

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

PORTRÄT
**ANGELA
FRIEDERICI**

Wie der
Mensch zur
Sprache kommt

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC
AMERICAN

EXTREME EREIGNISSE
Wie sich Katastrophen
vorhersagen lassen

RAUMFAHRT
Mit elektrischen Raketen
zu den Planeten

VERHALTEN
Was Menschen von Meer-
schweinchen lernen können

Mit Pillen zum Turbo-Gehirn?

Die Denkfähigkeit
künstlich zu steigern,
ist keine Utopie mehr

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

01/10

JANUAR 2010

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



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Kommt das Jahrzehnt des frisierten Gehirns?

Gegen Ende meines Studiums hatte ich Kontakt zu einem Medizinstudenten, der sich folgendermaßen auf seine Prüfungen vorbereitete: Morgens schluckte er Aufputzmittel, spät nachts ging er mit Valium zu Bett. Das ging wochenlang so. Über den Ausgang war ich wenig überrascht: Prompt fiel mein Freund durch sein Staatsexamen. Im zweiten Anlauf machte er es dann auf die »normale« Art, verzichtete ganz auf Pillen – und bestand.

Im letzten Jahr berichtete das Fachblatt »Nature« vom Ergebnis einer kleinen Umfrage, wonach in den USA sowohl Studenten wie Dozenten reihenweise Psychopharmaka gegen Müdigkeit, Prüfungsangst oder Stressprobleme einnehmen. Seitdem bricht auch hier zu Lande die Diskussion um ein »verbessertes Gehirn« aus. Hirnforscher sprechen von »Neuro-Enhancement«, neudeutsch für die Steigerung von mentaler Leistungsfähigkeit, Selbstvertrauen und Motivation. Jüngst legte eine Forschergruppe zu diesem Thema ein »Memorandum« vor (publiziert in der Zeitschrift »Gehirn&Geist« 11/2009), in dem sie für einen kritischen, letztlich aber doch liberalen Umgang mit solchen Mitteln plädieren.

Zwei Dinge fallen dabei auf. Zum Ersten: Sieht man von Alltagsdrogen wie Kaffee oder Tee ab, die man freilich auch in diesen Kontext stellen muss, gibt es solche Superpillen noch kaum oder gar nicht, die Gedächtnis, Aufmerksamkeit und Konzentration nachhaltig steigern könnten. Zum Zweiten: Obwohl Neuro-Enhancer zumindest in Deutschland bisher nicht nennenswert geschluckt werden, erhebt sich bereits ein Chor warnender Stimmen, die putative negative Folgen für Individuum und Gesellschaft beschwören.

Es geht hier um »spekulative Ethik«, also um die Diskussion eines Problems, bevor es

überhaupt auftritt. Das ist zumindest ungewöhnlich, aber in diesem Fall wohl von Nutzen – kann es doch euphorischen Heilserwartungen wie Dämonisierungen von vornherein den Boden entziehen und die Diskussion in einem rationalen Rahmen einfangen. Um die aufkeimende Debatte vom Kopf auf die Füße zu stellen, berichten wir ab S. 46 darüber, was heute an Mitteln und Wirkstoffen zum Neuro-Enhancement tatsächlich bekannt ist. Auch habe ich die Medizinethikerin Bettina Schöne-Seifert, Mitglied der »Memorandum«-Gruppe, befragt, wie sie es mit der Kritik hält, mit der sie nach der Publikation des Thesenpapiers überzogen wurde (S. 52).

Was mich an den Naturwissenschaften stets am meisten fasziniert hat, ist ihre Kraft zur Vorhersage – ihre prädiktive Macht. Die fällt natürlich je nach Forschungsgebiet unterschiedlich aus. Der Wetterbericht will das Wetter in sieben Tagen korrekt vorhersagen. Meteorologen antizipieren das Erdklima in 100 Jahren. Den Lauf der Planeten können Astronomen auf Millionen, das Schicksal der Sonne gar auf Milliarden Jahre bestimmen. Doch das Fallen eines Herbstblattes vom Baum, ein Vorgang von wenigen Sekunden, lässt sich nicht exakt simulieren.

Was aber leisten die Naturwissenschaften bei irdischen Ereignissen, wo wir als Menschheit ein existenzielles Interesse an zuverlässiger Prognostik haben, nämlich bei Katastrophen? Ob Erdbeben, Tsunamis, Hurrikane, Brückeneinstürze oder Börsencrashes? Der preisgekrönte Wissenschaftsautor Frank Grotelüschen hat die Entwicklungen auf diesem spannenden Gebiet für uns zusammengestellt (S. 74).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



Jetzt im Handel: unser Sonderheft über die wichtigste Nebenbeschäftigung



Schwierige Vorhersage extremer Ereignisse: Wann kommt der nächste Tornado?

Ihr Wunschartikel

In der 13. Runde unserer Wunschartikel-Angebote hatten Sie sich mehrheitlich für folgendes Thema entschieden: Elektrische Raketen (ab S. 32).



24

ASTRONOMIE & PHYSIK
Atmosphärenwandel durch Gasverlust



32
ASTRONOMIE & PHYSIK
Elektrisch ins All

MEDIZIN & BIOLOGIE
Sozialverhalten der Meerschweinchen

56



AKTUELL

10 Spektrogramm

Gentlemen bevorzugt · Ohne Sonne kein Regen · Alltagsleben der Maya · Vegetarische Spinne · Doppelte Sicherung gegen Krebs u. a.

13 Bild des Monats

Fossile Skorpionsfliege

14 Qualitätskontrolle bei Antikörpern

Wie der Körper Produktionsfehler bei seiner brisanten Abwehrwaffe verhindert

16 Meilenstein für grüne Leuchtdioden

Trickreiche Züchtung von Halbleiterkristallen für grüne Displays

20 Molekül steuert Lichtstrahl

Ultimativer Transistor für optische Schaltkreise im Nanobereich

22 Springers Einwürfe

Ist Sex im Alleingang besser?

ASTRONOMIE & PHYSIK

24 Wenn die Atmosphäre entweicht

Lufthüllen um manche Planeten sind fragile Gebilde; denn die Gase gehen auf vielerlei Wegen in den Weltraum verloren – ein Aderlass mit gravierenden Folgen

32 ► Elektrische Raketen

Für Raumfahrtmissionen in das äußere Sonnensystem setzen Ingenieure auf elektrische Ionen- oder Plasmamotoren, weil nur diese der Aufgabe gewachsen sind

SCHLICHTING!

40 Phantom im Eis

Wie Gasbläschen ein Fahrrad am Grund eines Sees auf dessen zugefrorene Oberfläche projizieren

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

42 Doppelbilder sehen – ganz nüchtern

Stereobildpaare liefern nicht nur räumliche Eindrücke – sie helfen auch, Fälschungen zu erkennen

MEDIZIN & BIOLOGIE

TITEL

46 ► Turbo für das Gehirn

Werden wir künftig einfach Pillen einwerfen, um Konzentration, Gedächtnis und Motivation zu steigern?

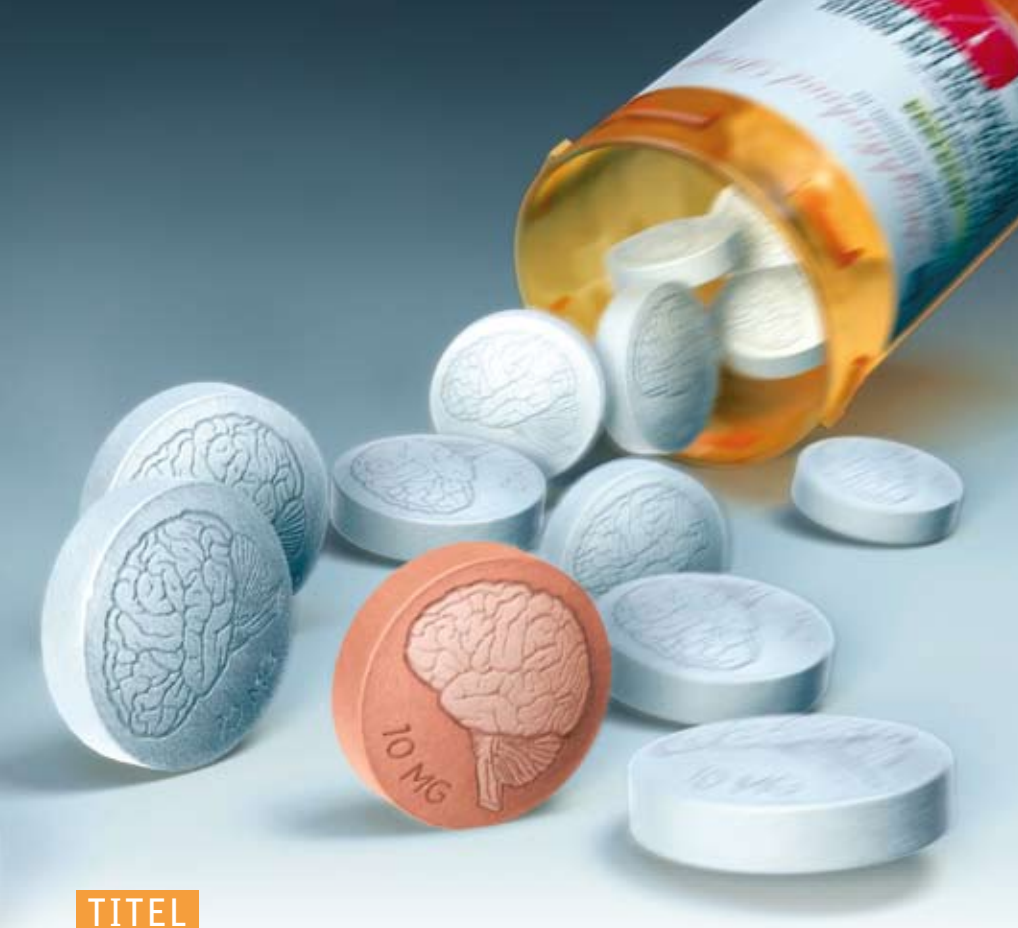
INTERVIEW

52 Zu viel Schwarzmalerei

Die Medizin-Ethikerin Bettina Schöne-Seifert über die Moral beim Hirndoping

56 ► Meerschweinchen als Sozialstrategen

Von ihren wilden Verwandten haben Hausmeerschweinchen ein flexibles Sozialverhalten geerbt. Trotzdem müssen sie in der Jugend erlernen, worauf es im täglichen Miteinander ankommt



TITEL

Brauchen wir Doping fürs Gehirn? 46

MENSCH & GEIST

PORTRÄT

66 ▶ Wie der Mensch zur Sprache kommt

Die Neurologin Angela Friederici erforscht die spezifisch menschliche Fähigkeit, Sprache zu verwenden. Ihre Arbeiten überbrücken die traditionelle Kluft zwischen Geistes- und Naturwissenschaft

Titelmotiv: Splashlight

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

ERDE & UMWELT

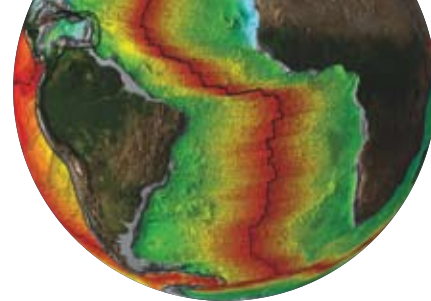
74 ▶ Extrem gewagt 🔊

Viele natürliche Katastrophen treten häufiger auf, als nach klassischer Statistik zu erwarten wäre. Neue Forschungsansätze suchen jetzt nach besserer Prognostik

82 Feuer unter dem Wasser

Forscher konnten jetzt im Detail klären, wie die erstarrte Lava, die den Untergrund der Ozeane bildet, an mittelozeanischen Rücken aus dem Erdinnern an den Meeresboden gelangt

ab Seite 104
naturejobs



ERDE & UMWELT
Vulkanismus am Meeresgrund 82



TECHNIK & COMPUTER
Neue Onlinegefahr Phishing 90

TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

88 Fleißige Mikroben
Dank emsiger Bakterien und Schimmelpilze wird aus Milch leckerer Käse

90 Computer an der Angel 🔊
Mit fingierten E-Mails erbeuten Kriminelle alljährlich Milliarden Euro, Tendenz steigend. Dabei nutzen sie nicht nur modernste Technik, sondern auch menschliche Schwächen

WISSENSCHAFT & KARRIERE

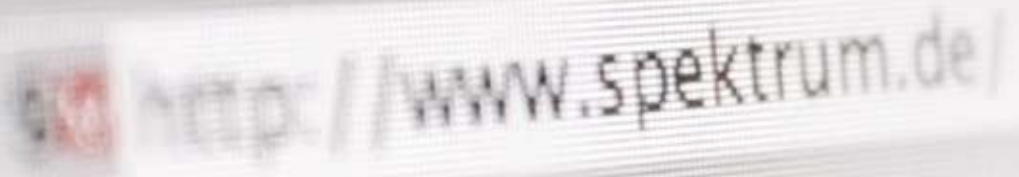
102 »Biostatistik ist mehr als ein Spiel mit Zahlen«
Als Einmannunternehmen bringt der Mathematiker Burkhard Haastert Ordnung in medizinische Daten

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Kommt das Jahrzehnt des frisierten Gehirns?
- 6 Onlineangebote
- 8 Leserbriefe/Impressum
- 55 Im Rückblick
- 106 Vorschau

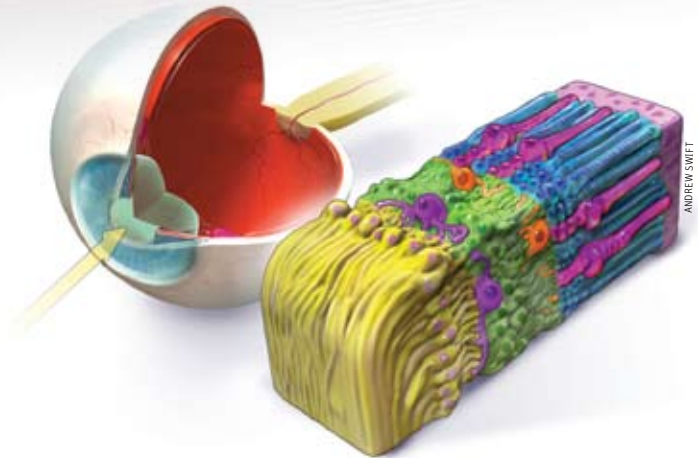
- 98 Rezensionen: Joachim Radkau *Technik in Deutschland – Vom 18. Jahrhundert bis heute*
Henry Ernest Dudeney *Die Canterbury Rätsel – Klassische Denk- und Knobelspiele*
Daniel Dennett *Den Bann brechen – Religion als natürliches Phänomen*
Keith Devlin *Pascal, Fermat und die Berechnung des Glücks – Eine Reise in die Geschichte der Mathematik*

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!



ISTOCKPHOTO / MICHAEL KEMTER

SPEKTRUMDIREKT Erstaunliche Sprache
www.spektrumdirekt.de/sprache



ANDREW SWIFT

INTERAKTIV Ihr Wunschartikel im Heft – stimmen Sie mit ab
www.spektrum.de/artikel/1015414

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Erstaunliche Sprache

Die Erforschung von Sprache und Kommunikation fördert Verblüffendes zu Tage. Babys brüllen in ihrer Muttersprache, Mäuse lehren uns viel über die Evolution menschlicher Sprachfähigkeit, und selbst die leidigen Mechanismen, auf Grund derer wir ausgerechnet das ausplaudern, was wir geheim halten wollten, verstehen Wissenschaftler immer besser

www.spektrumdirekt.de/sprache

Reisen zu Sonne, Mond und Planeten

Seit der kleine Satellit Sputnik das Weltall eroberte, hat sich an der Raumfahrtfront viel getan. **spektrumdirekt** berichtet über die wichtigsten Missionen, ob sie nun zum Mond führen oder zu den Trabanten der Gasplaneten, zu Kometen und Asteroiden oder sogar bis ins äußerste Sonnensystem

www.spektrumdirekt.de/raumfahrt

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Ergriffen vom göttlichen Schauspiel

Im Jahr 1609, vor 400 Jahren, veröffentlichte Johannes Kepler in Prag seine »Astronomia nova«. Heinz Klaus Strick berichtet in seinem »Mathematischen Monatskalender« über den großen Forscher

www.spektrum.de/artikel/1014933

Saubere Energie für den Schreibtisch

Basteln, Spielen, Zukunftstechnologie – Richard Mischak stellt einen Baukasten rund um die Brennstoffzelle vor, der Tüftlerherzen höher schlagen lässt

www.spektrumdirekt.de/artikel/1015368

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Ihr Wunschartikel im Heft – stimmen Sie mit ab

Das erste Porträt eines Schwarzen Lochs? Die verschlungenen evolutionären Wege, durch die es zum für Menschen typischen Farbenspektrum kam? Oder doch lieber Komplexitätstheorie – und wie man aus schwierigen Algorithmen einfache macht? Wählen Sie eines von fünf Themen aus, über das Sie in »Spektrum« demnächst gerne mehr lesen würden. Und wie immer verlosen wir unter allen Teilnehmern ein Wochenende in Heidelberg

www.spektrum.de/artikel/1015414

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



FREIGESCHALTET

»Kepler und der Stern von Betlehem«

www.astronomie-heute.de/artikel/1015935

Spektrum in den sozialen Netzwerken



www.spektrum.de/studivz

facebook

www.spektrum.de/facebook

twitter

www.spektrum.de/twitter

FÜR ABONNENTEN »Schlaflos im Bett«

www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Schlaflos im Bett«

Vielen Menschen gelingt es nicht mehr, richtig ein- und durchzuschlafen. Ihre Leistungsfähigkeit ist dadurch spürbar beeinträchtigt. Therapeutische Maßnahmen, vor allem auch im Verhaltensbereich, können erneut zu einem erholsamen Schlummer verhelfen

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

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

»Kepler und der Stern von Betlehem«

Auch Johannes Kepler spekulierte, ob der biblische Stern der Weisen auf ein reales Himmelsereignis zurückzuführen ist. Ein »neuer Stern«, eine Supernova, lieferte ihm entscheidende Hinweise

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

www.astronomie-heute.de/artikel/1015935

»Die Marionettenspieler«

Manche Parasiten machen selbst vor dem Denkgorgan nicht Halt. Sie befallen das Gehirn verschiedener Wirtstiere und manipulieren deren Verhalten. Auch der Mensch ist vor solchen Attacken nicht gefeit

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

www.gehirn-und-geist.de/artikel/1015357

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Klima zwischen Wissenschaft und Politik

Der Klimagipfel in Kopenhagen vom 7. bis 18. Dezember beschäftigte natürlich auch die Wissenslogs. In einem Sonderblog in Kooperation mit Siemens machten sich unsere Autoren Gedanken über die Wissenschaft und die Politik des Klimawandels. Der Historiker Theodor Kissel zum Beispiel beschrieb, wie schon Griechen und Römer Raubbau an der Natur betrieben, und Björn Lohmann vermutete, dass der Klimawandel bereits in unserem Wirtschaftssystem angelegt sei. Ebenfalls dabei: die neue Bloggerin Susanne Plotz, die als Ärztin die möglichen gesundheitlichen Folgen des Klimawandels erläutert. Diskutieren Sie mit

www.wissenslogs.de

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

Sprachlich unsensibel

Lebensborn statt Todesbote
Forschung aktuell, November 2009

Fast wäre mir das Heft aus der Hand gefallen, als ich die Überschrift »Lebensborn statt Todesbote« las. Der Lebensborn e. V. war im Nationalsozialismus ein Verein unter der Ägide von Reichsführer SS Heinrich Himmler mit dem Ziel, den »arischen« Nachwuchs zu fördern. Der Lebensborn e. V. unterhielt zahlreiche Mutter-Kind-Heime, in denen – im Sinn der NS-Rassenideologie – rassisch einwandfreie Frauen ihr uneheliches Kind zur Welt bringen konnten. Die Väter waren in der Regel ebenfalls »arisch« reine SS-Angehörige. Außerdem wurden während des Zweiten Weltkriegs blonde und blauäugige Kinder auf Befehl Himmlers aus den besetzten Gebieten in die Lebensborn-Heime verschleppt und zur Adoption in deutsche Familien vermittelt.

Ich habe mich noch bemüht, eine weitere Bedeutung des Wortes Lebensborn zu finden, bin aber in allen Nachschlagewerken immer nur auf die NS-Einrichtung gestoßen. Ich unterstelle demjenigen, der die Überschrift getextet hat, nicht, absichtlich Nazijargon verwendet zu haben. Trotzdem vermisse ich sprachliche Sensibilität. Da »Born« ein altes deutsches Wort für »Quelle« ist, liegt die unverfängliche und sogar noch verständlichere sprachliche Alternative doch so nahe: »Lebensquell statt Todesbote«.

Werner Kirsch, Köln

Nie gesehenes Naturphänomen

Als SdW-Leser seit über 30 Jahren bin ich einiges an Naturereignissen gewohnt – aber nicht einen so großen Eiskristall von einer Größe von rund 80 Millimetern, den ich neulich auf meinem Balkon in einem herumstehenden Wasserglas fand. Bekannt sind mir Eiskristallgrößen zwischen 0,1 und 3 Millimetern. Da auch wissenschaftlich beschlagene Leute in meinem Bekanntenkreis dieses Phänomen nicht erklären können: Wäre es möglich, Herrn Prof. Schlichting, den Autor der gleichnamigen Rubrik zu physikalischen Phänomenen im Alltag, um eine Antwort zu bitten? Handelt es sich um einen Monokristall? Kommt so etwas oft vor beziehungsweise ist das leicht in einer solchen Größe reproduzierbar? Sind die blattähnlich ausgerichteten Adern oder Bläschen Lufteinschlüsse (in der dunk-

len Scheibe)? Oder ist das alles kein Thema, sind beobachtete Größe und Form hinreichend bekannt, und kann ein solches Objekt auch schon mal einen Meter im Durchmesser haben?

Dipl.-Ing. Lutz-Michael Weiß, Berlin

Antwort von Prof. Schlichting:

Vermutlich ist der Kristall von der Mitte her zum Rand gewachsen. Denn es wäre unwahrscheinlich, dass gerade sechs Eisbäumchen vom Rand her symmetrisch zur Mitte wachsen und sich dort treffen. Auf Grund der Struktur des Wassermoleküls bildet sich beim Gefrieren an einem Keim eine winzige hexagonale Platte, die dann von diesem Startpunkt ausgehend weiterwächst.

Da beim Gefrieren Kristallisationswärme entsteht, wird das Wachstum besonders in der Nähe des bereits er-

Antwort der Redaktion:

Der Ausdruck Lebensborn war bereits vor dem Nationalsozialismus durchaus gebräuchlich und findet sich etwa bei Friedrich Hebbel oder Theodor Storm. Außerdem passte er von Rhythmus und Alliteration her einfach ideal zum Todesboten. Trotzdem hätten wir ihn vermieden, wenn uns die missbräuchliche Verwendung durch die NS-Rassenideologen in diesem Moment bewusst gewesen wäre.

Unbedarf

Plan für eine emissionsfreie Welt bis 2030, Dezember 2009

Der Artikel gehört wohl zum Unbedarftesten, was ich je zum Thema Energie gelesen habe. Er beschränkt sich im Wesentlichen darauf, darzutun, dass genügend Rohmaterialien vorhanden sind, um mit Wind-, Wasser- und Solaranlagen den gesamten Energiebedarf der Erde

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteur: 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: Britta Feuerstein, 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 Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Gestaltung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Marcus Kessler, Dr. Susanne Lipps-Breda.
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 Döls; 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, Brandstwiete 1 / 6, 06, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 31 vom 01.01.2010.
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 eingesandene Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

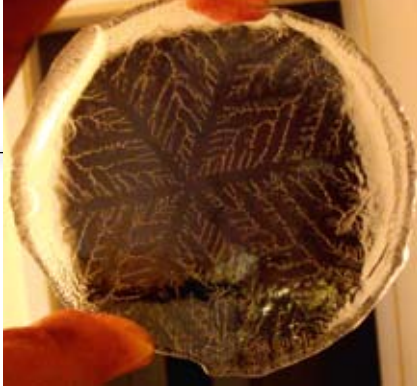
ISSN 0170-2971

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



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





Diesen ungewöhnlichen Eiskristall hat Leser Weiß einmal vor dunklem Hintergrund und einmal gegen das Licht fotografiert.

starrten und gerade erstarrenden Wassers gebremst. Dies gilt weniger für die sechs Ecken.

Wenn keine Störungen vorliegen, entwickeln sich Eisnadeln von der bestehenden Eisstruktur weg in Richtung Gefäßrand. An den Seiten dieser Nadeln entstehen (im vorliegenden Fall offenbar weniger durch die hexagonale Grundstruktur bedingt als vielmehr durch Zufall) einzelne Ausstülpungen von Eis, von denen die größten und damit von der Nadel am weitesten entfernten (wieder wegen der anfallenden Kristallisationswärme) bevorzugt sind und als Eiszweige sowohl vom Zentrum als auch von der Eisnadel weg schräg nach außen

treiben. Nach dem gleichen Prinzip verzweigen sich diese Zweige und so weiter. Insgesamt entstehen daher zwischen den sechs Eisnadeln baumartige Gebilde.

Bei den Verzweigungen hat sich (etwa durch Verunreinigungen bedingt) eine exakt hexagonale Struktur gegen die stets vorhandenen zufälligen Tendenzen nicht durchsetzen können. Es sind Fraktale entstanden, wie man sie von vielen Wachstumsprozessen kennt (von elektrolytischer Anlagerung über Einzugsbereiche von Flüssen bis zu Bäumen). Sie sind in ihren Teilen nicht gleich, sondern selbstähnlich, und daher haben wir es hier nicht mit einem Monokristall zu tun. Denn dieser be-

steht per definitionem aus einem fehlerfreien Kristallgitter. Das schränkt aber die Schönheit und wohl auch Seltenheit dieses Exemplars in keiner Weise ein. Denn hier werden Zufall (ähnliche, aber nicht identische Zweige) und Notwendigkeit (die hexagonale Grundstruktur) in ästhetisch ansprechender Weise miteinander verknüpft. Die blattartigen Strukturen sind demnach nicht auf Lufteinschlüsse zurückzuführen.

Ich selbst habe zwar Eisnadeln von bis zu einem Meter Länge auf einem Teich beobachten können, auch mehrere von einem Zentrum ausgehende, aber bislang keine, die eine so strenge hexagonale Grundstruktur aufwiesen.

zu decken. Daran hat wohl bisher niemand gezweifelt. Noch unbedarfter wäre zu »beweisen«, dass die Solarkonstante von 1367 W/m^2 multipliziert mit der Oberfläche der Erde genügen würde, den Energiebedarf unseres Planeten allein mit Solarenergie sogar mehrfach zu decken.

R. v. Schumacher, Rieden, Schweiz

Antwort der Redaktion:

Sicher klammert der Artikel viele – vor allem politische – Probleme aus. Aber er geht doch weit über den bloßen Nachweis hinaus, dass die Voraussetzungen für die Energieversorgung der Welt allein mit Wind-, Solar- und Wasserkraft im Prinzip erfüllt sind. So entwirft er einen Plan für einen sinnvollen nachhaltigen Energiemix und zeigt, dass ein Umstieg wirtschaftlich machbar ist und regenerative Energien nicht oder nicht wesentlich teurer sein werden als herkömmliche.

Etwas zu unscharf

Bye-bye, Brille!, Wissenschaft im Alltag, Oktober 2009

In den Artikel haben sich einige Fehler eingeschlichen. So wird die Linse des Au-

ges nicht durch Muskelaktion auseinandergezogen, um Gegenstände zu fokussieren, sondern vielmehr durch die Kontraktion des ringförmigen Ziliarmuskels entlastet, wodurch sich ihr Krümmungsradius und damit die Brechkraft erhöhen. Die Funktion der Pupille bei der Adaptation an unterschiedliche Lichtverhältnisse wird gern überschätzt, die Hauptverantwortung trägt tatsächlich die Netzhaut. Die Bedeutung der Lider in diesem Zusammenhang ist vernachlässigbar, sie dienen vor allem, zusammen mit dem Tränenfilm, dem Schutz des Auges. Anders als im Artikel dargestellt wird die Hornhaut in der Augenheilkunde nicht als Schutzorgan, sondern als schützenswerter Organteil eingestuft.

Unsauber ist etwa die Bezeichnung der Zonulafasern als Bänder – Bänder sind Bündel dicker Fasern – und ebenso die Gleichstellung von Weitsichtigkeit mit einem schlechten Sehen in der Nähe. Eine manifeste Hyperopie führt auch beim Fernblick zu einer unscharfen Abbildung, wenn sie nicht akkommodativ ausgeglichen wird, andererseits kann eine durch Akkommodation ausgeglichene Weitsichtigkeit zu einer scharfen Abbildung in der Nähe führen. Beim Astigmatismus bestehen nicht »mehrere

Brennpunkte in unterschiedlichen Ebenen«. Vielmehr liegt überhaupt kein Brennpunkt vor, sondern ein Bildpunkt wird intraokular in Form eines Konoids abgebildet. Zur Beschreibung von PRK und Lasek wäre anzumerken, dass die Behandlung in beiden Fällen erst erfolgt, nachdem das Epithel mechanisch abgetragen wurde. Bei der Photorefraktiven Keratektomie regeneriert sie später vom Hornhautrand aus, bei der *Laser Epithelial Keratomileusis* wird der Bereich als zusammenhängende Schicht aufgenommen und nach dem Eingriff wieder aufgelegt.

Prof. Dr. Heinrich Gerding, Olten, Schweiz

Briefe an die Redaktion ...

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

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

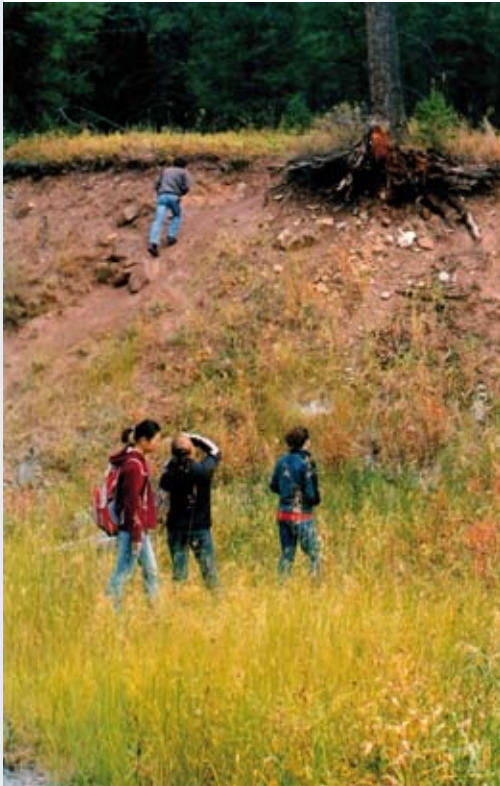
Spektrum der Wissenschaft

Redaktion Leserbriefe

Postfach 104840

69038 Heidelberg

E-Mail: leserbriefe@spektrum.com



SETH STEIN, NORTHWESTERN UNIVERSITY

ERDBEBEN

Entspannung erst nach 200 Jahren

■ Manche wie aus heiterem Himmel auftretende Erdstöße sind Nachbeben von schweren seismischen Erschütterungen, die bis zu mehrere hundert Jahre vorher stattfanden. Das haben Seth Stein von der Northwestern University in Evanston (Illinois) und Mian Liu von der University of Missouri in Columbia nun herausgefunden.

Bei Erdbeben werden ruckartig Verspannungen in der Erdkruste gelöst. Diese entstehen, weil sich die tektonischen Platten – riesige Blöcke, aus denen die feste Erdschale besteht – gegeneinander verschieben und sich dabei immer wieder ineinander verhaken. Beim gewaltsamen Aufbrechen der verkeilten Stellen werden

die Spannungen allerdings meist nicht auf einmal ganz gelöst. So kommt es danach noch zu weiteren Erschütterungen.

Wo zwei Platten aneinanderstoßen, ist die Relativbewegung zwischen ihnen ziemlich groß. Das fördert die Entladung verbliebener seismischer Energie in Form von Nachbeben. Je weiter entfernt von einer Plattengrenze jedoch die Erdkruste gebrochen ist, desto langsamer baut sich dort neue Spannung auf. Dadurch ziehen sich Nachbeben über einen größeren Zeitraum hin. Belege dafür fanden die beiden Forscher auf der ganzen Welt. So kommt es am Hebgen-Lake im Yellowstone-Nationalpark bis heute zu Erschütterungen als Spätfolgen eines Erdbebens vor 50 Jahren. Mitten auf der Nordamerikanischen Platte, an der New-Madrid-Zone in Missouri, gibt es sogar noch Nachbeben von schweren Erdstößen im Winter 1811/12.

Diese Geländestufe entstand bei einem Erdbeben im Yellowstone-Nationalpark vor 50 Jahren. Noch heute gibt es dort Nachbeben.

Nature, Bd. 462, S. 87

KLIMAFORSCHUNG

Ohne Sonne kein Regen

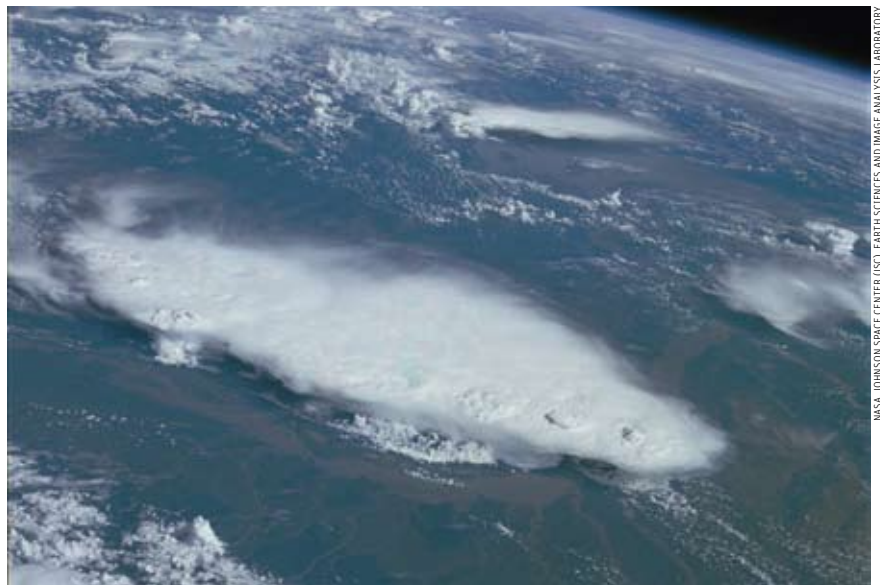
■ Der Monsun hat großen Einfluss auf Klima und Vegetation in Südasien und damit auf das Wohlergehen der dortigen Bevölkerung. Umgekehrt kann der Mensch aber auch den Monsun beeinflussen. Das zeigt ein Modell, das Anders Levermann vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und seine Kollegen entworfen haben.

Es gibt zwei konträre stabile Zustände des Monsuns: einen niederschlagsreichen und einen trockenen. Zwischen ihnen findet oft ein abrupter Wechsel statt. Dessen Ursache wollten die Potsdamer Forscher ergründen. Sie entwickelten dazu ein numerisches Modell für die Luftzirkulation, welche die treibende Kraft hinter dem Monsun ist. Den Berechnungen zufolge hängen die abrupten Übergänge mit einem Schwellenwert der Sonneneinstrahlung zusammen. Nur wenn er überschritten wird, bildet sich im Frühjahr eine so große Temperaturdifferenz zwischen Land und Meer, dass die Zirkulation in der Atmosphäre in

Gang kommt. Über Land steigt dann erhitzte Luft nach oben und zieht feuchte, kühle Meeresluft nach. Wenn daraus Regentropfen kondensieren, wird Wärme freigesetzt, was zu einem weiteren Aufstieg führt, wodurch mehr feuchte Luft nachströmt. So werden die Temperaturdifferenz und die Zirkulation aufrechterhalten.

Starke Luftverschmutzung kann die Sonneneinstrahlung verringern, so dass der Schwellenwert erst gar nicht erreicht oder während der Monsunsaison unterschritten wird. Dann bleibt der Niederschlag ganz aus, oder die Regenphase endet durch Abbruch der Zirkulation unerwartet früh.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung



NASA, JOHNSON SPACE CENTER (JSC), EARTH SCIENCES AND IMAGE ANALYSIS LABORATORY

Monsunwolken, hier über Bangladesch, versorgen große Weltregionen regelmäßig mit Niederschlägen.

Gentlemen bevorzugt

■ Gemeinhin gilt der erotische Draufgänger als besonders erfolgreich. Doch das stimmt, wie Biologen um Omar Tonsi Eldakar von der University of Arizona in Tucson nun herausfanden, nicht einmal bei den psychisch doch eher einfach gestrickten Wasserläufern. Wird ein Weibchen im Labor mit einer gemischten Gruppe aus sexuell bedrängenden und eher schüchternen Männchen zusammengesperrt, haben letztere zwar keine Chance. In freier Natur aber flüchtet sich das Opfer der Zudringlichkeit, wie sich jetzt zeigte, an einen Platz, wo ihm keine liebestollen Bewerber zusetzen, und paart sich dort mit eher zurückhaltenden Männchen.

Die Forscher teilten männliche Wasserläufer (*Aquarius remigis*) nach aggressivem Verhalten gegenüber dem anderen Geschlecht in fünf Kategorien ein und markierten sie mit einer Kombination verschiedenfarbiger Punkte. Danach wurden Fünfergruppen aus je einem Vertreter jeder Kategorie zusammen mit fünf Weibchen in isolierte Bereiche eines Beckens von 5,2 Quadratmeter Fläche gesperrt. Unter diesen Umständen stachen die aggressiven Männchen die weniger zupackenden Mitbewerber aus. Doch dann öffnete das Team die Durchgänge zwischen den Kammern, so dass sich die Insekten frei bewegen konnten. Die belästigten Damen ergriffen daraufhin die Flucht – hin zu sich neu bildenden Gruppen aus weniger fordernden Männchen. Diese kamen so zu mehr Paarungen als ihre aggressiven Kollegen.

»Die Draufgänger bekommen zwar ein größeres Stück vom Kuchen, aber für die Gesitteten ist der Kuchen größer«, fasst John Pepper aus dem Team das Ergebnis plastisch zusammen.

Science, Bd. 326, S. 816



OMAR TONSI ELDAKAR, UNIVERSITY OF ARIZONA

Der aggressive Wasserläufer rechts versucht die Paarung eines zurückhaltenderen Männchens mit einem Weibchen (mit grünem Punkt) zu stören.

MAYA-KULTUR

Kaleidoskop des Alltagslebens

■ Über den Alltag der Maya ist bislang wenig bekannt. Die Wandbilder in den berühmten Pyramiden zeigen fast nur prunkvolle Szenen aus dem Leben der Herrscher. Nun wurden im süd-mexikanischen Calakmul, der größten bisher bekannten Maya-Stadt, Malereien entdeckt, die auch die Welt der einfachen Leute beleuchten.

Nördlich des Stadtkerns gruben Ramón Carrasco Vargas vom Instituto Nacional de Antropología e Historia und sein Archäologenteam einen Tunnel in eine große dreistufige Pyramide, in der – typisch für die Maya-Architektur – Bauten aus unterschiedlichen Epochen ineinandergeschachtelt sind. Dabei stießen die Forscher auf den Teil, der im 7. nachchristlichen Jahrhundert errichtet wurde. Dort entdeckten

sie bestens erhaltene Wandbilder, die ganz normale Menschen bei ihren täglichen Verrichtungen zeigen: bei der Beförderung von Waren, bei der Zubereitung von Mahlzeiten oder beim Essen und Trinken. Männer, Frauen und Kinder tragen die unterschiedlichsten Arten von Kleidung.

Mal ist ein einfacher Lastenträger nur mit Lendenschurz abgebildet, mal speisen Frauen gemeinsam in bunten Gewändern und mit abwechslungsreichen Kopfbedeckungen. Viele der Frauenfiguren sind geschminkt. Schmuck trugen den Malereien zufolge im Maya-Reich beide Geschlechter. Jede Szene ist mit Hieroglyphen versehen, die das Bildmotiv erklären, was den Forschern zusätzliche Hinweise gibt.

PNAS, Bd. 106, S. 19245

RAMÓN CARRASCO VARGAS ET AL. / PNAS



Südwestecke der neu entdeckten Maya-Pyramide mit bunten Alltagsszenen

NACKTMULLE

Doppelte Sicherung gegen Krebs

■ Der Nacktmull ist der Methusalem unter den Nagern: Er wird bis zu 28 Jahre alt. Das liegt unter anderem daran, dass die Tiere nicht an Krebs erkranken. Noch nie hat ein Forscher einen Nacktmull mit Tumor zu Gesicht bekommen. Über welche Geheimwaffe gegen Geschwülste die Nager verfügen, war bisher unbekannt. Nun haben Andrei Seluanov von der University of Rochester (New York) und seine Kollegen das Geheimnis gelüftet.

Bei Säugetieren existiert eine Kontakthemmung für Zellen. Sobald sich zwei zu nahe kommen, sorgt ein erhöhter Wert des Proteins p27 dafür, dass sie ihr Wachstum einstellen. Bei Krebszellen funktioniert das nicht; sie vermehren sich ungebremst weiter und verklumpen: Ein Tumor entsteht.

Da dies bei Nacktmullen noch nie beobachtet wurde, untersuchten die Forscher deren Abwehrmechanismus an Bindegewebszellen, die sie in Kulturschalen züchteten. Wie sie dabei feststellten, existiert



UNIVERSITY OF ROCHESTER, NEW YORK

Nacktmulle bilden wie soziale Insekten Kolonien. Obwohl sie kaum größer und schwerer sind als Mäuse, leben sie fast zehnmal so lange. Ein Grund dafür ist ihre Krebsresistenz.

hier eine noch strengere Kontaktsperre. Vermittelt wird sie nicht durch p27, sondern durch eine erhöhte Konzentration des Proteins p16. Dieses stoppt das Wachstum schon bei einer sehr viel geringeren Zelldichte. Diese frühe Kontakthemmung funktioniert allerdings nur, wenn zwei weitere Eiweißstoffe, p53 und das RB-Protein, vorhanden sind.

Als die Forscher Krebsgene in die Nacktmullzellen einschleusten und gleichzeitig das Gen für p53 oder das RB-Protein ausschalteten, rückten die Zellen dichter zusammen – doch nur ein Stück; dann stieg die Konzentration an p27 und wirkte in zweiter Instanz als Notbremse.

PNAS, Bd. 106, S. 19352

FRÖSCHE

Tod durch Elektrolytmangel

■ Seit vielen Jahrzehnten rafft eine Epidemie Amphibien reihenweise dahin. Bei der Suche nach der Ursache fiel der Verdacht zunächst auf Schadstoffe in der Umwelt. Doch inzwischen steht fest: Der Töpfchenpilz *Batrachochytrium dendrobatidis* ist der Hauptschuldige. Wie er den Tod verursacht, blieb bislang allerdings ein Rätsel. Nun haben Jamie Voyles von der James Cook University im australischen Townsville und ihre Kollegen die Lösung gefunden.

Die Haut von Amphibien dient der Atmung, der Regulation des Wasserhaushalts und dem Elektrolytaustausch. Eine dieser Funktionen, so Voyles' Verdacht, sollte der Pilz beeinträchtigen. Um herauszufinden, welche, infizierten die Forscher Korallenfinger-Laubfrösche (*Litoria Caerulea*) mit dem Schädling und ermittelten die Auswirkungen durch Vergleich mit einer Kontrollgruppe.

Unter anderem maßen die Wissenschaftler die Konzentration verschiedener Metallionen im Froschplasma – einmal vor und dreimal nach der Pilzinfektion. Dabei fanden sie eine stetig abnehmende Menge im Blut. Bei der letzten Messung war die Natriumkonzentration um 20 Prozent reduziert, die von Kalium gar um die Hälfte. Wie Elektrokardiogramme zeigten, verlangsamte das Ungleichgewicht bei den Elektrolyten den Herzschlag, bis er schließlich aussetzte. Zum Test verabreichten die Forscher infizierten Fröschen Elektrolyt-Ergänzungsmittel. Die so behandelten Tiere lebten mehr als 20 Stunden länger.

Science, Bd. 326, S. 582

SCHMAROTZER

Vegetarische Spinne

■ Spinnen sind Räuber, die sich von anderen Gliedertieren ernähren. So steht es in den Lehrbüchern der Biologie. Doch nun haben Christopher Meehan von der Villanova University in Pennsylvania und Kollegen eine Art in Mittelamerika beschrieben, die fast rein vegetarisch lebt.

Die Springspinne *Bagheera kiplingi* unterwandert eine lange bekannte Symbiose zwischen Akaziensträuchern und Ameisen, welche die Pflanze vor Fraßschädlingen schützen. Belohnt werden die Leibwächter dafür mit Nektar und den so genannten beltschen Körperchen: protein- und fettreichen Noppen an den Akazienblättern. Daran tut sich auch die Spinne gütlich, allerdings ohne Gegenleistung. Exzellentes Sehvermögen, Schnelligkeit und Intelli-



ROBERT L. CURRY, VILLANOVA UNIVERSITY

Diese weibliche Spinne der Spezies *Bagheera kiplingi* lässt sich ein beltsches Körperchen schmecken, das sie von einem Akazienstrauch stibitzt hat.

genz helfen ihr, nicht von den Streife gehenden Ameisen erwischt zu werden. Auch ihre Nester schützt *B. kiplingi* vor den Bodyguards der Akazien, indem sie sie möglichst fernab der Patrouillenwege baut.

Ein Vorteil dieser Ernährungsweise ist, dass die Körperchen das ganze Jahr über zur Verfügung stehen. Außerdem schützen die Ameisen außer den Sträuchern ungewollt auch die Spinnen, indem sie deren Fressfeinde gleich mit fernhalten.

Current Biology, Bd. 19, S. R894

Mitarbeit: Julia Eder und Nicole Mai



JAMIE VOYLES (LIED), ALEX HAWTT (RECHRO) UND FRANK ETLEPPI

Dieser australische Corroboree-Frosch ist von dem tödlichen Töpfchenpilz *Batrachochytrium dendrobatidis* befallen.

Früher Bestäuber

Die gemeinsame Entwicklung von bedecktsamigen Blütenpflanzen und sie bestäubenden Insekten in der späten Kreidezeit – vor etwa 100 bis 65 Millionen Jahren – gilt als klassischer Fall einer Koevolution. Doch wie so oft stellt sich auch hier das berühmte Henne-Ei-Problem: Was war zuerst da, üppige Blüten oder ihre Bestäuber? Eine genaue Untersuchung von bis zu 160 Millionen Jahre alten Fossilien aus China hat in diesem Fall nun die Antwort geliefert. Die Versteinerungen zeigen ausgestorbene Skorpionsfliegen mit einem behaarten Rüssel von einem Zentimeter Länge. Dieser diente offenbar dazu, pollenreiche Flüssigkeiten aus den einfachen, unscheinbaren Blüten von Nacktsamern wie Nadelbäumen und Farnen zu saugen, die damals die einzigen Pflanzenarten waren. Bei dem Vorgang konnte es auch zur Bestäubung kommen. Auf der abgebildeten Versteinerung einer Skorpionsfliege der Art *Lichnomesopsyche glorioae* ist der lange, gerade Rüssel besonders schön zu erkennen.



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

Qualitätskontrolle bei Antikörpern

Bei der Synthese von Antikörpern in Immunzellen müssen mehrere Proteinkomponenten korrekt zusammengesetzt werden. Ein System zur Qualitätskontrolle hält unfertige oder falsch aufgebaute Exemplare zurück. Seine genaue Funktionsweise ließ sich jetzt aufklären.

Von Matthias Johannes Feige
und Johannes Buchner

Antikörper zählen zu den wichtigsten Waffen des Immunsystems. Ihr Einsatz gegen Krankheitserreger hat sich als äußerst erfolgreiche Strategie erwiesen. So kommen sie in sehr ähnlicher Form beim Hai wie beim Menschen vor – zwei Organismen, die durch fast 500 Millionen Jahre Evolution getrennt sind.

In unserem täglichen Kampf gegen sich schnell anpassende Krankheitserreger erkennen Antikörper die Eindringlinge und markieren sie, indem sie sich

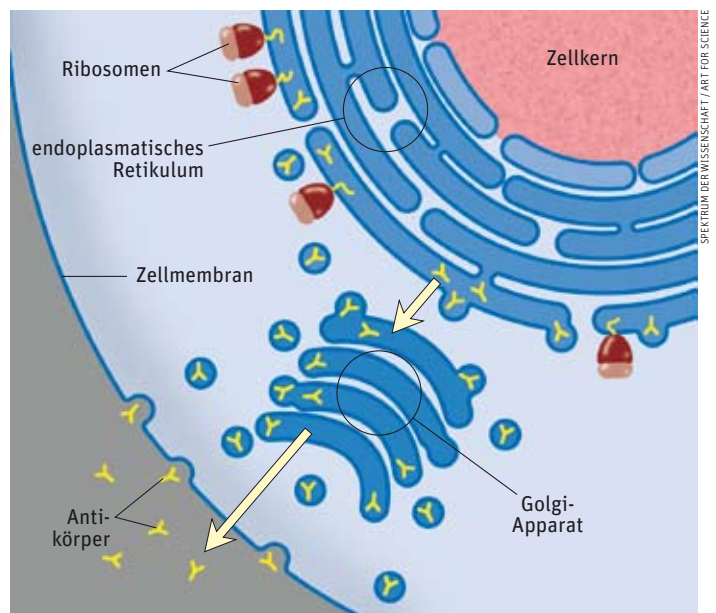
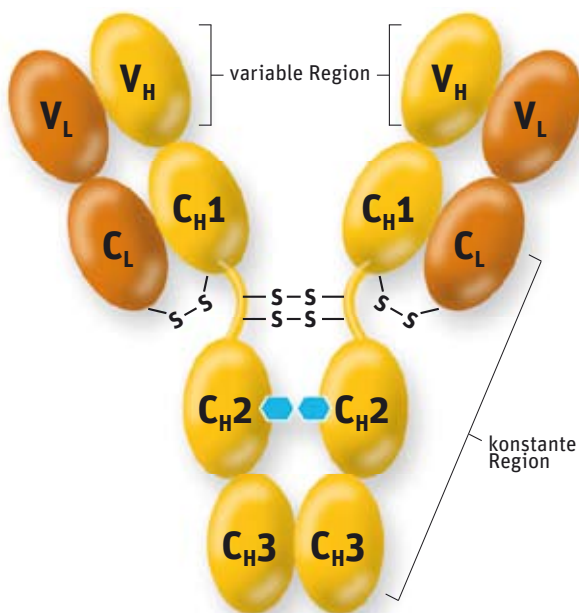
Antikörper der IgG-Klasse (links) bestehen aus zwei schweren (gelb) und zwei leichten Ketten (orange). Schwefelbrücken (S-S) halten sie zusammen, und angeheftete Zucker (blaue Sechsecke) sind wichtig für die biologische Funktion. Antikörper werden im endoplasmatischen Retikulum synthetisiert, von wo sie durch den Golgi-Apparat zur Zelloberfläche gelangen (rechts).

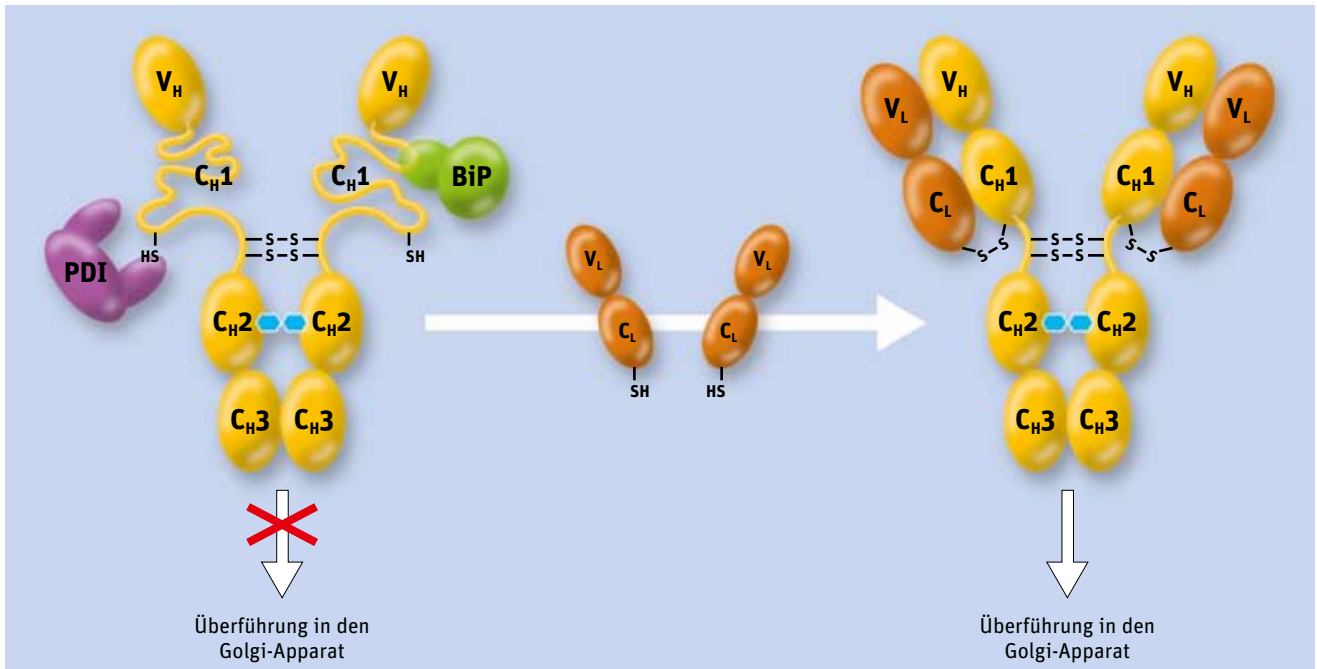
daran heften. Zugleich setzen sie weitere Abwehrmechanismen in Gang und rekrutieren zusätzliche Komponenten des Immunsystems. Dazu zählen Fresszellen, die ihrem Namen alle Ehre machen, sobald sie einem durch einen Antikörper markierten Fremdstoff im Körper begegnen, und natürliche Killerzellen – eine Klasse weißer Blutkörperchen, die Krankheitskeime direkt abtöten können.

Mit Millionen von Erregern muss der Organismus jeden Tag fertigwerden. Entsprechend groß sind die benötigten Mengen an Antikörpern. Sie werden in den ebenfalls zu den weißen Blutkörperchen gehörenden Plasmazellen produziert. Es handelt sich um spezialisierte Fabriken für Antikörper, die mehrere tausend davon pro Sekunde herstellen und in den Blutstrom abgeben. Die wesentlichen Produktionsschritte laufen im so genannten endoplasmatischen Retikulum ab (Bild unten). Dieses zellinterne membranumhüllte Kanalsystem ist auf die Herstellung von Proteinen spezialisiert, die zur Zelloberfläche gelangen sollen.

Antikörper bestehen aus vier Eiweißketten, zwei schweren und zwei leichten, die über Schwefelbrücken verknüpft sind. Diese vier Komponenten werden von Ribosomen an der Membran des endoplasmatischen Retikulums zunächst einzeln synthetisiert und in das Kanalsystem eingeschleust. Dort müssen sie dann zueinander finden und sich zum Komplex zusammenlagern. Im Verlauf dieses Zusammenbaus werden auch die Schwefelbrücken gebildet und zwei Zuckerstrukturen angeheftet. Nur wenn alle diese komplizierten Schritte erfolgreich abgeschlossen sind, erhalten die Antikörper die Freigabe für den Weg zur nächsten Station, dem Golgi-Apparat. Von ihm aus gelangen sie schließlich an die Zelloberfläche, wo sie freigesetzt werden.

Fehlerhafte Antikörper sind potenziell gefährlich, weil sie selbst und die von ihnen in Gang gesetzten zusätzlichen Abwehrmechanismen sich auch gegen körpereigene Strukturen richten können. Deshalb ist eine strenge Qualitätskontrolle unabdingbar. Sie muss Zuverlässig-





keit mit Effizienz verbinden – keine leichte Aufgabe für eine Zelle bei einem Ausstoß von tausenden Antikörpern pro Sekunde. Wie lässt sich erreichen, dass praktisch kein Mängel Exemplar übersehen wird? Dem sind wir nachgegangen und haben eine Erklärung gefunden: In das Antikörpermolekül selbst ist ein Mechanismus eingebaut, welcher der Zelle über den Status – korrekt zusammengebaut oder noch in Produktion – zuverlässig Auskunft gibt.

Kritisches Prüfmerkmal

Das Merkmal, das zur Qualitätskontrolle dient, befindet sich in einem bestimmten Bereich der schweren Kette. Es wird von weiteren Proteinen erkannt, die alle unfertigen oder falsch zusammengesetzten Antikörper zurückhalten und nur einwandfreien Exemplaren gestatten, das endoplasmatische Retikulum zu verlassen. Diese Proteine gehören zu den so genannten Chaperonen, was auf Deutsch Anstandsdamen oder Gouvernanten bedeutet. Der Begriff gibt ihre Funktion recht anschaulich wieder, verhindern sie doch, dass die »beaufsichtigten« Moleküle Unerlaubtes oder Gefährliches »unternehmen«, solange sie noch unreif sind.

Generell erkennen molekulare Chaperone Proteine, deren Eigenschaften noch nicht die Spezifikationen eines fertig strukturierten Proteins erfüllen. Meist geht es darum, sicherzustellen, dass die lineare Aminosäurekette, aus der Protei-

ne bestehen, auf eine bestimmte Weise zu einer räumlichen Struktur gefaltet ist.

Bei Antikörpern heißt eines der zuständigen Chaperone BiP (für Bindeprotein). Kritisch ist nun die Frage, welches Kennzeichen der unfertigen oder fehlerhaften Antikörperexemplare genau diese molekulare Gouvernante zum Einschreiten veranlasst. Durch unsere Arbeiten konnten wir das kritische Prüfmerkmal in der schweren Kette des Antikörpers aufspüren. Genauer gesagt, befindet es sich in einer Domäne – also einer strukturellen Untereinheit – mit der Bezeichnung C_{H1} . Dieser Abschnitt weist eine unerwartete Besonderheit auf: Solange die schwere Kette isoliert vorliegt, ist er unstrukturiert und bildet ein ungeordnetes Knäuel. Alle anderen Domänen der schweren und der leichten Ketten weisen bei Antikörpern der Klasse IgG, welche die häufigsten im Blut sind, dagegen schon vor der Zusammenlagerung zum fertigen Molekül ihre endgültige Faltungsstruktur auf.

An der C_{H1} -Domäne können also BiP und andere Chaperone erkennen, ob der Antikörper vollständig zusammengesetzt ist oder die schwere Kette noch ungepaart vorliegt. Ist sie noch unstrukturiert, heften sie sich daran und verhindern so, dass das Molekül das endoplasmatische Retikulum verlässt (links im Bild oben). Da die Abwehrmechanismen der Antikörper durch die schwere Kette rekrutiert werden, ist ein in diese eingebauter Mecha-

Eine Vielzahl von Chaperonen wie BiP (Bindeprotein) und Faltungshelfern wie das Enzym PDI (Proteindisulfidisomerase), das die Ausbildung korrekter Schwefelbrücken unterstützt, interagieren mit dem Antikörper während seiner Synthese im endoplasmatischen Retikulum. Solange die schweren Ketten allein vorliegen, ist eine Untereinheit von ihnen, die so genannte C_{H1} -Domäne, in einem unstrukturierten Zustand, in dem sie von BiP gebunden und dadurch am Weitertransport gehindert wird. Erst wenn sich die leichten Ketten anlagern und so den Antikörper komplettieren, veranlassen sie die korrekte Faltung der C_{H1} -Domäne, woraufhin sich BiP ablöst.

nismus zur Qualitätskontrolle die sicherste Lösung für die Kontrolle der Antikörperproduktion. Aufgelöst wird diese Blockade unter normalen Umständen, wenn sich die leichten Ketten anlagern. Diese vervollständigen dabei nicht nur den Antikörper, sondern bringen auch die C_{H1} -Domäne dazu, sich ordnungsgemäß zu falten. Erst dann, und nur dann, wenn der Antikörper korrekt zusammengesetzt ist und die richtige Struktur hat, lösen sich die Chaperone ab und entlassen das Molekül in den Golgi-Apparat.

Tatsächlich sind die beteiligten Anstandsdamen aber nicht nur passive Torwächter. Vielmehr beteiligen sie sich auch aktiv an der Faltung und am Zusammenbau des Antikörpers. Dazu rekrutieren sie

weitere Helferproteine. So sorgen sie dafür, dass Schlüsselreaktionen der Antikörperproduktion schneller ablaufen.

Die neuen Einsichten in die molekularen Mechanismen zur Qualitätskontrolle von Antikörpern veranschaulichen einmal mehr, wie elegant und effizient ein komplexes biologisches Problem in

der Evolution gelöst wurde. Doch auch wir können davon lernen. Antikörper stellen mittlerweile eine der wichtigsten Klassen von Diagnostika und Therapeutika dar, beispielsweise in der Krebstherapie. Dank Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung könnte es vielleicht schon in naher Zukunft gelingen,

sie mit technischen Verfahren effizienter als bisher zu erzeugen und damit die Entwicklung neuer Behandlungsmethoden erheblich zu beschleunigen.

Matthias Johannes Feige promoviert bei **Johannes Buchner**, der Professor für Biotechnologie an der Technischen Universität München ist.

HALBLEITERTECHNIK

Meilenstein für grüne Leuchtdioden

Bisher erzeugen Leuchtdioden grünes Licht nur indirekt und deshalb wenig effizient.

Mit einem Trick gelang nun die Züchtung von Kristallen aus Zinkoxid, die diesen

Mangel beheben und damit den Weg zu noch sparsameren Lampen öffnen könnten.

Von Detlef Klimm, Detlev Schulz und Steffen Ganschow

Seit etwa fünf Milliarden Jahren versorgt die Sonne die Erde mit Licht und Wärmestrahlung. Ihre Lichtintensität als Funktion der Wellenlänge entspricht der eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von etwa 5800 Kelvin. Wir Menschen, die wir uns im Verlauf der Evolution den irdischen Bedingungen angepasst haben, nehmen solches Licht als weiß wahr. Auch künstliche Beleuchtung empfinden wir dann als angenehm, wenn sie das Sonnenspektrum möglichst gut nachbildet.

Eine Glühlampe, die ebenfalls als schwarzer Strahler fungiert, wenn auch mit tieferer Temperatur, kommt diesem Ideal recht nahe. Zwar ist ihr Spektrum gegenüber dem der Sonne etwas in den langwelligeren Bereich verschoben, doch stört uns das subjektiv weniger als eine

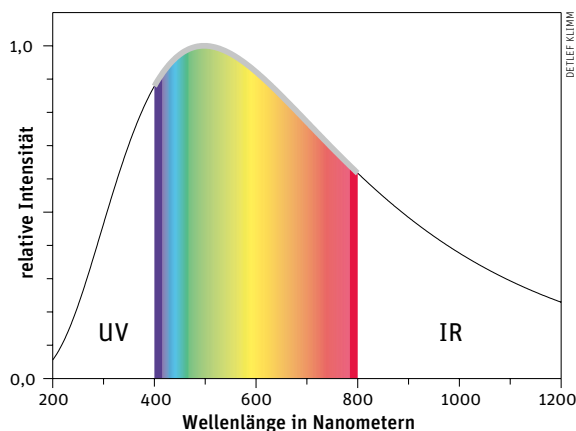
Verlagerung zur kurzwelligen Seite hin. Glühlampen haben allerdings den Nachteil, dass sie erhebliche Anteile der Strahlung im unsichtbaren ultravioletten (UV) oder infraroten (IR) Spektralbereich abgeben. So verschwenden sie einerseits Energie, weshalb die Europäische Union ihre Abschaffung bis 2012 beschlossen hat; zum anderen ist die erzeugte Abwärme oft sogar lästig – was jeder weiß, der sich im Hochsommer schon einmal in der Leuchtenabteilung eines Warenhauses umgesehen hat.

Nichtthermische Quellen wie Leuchtstoffröhren oder Energiesparlampen vermeiden diesen Nachteil, indem sie fast nur im sichtbaren Spektralbereich zwischen 400 und 800 Nanometern emittieren. Allerdings müssen sie den betreffenden Abschnitt des Sonnenspektrums hinreichend gut nachbilden, damit wir ihr Licht als angenehm empfinden. Derzeitige Energiesparlampen können das schon recht gut. Dabei erreichen sie gegenüber konventionellen Glühlampen etwa die fünffache Lichtausbeute. Leuchtdioden (LEDs) bieten eine noch höhere Energieeffizienz, was zum Beispiel moderne Fahrrad-Frontscheinwerfer anschaulich belegen. Doch kranken solche

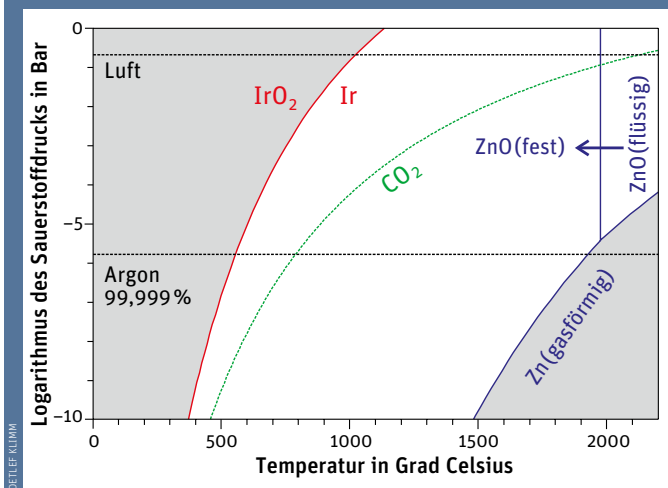
optoelektronischen Bauteile noch daran, dass ihr Licht eigentümlich kalt wirkt. Wohl niemand würde es deshalb gern zur Wohnraumbeleuchtung verwenden. Das liegt an der spektralen Zusammensetzung dieser Strahlung: Bei ihr stehen die Grundfarben Rot, Grün und Blau nicht in demselben »ausgewogenen« Verhältnis wie beim Sonnenlicht.

Wirklich effizient können Leuchtdioden derzeit nur rotes Licht erzeugen. Sogar Laser lassen sich für diesen Spektralbereich auf der Basis von Mischkristallen der Halbleiter Galliumarsenid und Indiumphosphid bauen. Auch blaue Leuchtdioden gibt es inzwischen. Die japanische Elektronikfirma Nichia konnte sie auf der Grundlage von Gallium-Indium-Nitrid im Jahr 1993 erstmals herstellen. Die Energieeffizienz dieser blauen Leuchtdioden ist aber sehr viel geringer als bei rot emittierenden LEDs.

Im so wichtigen grünen Spektralbereich sieht es noch schlechter aus. Der grüne Anteil von heutigen weißen Leuchtdioden wird erst nachträglich durch Leuchtstoffe (»Phosphore«) aus blauem Licht erzeugt. Ein Grund für diesen unbefriedigenden Zustand ist der Mangel an geeigneten Halbleitern. So emittiert Galliumnitrid zwar im Grünen, zersetzt sich aber beim Erhitzen unter Abgabe von Stickstoff. Nun beruhen die meisten Kristallzüchtungsverfahren darauf, dass die betreffende Substanz in einem Tiegel bis über ihren Schmelzpunkt erhitzt und dann langsam von einer Seite her abgekühlt wird. Vorausset-



Das menschliche Auge ist an den sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums angepasst. Künstliche Lichtquellen müssen ihn möglichst getreu reproduzieren, um als natürlich empfunden zu werden.



Schmaler Grat zwischen Verbrennung und Zersetzung

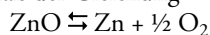
Dieses Phasendiagramm zeigt die Stabilitätsbereiche und Zustandsformen von Iridium, Zink und ihren Oxiden in Abhängigkeit vom (hier logarithmisch dargestellten) Sauerstoffdruck und der Temperatur. In den grauen Regionen reagiert entweder Iridium zum Dioxid, oder Zinkoxid zerfällt zu Zink und Sauerstoff. Der Bereich dazwischen eignet sich jedoch zur Züchtung von Zinkoxidkristallen aus der Schmelze (blauer Pfeil) in einem Iridiumtiegel. Kohlendioxid als Schutzgas liefert durch seine temperaturabhängige Zersetzung bei allen Temperaturen genau so viel Sauerstoff, dass Iridium nicht verbrennt und Zinkoxid nicht zerfällt, was in hochreinem Argon passieren würde.

zung dafür ist natürlich, dass der Halbleiter auch im geschmolzenen Zustand stabil bleibt. Außerdem braucht man ein Tiegelmateriale, das dem thermischen und chemischen Angriff der Schmelze widersteht.

Galliumnitrid erfüllt diese Bedingungen nicht. Allerdings gibt es einen möglichen Ersatz. Zinkoxid (ZnO) hat ganz ähnliche elektronische Eigenschaften und kann deshalb auch im grünen Spektralbereich emittieren. Erste LEDs aus diesem Material, wenngleich noch mit geringer Effizienz, wurden 2005 in Japan entwickelt. Auch Zinkoxid hat jedoch einen Nachteil: Einkristalle zur Herstellung von Wafern – jenen Scheiben, auf denen man durch Abscheidung dotierter (mit Fremdatomen versehener) Schichten die Dioden erzeugt – werden derzeit industriell ausschließlich aus alkalischen wässrigen Lösungen nach dem so genannten Hydrothermal-Verfahren unter hohen Temperaturen und Drücken erzeugt. Das führt unweigerlich zum Einbau geringer Anteile des Lösungsmittels in den wachsenden Kristall – was für elektronische Materialien mit höchsten Reinheitsanforderungen kritisch ist.

Eigentlich sollten sich Zinkoxidkristalle auch aus der Schmelze ziehen lassen; denn die Substanz ist bei der dafür nötigen hohen Temperatur sehr wohl beständig. Als Stolperstein erweist sich in diesem Fall jedoch der Behälter: Bisher ließ sich kein geeignetes Material dafür finden. Zinkoxid schmilzt erst bei 1975 Grad Celsius. Bei dieser Temperatur aber sind viele gebräuchliche Tiegelmateriale wie Platin selbst schon flüssig. Alle anderen bekannten Stoffe mischen sich entweder – wie feuerfeste Keramiken – mit geschmolzenem Zinkoxid oder verbrennen – wie Graphit und Wolfram – in Anwesenheit von Sauerstoff. Dieser

muss jedoch zugegen sein, weil Zinkoxid sonst gemäß der Gleichung



in seine Elemente zerfällt.

Bei anderen Oxiden mit sehr hohem Schmelzpunkt (beispielsweise Rubin und Saphir oder mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat für Laser) dienen Tiegel aus Iridium als Behälter für die Züchtung von Einkristallen. Dieses Edelmetall steht neben Platin in der 8. Nebengruppe des Periodensystems, hat aber den sehr viel höheren Schmelzpunkt von 2446 Grad Celsius. Dafür ist es gegenüber Sauerstoff allerdings erheblich empfindlicher: Beim Erhitzen an der Luft verbrennt es zum Oxid. Deshalb schien es bisher unmöglich, Iridiumtiegel auch zur Züchtung von Zinkoxidkristallen aus der Schmelze zu verwenden.

Zwischen Skylla und Charybdis

Der Blick auf das Phasendiagramm für das System Iridium-Zink-Sauerstoff macht jedoch klar, dass der Schein trügt. Dieses Diagramm zeigt die Stabilitätsbereiche und Zustandsformen der beiden Metalle in Abhängigkeit vom Sauerstoffdruck und von der Temperatur (Grafik oben). Es enthält zwar Bereiche, in denen entweder Iridium oxidiert oder Zinkoxid in metallisches Zink und Sauerstoff zerfällt. Dazwischen existiert aber ein breiter Korridor moderater Bedingungen, unter denen das Iridium des Tiegels im Gleichgewicht mit flüssigem oder festem Zinkoxid vorliegt. Dort kann bei 1975 Grad Celsius der gewünschte Kristallzüchtungsprozess stattfinden – zumindest im Prinzip.

Es gibt jedoch einen Haken. Leider existiert kein Sauerstoffdruck, bei dem sowohl Zinkoxid als auch Iridium über den gesamten Temperaturbereich bis 1975 Grad Celsius chemisch stabil sind. Luft

zum Beispiel enthält 21 Prozent Sauerstoff, was einem Sauerstoffdruck von 0,21 Bar entspricht. Laut Phasendiagramm ist unter diesen Bedingungen zwar das Zinkoxid bis über seinen Schmelzpunkt hinaus beständig; doch das Iridium verbrennt bei Temperaturen unterhalb von 1000 Grad Celsius zum Dioxid.

Das für Kristallzüchtungsprozesse oft als Schutzgas verwendete hochreine Argon würde das zwar verhindern. Aber die verschwindende Menge Sauerstoff, die es als Restverunreinigung enthält, wäre zur Stabilisierung des Zinkoxids bei hohen Temperaturen nicht ausreichend: Der Halbleiter würde sich oberhalb von 1900 Grad Celsius zersetzen. Deshalb kann man Zinkoxid nicht ohne Weiteres in Iridiumtiegeln schmelzen.

Es gibt jedoch einen Ausweg, den wir entdeckt haben. Tatsächlich ist er ebenso einfach wie effektiv: Man verwendet Kohlendioxid als Schutzgas. Es bewahrt das Iridium bei tiefen Temperaturen vor Oxidation. Bei zunehmender Erwärmung aber spaltet es sich gemäß



in Kohlenmonoxid und Sauerstoff auf. Dadurch erzeugt es bei jeder Temperatur genau so viel Sauerstoff, dass einerseits das Iridium nicht angegriffen wird und andererseits das Zinkoxid nicht zerfällt: Die von ihm quasi automatisch produzierte Sauerstoffkonzentration (grüne Kurve in der Grafik oben) verläuft vollständig innerhalb des Korridors, in dem die beiden Substanzen stabil sind.

Damit ist der Weg frei für die Entwicklung einer großtechnisch einsetzbaren Methode zur Züchtung von Zinkoxid-Einkristallen aus der Schmelze. In kleinem Umfang wird das Verfahren bereits praktisch angewendet. Dabei liefert es eine Kristallqualität, welche die Herstellung von Wafern erlaubt. Solche Wa-

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

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

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



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



Pocket-Notizbuch »Moleskine«: Hemingway hatte es, Picasso auch: das Notizbuch (9 x 14 cm) hat einen festen Einband und wird mit einem Gummiband verschlossen. Alle Seiten sind mit Zwirn geheftet.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

MINIABO:

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

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



Triebwerke, Laufschuhe, Computermäuse ... Es ist erstaunlich, wo uns Wissenschaft überall begegnet. Das Dossier »Wissenschaft im Alltag II« zeigt in kurzen, anschaulichen Artikeln, wie und wo sich mitten in unserem Alltagsleben jede Menge Physik und Chemie abspielt.

35%
PREIS-
VORTEIL

SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751



E-MAIL: service@spektrum.com

www.spektrum.de/januar

SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR
LESEVERGNÜGEN

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

www.spektrum.de/januar

LESER WERBEN LESER

SIE MÖCHTEN UNS EINEN
NEUEN ABONNENTEN VER-
MITTELN?

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

www.spektrum.de/januar

PRODUKT DES MONATS

Hand-Digital-Mikroskop 1,3 MP

Schon mal die eigene Haut
200-fach vergrößert gesehen?
Nein? Na dann aber ran an den
Computer! Hochfahren, Soft-
ware starten, USB-Handmikro-
skop anschließen und los
geht's!

Auflicht-Stereo-Mikroskop mit
USB-Anschluss, 1,3 Megapixel
Auflösung, Vergrößerung
20-fach bzw. 200-fach, mit
USB-Anschlusskabel, 8 LEDs.
Preis für Abonnenten:
€ 39,90 inkl. Versand Inland
(statt € 49,90)

www.spektrum.de/plus



20%
PREIS-
VORTEIL



Dieser Zinkoxidkristall mit einem Durchmesser von 33 Millimetern wurde durch Erstarrung aus der Schmelze im Iridiumtiegel hergestellt. Er ist nicht ganz perfekt: Durch Spannungen auf Grund sehr hoher Temperaturgradienten im Tiegel sind am Rand Risse entstanden. Durch Optimierung des Temperaturfelds in der Züchtungsapparatur sollte sich dieses Problem jedoch lösen oder zumindest verringern lassen.

fer bietet die Firma CrysTec seit Kurzem auch kommerziell an – für Forschungszwecke in wissenschaftlichen Einrichtungen oder Entwicklungslabors von Unternehmen. Zwar konnten noch keine Leuchtdioden daraus gefertigt werden. Doch ist es immerhin bereits gelungen, dotiertes Zinkoxid einkristallin darauf abzuscheiden. Die Chancen stehen demnach gut, dass weiße LEDs demnächst auch einen adäquaten Anteil an genuin grünem Licht erzeugen und die Basis von Energiesparlampen bilden, die noch weniger Strom verbrauchen und auch nicht wie die heutigen giftiges Quecksilber enthalten.

Detlef Klimm ist promovierter Kristallograf und Privatdozent an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin. Auch **Detlev Schulz** hat in Kristallografie promoviert, während **Steffen Ganschow** Physiker ist. Alle drei sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Kristallzüchtung in Berlin, Klimm als Leiter der Themengruppe Zinkoxid.

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

Molekül steuert Lichtstrahl

Forschern in der Schweiz ist es gelungen, ein einzelnes Molekül als Transistor für Licht einzusetzen. Damit haben sie einen Prototyp für optische Schaltkreise im Nanobereich geschaffen.

Von Stefan Maier

Das erste Jahrzehnt des neuen Jahrhunderts ist kaum vorüber, und schon machen sich Wissenschaftshistoriker auf die Suche nach Leitmotiven. Als wichtigste Errungenschaft des 20. Jahrhunderts erscheint im Rückblick die Mikroelektronik, die mit ihrem zentralen Element, dem Transistor, innerhalb kurzer Zeit unsere Welt verändert hat. Eine nicht weniger bedeutende Rolle könnte im neuen Jahrhundert die Nanophotonik spielen. Angesiedelt im Grenzgebiet zwischen Physik, Materialwissenschaften und Elektrotechnik, macht sie sich anheischig, winzig kleine Schaltkreise nicht für elektrische Ströme, sondern für Licht zu liefern, welche die heutigen Halbleiterchips in Sachen Arbeitsgeschwindigkeit weit in den Schatten stellen würden.

Zwar steckt das Gebiet noch in den Kinderschuhen. Doch nun hat eine Gruppe von Forschern am Laboratorium für Physikalische Chemie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) einen wichtigen Schritt auf dem weiten Weg zur Realisierung der Vision getan. Vahid Sandoghdar und seinen Kollegen ist es gelungen, einen Transistor für Laserstrahlen zu entwickeln, der nur aus einem einzigen Molekül besteht (*Nature*, Bd. 460, S. 76). In der vorliegenden Version eignet er sich zwar noch nicht zur Anwendung in optischen Schaltkreisen, die es im Nanoformat bisher ohnehin nicht gibt; doch ist er ein hervorragendes Modellsystem für die weitere Erforschung der Möglichkeiten, Lichtstrahlen mit einzelnen Molekülen zu steuern.

Wieso bemühen sich Wissenschaftler überhaupt um die Ablösung des altbe-

währten Siliziumtransistors? Die Antwort ersieht man aus der Entwicklung der Taktraten von PCs. Während sich die Arbeitsgeschwindigkeit der Prozessoren, ausgedrückt in Megahertz und später Gigahertz, noch bis vor einem Jahrzehnt regelmäßig in kurzen Abständen verdoppelte, hat sich dieser Anstieg letzthin deutlich verlangsamt. Dafür gibt es mehrere Gründe, unter anderem die Hitzeentwicklung von Chips, die aus einer wachsenden Zahl immer kleinerer Transistoren bestehen. Um dennoch schnellere Computer anbieten zu können, setzen die Chiphersteller daher seit mehreren Jahren auf Rechner mit zwei, vier oder gar acht Zentraleinheiten statt nur einer.

Die Koordination dieser Prozessoren erfordert aber ein dichtes sie verbindendes Leitungsnetz. Und genau hier tritt ein neues Problem auf: Je dünner die Drähte zwischen den Zentraleinheiten

sind, desto schlechter leiten sie den Strom, weil der elektrische Widerstand, aber auch die Kapazität mit abnehmendem Querschnitt steigt. Die Nanophotonik weist da einen ebenso radikalen wie eleganten Ausweg: Statt Elektronen sollen Photonen, also Lichtteilchen, zur Informationsübertragung dienen. Im größeren Maßstab hat das ja schon hervorragend geklappt – man denke nur an die Glasfaserkabel, die heute beispielsweise Fernsehbilder und die Datenströme des Internets höchst effizient und mit hoher Geschwindigkeit übermitteln.

Optimal wäre es natürlich, auch Schaltelemente zu verwenden, die mit Photonen statt Elektronen arbeiten. Zum einen entfielen dann die Umwandlung der kodierten Informationen von den Lichtsignalen auf den Leiterbahnen in die Elektronenströme innerhalb der Recheneinheiten. Zum anderen eignen sich Photonen vermutlich besser zum Bau der viel beschworenen Quantencomputer, deren Leistungsfähigkeit fast ins Unermessliche ginge. Deshalb erscheint ein Transistor für Licht höchst erstrebenswert.

Die grundlegende Aufgabe eines solchen Bauteils besteht darin, ein Signal entweder zu verstärken oder abzuschwächen. In der Elektronik ist ein Transistor daher im Prinzip ein durch einen Strom oder eine Spannung steuerbarer Widerstand. Bei seiner gängigen Variante wird

der Stromfluss zwischen der »Quelle« (*source*) und dem »Abfluss« (*drain*) durch eine am »Gatter« (*gate*) angelegte Spannung gesteuert.

Farbstoff als Schalter

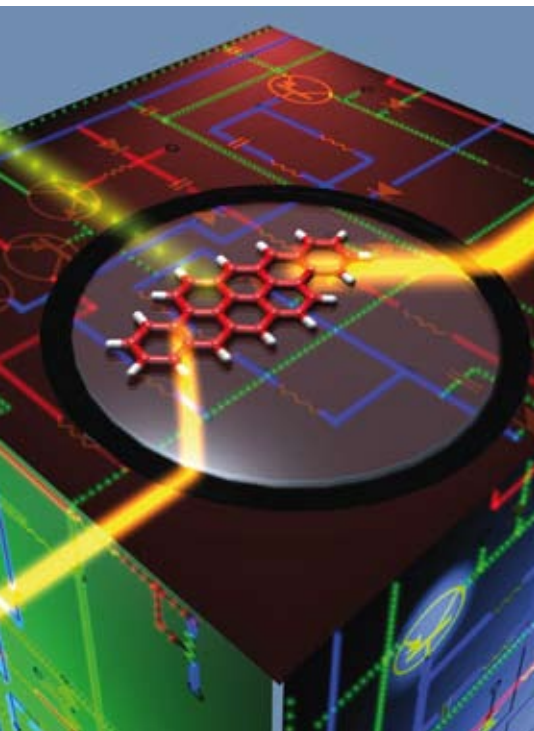
Bei Sandoghdar übernimmt nun ein einzelnes Farbstoffmolekül die Aufgabe des Transistors. Es schwächt oder verstärkt einen darauf fokussierten Laserstrahl – nennen wir ihn den Informationsstrahl – beim Hindurchtreten. Das geschieht in Abhängigkeit von der Stärke eines zweiten Strahls, der ebenfalls auf das Molekül trifft und dessen energetischen Zustand beeinflusst. Dadurch ändert er die Fähigkeit des Farbstoffs, den Informationsstrahl durch Absorption von Photonen zu verschlucken oder umgekehrt durch Emission von Lichtteilchen zu verstärken.

Die Forscher von der ETHZ verwendeten ein Molekül aus einer Klasse von Verbindungen, die heute schon in vielen Bereichen von Wissenschaft und Technik zum Einsatz kommen und sich durch eine Eigenschaft auszeichnen, die als Fluoreszenz bezeichnet wird: Wenn sie ein Photon absorbieren, senden sie wenige Nanosekunden später ein Lichtquant etwas größerer Wellenlänge aus – die Energiedifferenz wird in Schwingungen des Moleküls und somit Wärme umgewandelt. Zum Beispiel strahlen solche Substanzen nach Anregung mit einem grünen Laserstrahl rotes Licht ab, dessen Photonen langwelliger und folglich energieärmer sind.

In ihrem Experiment betteten Sandoghdar und seine Kollegen den Fluoreszenzfarbstoff in einen Kristall ein. Die Moleküle waren dadurch so verdünnt, dass sie sich mit Hilfe eines Mikroskops einzeln ansprechen ließen. Damit der Transistor wie vorgesehen funktionierte, durften die Energiezustände des Farbstoffs nur von den beiden Laserstrahlen und nicht auch von thermischen Schwingungen beeinflusst werden. Deshalb kühlten die Forscher ihren Kristall fast auf den Temperaturnullpunkt von $-273,16$ Grad Celsius ab.

Das Farbstoffmolekül verfügt über vier Energieniveaus, die für die Transis-

Künstlerische Darstellung eines photonischen Chips, in dem einzelne fluoreszierende Moleküle – gezeigt ist hier ein polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff – als Transistoren fungieren.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN



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

▶ Kernmechanik

Kernstrukturen + Dipolmomente
Neutrino-Quantengravitation
Kernmechanische Chemie
www.kernmechanik.de

▶ SciLogs

Die größte deutschsprachige Webseite
mit Wissenschaftsblogs
www.scilog.de

▶ FASZINATION WELTALL!

Leuchtglobus »Der Mond«, Ø 26cm, EUR 89,95
Leuchtglobus »Sternenhimmel«, Ø 34cm,
EUR 119,95
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

Springers Einwürfe

Ist Sex im Alleingang besser?

Ein Fadenwurm als Kronzeuge

Manches Wunder der Natur ist so unscheinbar, dass wir es wohl nie im Fernsehen zu Gesicht bekommen werden. Zum Beispiel *Caenorhabditis elegans* (griechisch für: zierliches neues Stäbchen). Das ist ein winziger, nur einen Millimeter langer Fadenwurm, den Biologen wegen seiner einfachen Struktur gern als Modellorganismus für ihre Forschungen verwenden.

Einfach ist er, aber nicht primitiv. So vermehrt sich das evolutionär höchst erfolgreiche und entsprechend weit verbreitete Würmchen nicht etwa ungeschlechtlich – indem es durch simple Teilung oder Knospung identische Kopien seiner selbst erzeugt –, sondern im Prinzip sexuell wie wir auch: durch Vereinigung von Ei- und Samenzellen. Allerdings macht es sich das Geschlechtsleben einfacher als wir und die meisten komplexeren Tiere, die entweder als Männchen oder als Weibchen chronisch unerfüllt durchs Leben schweifen. Dieser Wurm ist mit Vorliebe Hermaphrodit.

Das heißt, die meisten Exemplare von *C. elegans* tragen sowohl Samen- als auch Eizellen in sich. Deshalb können sie sich als echte Zwitter die umständliche Partnersuche ersparen; durch Selbstbefruchtung zeugen und gebären sie ihre Nachkommen.

Aber Inzucht ist in ihrem Fall kein Muss. Gelegentlich entstehen Fadenwurm-Männchen, die dann mangels eigener Eier die des nächstbesten Hermaphroditen begatten. Damit ist *C. elegans* das ideale Tiermodell zur Klärung der Frage: Warum hat die Evolution zwei separat verkörperte Geschlechter hervorgebracht, statt es sich mit Selbstbefruchtung bequem zu machen? Konkret: Was nützen der Fadenwurmpopulation die eingestreuten Männchen – auf den ersten Blick pure Minusposten, die für die Produktion von Nachwuchs auf die Hilfe anderer angewiesen sind?

Wie den Biologen um Levi T. Morran an der University of Oregon in Eugene jetzt experimentell zeigen konnte, hat der Fremdsex tatsächlich Vorteile, die den reproduktiven Extraaufwand rechtfertigen (*Nature*, Bd. 462, S. 350). Die Forscher kreierte durch Genmanipulation Wurmpopulationen, die entweder ausschließlich Selbst- oder nur Fremdbefruchtung betrieben. Dann zwangen sie die armen Würmer, sich über raues Terrain zu quälen, oder setzten sie schädlichen Bakterien aus. Und siehe da: Nach 40 bis 50 Generationen erwies sich, dass die Fremdgänger deutlich überlebensfähiger waren als die sexuell selbstgenügsame Vergleichspopulation.

Das Resultat wurde freilich in einer künstlich sehr unwirtlich gestalteten Umwelt gewonnen. Unter halbwegs konstanten Bedingungen rentiert sich der Hermaphroditismus. Da kann man, passend zur trüben Jahreszeit, schon ins Grübeln kommen. Wie schwer fällt uns modernen Menschen doch die Suche nach Liebe und partnerschaftlichem Glück! Wie frustrierend ist oft der Besuch von Kneipen und Discos für bindungswillige Singles! Die Partnersuche per Internet spart zwar Zeit, kann aber auch nicht garantieren, dass wir je das Glück zu zweit finden.

Würde sich da nicht der Versuch lohnen, das mühsame Verfahren abzukürzen? Wäre es nicht einfacher, die Menschen künftig biotechnisch mit beiderlei Geschlechtsmerkmalen zu versehen? Psychoanalytiker müssten dann nicht länger über den Penisneid bei der Frau und den Gebärdneid beim Mann spekulieren. So entstünde eine Gesellschaft aus selbstzufriedenen, keineswegs zur Kinderlosigkeit verdamnten Singles.

Doch so verlockend diese schöne neue Welt auch scheinen mag – ich persönlich könnte gern darauf verzichten. Wie arm wäre doch ein Leben ohne die Spannung, die aus dem Gegensatz der Geschlechter und der Anziehungskraft zwischen Mann und Frau erwächst.



Michael Springer

torfunktion entscheidend sind (siehe Kasten rechts). Indem ein Elektron zwischen ihnen wechselt, kommt es zur Absorption oder Emission von Photonen verschiedener Energie.

Der Informationsstrahl ist grün und hat eine Wellenlänge von 590 Nanometern. Trifft er auf das Farbstoffmolekül, hebt er ein Elektron vom Grund- in den tiefsten elektronischen Anregungszustand an. Dieser sei hier mit der Ziffer 2 bezeichnet, während das Basisniveau die Nummer 1 erhalten soll. Das angeregte Elektron bleibt nur rund zehn Nanosekunden im Zustand 2. Dann sendet es ein langwelligeres rotes Photon aus und fällt dabei auf ein Niveau, das nur wenig über dem Grundzustand liegt. Durch die Restenergie wird das Molekül zu Schwingungen angeregt, die aber sehr schnell abklingen. Danach liegt das Molekül wieder im Grundzustand vor, und der Vorgang kann von vorn beginnen.

Dieser Prozess wiederholt sich viele Male pro Sekunde. Dabei verliert der grüne Informationsstrahl, da aus ihm Photonen entnommen und als rotes Licht wieder ausgesendet werden, an Intensität: Er schwächt sich bei dem Kristall von Sandoghdar und Kollegen um etwa sieben Prozent ab.

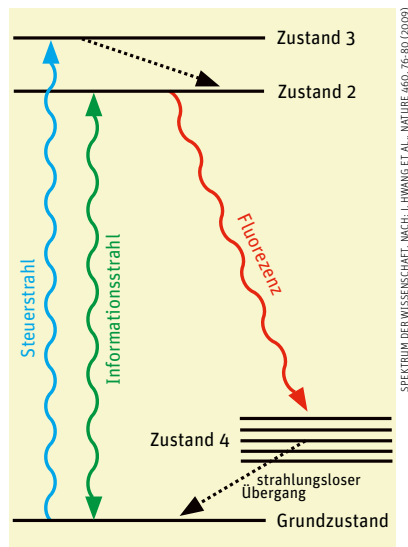
Wegen Unterbesetzung geschlossen

Entscheidend für die Transistorfunktion ist nun, dass sich der Grad dieser Abschwächung durch einen zweiten Strahl steuern lässt. Dieser war beim Experiment der ETHZ-Forscher zerhackt: Die Photonen wurden alle 13 Nanosekunden in 50 Pikosekunden langen Pulsen abgegeben. Zudem bestand der Steuerstrahl aus etwas höherenergetischen Photonen einer Wellenlänge von 582 Nanometern und spielte damit ins Bläuliche. Auf diese Weise konnte er Elektronen aus dem Grundzustand auf ein Niveau befördern, das oberhalb desjenigen lag, auf das sie vom Informationsstrahl angehoben wurden. Dieses Niveau sei hier mit 3 bezeichnet. Im Grunde unterschied es sich nur dadurch vom Zustand 2, dass das Molekül zusätzlich Schwingungen ausführte. Diese klangen wiederum sehr schnell ab. Deshalb gelangte das angeregte Elektron im Nu in den Zustand 2, wo es wiederum für zehn Nanosekunden verharrte.

Was ist die Konsequenz? Während sich das Elektron im Niveau 2 aufhält, bleibt

FUNKTIONSWEISE DES MOLEKÜLTRANSISTORS

Der als Transistor dienende Fluoreszenzfarbstoff hat vier Zustände, die für seine Funktion entscheidend sind. Normalerweise schwächt er den grünen Informationsstrahl durch Absorption, bei der ein Elektron vom Grundzustand in den Zustand 2 angehoben wird, von dem es mit zeitlicher Verzögerung durch Fluoreszenz über Zustand 4 in den Grundzustand zurückkehrt. Diese Schwächung kann der blaue Steuerstrahl jedoch verringern oder sogar in eine Verstärkung umwandeln, indem er seinerseits Elektronen aus dem Grundzustand über den Zustand 3 in Zustand 2 befördert, von dem sie dann durch stimulierte Emission unter Aussendung grünen Lichts in den Grundzustand zurückspringen.



der Grundzustand leer. Deshalb vermag das Farbstoffmolekül kein Photon aus dem grünen Spektralbereich mehr zu absorbieren. Der Informationsstrahl kann das Molekül folglich ungehindert durchdringen – es wirft quasi keinen Schatten. Weil aber der Steuerstrahl bei jedem Puls mit umso höherer Wahrscheinlichkeit das Elektron aus dem Grundzustand des Farbstoffmoleküls entfernt, je stärker er ist, lässt sich durch Steigerung seiner Intensität die Absorption des Informationsstrahls immer mehr verringern und schließlich auf null drücken.

Doch das ist noch nicht alles. Befindet sich ein Elektron im Niveau 2 und trifft ein Photon des grünen Informationsstrahls auf das zugehörige Molekül, kommt es zu einer so genannten stimulierten Emission. Das angehobene Elektron wird zum Rücksprung in den Grundzustand veranlasst – unter Abgabe eines Lichtquants aus dem grünen Spektralbereich. Auf dem gleichen Prinzip beruht übrigens der Laser. Im Endeffekt wird also ein Photon des Steuer- in eines des Informationsstrahls verwandelt und dieser entsprechend verstärkt – laut den Messungen der Züricher Forscher bei ihrem Kristall um bis zu ein Prozent.

Das Ergebnis ist ein optischer Transistor: Genauso wie im elektronischen Fall die Steuerspannung die Ladungsträgerdichte und somit den Widerstand in der Bahn des Stroms zwischen Quelle und Abfluss kontrolliert, beeinflusst hier der Steuerstrahl das Besetzungsverhältnis

zwischen Grundzustand und tiefstem angeregtem elektronischem Niveau und damit die Fähigkeit des Moleküls, den Informationsstrahl entweder zu absorbieren oder zu verstärken.

Zwar war die Spanne, über die sich die Intensität verändern ließ, beim Züricher Experiment mit maximal acht Prozent nicht besonders groß. Die Methode sollte jedoch auch mit Informationsstrahlen viel geringerer Intensität funktionieren, die sich dann weitaus stärker beeinflussen ließen. Im Grenzfall könnte es auf diese Weise sogar gelingen, einzelne Photonen zu schalten – eine Grundvoraussetzung für Quantencomputer.

Natürlich bleibt abzuwarten, ob sich ein solcher Transistor auch bei höheren Temperaturen realisieren lässt. Immerhin haben die Forscher um Sandoghdar bewiesen, dass die Manipulation von Lichtstrahlen mit einzelnen Molekülen möglich ist, und damit den Grundstein zur optischen Informationsverarbeitung auf kleinstem Raum gelegt. Trotzdem sind noch viele Herausforderungen zu meistern – darunter die Entwicklung winziger Leiterbahnen für Photonen. Aber das Jahrhundert hat ja erst angefangen und den Forschern bleibt noch reichlich Zeit, dafür zu sorgen, dass die Nanophotonik vielleicht wirklich zur zentralen Errungenschaft des neuen Centenniums avanciert.

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

Interaktive Lern-CD



ABENTEUER IM WELTALL

Begleiten Sie in diesem Lernspiel den kleinen Außerirdischen Sparky in einem Raumschiff quer durch unser Sonnensystem. Hier heißt es verschiedene Missionen erfüllen, Aufgaben lösen und Rätsel knacken.

Zusätzlich können Sie Ihr Wissen über das Universum und die Geschichte der Raumfahrt anhand von über 60 Lernmodulen in Form von Texten, Aufgaben, Schaubildern und Zeittafeln testen und vertiefen.

Ab 10 Jahren; € 9,90 (zzgl. Versand)

Schullizenz: € 98,-

Systemvoraussetzungen: PC mit CD-Laufwerk, Microsoft Windows XP oder Vista

www.spektrum.com/sparky



in Kooperation mit

Klaus Tschira Stiftung
Gemeinnützige GmbH



Wenn die Atmosphäre INS ALL ENTWEICHT

Die dünnen Lufthüllen um manche Planeten sind höchst fragile Gebilde, denn Gase können auf vielerlei Wegen in den Weltraum verloren gehen. Nicht nur für Erde, Venus und Mars ist dies ein Prozess mit gravierenden Folgen.

Von David C. Catling und Kevin J. Zahnle

Zu den auffälligsten Eigenschaften des Sonnensystems gehört die Vielfalt planetarer Atmosphären. So erhitzt die Lufthülle der Venus die Oberfläche des Planeten auf 460 Grad Celsius, und der dort herrschende Druck ließe sich auf der Erde erst in über 900 Meter Wassertiefe messen. Und das, obwohl beide Planeten vergleichbare Größe und Masse besitzen. Etwa denselben Umfang weisen auch die planeten-großen Monde von Jupiter und Saturn auf, Kallisto und Titan. Doch Titans stickstoff-reiche Lufthülle ist sogar dichter als die irdische, während Kallistos außerordentlich dünne Atmosphäre kaum erwähnenswert ist. Worin liegen die Ursachen solcher extremen Unterschiede? Und wie ist es eigentlich um die Zukunft der irdischen Atmosphäre bestellt, die für unser Leben eine so zentrale Rolle spielt?

Zu einer Lufthülle gelangt ein Planet, wenn aus seinem Inneren Dämpfe aufsteigen, wenn er flüchtige Substanzen von abgestürzten Kometen und Asteroiden aufnimmt oder dank seiner Schwerkraft Gase aus dem interplanetarischen Raum anzieht. Doch die Atmosphäre kann auch wieder verschwinden – unter Umständen in einem einzigen kosmischen Augenblick. Zwar ist etwa auf der Erde die gegenwärtige Verlustrate der beiden leichtesten Gase gering: Bei Wasserstoff beträgt sie nur rund drei Kilogramm pro Sekunde, bei Helium sind es 50 Gramm. Über geologische Zeiträume hinweg ist aber auch dieses Heraussickern von Bedeutung: »Selbst ein kleines Leck kann ein großes Schiff zum Sinken bringen«, sagte schon Benjamin Franklin. Und möglicherweise war die Verlustrate einst erheblich höher.

Das Wissen um die Vergänglichkeit von Atmosphären hat unseren Blick auf das Sonnensystem verändert. So versuchten Forscher jahrzehntelang herauszufinden, warum der Mars

eine so dünne Atmosphäre besitzt. Jetzt aber fragen wir uns: Warum besitzt der Rote Planet überhaupt noch eine Atmosphäre? Stand für Titan während seiner Entstehungsgeschichte schlicht mehr Gas zur Verfügung, oder ist es vielmehr Kallisto, der seine Atmosphäre im Lauf der Zeit verlor? War Titans Lufthülle vielleicht früher noch dichter als heute? Wie konnte die Venus Stickstoff und Kohlendioxid an sich binden, während sie doch ihr Wasser verlor? War der Verlust von Wasserstoff möglicherweise sogar eine Voraussetzung dafür, dass auf der Erde komplexe Lebensformen entstanden? Und wird sich unser Planet deshalb einst in einen Zwilling der Venus verwandeln?

Genau wie eine Rakete die so genannte Fluchtgeschwindigkeit besitzen muss, um das Gravitationsfeld der Erde verlassen zu können, müssen auch Atome und Moleküle diese Minimalgeschwindigkeit erreichen, um in den Weltraum zu entkommen. Wenn dafür bei hohen Gastemperaturen schon die Wärmebewegung der Moleküle ausreicht, sprechen Forscher von thermischem Verlust oder thermischer Flucht. Vor allem in dieser Verlustart scheint es auch begründet zu sein, dass unser Sonnensystem mit atmosphärelosen Körpern durchsetzt ist. Bei diesen Himmelsobjekten übertrifft die Intensität der Sonneneinstrahlung einen bestimmten Grenzwert, der wiederum von der Schwerkraft des jeweiligen Körpers abhängig ist (siehe Grafik S. 26).

Der thermische Verlust geht auf zweierlei Weise vonstatten. Beim Jeans-Verlust, benannt nach dem englischen Astronomen James Jeans, der den Prozess im frühen 20. Jahrhundert erstmals beschrieb, verdampft die Luft Atom für Atom und Molekül für Molekül vom oberen Rand der Atmosphäre. In niedrigen Höhen werden die Teilchen noch von Kollisionen aufgehalten, aber oberhalb einer bestimmten Höhe, der so genannten Exobase – sie liegt im Fall der Erde in etwa 500 Kilometer Höhe –,

In Kürze

- Viele der Gase, aus denen sich die Atmosphären der Erde und anderer Planeten zusammensetzen, entweichen mehr oder weniger rasch ins All. Zu den Gründen dafür zählen ihre Wärmebewegung und chemische Reaktionen, aber auch **Einschläge von Kometen und Asteroiden**.
- Diese Verluste erklären viele **Auffälligkeiten im Sonnensystem**, etwa die Rote des Planeten Mars und die Dichte der Lufthülle von Venus. Sie deuten auch darauf hin, dass die Erde einst das Schicksal der Venus mit ihrem galoppierenden Treibhauseffekt teilen wird.
- Der **Verlust von irdischem Wasserstoff** könnte letztlich aber auch mit dafür verantwortlich sein, dass sich vor 2,4 Milliarden Jahren Sauerstoff in der Erdatmosphäre ansammelte.

ASTRONOMIE & PHYSIK

VERGANGENHEIT: VOR 3 MILLIARDEN JAHREN

GEGENWART: DIE ERDE HEUTE

ZUKUNFT: IN 3 MILLIARDEN JAHREN

ALFRED T. KAMBIAN

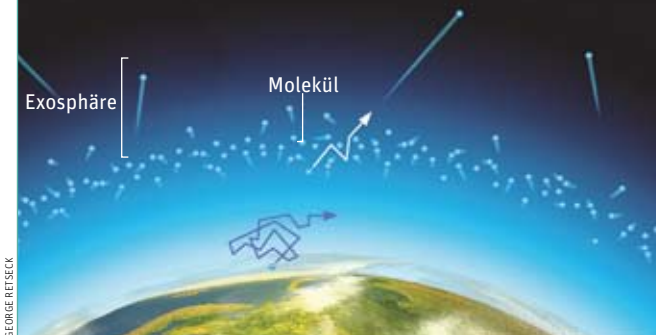
Der Verlust mancher Gase und insbesondere von Wasserstoff hat unseren Planeten verändert. Er zählt möglicherweise sogar zu den Gründen dafür, dass sich überhaupt Sauerstoff in der Atmosphäre anreichern konnte. In einigen Milliarden Jahren aber werden die Ozeane austrocknen und Leben wird allenfalls in den Polarregionen überdauern.

THERMISCHE VERLUSTE: ENTWEICHEN AUS DEM PLANETARISCHEN TEEKESSEL

Eine Hauptursache für atmosphärische Verluste besteht in der Erwärmung von Gasmolekülen durch die Sonnenstrahlung. Dann kann es infolge zweier unterschiedlicher Mechanismen zum Entweichen der Luft kommen.

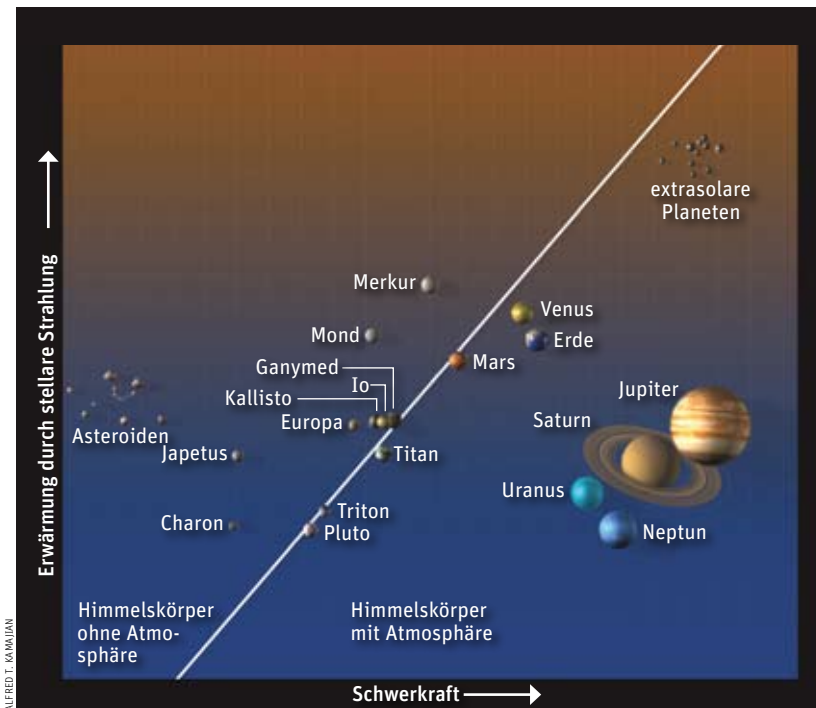
DIE LUFT VERDAMPFT MOLEKÜL FÜR MOLEKÜL

Sind Atome und Moleküle erst einmal in der Exosphäre, hält die schnellsten von ihnen nichts mehr davon ab, ins All zu entkommen. Dieser so genannte Jeans-Verlust ist wesentlich für das Entweichen von Wasserstoff aus der irdischen Atmosphäre verantwortlich.



ERWÄRMTE LUFTMASSEN STRÖMEN AB

Von Sonnenstrahlung erwärmte Luft steigt nach oben und erreicht Fluchtgeschwindigkeit. Dieser hydrodynamische Verlust war vor allem in der Frühzeit der Erde von Bedeutung und verwandelte wohl auch die Venusatmosphäre in eine lebensfeindliche Umgebung.



Auffälliger Zusammenhang: Himmelskörper, die keine Atmosphäre (mehr) besitzen, sind eher starker Erwärmung ausgesetzt, üben aber nur schwache Gravitation aus (links der Diagonale). Bei Welten mit Atmosphären verhält sich dies umgekehrt (rechts der Diagonale).

ist die Luft so dünn, dass sie nur noch selten zusammenstoßen. Hier wird ein Atom oder Molekül mit der notwendigen Geschwindigkeit durch nichts mehr vom Entweichen ins All abgehalten.

Dank seiner geringen Masse kann Wasserstoff die Schwerkraft eines Planeten zwar im Vergleich zu anderen Elementen am leichtesten überwinden, doch zunächst muss auch er die Exobase erreichen. In der irdischen Atmosphäre ist das ein langwieriger Prozess, denn wasserstoffhaltige Moleküle gelangen meist nicht über die untersten Schichten der Atmosphäre hinaus. Wasserdampf kondensiert und regnet wieder auf die Oberfläche herab, Methan oxidiert zu Kohlendioxid und Wasser.

Allerdings entgehen einige der Wasser- und Methanmoleküle diesen Prozessen. Sie erreichen die Stratosphäre, zerfallen und geben den Wasserstoff frei, der dann langsam nach oben diffundiert, bis er die Exobase erreicht. Wieder ein Teil davon schafft es dann ins Weltall, wie der Halo aus Wasserstoffatomen rund um unseren Planeten belegt (Aufnahme rechts).

Die Temperatur in Höhe der irdischen Exobase schwankt typischerweise um 1000 Kelvin. Bei dieser Temperatur besitzen Wasserstoffatome im Mittel eine Geschwindigkeit von fünf Kilometer pro Sekunde, doch die Geschwindigkeitsverteilung umfasst auch viel schnellere Atome. Manche von ihnen erreichen auch Fluchtgeschwindigkeit, die in dieser Höhe 10,8 Kilometer pro Sekunde beträgt, was 10 bis 40 Prozent des gegenwärtigen Wasserstoffverlusts der Erdatmosphäre erklärt. Auf dem Mond geschieht Vergleichbares: Das Fehlen einer lunaren Atmosphäre lässt sich teilweise ebenfalls durch den Jeans-Verlust beschreiben, denn aus dem Mondoberflächengestein freigesetzte Gase können leicht ins All entweichen.

Statt Molekül für Molekül verloren zu gehen, kann erwärmte Luft aber auch in großen Mengen abströmen. Absorbiert die Hochatmosphäre ultraviolette Strahlung, erwärmt sie sich und dehnt sich aus, wobei Luftmassen in Richtung Weltall gedrückt werden. Dabei werden sie allmählich beschleunigt, überschreiten die Schallgeschwindigkeit und erreichen schließlich Fluchtgeschwindigkeit. Diesen so genannten hydrodynamischen Verlust bezeichnen Forscher in Analogie zum Sonnenwind – geladene Teilchen, die von der Sonne in den interplanetaren Raum strömen – auch als planetarischen Wind. Besonders anfällig für diese Verlustart sind Atmosphären mit hohen Wasserstoffanteilen. Strömt Wasserstoff nach außen, kann er auf seinem Weg schwerere Mole-

küle und Atome mitreißen. Je schwerer diese sind, in desto geringerem Umfang ist dies allerdings der Fall, weshalb uns die gegenwärtige Zusammensetzung einer Atmosphäre zeigen kann, ob ein solcher Prozess in der Vergangenheit stattgefunden hat.

Bei dem jupiterähnlichen Exoplaneten HD 209458b stießen Astronomen tatsächlich auf die typischen Anzeichen für einen hydrodynamischen Verlust. Alfred Vidal-Madjar vom Institut d'Astrophysique de Paris und seine Kollegen berichteten 2003 von Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Hubble. Sie belegen, dass HD 209458b eine durch nach oben drückende Luftmassen aufgeblähte Atmosphäre aus Wasserstoff besitzt. Nachfolgende Messungen zeigten, dass die aufgeblähte Luft hülle zudem Kohlenstoff und Sauerstoff enthält. (In ihren tieferen Schichten hätten sich diese Elemente gar nicht entdecken lassen.) Weil diese Atome eigentlich zu schwer sind, um solche Höhen zu erreichen, müssen sie vom Wasserstoff mitgerissen worden sein.

Die gesamte Atmosphäre entrissen

Der hydrodynamische Verlust erklärt wohl auch, warum die Astronomen keine großen Gasplaneten finden, die auf erheblich engeren Bahnen als HD 209458b um ihren Stern kreisen. Objekten, die weniger als etwa drei Millionen Kilometer (rund die Hälfte des Bahnradius von HD 209458b) von ihrem Stern entfernt sind, entreißt der hydrodynamische Verlust innerhalb einiger Milliarden Jahre die gesamte Atmosphäre. Von Gasplaneten bleibt dann nur ein kleiner, nicht beobachtbarer Kern zurück.

Hinweise auf planetarische Winde wie in diesem Fall stärken die in den 1980er Jahren aufgekommene Idee, dass der hydrodynamische Verlust wohl auch eine wichtige Rolle in der Frühzeit von Venus, Erde und Mars spielte. Darauf weisen drei wichtige Indizien hin. Das erste betrifft die Edelgase: Kommt es nicht zu Verlusten, müssten chemisch nicht reagierende Gase wie Neon und Argon auf Dauer in der Atmosphäre verbleiben – die Häufigkeitsverteilungen ihrer Isotope sollten daher immer noch ihren ursprünglichen Werten entsprechen. Die wiederum können als ungefähr bekannt gelten, weil Sonne und Planeten einst aus der gleichen Gaswolke entstanden. Tatsächlich aber unterscheiden sich die beobachteten Häufigkeitsverteilungen von denen, die zu erwarten wären.

Das zweite Indiz: Junge Sterne – und unsere Sonne bildete vermutlich keine Ausnahme – senden intensive ultraviolette Strahlung aus, die den hydrodynamischen Verlust angetrieben haben könnte. Und drittens besaßen die jun-

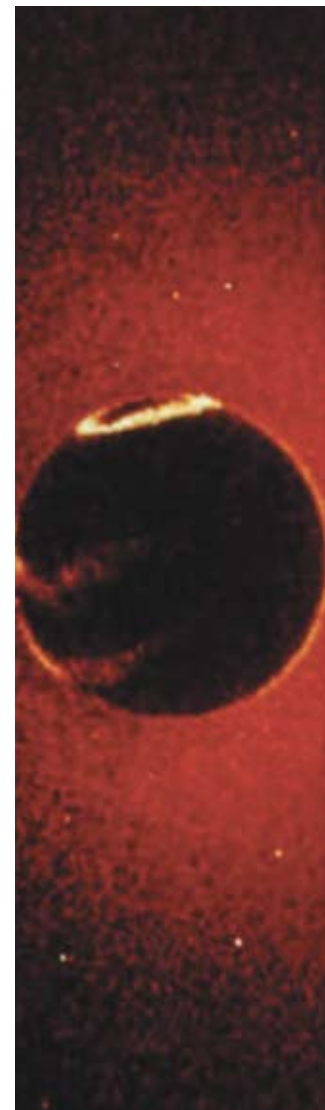
gen terrestrischen Planeten möglicherweise wasserstoffreiche Atmosphären. Der Wasserstoff könnte aus chemischen Reaktionen von Wasser mit Eisen stammen, aber auch von Gas aus der einstigen Gas- und Staubwolke, die Ursprung unseres Planetensystems war, und aus der Aufspaltung von Wassermolekülen durch die UV-Strahlung der Sonne. In der Frühphase des Sonnensystems stürzten erheblich mehr Asteroiden und Kometen als heute auf die Planeten. Immer, wenn sie in einen Ozean einschlugen, füllte sich die Atmosphäre mit Dampf. Dieser kondensierte zwar im Verlauf von Jahrtausenden und fiel als Regen zurück auf die Oberfläche. Doch zumindest die Venus ist der Sonne so nah, dass optimale Bedingungen für den hydrodynamischen Verlust herrschten. Weil sich der Wasserdampf lange in der erwärmten Atmosphäre hielt, konnte er durch die Strahlung aufgespalten werden.

In den 1980er Jahren zeigte James F. Kasting, jetzt an der Pennsylvania State University, dass die Venus auf diesem Weg binnen einiger weniger zehn Millionen Jahre extrem viel Wasserstoff verloren haben könnte – eine Menge, die dem Wasserstoffgehalt eines ganzen Ozeans entspricht (siehe SdW 4/1988, S. 46). Gemeinsam mit einem von uns (Zahnle) zeigte Kasting dann auch, dass der Wasserstoff einen Großteil des Sauerstoffs mitreißen, das Kohlendioxid jedoch zurücklassen würde. Damit aber fehlte Wasser, das eine wichtige Rolle bei chemischen Reaktionen spielt, in denen aus Kohlendioxid und anderen Elementen Mineralien wie etwa Kalkstein entstehen. Kohlendioxid wurde also nicht gebunden, sondern sammelte sich in der Atmosphäre an und machte die Venus zu einer extrem lebensfeindlichen Welt.

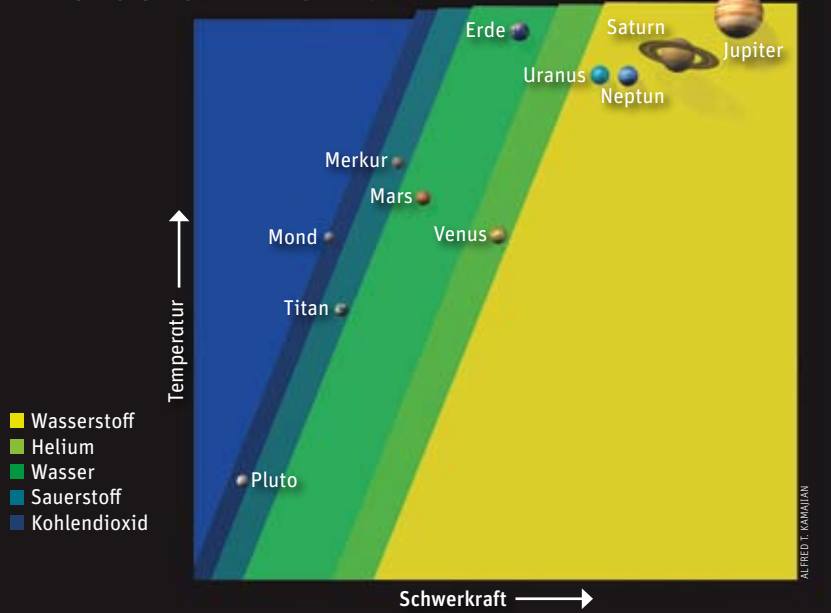
Mars und Erde litten in geringerem Maß ebenfalls unter hydrodynamischem Verlust. Leichte Isotope nämlich – die leichter verloren gehen können – finden sich hier in relativ geringer Menge. In den Atmosphären der beiden Planeten liegt das Verhältnis von Neon-20 zu Neon-22 um 25 Prozent unter dem solaren Wert. In der Marsatmosphäre ist ein ähnliches Defizit an Argon-36 gegenüber Argon-38 nachzuweisen. Und selbst die Isotope von Xenon, dem von Schadstoffen abgesehen schwersten Gas in der Erdatmosphäre, zeigen Spuren des hydrodynamischen Verlusts. Dies wirft allerdings eine Frage auf. Wenn der hydrodynamische Verlustprozess sogar Xenonatome betraf: Warum riss er dann nicht auch alles andere mit? Die Antwort steht bislang noch aus.

Auch Titan verlor wahrscheinlich einen Großteil seiner Luft durch hydrodynamischen Verlust. Beim Sinkflug der ESA-Sonde Huy-

Entweichende Wasserstoffatome erscheinen auf diesem im Ultravioletten aufgenommenen Bild der Nachtseite der Erde als rotes Glühen rund um den Planeten. Aufgenommen wurde das Foto im Jahr 1982 vom NASA-Satelliten Dynamic Explorer I. Für den Streifen um den Nordpol und die schwach leuchtenden Strukturen in Äquatornähe sind Sauerstoff und Stickstoff verantwortlich.



WELCHE GASE KÖNNEN ENTKOMMEN?



Leichte Gase wie Wasserstoff sind weniger stark an einen Himmelskörper gebunden als schwere wie Kohlendioxid. Ihre Anfälligkeit für den Jeans-Verlust hängt von der Temperatur (vertikale Achse) am äußeren Rand der Atmosphäre beziehungsweise an der Oberfläche atmosphäreloser Körper sowie der Stärke der Schwerkraft (horizontale Achse) ab. Himmelskörper rechts der Linie für ein bestimmtes Gas können dieses an sich binden. Liegen sie links der Linie, verlieren sie es. Mars etwa verliert Wasserstoff und Helium, außerdem viel Wasser, behält aber Sauerstoff und Kohlendioxid.

gens durch die Atmosphäre des Saturnmonds im Jahr 2005 stellten die Messinstrumente fest, dass das Verhältnis von Stickstoff-14 zu Stickstoff-15 70 Prozent über dem irdischen Wert liegt – ein Rätsel, denn schließlich unterscheiden sich diese Isotope kaum in ihrer Anfälligkeit für den hydrodynamischen Verlust. Falls die Atmosphäre Titans ursprünglich die gleiche Stickstoffzusammensetzung besaß wie die irdische, dürfte Titan jedenfalls gewaltige Stickstoffverluste erlitten haben – ein Vielfaches der heute vorhandenen, immer noch großen Menge. Vielleicht war seine Atmosphäre einst also sogar dichter als heute, was die ganze Sache indessen nur noch verwirrender macht.

Bei einigen Planeten, zu denen auch die heutige Erde gehört, spielen indessen nichtthermische Prozesse die größere Rolle. Dabei katapultieren chemische Reaktionen oder Teilchenkollisionen die Partikel auf Fluchtgeschwindigkeit. Durch ein einziges Ereignis oberhalb der Exobase erhält ein Atom oder Molekül so eine sehr große Geschwindigkeit und kann auch durch weitere Zusammenstöße nicht mehr am Entweichen gehindert werden. Oft sind auch Ionen beteiligt. Üblicherweise sind diese geladenen Teilchen magnetisch an einen Planeten gebunden – entweder durch sein globales Magnetfeld oder durch lokale, vom Sonnenwind induzierte Felder. Entkommen können sie trotzdem. Eines der Schlupflöcher ist der Ladungsaustausch: Kollidiert ein schnelles Wasserstoffatom mit einem neutralen Wasserstoffatom und fängt dessen Elektron ein, ist das so entstandene schnelle neutrale Atom immun gegen das magnetische Feld. Dieser Prozess ist für 60 bis 90 Prozent des derzeitigen Wasserstoffverlusts der Erde und für den überwiegenden Teil des Wasserstoffverlusts der Venus verantwortlich.

Auch einen weiteren Schwachpunkt der planetaren Magnetfalle nutzen Ionen aus. Die meisten Magnetfeldlinien verlaufen von einem magnetischen Pol zum anderen. Doch der Sonnenwind zieht die äußeren Feldlinien noch weiter nach außen – sie krümmen sich nicht zum Planeten zurück, sondern sind zum interplanetarischen Raum hin offen. Den Weg entlang dieser Linien können allerdings nur die leichtesten Teilchen wie Wasserstoff- und Heliumionen nehmen, weil sie natürlich dennoch die Schwerkraft überwinden müssen. Der so entstehende geladene Teilchenstrom, der polare Wind, ist für 10 bis 15 Prozent des Wasserstoffverlusts und nahezu den gesamten Heliumverlust der Erde verantwortlich.

Manchmal reißen die leichten Ionen auch schwerere Exemplare mit, was möglicherweise das Xenonrätsel löst. War der polare Wind einst stärker, ist denkbar, dass er Xenonionen mit ins All trug. Als eines der Indizien dafür gilt, dass die Isotopenverteilung von Krypton – das Gas ist leichter als Xenon und sollte unter sonst gleichen Bedingungen daher anfälliger für Verluste sein – nicht dieselben Auffälligkeiten wie jene von Xenon aufweist. Anders als Xenon lässt sich Krypton nämlich nicht ionisieren und darum auch von stärkeren polaren Winden nicht mitreißen.

Der vollen Wucht des Sonnenwinds ausgeliefert

Auf Mars und möglicherweise auf Titan ist ein dritter nichtthermischer Prozess am Werk. Beim fotochemischen Verlust wandern Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlenmonoxidmoleküle in die Hochatmosphäre, wo die Strahlung der Sonne sie ionisiert. Rekombinieren die ionisierten Moleküle mit Elektronen oder stoßen sie miteinander zusammen, werden sie von der freigesetzten Energie in Atome aufgespalten, die dann Fluchtgeschwindigkeit besitzen können. Ein vierter nichtthermischer Prozess ist das Sputtering (englisch: *to sputter* = zerstäuben). Weil Mars, Titan und Venus kein globales, schützendes Magnetfeld besitzen, ist ihre Hochatmosphäre der vollen Wucht des Sonnenwinds ausgeliefert. Dieser reißt Ionen mit sich, die – wenn aus ihnen per Ladungsaustausch neutrale Atome entstehen – schließlich entkommen können.

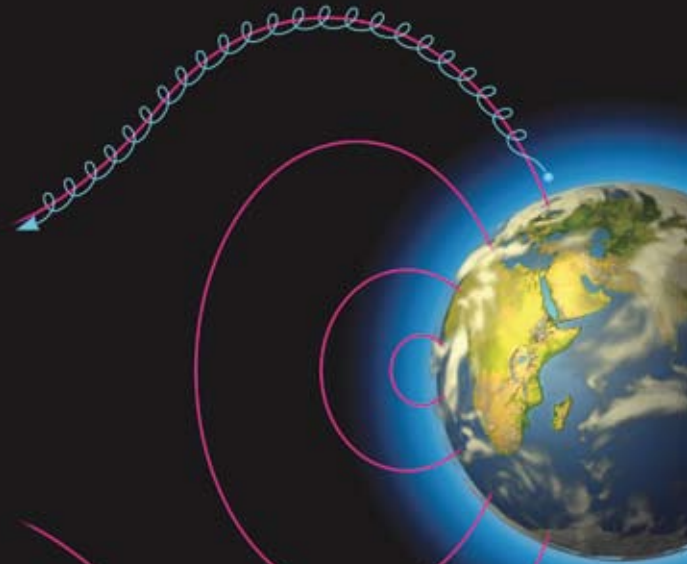
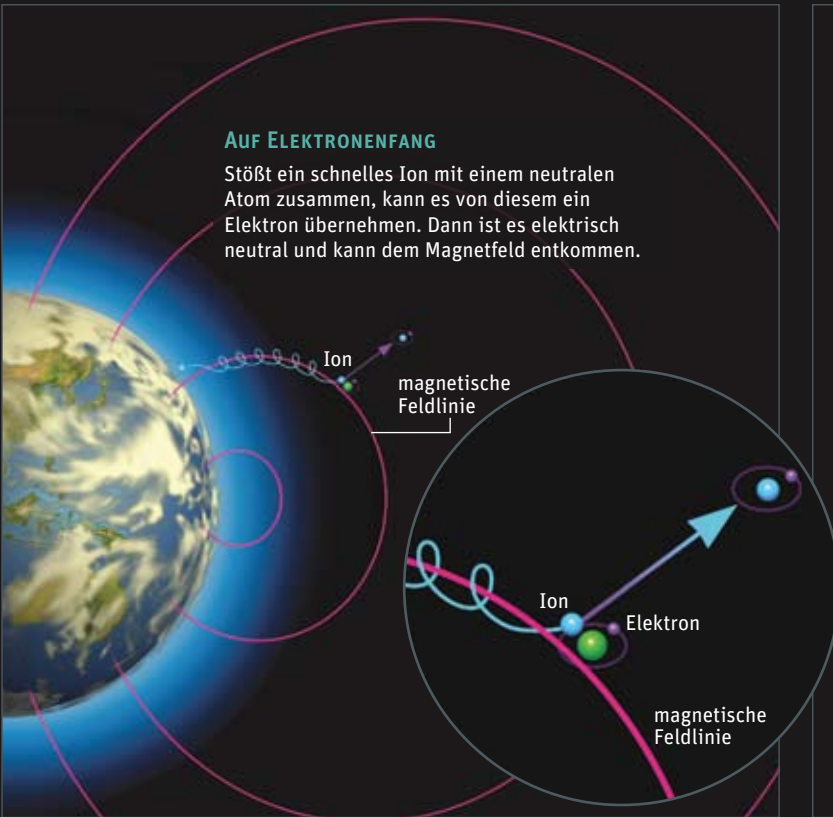
Vor allem Sputtering und fotochemische Verluste sind wohl dafür verantwortlich, dass der Mars bis zu 90 Prozent seiner einstigen Atmosphäre verloren hat. Dies schließen Forscher aus der Anreicherung der Marsatmosphäre mit schweren Stickstoff- und Kohlenstoffisotopen. Genauer wird dies erst die NASA-Sonde Mars Atmosphere and Volatile Evolution herausfinden, die ab 2014 um den

NICHTTHERMISCHE VERLUSTE: MOLEKÜLE VERSCHWINDEN DURCH SCHLUPFLÖCHER

Auch elektrisch geladene Teilchen verlassen die Atmosphäre in Richtung Weltall. Elektrische Felder können solche Ionen nämlich auf Entweichgeschwindigkeit beschleunigen. Zwar hält das Magnetfeld des Planeten die meisten von ihnen gefangen, doch auf unterschiedlichen Wegen entkommen manche dennoch.

AUF ELEKTRONENFANG

Stößt ein schnelles Ion mit einem neutralen Atom zusammen, kann es von diesem ein Elektron übernehmen. Dann ist es elektrisch neutral und kann dem Magnetfeld entkommen.

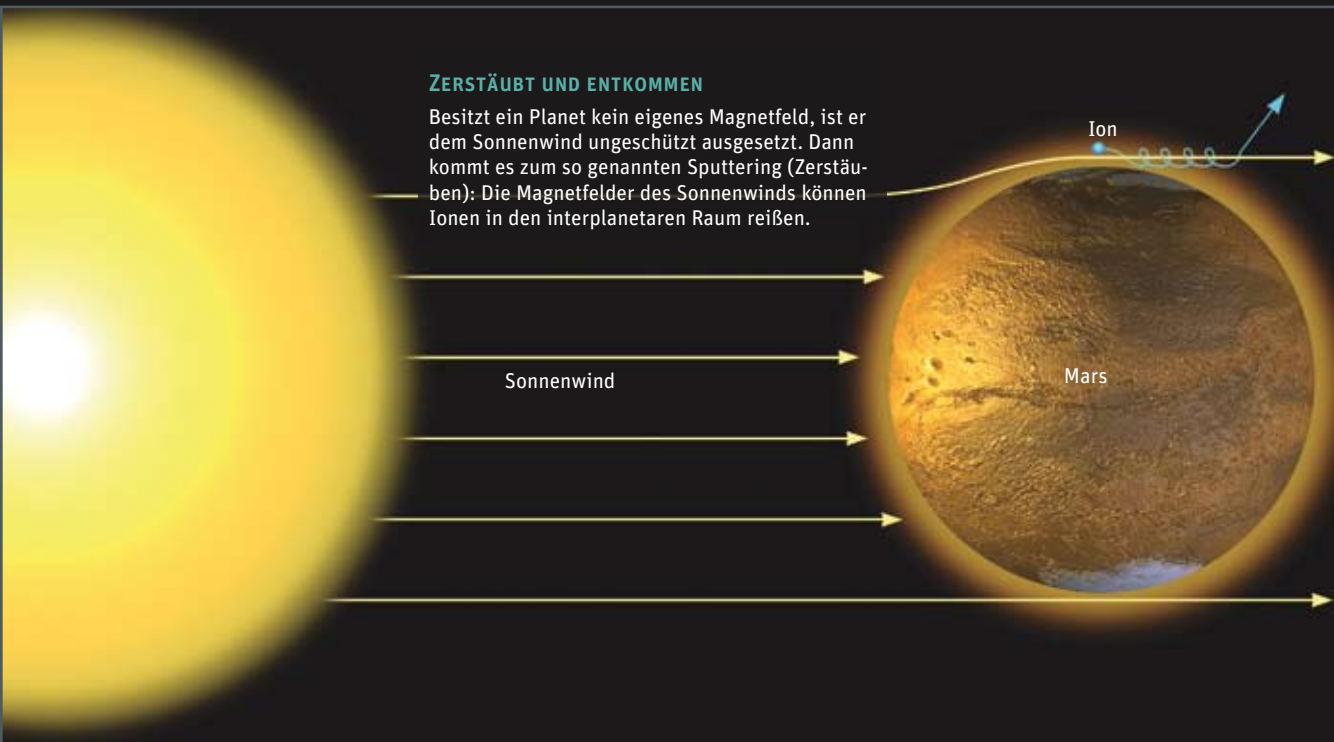


AUF DER FELDLINIE INS ALL

Manche Feldlinien in hohen Breiten krümmen sich nicht zum Planeten zurück, sondern verbinden sich mit interplanetarischen Feldlinien. Ionen können durch die entstehenden Öffnungen im Magnetfeld entweichen.

ZERSTÄUBT UND ENTKOMMEN

Besitzt ein Planet kein eigenes Magnetfeld, ist er dem Sonnenwind ungeschützt ausgesetzt. Dann kommt es zum so genannten Sputtering (Zerstäuben): Die Magnetfelder des Sonnenwinds können Ionen in den interplanetaren Raum reißen.



Literaturhinweise:

Catling, D. C., Kasting, J. F.:

Planetary Atmospheres and Life. In: Sullivan, W. T., Baross, J. A. (Hg.): Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology. Cambridge University Press, 2007.

Catling, D. C. et al.: Biogenic Methane, Hydrogen Escape, and the Irreversible Oxidation of Early Earth. In: Science 293, S. 839–843, 2001.

Vidal-Madjar, A. et al.: An Extended Upper Atmosphere around the Extrasolar Planet HD 209458b. In: Nature 422, S. 143–146, 13. März 2003.

Zahnle, K. J.: Origins of Atmospheres. In: Woodward, C. E. et al. (Hg.): Origins. Astronomical Society of the Pacific Conference Series 148, S. 364–391, 1998.

Roten Planeten kreisen und entkommende Ionen und neutrale Atome untersuchen soll.

Thermische wie nichtthermische Prozesse verursachen indessen nur ein unbedeutendes Herauströpfeln im Vergleich zu den gewaltigen Fontänen, die Kometen- oder Asteroideneinschläge verursachen. Große und schnelle Projektile können dabei vollständig verdampfen; dasselbe geschieht mit einer vergleichbar großen Masse an Material der Planetenoberfläche. Das entstehende heiße Gas expandiert dann mit einer Geschwindigkeit jenseits der Fluchtgeschwindigkeit und treibt die darüberliegende Luft ins Weltall hinaus.

Je größer die Einschlagenergie, desto größer ist die betroffene kegelförmige Region. Bei dem möglicherweise für das Dinosauriersterben verantwortlichen Asteroideneinschlag vor 65 Millionen Jahren umfasste der Kegel vermutlich den gesamten Bereich innerhalb von 80 Grad zur Vertikalen. Etwa ein Hunderttausendstel der Erdatmosphäre ging so verloren. Ein noch gewaltigerer Einschlag könnte gar den gesamten Atmosphärenbereich hinwegfegen, der oberhalb der Tangentialebene am Ort des Einschlags liegt.

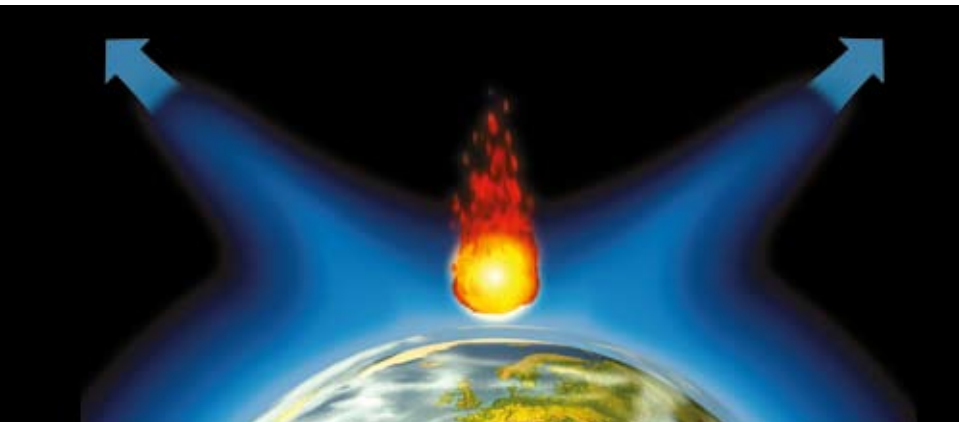
Der verloren gehende Atmosphärenanteil ist dabei umso größer, je dünner die Luft ist – mit der Folge, dass eine bereits unter Verlusten leidende Atmosphäre für Erosion durch weitere Einschläge umso anfälliger ist. Mit der Zeit kann so die gesamte Lufthülle verschwinden. Der durch seine geringe Größe ohnehin anfällige Mars verbrachte bereits seine frühen Jahre nahe dem Asteroidengürtel. Die Konsequenz: Der Rote Planet könnte seine Atmosphäre infolge vieler Einschläge binnen weniger als 100 Millionen Jahren verloren haben, wie Berechnungen ergaben. Die großen Jupitermonde halten sich aber ebenfalls in gefährlicher Umgebung auf, nämlich tief im Schwerkraftfeld des Jupiters, das einfallende Asteroiden und Kometen weiter beschleunigt. Sollten die Monde jemals Atmosphären besessen haben, hätten Einschläge sie ihnen rasch entrissen. Im Gegensatz dazu zieht Titan seine Bahn in relativ großem Abstand vom Saturn. Die Einschlaggeschwindigkeiten sind daher kleiner, Titans Atmosphäre blieb bestehen.

Thermische und nichtthermische Verluste liefern ebenso wie Einschläge von Himmelskörpern Erklärungen für die Verschiedenheit der Atmosphären im Sonnensystem. Zu ihren weniger offensichtlichen Konsequenzen gehört die Oxidation der Planetenoberflächen. Sauerstoff entkommt weniger leicht als Wasserstoff, und dies ist letztlich der Grund, warum Mars, Venus und Erde rot sind. Im Fall der Erde verbergen Erdreich und Vegetation diese natürliche Farbe der kontinentalen Kruste allerdings. Doch ursprünglich bestanden die Oberflächen aller drei Planeten aus grauschwarzen Gemischen vulkanischen Gesteins, das sich erst durch chemische Reaktionen mit Sauerstoff und vor allem die Bildung von Eisenoxid rot färbte. So lässt sich die Farbe des Mars nur damit erklären, dass er einst Wasser besaß und es in Mengen verlor, die den gesamten Planeten mit einem mehrere zehn Meter tiefen Ozean hätten bedecken können.

Auch ein weiteres Phänomen könnten die Gasverluste aufklären. Die Zunahme des Sauerstoffgehalts der irdischen Atmosphäre vor 2,4 Milliarden Jahren schreiben die meisten Forscher dem Aufkommen fotosynthetischer Organismen zu. Wir schlugen jedoch im Jahr 2001 vor, dass bei diesem Prozess auch der Wasserstoffverlust eine wichtige Rolle spielte. Wenn Mikroben Photosynthese betreiben und dabei Wassermoleküle aufspalten, kann der entstehende Wasserstoff wie ein Stab beim Staffellauf von der organischen Materie zu Methan weiterwandern und schließlich das Weltall erreichen. Dem durch diesen Prozess zu erwartenden Wasserstoffverlust entspricht eine im System verbliebene Sauerstoffmenge,

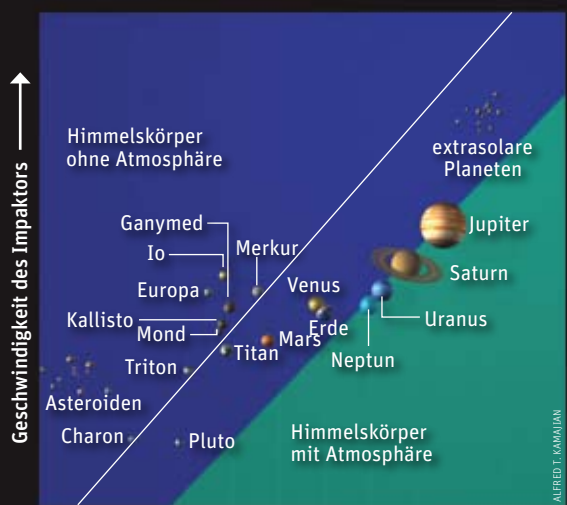
IMPAKT: DIE ATMOSPHERE WIRD HINAUSGESCHLEUDERT

Durch auftreffende Himmelskörper gehen auf einen Schlag große Atmosphärenanteile verloren.



GEORGE REISECK








Die Erosion einer Atmosphäre infolge von Einschlägen fällt umso stärker aus, je schwächer die Schwerkraft (horizontale Achse) und je höher die Geschwindigkeit (vertikale Achse) des einschlagenden Asteroiden oder Kometen ist. Körper ohne Atmosphäre liegen eher links oben im Diagramm, hier ist die Erosion am stärksten. (Die Geschwindigkeiten im grün unterlegten Bereich treten nicht auf, denn die jeweilige Stärke der Schwerkraft sorgt für eine Mindestgeschwindigkeit einschlagender Himmelskörper.)



ALBERT J. KAMILLIAN

WELCHER PLANET VERLIERT WELCHE GASE?

Die Wirksamkeit der unterschiedlichen Prozesse, die zu Gasverlusten in Planetenatmosphären führen, ist von verschiedenen Faktoren abhängig.

HIMMELSKÖRPER	EPOCHE	WELCHE GASE GEHEN HAUPTSÄCHLICH VERLOREN?	THERMISCH		NICHTTHERMISCH			EINSCHLÄGE
			Jeans-Verlust	hydrodynamisch	Ladungsaustausch	polarer Wind	fotochemisch	
Erde 	gegenwärtig	Wasserstoff	✓		✓	✓		
		Helium			✓	✓		
Venus 	gegenwärtig	Wasserstoff, Helium			✓			✓
	ursprünglich	Wasserstoff, Sauerstoff		✓				
Mars 	gegenwärtig	Wasserstoff	✓					
		Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Argon					✓	✓
	ursprünglich	alle Gase						✓
Jupitermonde 	ursprünglich	alle Gase		✓				✓
	gegenwärtig	Wasserstoff	✓					✓
Titan 	gegenwärtig	Methan, Stickstoff		?				✓
		Wasserstoff, Methan, Stickstoff		✓				✓
	ursprünglich	Wasserstoff, Methan, Stickstoff		✓				
Pluto 	gegenwärtig	Wasserstoff, Methan, Stickstoff		?				
HD 209458b 	gegenwärtig	Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff		✓				

PLANETEN: ALFRED T. KAWAJAN

die wiederum hilft, die Menge an oxidiertem Material auf der heutigen Erde zu erklären.

Die dünne Marsatmosphäre lässt sich durch das Entweichen von Gasen ins All ebenfalls erklären. Lange Zeit wurde vermutet, dass chemische Reaktionen zwischen Wasser, Kohlendioxid und Gestein Bestandteile der ursprünglich dichten Atmosphäre in Karbonate, also kohlenstoffhaltige Mineralien, umwandelten. Diese Karbonate wurden dann nie wieder zu Kohlendioxid zurückverwandelt, weil der kleine Mars zu schnell abkühlte und der Vulkanismus auf seiner Oberfläche zu früh endete.

Doch ob dieses Szenario zutrifft, ist ungewiss. Denn Raumsonden entdeckten bislang nur eine einzige Region auf dem Planeten, wo tatsächlich karbonathaltiges Gestein existiert. Überdies sind diese Felsaufschlüsse vermutlich durch unterirdisches warmes Wasser entstanden. Außerdem kann die Karbonattheorie nicht erklären, warum die Marsatmosphäre so wenig Stickstoff und Edelgase enthält. Die Prozesse entweichender Gase bieten dagegen bessere Antworten: Die Atmosphäre wurde nicht im Gestein gebunden, sie entkam ins Weltall.

Trotzdem beschäftigt die Astronomen ein weiteres Problem. Eigentlich hätte die Marsatmosphäre durch Impakte vollständig verloren gehen müssen. Was also stoppte diesen Vorgang? Eine mögliche Antwort lautet: der Zufall. Große Einschläge sind ohnehin selten,

vor etwa 3,8 Milliarden Jahren nahm deren Häufigkeit zudem rapide ab. Vielleicht ist der Mars dem finalen zerstörerischen Einschlag also einfach glücklich entkommen. Zudem könnte ein großer eishaltiger Asteroid oder Komet mehr flüchtige Stoffe zum Mars transportiert haben, als ihm die nachfolgenden Einschläge wieder entrissen. Oder aber Atmosphärenüberreste überdauerten im Marsboden, dem sie nach den Einschlägen allmählich wieder entströmten.

Die Erde wiederum überstand Verluste bislang relativ unbeschadet. Doch die Helligkeit der Sonne steigt um etwa zehn Prozent pro einer Milliarde Jahre. Über geologische Zeiträume hinweg wirkt sich dieser Anstieg zerstörerisch aus, weil die Atmosphäre stärker erwärmt und dadurch auch feuchter wird. Nach und nach wird der in den interplanetaren Raum fließende Strom von Wasserstoff immer mehr anschwellen. In rund zwei Milliarden Jahren werden die irdischen Ozeane austrocknet sein. Dann ist die Erde zu einem Wüstenplaneten geworden, auf dem nur noch an den Polen Spuren von Wasser existieren. Und weitere zwei Milliarden Jahre später brennt die Sonne so gnadenlos auf die Erde herab, dass alles verbleibende Wasser verdampft und der atmosphärische Treibhauseffekt so stark wird, dass sogar das Gestein auf der Oberfläche schmilzt. Ganz zum Schluss wird die Erde der heutigen Venus ähneln – und als leblose Welt enden. ◀



Der Planetenforscher **David C. Catling** (links) untersucht das Wechselspiel zwischen Oberflächen und Atmosphären von Planeten. 2001 wechselte er vom Ames Research Center der NASA an die University of Washington, wo er als Projektwissenschaftler an der Marslandemission Phoenix beteiligt war.

Kevin J. Zahnle ist seit 1989 als Wissenschaftler am Ames Research Center tätig. Seine Interessen reichen von Planetenatmosphären über die Oberflächen bis hin zum inneren Aufbau von Planeten. 1996 zeichnete ihn die NASA für seine Arbeiten über den Einschlag des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter mit einer Medaille für außergewöhnliche Leistungen aus.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1015399.

Das Zeitalter der ELEKTRISCHEN RAKETEN

Bei der Erkundung des äußeren Sonnensystems durch Raumsonden mit konventionellen chemischen Triebwerken stoßen die Weltraumagenturen an technische Grenzen. Für künftige Langstreckenmissionen setzen die Planer daher auf elektrische Ionen- oder Plasmamotoren.

In Kürze

- ▶ Konventionelle Raketen erzeugen Schub durch die Verbrennung chemischer Treibstoffe. **Elektrische Triebwerke** hingegen treiben Raumfahrzeuge an, indem sie Wolken elektrisch geladener Teilchen, ionisierte Gase oder Plasmen, mittels elektromagnetischer Felder beschleunigen.
- ▶ Zwar liefern sie einen **sehr geringen Schub**, können aber bei gleicher Treibstoffmenge letztlich sehr viel höhere Geschwindigkeiten erreichen.
- ▶ Besonders für Missionen zu **Zielen im äußeren Sonnensystem** werden »elektrische Raketen« künftig unverzichtbar sein.

Von Edgar Y. Choueiri

Jenseits der Umlaufbahn des Planeten Mars rast die amerikanische Raumsonde Dawn einsam auf den Asteroidengürtel zu. Sie soll die Asteroiden Ceres und Vesta untersuchen, zwei der größten Überbleibsel jener Zeit vor 4,5 Milliarden Jahren, als zahlreiche Planetenvorläufer miteinander zusammenstießen und verschmolzen, um die heutigen Planeten zu bilden. Dawns Flug ist aber nicht nur bemerkenswert, weil er neue Einsichten in die Entstehungsphase des Sonnensystems verspricht. Die 2007 gestartete US-Sonde verfügt auch über einen ganz besonderen Antrieb: einen Ionenmotor.

Die Bedeutung von Ionen- und Plasmaantrieben für Missionen in die Tiefen des Sonnensystems wächst zunehmend. Den nötigen Schub erzeugen sie nicht wie herkömmliche Raketen durch das Verbrennen flüssiger oder fester chemischer Treibstoffe. Stattdessen nutzen sie elektrische Energie, um ionisierte Gase oder Plasmen herzustellen und dann mit deren Hilfe die Raumsonde voranzutreiben. Das Verfahren ist hocheffizient. Verglichen mit einem chemischen Raketenmotor benötigt es

nur ein Zehntel der Treibstoffmasse, um zu dem Asteroidengürtel zu gelangen. Ohne den Ionenmotor, so hatten die Entwickler der Dawn-Mission am kalifornischen Jet Propulsion Laboratory der NASA berechnet, hätte Dawn entweder Ceres oder Vesta, nicht aber beide Asteroiden erreichen können.

»Elektrische Raketen« entwickeln sich allmählich zum Transportmittel der Wahl, wenn eine Mission zu weit entfernten Zielen aufbrechen soll. Zu ihren Erfolgen zählen etwa der Besuch von Deep Space 1 bei einem Kometen, der nur möglich war, weil nach Erreichen des Hauptziels, des Asteroiden 9969 Braille, noch genügend Treibstoff vorhanden war. Elektrische Antriebe brachten auch die japanische Sonde Hayabusa, die einem Asteroiden Bodenproben entnehmen sollte, zum Ziel, ebenso wie die europäische Mondsonde SMART-1. Immer stärker setzen die Raumfahrtbehörden in den USA, Europa und Japan daher auf Ionen- und Plasmaantriebe, wenn sie neue Sonden zu den äußeren Planeten schicken wollen oder Missionen vorbereiten, die der Suche nach extrasolaren Planeten oder der Erforschung grundlegender physikalischer Fragen in den Weiten des Weltraums dienen.



PAT RAWLINGS / SAIC

Doch es hat lange gedauert, bis ihre Pläne Wirklichkeit wurden. Bereits im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts spekulierten Raketenpioniere, ob sich Elektrizität für den Antrieb von Raumfahrzeugen nutzen ließe. Ernst Stuhlinger – ein Mitglied von Wernher von Brauns legendärem Team deutscher Raketenforscher, das die Speerspitze des US-Raumfahrtprogramms bildete – setzte das Konzept Mitte der 1950er Jahre in eine technische Anwendung um. Ein paar Jahre später bauten Ingenieure am Lewis (heute Glenn) Research Center der NASA die erste funktionstüchtige elektrische Rakete: Beim Space Electric Rocket Test 1 im Jahr 1964 arbeitete der elektrische Antrieb eine halbe Stunde lang, bevor die Rakete nach ihrem suborbitalen Flug zur Erde zurückfiel. Sowjetische Wissenschaftler entwickelten damals ebenfalls elektrische Raketen und setzten die Treibstoff sparende Technik bereits um 1970 für die Lage- und Positionskontrolle geosynchroner Kommunikationssatelliten ein.

Immer noch denken viele Menschen an lange feurige Schweife, die Raumschiffe auf dem Weg zu fernen Planeten hinter sich herziehen. Tatsächlich aber spielt der Antrieb

während des Flugs selbst praktisch keine Rolle. Der größte Teil des Treibstoffs wird in den ersten Minuten der Reise verbraucht, wenn die Raumfahrzeuge von der Oberfläche der Erde ins All geschossen werden. Für diesen Zweck sind chemische Antriebe auch heute noch unverzichtbar, zudem eignen sie sich für Kurskorrekturen während des Flugs. Doch für Exkursionen ins äußere Sonnensystem taugen sie wegen ihres hohen Treibstoffverbrauchs nicht. Denn all dieser Treibstoff muss beim Start mit ins All gehievt werden, zu Kosten von rund 20 000 US-Dollar pro Kilogramm.

Sparen ist aber auch schon bei kürzeren Missionen angesagt. Bis heute verbringen Sonden oftmals Jahre damit, auf komplizierten Bahnen wiederholt an Planeten vorbeizufiegen, um sich in deren Schwerefeld, also ohne zusätzlichen Treibstoffverbrauch, die nötige Energie für eine Beschleunigung in die gewünschte Richtung zu holen. Doch solche Fly-by-Manöver schränken die Missionsplaner auch deshalb stark ein, weil sie nur während kurzer zeitlicher Startfenster möglich sind. Schließlich müssen die Planeten in der jeweils richtigen Position stehen, um der Sonde den nötigen Schwung zu verleihen.

Im Jahr 2011 wird sich die mit einem Ionenantrieb ausgestattete Raumsonde Dawn dem Asteroiden Vesta annähern. Der helle Punkt oben rechts in dieser Grafik stellt Ceres dar, das zweite Ziel der Sonde. Besäße Dawn einen konventionellen chemischen Antrieb, wäre die Mission bereits nach dem Besuch von Vesta mangels Treibstoff beendet.

CHEMISCH ODER ELEKTRISCH?

Chemische Raketen (linke Spalte) erzeugen in kurzer Zeit großen Schub, können Raumsonden also schnell auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen. Dabei verbrauchen sie zwar viel Treibstoff, für kürzere Reisen sind sie dennoch sehr gut geeignet.

Elektrische Raketen (rechte Spalte) benutzen ionisierte Gase oder Plasmen als Treibstoff (genauer: als Stützmasse), erzeugen aber sehr wenig Schub. Der geringe Treibstoffbedarf erlaubt indessen viel längere Missionen. Das Prinzip dieser Aggregate beruht darauf, dass in der reibungsfreien Umgebung des Weltraums auch kleine Kräfte, sofern sie lange wirken, zu hohen Geschwindigkeiten führen. Damit sind sie besonders für weite Reisen geeignet, die auch zu mehreren Zielen führen können. (Als »Missionsbeginn« bezeichnet die stark vereinfachende Grafik den Zeitpunkt, zu dem eine Sonde von einer konventionellen Feststoffrakete im All abgesetzt worden ist.)



Hinzu kommt ein letztes großes Problem. Nach jahrelanger Reise besitzt eine Sonde mit chemischem Antrieb häufig nicht mehr genug Treibstoff für ein Bremsmanöver. Um ausgedehnte wissenschaftliche Beobachtungen durchzuführen, müsste sie mit Hilfe ihrer Triebwerke in eine Umlaufbahn um ihr Zielobjekt einschwenken. Mangels Treibstoff ist aber oft nur ein kurzer Vorbeiflug möglich. So wird die 2006 zum Zwergplaneten Pluto aufgebrochene NASA-Sonde New Horizons ihr Missionsziel gerade einmal einen Tag lang beobachten können.

Aber ist denn wirklich keine Abhilfe möglich? Die Antwort liefert die so genannte Raketengleichung, eine Formel, mit der sich die für eine Mission nötige Treibstoffmenge berechnen lässt. Der russische Wissenschaftler Konstantin Ziolkowski, einer der Väter der Raketen- und Weltraumforschung, hatte sie im Jahr 1903 entwickelt. Die Raketengleichung beschreibt die intuitiv verständliche

Tatsache, dass die Geschwindigkeit einer Rakete umso stärker anwächst, je schneller der Treibstoff aus den Antriebsdüsen ausgestoßen wird. Stellen wir uns einen Tennisspieler (den Raketenmotor) mit einem Beutel voller Tennisbälle (dem Treibstoff) auf einem Skateboard (dem Raumschiff) vor. Je größer nun die Geschwindigkeit, mit der der Tennisspieler die Bälle nach hinten schlägt, desto höher ist die Geschwindigkeit, mit der sich das Skateboard nach vorn bewegt. Die auf diese Weise schrittweise erreichbare Geschwindigkeitszunahme bezeichnen Wissenschaftler als »Delta-v«.

Die Raketengleichung stellt also einen Zusammenhang her zwischen der Ausstoßgeschwindigkeit des Treibstoffs, dem Delta-v eines Manövers während einer Mission und der dafür nötigen Treibstoffmenge. Anders gesagt: Bei vorgegebener Raketentechnik – von ihr hängt die erreichbare Ausströmgeschwindigkeit ab – liefert die Raketengleichung die für ein gewünschtes Delta-v nötige Treibstoffmenge. Die Delta-v-Metrik ist deshalb eine Art »Preisschild«, denn die Kosten für die Beförderung des Treibstoffs dominieren typischerweise die Gesamtkosten einer Mission.

Konventionelle chemische Raketen besitzen indessen nur geringe Ausstoßgeschwindigkeiten von etwa drei bis vier Kilometer pro Sekunde. Außerdem führt der exponentielle Charakter der Raketengleichung dazu, dass der Anteil des Treibstoffs an der Startmasse des Raumfahrzeugs exponentiell mit Delta-v anwächst: Ist für eine Mission zu einem Ziel im äußeren Sonnensystem ein hohes Delta-v erforderlich, muss fast die gesamte Startmasse des Raumschiffs aus Treibstoff bestehen.

Dann aber kann die wissenschaftliche Nutzlast nur gering ausfallen. Um etwa aus einer niedrigen Erdumlaufbahn zum Mars zu fliegen, ist ein Delta-v von 4,5 Kilometer pro Sekunde (km/s) nötig. Aus der Raketengleichung ergibt sich, dass für eine solche Reise zwei Drittel der Raumschiffmasse aus Treibstoff bestehen müssen. Ambitioniertere Expeditionen zu den äußeren Planeten erfordern sogar ein Delta-v von 35 bis 70 km/s, der entsprechende Treibstoffanteil müsste schon mehr als 99,98 Prozent der Anfangsmasse betragen!

Je weiter hinaus die Reise also führt, desto weniger kommen chemische Antriebe in Frage. Es sei denn, die Ingenieure fänden einen Weg, die Ausströmgeschwindigkeiten signifikant zu erhöhen. Das aber würde extrem hohe Verbrennungstemperaturen erfordern, die nicht ohne Weiteres realisierbar sind. Sie sind einerseits durch die bei den üblichen chemischen Reaktionen frei werdende Energie begrenzt, andererseits durch den Schmelz-

punkt des Materials, aus dem Brennkammern und Düsen bestehen.

Die Ausströmgeschwindigkeiten elektrischer Antriebe sind hingegen von vornherein deutlich höher. Die Aggregate verbrennen keinen chemischen Treibstoff, sondern erzeugen Schub, indem sie ionisierte Gase oder Plasmen auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigen. Dazu führt man ihnen zunächst mittels Laser, Mikrowellen, Radiostrahlung oder starker elektrischer Felder Energie zu, so dass aus den Atomen oder Molekülen des Gases Elektronen freigesetzt werden. Diese können sich dann frei im Gas bewegen, während positiv geladene Ionen zurückbleiben. (Solche Plasmen sind darum bessere elektrische Leiter als Kupfer.) Nun lässt sich die Bewegung der elektrisch geladenen Teilchen beeinflussen, indem man zusätzliche elektrische oder magnetische Felder anlegt, welche die Teilchen beschleunigen und aus der Antriebsdüse ausstoßen. Weil den Gasen die nötige Energie erst zugeführt werden muss, werden sie von Ingenieuren korrekter als Stützmasse bezeichnet, in Abgrenzung zum Begriff des Treibstoffs, bei dem es auf dessen chemische Energie ankommt.

Kernreaktor an Bord?

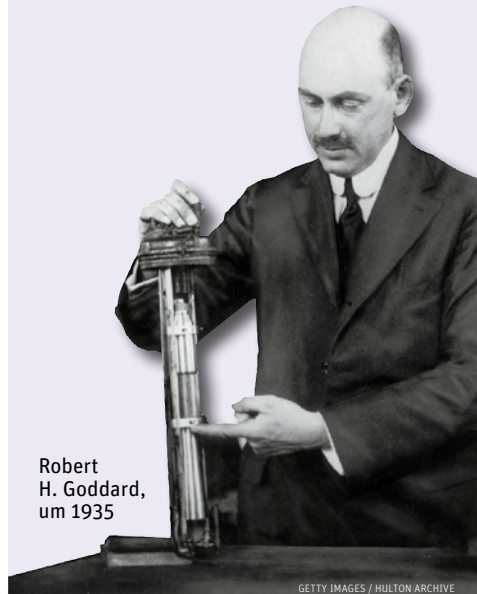
Die nötigen Felder werden mit Elektroden und Magneten erzeugt, per Induktion durch externe Spulen oder indem man elektrischen Strom durch das Plasma leitet. Die elektrische Energie für die Erzeugung des Plasmas und die Beschleunigung der Partikel liefern typischerweise Solarzellen. Doch Ziele jenseits der Marsbahn, wo solche Zellen zu wenig Licht einfangen, machen nukleare Energiequellen erforderlich. Kleine robotische Sonden stattdessen man daher mit thermoelektrischen Geräten aus, in denen der Zerfall nuklearer Isotope Wärme erzeugt. Die anspruchsvolleren Mis-

sionen der Zukunft benötigen indessen Kernspaltungs- oder gar Kernfusionsreaktoren. Beim Start wäre das nukleare Brennmaterial natürlich in geschützten Behältern untergebracht, und aktiviert würde ein solcher Reaktor erst, wenn sich das Raumfahrzeug in einer stabilen Umlaufbahn oder in sicherer Entfernung von der Erde befindet.

Drei Varianten elektrischer Antriebe haben die Entwicklungsingenieure mittlerweile so optimiert, dass sie für lang andauernde Weltraummissionen zum Einsatz kommen können, darunter der auch von Dawn genutzte Ionenantrieb. Er geht auf Ideen des amerikanischen Raketepioniers Robert H. Goddard zurück, die dieser vor rund einem Jahrhundert bei seinem Studium am Worcester Polytechnic Institute im US-Bundesstaat Massachusetts entwickelte. Ionenantriebe beziehen ihre Energie meist aus Solarzellen und erreichen Ausströmgeschwindigkeiten von 20 bis 50 km/s (siehe Kasten S. 36). Das Aggregat sieht in der Regel wie ein gedrungener Zylinder aus, nicht viel größer als ein Eimer, der am hinteren Ende des Raumfahrzeugs sitzt. Im Inneren des Zylinders strömt Xenongas aus dem Treibstofftank in eine Ionisationskammer. Dort entziehen elektrische Felder den Xenonatomen Elektronen, es entsteht also ein Plasma. Diesem entzieht ein zwischen zwei Elektrodengittern angelegtes elektrisches Feld die positiven Ionen und beschleunigt sie auf hohe Geschwindigkeiten in Richtung der Auslassöffnung.

Sobald ein positiv geladenes Ion aus dem Raumfahrzeug austritt, lässt es dieses allerdings mit einer negativen Nettoladung zurück. Vergrößerte sich die Ladung über längere Zeit hinweg immer weiter, bliebe irgendwann der Schub aus, denn sie würde die ausgestoßenen Ionen wieder zum Raumfahrzeug zurückziehen. Darum injiziert eine ex-

DIE FRÜHE GESCHICHTE DER ELEKTRISCHEN RAKETEN



Robert H. Goddard, um 1935

GETTY IMAGES / HULTON ARCHIVE

1903: Konstantin E. Ziolkowski entwickelt die Raketengleichung. In den folgenden Jahren spekuliert auch er bereits über elektrische Antriebe.

1906/07: Robert H. Goddard formuliert in seinen Notizen die Idee, die elektrostatische Beschleunigung geladener Teilchen als Raketenantrieb zu nutzen. Später erfindet er einen Vorgänger des Ionenantriebs und lässt ihn 1917 patentieren.

1954: Bei theoretischen Arbeiten findet Ernst Stuhlinger Möglichkeiten, Ionenantriebe zu optimieren. Später wird er wichtiger Berater bei deren Bau.

1962: Auf Basis von Forschungsarbeiten in der Sowjetunion, Europa und den USA wird von G. Seikel, F. Salz, E. Lary et al. die erste Beschreibung eines Halleffekt-Triebwerks veröffentlicht.

1962: Adriano Ducati entdeckt die Technik des magnetoplasmadynamischen Triebwerks.

1964: Mit SERT-1 testet die NASA erstmals einen Ionenantrieb bei einem suborbitalen Flug in den Weltraum.

1972: Sowjetische Meteor-Wettersatelliten verwenden die ersten Halleffekt-Triebwerke im Weltall.

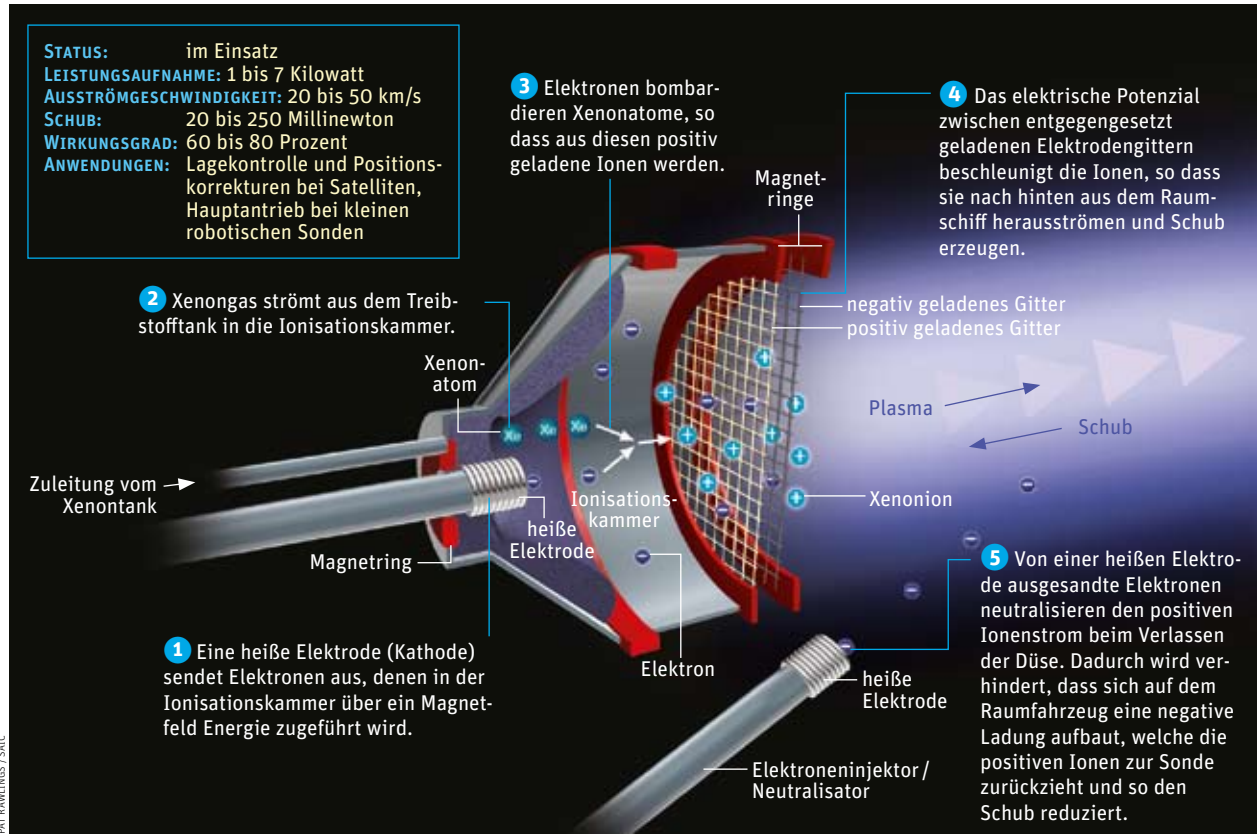
1998: Die von der NASA entwickelte Sonde Deep Space 1 verwendet zum ersten Mal ein Ionenantrieb als Hauptantrieb einer Mission, die das Schwerefeld der Erde verlässt.



IONENTRIEBWERK: DAS ARBEITSPFERD UNTER DEN ELEKTRISCHEN ANTRIEBEN

In diesem Aggregat wird ein neutrales Gas mit Elektronen aus einer heißen Elektrode bombardiert. Die entstehenden positiven Ionen werden mit Hilfe von elektrischen Feldern aus dem Plasma herausgezogen, beschleunigt und entgegen der Flugrichtung aus-

gestoßen. Eine zwischen zwei Elektrodengittern angelegte Hochspannung erzeugt das für die Beschleunigung der Ionen nötige elektrische Feld. Der Ausstoß der Ionen aus dem Raumschiff erzeugt schließlich einen Schub in die entgegengesetzte Richtung.



Geladene Xenonatome verursachen das blaue Glühen in diesem Ionenantrieb. Das Bild zeigt ein in einer Vakuumkammer testweise gezündetes Aggregat mit einem Durchmesser von rund 40 Zentimetern.

terne Elektronenquelle – eine negative Kathode oder eine Elektronenkanone – Elektronen in den positiven Ionenfluss, um ihn elektrisch zu neutralisieren. So bleibt auch das Raumfahrzeug als Ganzes neutral.

Dutzende kommerzieller Satelliten sind derzeit mit Ionenantrieben ausgestattet, was den Betreibern jeweils mehrere Millionen Euro Kosten erspart. Vor allem Kommunikationssatelliten in geostationären Umlaufbahnen korrigieren damit ihre Position und Ausrichtung. Die erste Raumsonde mit elektrischem Antrieb, die auch die Erdumlaufbahn verließ, startete allerdings erst 1998. Mit weniger als 74 Kilogramm Xenon als Treibstoff erreichte Deep Space 1 ein Delta-v von 4,3 km/s und durchflog den staubigen Schweif des Kometen Borrelly. Das ist der bislang höchste Geschwindigkeitszuwachs, den ein Raumfahrzeug durch seinen eigenen Antrieb erreichte, nur mit Fly-by-Manövern hat man schon mehr erzielt. Die Sonde Dawn soll diesen Rekord mit einem Wert von 10 km/s

demnächst brechen. Unlängst gelang Ingenieuren des Jet Propulsion Laboratory auch der Nachweis, dass Ionenantriebe über drei Jahre lang fehler- und unterbrechungsfrei arbeiten können.

Das Leistungsvermögen elektrischer Antriebe hängt außer von der Ausströmgeschwindigkeit auch von der Schubdichte ab. Darunter versteht man die Schubkraft pro Einheitsfläche der Austrittsöffnung. Diese lässt sich nicht beliebig erhöhen. Denn ein großer Nachteil von Ionenantrieben und ähnlichen elektrostatischen Raketenmotoren ist die so genannte Raumladungsbegrenzung. Wenn die positiven Ionen die elektrostatischen Gitter im Ionenantrieb passieren, bildet sich in diesem Bereich unvermeidlich eine positive Raumladung und begrenzt die Stärke des beschleunigenden elektrischen Felds. Aus diesem Grund ist die Schubkraft, die der Ionenantrieb von Deep Space 1 erzeugt, nicht stärker als die Gewichtskraft eines einzigen Blatts Papier. Mit donnernden Raketenmotoren hat das wenig

zu tun, eher schon mit einem Auto, das zwei Tage benötigt, um von 0 auf 100 Kilometer pro Stunde zu beschleunigen. Typischerweise aber hat eine Sonde mehrere Monate Zeit – das reicht, damit ihr Ionenantrieb das nötige Delta-v für eine Reise in das äußere Sonnensystem liefert. Schließlich gibt es im Vakuum des Weltalls keine Reibung, die das Gefährt wieder ausbremst. Vielmehr kann es seine Geschwindigkeit langsam und allmählich auf immer höhere Werte steigern.

Bald mit höherer Schubdichte unterwegs

Eine Alternative zum Ionenantrieb ist der so genannte Halleffekt-Antrieb (englisch: *Hall thruster*, siehe Kasten rechts), bei dem die Raumladungsbegrenzung nicht zum Tragen kommt und der deshalb eine höhere Schubdichte erreicht. Entwickelt worden war er im Verlauf von rund drei Jahrzehnten zunächst in der Sowjetunion. Seit den frühen 1990er Jahren findet er auch in den anderen Raumfahrtmissionen Anerkennung und wird bald für Missionen zu fernen Zielen einsatzbereit sein. Sein Funktionsprinzip basiert auf dem 1879 von Edwin H. Hall entdeckten und nach diesem benannten Halleffekt. Während seines Studiums an der Johns Hopkins University im US-Bundesstaat Maryland war dem Physiker aufgefallen, dass im Inneren eines elektrischen Leiters, den man einem Magnetfeld und einem senkrecht dazu stehenden elektrischen Feld aussetzt, ein elektrischer (Hall-)Strom zu fließen beginnt, und zwar senkrecht zu den beiden Feldern.

In Halleffekt-Antrieben sorgen eine innere positive Anode und eine äußere negative Kathode für elektrische Entladungen in einem neutralen Gas, das sich daraufhin in Plasma verwandelt. Die Wechselwirkung zwischen einem radialen Magnetfeld und einem elektrischen Hallstrom, der in azimuthaler Richtung fließt, also in einer Art Kreisbahn um die zentrale Achse, lässt schließlich eine Lorentzkraft wirken, die das Plasma aus dem Antriebszylinder heraus beschleunigt. Der Hallstrom in diesem System wiederum ist eine Konsequenz aus der Kombination von Magnetfeld und elektrischem Feld.

Abhängig von der verfügbaren Energie lassen sich so Ausströmgeschwindigkeiten von 10 bis zu mehr als 50 km/s erreichen. Zur Entstehung einer Raumladung kommt es dabei gar nicht erst, da das gesamte Plasma ausgestoßen wird, also sowohl positive Ionen als auch negative Elektronen. Schubdichte und Schubkraft und damit auch das erreichbare Delta-v sind daher um ein Mehrfaches höher als bei einem Ionenantrieb gleicher Größe.

HALL THRUSTER: DER HERAUSFORDERER

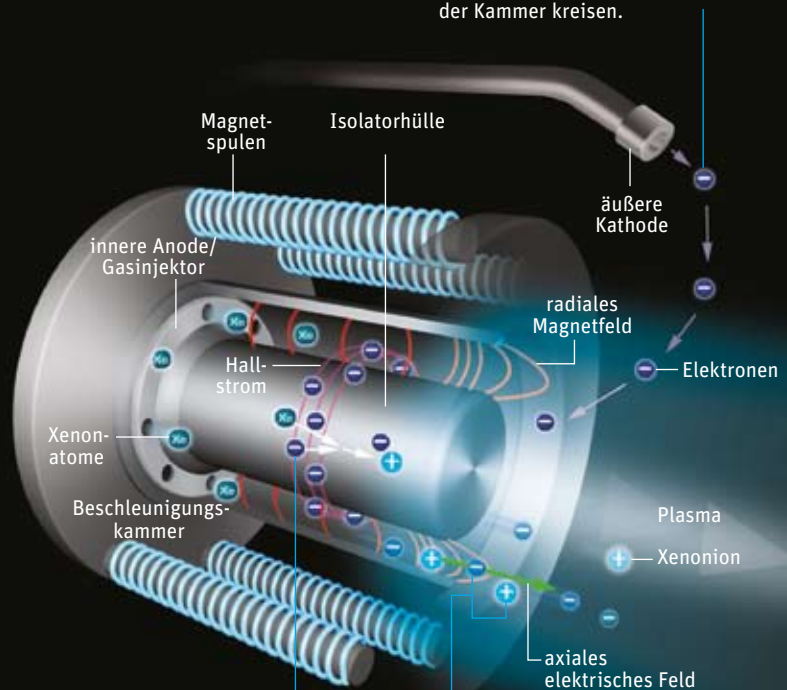
Der Halleffekt-Antrieb erzeugt Schub, indem in seinem Inneren ein so genannter Hallstrom mit einem radialen Magnetfeld gekreuzt wird. Die Elektronen, die als Hallstrom um die Achse der Maschine kreisen, entreißen Xenonatomen deren Elektronen, ionisieren sie also. Ein parallel zur Achse verlaufendes elektrisches Feld beschleunigt die Ionen schließlich zum rückwärtigen Ende des Aggregats. Die Schubdichte eines Halleffekt-Antriebs übertrifft die eines Ionenantriebs, weil sowohl die positiven Ionen als auch die negativen Elektronen ausgestoßen werden. So baut sich keine positive Ladung auf, welche die Stärke des beschleunigend wirkenden elektrischen Felds begrenzen würde.

1 Ein elektrisches Feld zwischen einer äußeren negativen Kathode und einer inneren positiven Anode erzeugt ein im Wesentlichen axiales elektrisches Feld im Inneren der Beschleunigungskammer.

2 Wird die Kathode aufgeheizt, sendet sie Elektronen aus. Einige dieser Elektronen treiben auf die Anode zu. Sobald sie in die Beschleunigungskammer eintreten, führen das radiale Magnetfeld und das axiale elektrische Feld dazu, dass sie als Hallstrom um die Achse der Kammer kreisen.

3 Ein Injektor an der positiven Anode speist Xenongas in die ringförmige Beschleunigungskammer ein. Die dort kreisenden Elektronen stoßen mit den Xenonatomen zusammen und ionisieren sie.

4 Die von der Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und Hallstrom erzeugten elektromagnetischen Kräfte beschleunigen das Plasma aus Ionen und Elektronen in rückwärtige Richtung.



STATUS: im Einsatz
LEISTUNGS-AUFNAHME: 1,35 bis 10 Kilowatt
AUSSTRÖMGESCHWINDIGKEIT: 10 bis 50 km/s
SCHUB: 40 bis 600 Millinewton
WIRKUNGSGRAD: 45 bis 60 Prozent
NUTZUNG: Lagekontrolle und Positionskorrektur bei Satelliten, Hauptantrieb bei robotischen Sonden mittlerer Größe

PAT RAWLINGS / SAIC, NACH: Y. BATSIS ET AL.: PLUME REDUCTION IN SEGMENTED ELECTRODE HALL THRUSTER. IN: J. APPL. PHYS. 88(3), AUGUST 2000.

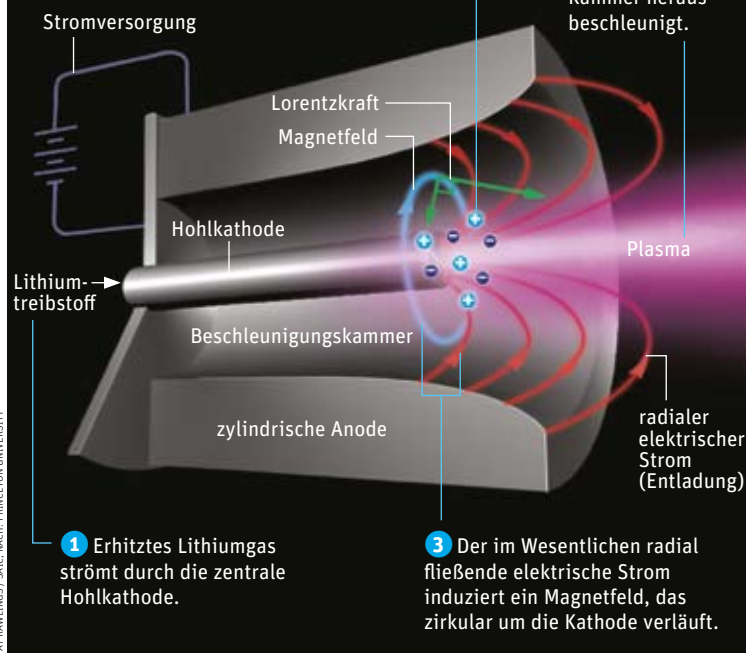
MPD: DIE ZUKUNFT DES PLASMAANTRIEBS

Ein magnetoplasmadynamischer Antrieb (MPD-Antrieb) beruht darauf, dass die Lorentzkraft ein Plasma beschleunigt und aus der Beschleunigungskammer ausstößt. Diese elektromagnetische Kraft (grüne Pfeile), deren wichtigste Komponente parallel zur Achse verläuft, entsteht durch Wechselwirkung eines in radialer Richtung fließenden Stroms (rote Linien) mit einem konzentrischen Magnetfeld (blauer Kreis).

STATUS: im Flug getestet, noch nicht im Einsatz
LEISTUNGS-AUFNAHME: 100 kW bis 1 Megawatt
AUSSTRÖMGESCHWINDIGKEIT: 15 bis 60 km/s
SCHUB: 2,5 bis 25 Newton
WIRKUNGSGRAD: 40 bis 60 Prozent
ENTWICKLUNGSZIEL: Hauptantrieb für schwere unbemannte und bemannte Raumfahrzeuge

2 Sobald Lithiumgas in die Beschleunigungskammer eintritt, werden die Lithiumatome durch eine elektrische Entladung zwischen Kathode und zylindrischer Anode ionisiert; ein Plasma bildet sich.

4 Der radiale elektrische Strom und das von ihm induzierte Magnetfeld erzeugen eine Lorentzkraft, die das Plasma aus der Kammer heraus beschleunigt.



1 Erhitztes Lithiumgas strömt durch die zentrale Hohlkathode.

3 Der im Wesentlichen radial fließende elektrische Strom induziert ein Magnetfeld, das zirkular um die Kathode verläuft.

Schritt in diese Richtung gelang Wissenschaftlern des Princeton Plasma Physics Laboratory in New Jersey, als sie segmentierte Elektroden in die Wandung eines Halleffekt-Antriebs integrierten. Diese Elektroden formen das interne elektrische Feld so, dass sich das Plasma in einem dünnen Strahl bündeln lässt. Dies reduziert die Radialkomponente des Schubs, die für den Antrieb nutzlos ist, und verlängert außerdem die Lebensdauer des Systems, weil der Plasmastrahl von der Wandung der Antriebskammer ferngehalten wird. Ein ähnlicher Fortschritt gelang deutschen Ingenieuren mit Hilfe speziell geformter Magnetfelder. Forscher der kalifornischen Stanford University konnten wiederum zeigen, dass die Beschichtung der Wandungen mit einer synthetischen polykristallinen Diamantschicht deren Widerstandsfähigkeit gegen Erosion durch das Plasma erheblich verbessert.

Mit einem Megawatt durchs All

Wie aber lässt sich die Schubdichte eines elektrischen Antriebs noch weiter erhöhen? Man könnte schlicht eine größere Menge an Plasma beschleunigen. Doch wenn die Plasmadichte im Halleffekt-Antrieb steigt, stoßen die Elektronen häufiger mit Atomen und Ionen zusammen – und damit wird es schwieriger, den für die Beschleunigung nötigen Hallstrom aufrechtzuerhalten. Eine echte Alternative bietet der magnetoplasmadynamische oder MPD-Antrieb. Statt des Hallstroms dient hier eine parallel zum elektrischen Feld ausgerichtete Stromkomponente zur Beschleunigung (siehe Kasten links). Dieser Strom ist auf Grund seiner Richtung weniger anfällig für Kollisionen mit Atomen und erlaubt daher eine höhere Plasmadichte.

Ein MPD-Antrieb besteht im Wesentlichen aus einer zentralen Kathode, die sich innerhalb einer größeren zylindrischen Anode befindet. Ein Gas, typischerweise Lithium, strömt in den ringförmigen Bereich zwischen Kathode und Anode und wird dort durch den zwischen den Elektroden fließenden Strom ionisiert. Der Strom induziert außerdem ein azimuthales Magnetfeld, dessen Feldlinien um die zentrale Kathode herum verlaufen. Die Wechselwirkung des Magnetfelds mit dem Strom erzeugt eine Lorentzkraft, die das Plasma beschleunigt und Ausströmgeschwindigkeiten von 15 bis 60 km/s erlaubt.

Mit seiner Leistungsaufnahme von bis zu einem Megawatt elektrischer Energie, ob mit Hilfe von Solarzellen oder einer nuklearen Energiequelle erzeugt, übertrifft ein MPD-Antrieb einen Halleffekt-Antrieb bei Weitem. Zudem lässt sich ein MPD-Antrieb einfach drosseln. Indem man die elektrische Strom-

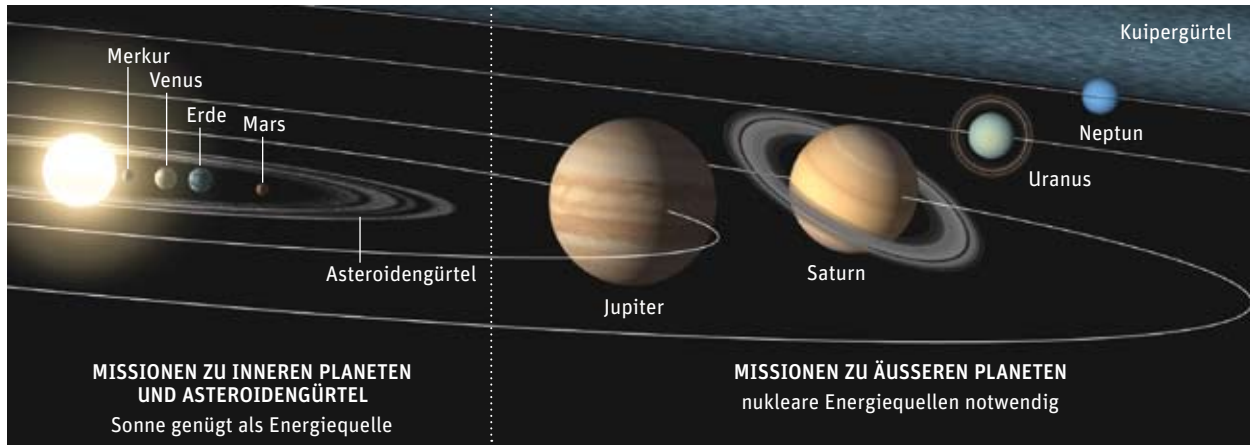
Bereits über 200-mal wurden Satelliten für den Einsatz in der Erdumlaufbahn mit einem Halleffekt-Antrieb ausgestattet, und auch die europäische Sonde SMART-1 erreichte dank eines solchen Aggregats den Mond. Derzeit arbeiten die Ingenieure vor allem daran, größere Systeme zu entwickeln. Für sie soll mehr Energie zur Verfügung stehen, die wiederum für noch höhere Ausströmgeschwindigkeiten und höheren Schub sorgen wird.

Außerdem erlaubt die Lebensdauer der Systeme bislang noch keine mehrjährigen Flüge in das äußere Sonnensystem. Ein wichtiger

SONNEN- ODER KERNENERGIE?

Bei Reisen in das innere Sonnensystem, wo die Sonnenstrahlung stark ist, können Solarzellen einen elektrischen Antrieb mit ausreichend Energie versorgen. Flüge in das äußere Sonnensystem erfordern jedoch nukleare Energiequellen. Große, schwere

Sonden müssten dazu mit einem Kernreaktor ausgestattet werden. Für kleinere Sonden reichen dagegen thermoelektrische Generatoren, die ihre Energie aus der beim Zerfall radioaktiver Elemente frei werdenden Wärme gewinnen.



stärke oder die Einströmrates des Treibstoffs verändert, lassen sich Ausströmgeschwindigkeit und Schub auf einfache Weise regulieren – ideal, um die jeweils optimale Flugbahn einzuhalten.

Durch Erosion der Elektroden sowie durch Plasmastabilitäten und Energiedissipation im Plasma werden Lebensdauer und Leistungsfähigkeit von MPD-Antrieben allerdings eingeschränkt. Neue, leistungsfähigere Antriebe nutzen daher Lithium- und Bariumgase als Treibstoff. Lithium und Barium lassen sich leicht ionisieren, ihre Plasmen weisen geringere Energieverluste auf und helfen auch, die Kathode zu kühlen. Außerdem gaben die Ingenieure der Kathode eine neue Form; sie ist nun mit Kanälen ausgestattet, welche die Wechselwirkung des elektrischen Stroms mit ihrer Oberfläche verändern. Beide Entwicklungen haben die Korrosion der Kathode erheblich verringert und führen allmählich zu zuverlässigeren MPD-Antrieben. Unlängst hat ein Team von Forschern verschiedener Universitäten und der NASA auch den Entwurf eines modernen Lithium-MPD-Antriebs namens α^2 . Mit einer nuklearen Energiequelle ausgestattet, könnte er nicht nur robotische Missionen zu den äußeren Planeten befördern, sondern auch Fracht und Menschen zu Mond und Mars.

Ionen-, Halleffekt- und MPD-Antrieb sind zwar die heute am weitesten entwickelten elektrischen Antriebe, doch in den vergangenen Jahrzehnten haben Forscher eine ganze Reihe weiterer viel versprechender Konzepte entwickelt. Manche Aggregate arbeiten gepulst, an-

dere kontinuierlich. Einige erzeugen Plasma über Entladungen an Elektroden, andere nutzen die Induktion durch Magnetspulen oder von Antennen eingestrahelte Energie. Auch die Methoden zur Beschleunigung des Plasmas variieren: Einige basieren auf der Lorentzkraft, andere verwenden magnetisch erzeugte Strom- »Schichten« oder wandernde elektromagnetische Wellen. Einer der Entwürfe sieht sogar vor, dass das Plasma durch aus Magnetfeldern geformte »Düsen« ausströmt.

Natürlich werden elektrische Raketen auch in Zukunft langsamer beschleunigen als konventionell angetriebene Raumvehikel. Und doch sind sie oft schneller am Ziel, weil sie bei gleicher Treibstoffzuladung letztlich höhere Geschwindigkeiten erreichen und auf Zeit raubende Fly-by-Manöver verzichten können. Für Marathonflüge zu fernen Zielen im Sonnensystem sind sie daher derzeit ohne Alternative, zumal auch die Entwicklung schnell voranschreitet. Die fortschrittlichsten Entwürfe können heute ein Delta- v von 100 km/s erreichen. Das ist noch viel zu wenig für eine Mission zu den Sternen, aber mehr als genug, um Flüge zu den äußeren Planeten in überschaubaren Zeiträumen durchzuführen. Zu den spannendsten dieser Vorhaben zählt der Versuch, Bodenproben vom Saturnmond Titan zur Erde zu bringen, dessen Atmosphäre der Lufthülle der jungen Erde ähnelt. Eine Sonde mit Plasmaantrieb, die ohne Fly-by-Manöver auskäme und ausreichend Energie-reserven für die nötigen Brems- und Beschleunigungsmanöver besäße, wäre für diese Aufgabe ideal geeignet. ◀



Edgar Y. Choueiri lehrt Raumfahrttechnik und Angewandte Physik an der Princeton University. Er leitet dort das Electric Propulsion and Plasma Dynamics Laboratory sowie das Programm Engineering Physics.

Choueiri, E. Y.: A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906 – 1956). In: Journal of Propulsion and Power 20(2), S. 193 – 203, 2004.

Goebel, D. M., Katz, I.: Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. Wiley-VCH, Weinheim, Berlin 2008.

Woodcock, G. et al.: Benefits of Nuclear Electric Propulsion for Outer Planet Exploration. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1015394.



Phantom im Eis

Wie Gasbläschen ein Fahrrad am Grund eines Sees auf dessen zugefrorene Oberfläche projizieren

Es gab eine Zeit, in welcher der Aasee im westfälischen Münster vielfach als letzte Ruhestätte für Fahrräder missbraucht wurde. Eines von ihnen scheint auf geheimnisvolle Weise und mit bemerkenswerter Originaltreue unter die Eisschicht des zugefrorenen Sees projiziert worden zu sein.

Lagern Gegenstände einige Zeit unter Wasser, siedeln sich auf ihnen Mikroorganismen und Algen an. Diese geben Gase in Form winziger Bläschen ab, die meist unbemerkt zur Oberfläche aufsteigen. Beginnt der See allerdings zuzufrieren, können sie nicht in die Atmosphäre übergehen, sondern bleiben unter der zunächst noch dünnen Eisschicht hängen. Dort sammeln sie sich in Blasen an, die – weil die Eisschicht weiter nach unten wächst – schließlich von Eis umgeben und eingeschlossen werden. Später aufsteigende Blasen steigen nur noch bis zur jeweils neuen Eisgrenze und werden ebenso konserviert.

So entsteht allmählich eine vielschichtige Blasensäule, deren dreidimensionale Struktur einiges über die Temperaturverhältnisse während des Zufrierens der Eisfläche aussagt. Geht man von einer konstanten Gasproduktionsrate aus, so zeugen kleine Blasen in einer horizontalen Schicht von deren schnellem Zufrieren in einer kalten Nacht. Denn bevor sich eine größere Menge Gas ansammeln konnte, war die Blase auch schon vom Eis umschlossen. Je langsamer die Eisdicke hingegen wächst, desto größere Exemplare bilden sich.

Die auf der Oberfläche des Fahrrads entstehenden Bläschen lösen sich ab, sobald ihre mit dem Volumen zunehmende Auftriebskraft größer wird als die Adhäsionskraft, mit der sie daran haften. Sie steigen dann senkrecht auf und sammeln sich zu mehr oder weniger großen Blasen. So bilden sie die Umrisse des Rads ziemlich größengetreu in der Eisschicht ab, während das allmähliche Zufrieren sogar für eine räumliche Struktur sorgt. Die Randlinien wiederum heben sich besonders ab, weil hier alle Blasen eintreffen, die von den nicht der Eisfläche zugewandten Fahrradteilen stammen. Denn diese müssen erst zum seitlichen Rand etwa des Rahmens hochdriften, bevor sie senkrecht aufsteigen können.

Warum aber erscheinen die eingefrorenen Gasblasen so weiß? Eigentlich sollten sie wie auch das Eis durchsichtig und nur auf Grund der Lichtbrechung an den Grenzflächen überhaupt zu sehen sein. Doch das Gas in den aufsteigenden Blasen ist mit Wasserdampf aus dem umgebenden Wasser gesättigt. Sobald es im kalten Eis eingefroren ist, wird dessen Taupunkt unterschritten und der überschüssige Wasserdampf gefriert sofort zu Eis. Im Blaseninneren bildet sich daher eine Raureifschicht aus winzigen Eiskristallen, die das Licht diffus streut und die Kristalle ähnlich wie Schnee weiß erscheinen lässt. Übrigens kann ein nur beiläufiger Blick auf das Foto leicht täuschen – die Luftblasen stammen von einem Rad, das im Bild gar nicht zu sehen ist. ◁

Das in die Eisdecke des westfälischen Aasees »gemalte« Fahrrad (links) besteht aus »Türmen« eingefrorener Gasblasen (unten).



LINKS: STEFFEN HARTMANN; RECHTS: H. JOACHIM SCHLICHTING



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

STEREOSEHEN

Mit allen beiden sehen Sie besser!

Mit zwei Augen (keineswegs mit dem zweiten allein!) sehen Sie geeignete flache Bilder echt dreidimensional, oder Sie sehen schlagartig die Unterschiede zwischen Original und Fälschung. Hauptsache: Sie spielen dabei.



Von Norbert Treitz

Was machen Sie, wenn Sie ein Auge schließen und trotzdem Kaffee in eine Tasse gießen sollen, ohne mit den Händen die Entfernungen zu tasten? Wackeln Sie mit dem Kopf. Ihr Gehirn empfängt dann zwei geringfügig verschiedene Netzhautbilder, und zwar nicht, wie üblich, gleichzeitig von beiden Augen, sondern nacheinander, kann aber immer noch aus den Unterschieden auf die Entfernungen schließen – jedenfalls wenn Sie mit beiden Augen räumlich sehen können. Diese Fähigkeit kann insbesondere durch unbehandeltes Schielen in der Kindheit gestört sein.

Die beiden Netzhautbilder unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, dass der nahe Gegenstand gegenüber dem fernen Hintergrund um einen kleinen Winkel versetzt erscheint (Bild unten). Um also mit zwei bloßen Augen – in deren naturgegebenem Abstand – Entfernungen zu schätzen, braucht man ein gutes Winkelauflösungsvermögen der Augen. Dieses ist wie bei jedem abbildenden System einerseits begrenzt durch die wellenoptischen Beugungseffekte – je kleiner der effektive Linsendurchmesser, desto schlechter –, andererseits durch die Struktur, auf der das reelle Bild entsteht: die Pixelgröße in der Digitalkamera, die Körnigkeit beim Film, der Abstand der Sehzellen im Auge. Beim Menschen handelt es in der Netzhautmitte fast ausschließlich um die Zapfen (bitte nicht als Zäpfchen bezeichnen: solche gibt es im Hals oder auch aus der Apotheke).

In der Evolution sind die Zapfen nicht wesentlich kleiner geworden als die wellenoptische Begrenzung; das hätte ja auch keinen Zuwachs an Information geliefert. Dass unsere Augen und die anderer Wirbeltiere nicht wesentlich größer geworden sind, mag daran liegen, dass dann optische Inhomogenitäten Unschärfen liefern würden, wie ja auch Linsenteleskope bei Weitem nicht so groß gebaut werden wie Spiegelteleskope, bei denen nur die Oberfläche optisch einwandfrei sein muss.

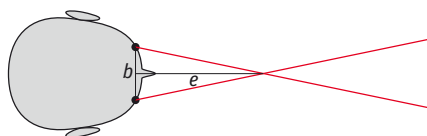
Damit bestimmt zunächst die Zapfengröße das Winkelauflösungsvermögen: Damit man zwei Objekte als getrennt erkennt, muss zwischen zwei beleuchteten Zapfen mindestens einer dunkel bleiben. Damit kommt man auf etwa 1/120 Grad oder 30 Winkelsekunden. Den Verlauf beispielsweise einer langen geraden Grenze zwischen hell und dunkel kann das Gehirn noch etwas genauer rekonstruieren, indem es die auf teilweise beleuchtete Zapfen einfallende Lichtmenge verrechnet; dadurch kann es etwa ein Drittel eines Zapfendurchmessers noch erkennen und kommt auf eine Hypersehschärfe von etwa 10 Bogensekunden oder 0,00005 im Bogenmaß. Sie heißt Noniensehschärfe nach dem Noni-

us, einer mechanischen Vorrichtung zur Verbesserung der Ablesegenauigkeit.

Um von zwei Gegenständen in den Entfernungen e und $e+d$ in benachbarten Blickrichtungen das Vorzeichen von d erkennen zu können, benötigen wir die Noniensehschärfe $s = |b|e - b|(e+d)|$. Dabei ist b der Augenabstand, allgemeiner die »Stereobasis«, also zum Beispiel der Abstand der Kamerapositionen bei einem Stereobildpaar. Aus dieser Gleichung folgt $|d| \approx e^2 s / b$. Sind also b und s von der Natur (oder der Technik) vorgegeben, so ist d im Wesentlichen proportional dem Quadrat von e . Damit ist unser Bereich für unmittelbar, das heißt ohne Vorkenntnis vom Objekt erfahrbare Entfernungen nach oben durch die Größenordnung von 100 Metern begrenzt.

Doppelbilder sehen

Wer mit nur einer Kamera ein Stereobildpaar anfertigen möchte, muss von einem Bild zum anderen die Kamera ein Stück nach rechts oder links verschieben oder – bei diffusem Hintergrund – das Objekt geringfügig um eine vertikale Achse drehen. Wenn Sie Stereobilder im Zoo machen wollen, fotografieren Sie sinnvollerweise Bäume oder ganz langsame Tiere. Ich verbeiße mir hier Witze



Der Winkel, um den ein nahes Objekt vor dem weit entfernten Hintergrund zu springen scheint, wenn man von einem auf das andere Auge wechselt, ist gleich dem Winkel, um den die Augen, vom Gegenstand aus gesehen, voneinander entfernt sind.



Der technische Ersatz für Stielaugen: Durch Paare schräg gestellter Spiegel stellt sich die Welt für Tim so dar, als wäre sein rechtes Auge (Bild links) oder sogar beide Augen (Bild ganz links) nach außen verschoben. Dank dem so vergrößerten Augenabstand kann er auch bei Gegenständen am Horizont deren unterschiedliche Entfernungen auf einen Blick erkennen.

über gewisse Berufsstände oder Bewohner bestimmter Städte, die auch auf Fotos mit riesigen Belichtungszeiten nicht verwickelt erscheinen. Dankbare Objekte sind nachgemachte Tiere an Stelle der echten oder auch geometrische Konstruktionen, deren räumliche Struktur ein Stereobildpaar eindrucksvoll vor beide Augen führt (Bild unten).

Bei der Wiedergabe stereografischer Bildpaare darf jedes Auge nur das Teilbild in den Blick nehmen, das für dieses Auge vorgesehen ist. Das kann der Betrachter mit Augenmuskeltraining oder optischen Ablenkungen erreichen; oder die Einzelbilder stehen nicht nebeneinander, sondern bedecken eine gemeinsame Fläche und werden über getrennte Kanäle den beiden Augen zugeführt.

Betrachten wir ein Ding direkt vor unserer Nase, so drehen sich unsere Augäpfel einwärts, und die Linse wird zur Scharfeinstellung (»Akkommodation«) kontrahiert. Wir sind es gewohnt, beide Bewegungen stets gekoppelt auszufüh-

ren; diese Kopplung muss man sich für die Betrachtung von Stereobildpaaren abgewöhnen, weil Blickrichtung und Akkommodation nicht zueinanderpassen. Die Auflösung einer solchen nervösen Kopplung erfordert geduldiges Üben (versuchen Sie mal, einen kleinen Finger zu krümmen und dabei den benachbarten Ringfinger frei im Raum gestreckt zu lassen ...); die Mühe wird belohnt, wenn plötzlich das räumliche Bild erscheint. Vielleicht kennen Sie das noch von den vor einigen Jahre in Mode gekommenen Autostereogrammen (»Magic Eye«, siehe Spektrum der Wissenschaft 1/1995, S. 10).

Sind die Einzelbilder kleiner als der Augenabstand, kann man die Augen nahezu parallel ausrichten, als würde man in eine große Entfernung sehen. Sind dann statt vier Bildern nur drei zu sehen, so muss man diese Blickrichtungen beibehalten und trotzdem »scharf stellen«. Stellt man die Bilder jedoch umgekehrt nebeneinander (links das Bild für das

rechte Auge und umgekehrt), so muss man überkreuz schielen und passend akkommodieren, was viele Menschen als etwas schwieriger empfinden; man hat aber dann für die Größe der Bilder keine Einschränkungen.

Ganz ohne Augenmuskelakrobatik geht es mit Spiegeln, Prismen oder Lupen. Manchen Büchern sind Prismen beigelegt, mit denen man die seitlich oder nach oben und unten nebeneinander versetzten Halbbilder mühelos ansehen kann. Stereoskope sind Halterungen für zwei Halbbilder (etwa Diapositive) genau geradeaus vor Ihren beiden Augen, mit je einer Lupe, die den Abstand zwischen Dia und Auge als Brennweite hat. So richten Sie Ihre Augen parallel nach vorne und akkommodieren dazu passend ins Unendliche, die Lupen gleichen das dann aus.

Beliebig große Halbbilder können Sie an die rechte und die linke Zimmerwand hängen und dann mit zwei Taschenspiegeln vor den Augen ansehen.

Stereobilder zum gewöhnlichen oder Überkreuzschielen. Betrachten Sie das mittlere Bild mit dem linken Auge und eines der beiden (gleichen) anderen mit dem rechten. Rechts ein Känguru mit herausnehmbarem Kind, unten ein Oktaederstumpf mit einigen Diagonalen.





Drei Ansichten der gleichen Hohlform: links von außen, rechts von innen und in der Mitte »im Halbprofil«

Das bekannteste Beispiel für Bilder, die sich eine Fläche teilen, sind die Anaglyphen: Die Teilbilder eines schwarz-weißen Bildpaars werden rot und grün eingefärbt und auf die gleiche Fläche gedruckt (oder projiziert); entsprechende Farbfilter lassen für jedes Auge nur das Passende durch. Strichzeichnungen kann man mit dem Computer oder mit deckenden Farbstiften auf schwarzem Untergrund ausführen, dabei müssen die Schnittbereiche von roten und grünen Linien gelb gefärbt werden.

Es geht auch ohne Verzicht auf bunte Farben. Man projiziert zum Beispiel die linken Bilder eines farbigen Kinofilms mit einem Polarisationsfilter und die rechten Bilder mit einem rechtwinklig dazu orientierten Filter. Dabei füllt jedes Bild die ganze Leinwand. Die Augen bekommen durch passende Polarisations-

filter jeweils nur das zu sehen, was sie sollen.

Eine andere Methode der Kanaltrennung nutzt die Trägheit unseres visuellen Systems. Unser Auge nimmt auch dann noch eine kontinuierliche Bewegung wahr, wenn zwischen den Zeitintervallen, in denen die Einzelbilder eines Films zu sehen sind, genau so lange Pausen liegen. In diesen Pausen wird das jeweils andere Auge bedient. Wie eine Verkehrsampel eine Unterführung ersetzt, aber um den Preis, dass man jede der Straßen immer nur in einem Teil der Zeit befahren kann, gibt man einem Bildschirm abwechselnd die Bilder für die beiden Augen. Vor diese werden dann Brillen (»Shutter«) gesetzt, die passend dazu vom zugehörigen Computer abwechselnd durchsichtig und undurchsichtig geschaltet werden.

Auf Postkarten findet man manchmal Bilder, die aus feinen senkrechten Streifen aus den beiden Teilbildern bestehen und auf die ein ebenso feines Prismenraster aufgeklebt ist. Dieses leitet dem einen Auge die Streifen mit den ge-

raden Nummern und dem anderen die mit den ungeraden zu. Dieser Trick wird nicht nur für Stereobilder benutzt, sondern auch für das Wechseln zwischen zwei ähnlichen Bildern beim leichten Drehen der Karte, was zum Beispiel Augenzwinkern oder die Wirkung kosmetischer Operationen vortäuscht.

Mit einem einfachen Versuch können Sie gleichsam Ihr Gehirn beim Schätzen von Größen und Entfernungen beobachten. Legen Sie zwei genau gleiche Kärtchen (Visiten- oder Spielkarten aus einem Memory- oder einem Rommee-Spiel) vor sich nebeneinander auf den Tisch und schauen Sie überkreuz (einwärts schielend) so, dass nur ein (flaches) Bild zwischen zwei weiteren zu sehen ist. Wenn Sie nun den Abstand der beiden Kärtchen vorsichtig ändern, scheint sich die Größe zu ändern. Das Gehirn berücksichtigt nämlich bei der Größenabschätzung nicht nur die Größe der Netzhautbilder, sondern auch anhand bisheriger Erfahrungen die Einwärtsdrehung der Augenachsen. Es sieht die Karte dort, wo sich die Blicke kreuzen, und wundert sich sozusagen, dass sie trotz der vermeintlichen Nähe so klein aussieht.

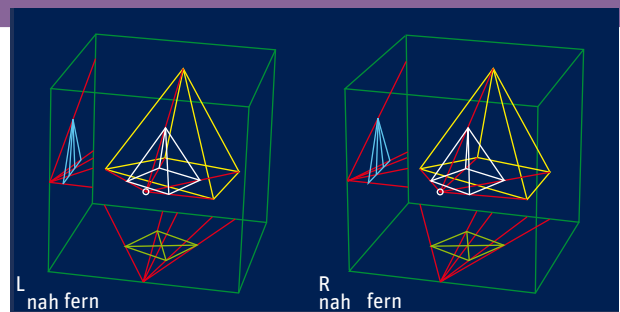
Damit verwandt ist ein Effekt beim Betrachten eines farbnegativen Nachbilds: Man schaut starr, das heißt unter Vermeidung von Augenbewegungen, minutenlang auf ein buntes und gut beleuchtetes Objekt und anschließend auf

STEREOBILDER BERECHNEN

Dieses Bildpaar zeigt seine eigene Entstehung, genauer die von einem der beiden Teilbilder.

Der Würfel deutet ein Koordinatensystem an. In seiner Ihnen zugewandten Wand ist genau in der Mitte das Projektionszentrum (Objektivmitte, Loch einer Lochkamera); die weiße Pyramide ist ein dreidimensionales Objekt, die gelbe Figur an der Ihnen zugewandten Wand ihr zentralprojiziertes ebenes Bild. Die Skizze auf der linken Wand zeigt, wie mit dem Strahlensatz die vertikalen Koordinaten der einzelnen Punkte für das Bild aus denen des Objekts gewonnen werden, die auf dem Boden entsprechend für die waagerechten Koordinaten. Die Zentralprojektion bildet gerade Strecken des Objekts auf gerade Strecken des Bilds ab. Das vereinfacht die Konstruktion von Strichzeichnungen ganz wesentlich. Es sei aber angemerkt, dass gleichstufige Skalen auf einer solchen Geraden durchaus ungleichstufig abgebildet werden können (zum Beispiel bei Eisenbahnschwellen).

Ein einfaches Rechenprogramm sieht etwa so aus: Wir beschreiben unser räumliches Objekt durch seine Eckpunkte mit den Koordinaten (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) und so weiter. Gewisse Eckpunkte sind durch gerade Linien miteinander verbunden.



Von einem Punkt $(0, 0, e)$ als Projektionszentrum wollen wir die Punkte (x_j, y_j, z_j) in die Ebene $z = 0$ auf die Punkte (u_j, v_j) in Zentralperspektive abbilden. Die Strahlensätze liefern $u_j = x_j e / (z_j + e)$ und $v_j = y_j e / (z_j + e)$. Damit ist eins der beiden Teilbilder fertig. Für das zweite müssten wir eigentlich ein anderes Zentrum wählen. Wir können aber stattdessen das Objekt um einen passenden Winkel ϕ um eine senkrechte Achse drehen. Das geschieht mit folgender Abbildung:

$$\begin{aligned} x_j' &= x_j \cos(\phi) + y_j \sin(\phi) \\ y_j' &= -x_j \sin(\phi) + y_j \cos(\phi) \\ z_j' &= z_j \end{aligned}$$

CHRISTOPH POPPE, NACH NORBERT TREITZ

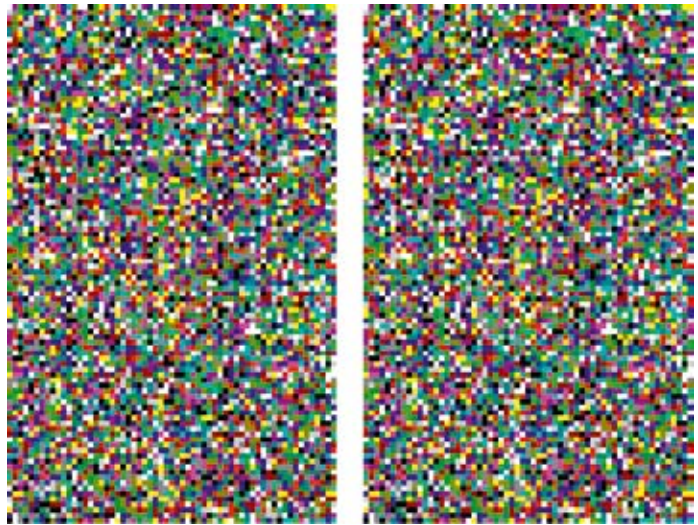
FEHLERSUCHE AUF EINEN BLICK

Wer in einem sehr detailreichen Bild und einer Kopie desselben mit einigen abweichenden Stellen diese Fehler finden soll, richte jedes Auge auf eins der Bilder und betrachte sie wie ein Stereopaar. Schon sieht man ein auffallend flaches Bild mit Löchern an den Fehlerstellen. Man braucht dann die Zeit nur noch zum Ablesen und nicht zum Suchen. Das hat ein pfiffiger Mensch in der Fernsehsendung »Wetten, dass ...?« als sensationelle Leistung vorgeführt (und dann nur vage erklärt).

Eine ernsthafte Anwendung desselben Prinzips betreiben die Astronomen: Betrachtet man jeweils mit einem Auge zwei Fotos desselben Himmelsausschnitts, so scheint ein Planet, der sich in der Zeit zwischen den Aufnahmen bewegt hat, dem Betrachter ins Gesicht (oder in die Gegenrichtung) zu springen.



LINKS: DEUTSCHE BUNDESPOST; RECHTS: NORBERT TREITZ



NORBERT TREITZ

NORBERT TREITZ

jlkfoeömdfsjfdhdjelo33d892
meönlxl,mnjföeiwkacjndlfg
lherflkdmnlknkgnbldkncarvi
jäpbw+öltmblnhfdöjknlyknkx
c,wjggöwihföoeihgotijgldöm
3vklvnlfdgjeoövdnldfnjvkdhg
valknvlknvka8hdfjikhvlnlw
ßvgjwlskmjeu8wpödxösöklshh

jlkfofömdfsjfdhdjelo33d892
meönlxl,mojföeiwkacjndmfg
lherflkdmnlknkgnbldkncarvi
jäpbw+ölmblnhfdöjknlyknkx
c,wkqgöwihföoeihgotijgldöm
3vklvnlfdgjeoövdnldfnjvkdhg
vamknvllnvlka8hdfjikhvlnlw
ßvgjwlskmjeu8wpödxpsöklshh

eine weiße Wand. Sofort erscheint dann das Objekt in Gegenfarben und in einer Größe, die der Entfernung dieser Wand bei gleicher Netzhautbildgröße (also dem gleichen Sehwinkel) entspricht, also typischerweise viel größer. Goethe hat diesen physiologischen Effekt offenbar als Erster entdeckt (und in seiner »Farbenlehre«, didaktischer Teil, Nummer 52, beschrieben): nicht in einem Labor, sondern im Wirtshaus an einer Kellnerin, die er hinreichend lange angestarrt hatte.

Menschen mit Gorillaarmen

Wenn wir die Augen so einfach seitwärts ausfahren könnten wie die Fingerspitzen, würden wir das vermutlich zum Entfernungssehen ausnutzen. Mit zwei parallel gestellten Spiegeln (Bilder S. 42/43) sehen wir Entfernungsunterschiede vergrößert, so als wenn die Augen den großen Abstand der Spiegel hätten. Bäume oder Häuser am Horizont treten deutlich nach vorne oder hinten auseinander, und ganz normale Menschen haben plötzlich Gorillaarme. Schiebt man einen der Spiegel – der dann etwas größer sein sollte – während der Benutzung meterweit auf einem Stativ seitwärts, so werden die Objekte scheinbar wie Kulissen

auf einer Bühne nach vorne und hinten auseinandergezogen: Stereozoom.

Noch verrückter wird es, wenn man mit den beiden Spiegeln »effektiv« die Augen miteinander vertauscht. Das weiß das Gehirn zwar auf der bewussten Ebene, ändert aber wegen solcher Kleinigkeiten nicht seine Bildauswertungsroutinen! Nun sehen wir vorne und hinten vertauscht, der vom Fenster optisch geschnittene Teil eines Baums scheint vor dem Fenster im Zimmer zu stehen. Bei einem Mobile aus kleinen Figuren, die an Stäben und Fäden hängen und sich langsam bewegen, schaltet das Gehirn schlagartig von der getäuschten Wahrnehmung zur korrigierten um, sobald eine Figur beginnt, eine andere zu verdecken.

Eine sehr starke Illusion liefert eine Gießform für Puppenköpfe, besonders wenn man sie innen schön ausmalt. Man betrachte diese Innenseite mit nur einem Auge, und zwar so, dass keine Schattengrenzen darin auftreten – und kann sich der Illusion, einen konvexen Puppenkopf zu sehen, nicht entziehen! Wenn man ihn nun in der Hand leicht dreht oder kippt, scheint er genau die entgegengesetzte Bewegung zu machen, und wenn man bei ruhend aufgestellter Mas-

ke einen Schritt seitwärts geht, scheint der Kopf einem durch eine – allerdings doppelt so weite – Drehung nachzublicken. Wenn das Gehirn keine anderen Hinweise wie den Parallaxeneffekt bei beidäugigem Sehen, Schatten oder Bedeckungen zur Verfügung hat, gewinnt bei der Bildverarbeitung die Erfahrung die Oberhand: Es gibt eben normalerweise keine Hohlköpfe, jedenfalls keine, in die man hineinblicken kann.

Wenn in Ihrem Bastelgeschäft die Puppenkopf-Gießmasken gerade ausverkauft sind: Es geht auch mit Papier, das Sie zu einer hohlen Würfecke falten und als Gesicht bemalen. ◁



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

Treitz, N.: Spiele mit Physik(!). Harri Deutsch, Frankfurt am Main 1991.



DOPING FÜR DAS GEHIRN

Wird man künftig einfach zum Frühstück eine Pille einwerfen, um Konzentration und Gedächtnis zu steigern? Geht das überhaupt, ohne langfristig das Gehirn zu schädigen?

Von Gary Stix

In Kürze

- ▶ Studenten und Manager nehmen **psychoaktive Medikamente** ein, um die geistige Leistungsfähigkeit zu steigern, obwohl die Substanzen nie für diesen Zweck zugelassen wurden.
- ▶ Manche Ethiker und Neurowissenschaftler diskutieren, ob Gesunde **freien Zugang** zu solchen Medikamenten bekommen sollen.
- ▶ Unklar ist, ob ein Wirkstoff, der **in grundlegende Denkfunktionen eingreift**, jemals so sicher sein kann, dass er wie Kaffee oder Tee konsumiert werden kann.

Unter dem Label »Transhumanismus« plädieren einige Futurologen für eine gesteigerte Version des Menschentums. Der verbesserte *Homo sapiens* wird demnach schon bald eine Kombination von Spitzentechnologien wie Stammzellen, Robotertechnik und Psychopharmaka nutzen, um die natürlichen Grenzen seiner physischen und psychischen Leistungsfähigkeit zu sprengen. In der Tat ist die Idee, man könnte eine Pille schlucken, um Aufmerksamkeit, Gedächtnis und planmäßiges Handeln zu forcieren, schon heute keine pure Fantasie mehr. Auf die 1990er Jahre, die zur Dekade des Gehirns erklärt wurden, folgt jetzt gewissermaßen das »Jahrzehnt des besseren Gehirns«.

Schlagzeilenträchtige Begriffe wie kosmetische Neurologie, Smart Drugs, Neuro-Enhancer, Hirndoping oder gar »Viagra fürs Gehirn« zeigen: Pharmakologische Kognitionsverstärker haben Konjunktur. Aus Sicht der Medien ist die Ära der künstlichen Hirnoptimierung schon angebrochen. Unter US-Studenten ist es durchaus üblich geworden, von einem Kommilitonen einige Tabletten des rezeptpflichtigen Medikaments Ritalin (Methylphenidat) auszuborgen, um die ganze Nacht lang hellwach büffeln zu können. Softwareprogrammier-

er unter Termindruck oder gestresste Manager nehmen Modafinil, einen neueren Muntermacher. Anwender schwören, dass die Substanz viel mehr ausrichtet als zwei Tassen Espresso gegen Schläfrigkeit. Sie berichten von laserscharfer Konzentration, die ihnen hilft, die Feinheiten der organischen Chemie oder die Geheimnisse kollateraler Schuldobligationen zu verstehen.

Wissenschaftler und Pharmaunternehmen sind seit Längerem bemüht, aus Erkenntnissen über die molekulare Grundlage der Kognition Wirkstoffe zu entwickeln, die gezielt geistige Leistungen verbessern – zunächst vor allem für Demenzerkrankte. Doch Ärzte werden ein Medikament, das bei Alzheimer- oder Parkinsonpatienten wirkt, angesichts einer alternden Bevölkerung bald auch bei mildereren Symptomen verschreiben. Die beginnende Debatte über die Ethik des »optimierten Gehirns« erweckt den Eindruck, wir alle könnten demnächst eine Pille für schnelleres Denken kaufen.

Schon wird in Fachjournalen und Tagespresse diskutiert, ob sich Studenten mit Hirndoping einen unfairen Vorteil bei Prüfungen verschaffen, oder ob Firmenchefs von ihren Beschäftigten die Einnahme solcher Mittel verlangen dürfen, um einen knappen Produktionstermin einzuhalten.

Doch können heute zugelassene Arzneimittel, die eigentlich gegen Aufmerksamkeitsstö-



SPASHLIGHT

rungen oder krankhaften Schlafdrang entwickelt wurden, tatsächlich einem Studenten zu besseren Examensnoten verhelfen oder einem Manager zu schlagfertigen Antworten im firmeninternen Kreuzverhör? Wird ein Medikament, das in elementare Hirnfunktionen eingreift, jemals rezeptfrei zu haben sein wie Aspirin oder Alka-Seltzer? An solchen Fragen entzündeten sich hitzige Debatten unter Neurowissenschaftlern, Medizinern und Ethikern (rechte Randspalte und Interview S. 52/53).

Ethische Bedenken

Einmal abgesehen von Aspekten wie Sicherheit, Fairness und Nötigung – die Nachfrage nach Kognitionsverstärkern ist wirklich groß. Nach offiziellen Schätzungen nutzten im Jahr 2007 mehr als 1,6 Millionen US-Bürger Medikamente als Neuro-Enhancer, die eigentlich für die Behandlung des Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätssyndroms (ADHS) verschrieben werden. Dazu gehören Methylphenidat (Handelsname Ritalin), die Amphetamine Adderall und Benzedrin sowie Modafinil (Provigil, Nuvigil). An einigen Universitäten gab ein Viertel der Studenten an, diese Präparate schon einmal geschluckt zu haben. 2008 ergab eine formlose Onlinebefragung der Zeitschrift »Nature«, dass jeder fünfte von 1427 Wissenschaftlern aus 60 Ländern Methylphenidat, Modafinil oder Betablocker eingenommen hat-

te, Letztere gegen Lampenfieber. Als häufigster Grund wurde die Notwendigkeit genannt, die Konzentration zu steigern. Beschafft werden die Medikamente oft aus dem Internet oder über Ärzte, die sie zweckentfremdet verschreiben; legal dürfen die Pharmaunternehmen nicht für diesen Missbrauch werben.

Die Einnahme solcher Präparate wird mit steigendem Durchschnittsalter und fortschreitender Globalisierung voraussichtlich zunehmen. »Ein 65-Jähriger aus Boston, dessen Altersversorgung durch die Finanzkrise nicht mehr ausreicht, der deshalb weiterarbeiten muss und mit einem 23-Jährigen aus Mumbai um den Job konkurriert, könnte sich geradezu gezwungen fühlen, zu diesen Pillen zu greifen«, erklärt Zack Lynch, Präsident des Interessenverbands Neurotechnology Industry Organization.

Der Ruf nach ethischen Richtlinien unterstellt freilich, dass die Präparate besser wirken als Placebos und grundlegende Funktionen wie Aufmerksamkeit und Gedächtnis oder Vorausplanen und abstraktes Denken tatsächlich günstig beeinflussen. Jedenfalls entstand 2002 ein neues Fach namens Neuroethik mit dem Ziel, die moralischen und sozialen Konsequenzen von kognitionssteigernden Medikamenten und Geräten – etwa Hirnimplantaten – zu untersuchen.

Eine Gruppe von Ethikern und Neurowissenschaftlern publizierte 2008 in »Nature« ei-

DARF MAN?

Im November 2009 veröffentlichte die Zeitschrift »Gehirn&Geist« (G&G) unter dem Titel »Das optimierte Gehirn« ein Experten-Memorandum, das für reichlich Wirbel sorgte. Einige Kernsätze:

- ▶ »Ausgangspunkt unserer Überlegungen ist das Recht eines jeden entscheidungsfähigen Menschen, über sein persönliches Wohlergehen, seinen Körper und seine Psyche selbst zu bestimmen.«
- ▶ »Entgegen vielen Befürchtungen (und Hoffnungen) gibt es offenbar gegenwärtig noch keine bemerkenswert wirksamen Neuro-Enhancement-Präparate.«
- ▶ »Wir fordern einen offenen und liberalen, aber keineswegs unkritischen oder sorglosen Umgang mit pharmazeutischem Neuro-Enhancement.«

»Neuro-Enhancement-Präparate dürfen keine Entschuldigung dafür sein, das Bemühen um eine bessere Gesellschaft zu vernachlässigen«

(Aus dem Memorandum, Gehirn&Geist 11/2009)

nen höchst provokanten Kommentar, der vorhersagte, Medikamente würden künftig immer weniger als bloße Medizin gegen Krankheiten gelten. Die Verfasser rechnen damit, dass Psychostimulanzien, sobald ihre Wirksamkeit und Unschädlichkeit bei Gesunden einmal belegt ist, breite Anwendung zur Leistungssteigerung in Unterrichtsräumen und Verhandlungszimmern finden. Studien, die eine Wirkung solcher Substanzen auf das Gedächtnis und andere Formen der Informationsverarbeitung im Gehirn zeigen, dienen den Autoren als Argument, das Hirndoping auf eine Stufe zu stellen mit »Erziehung, Gesundheitsvorsorge und Datentechnik – lauter Methoden, mit denen unsere einzigartig innovative Spezies sich zu verbessern sucht«.

Sechs Monate später ging einer der Autoren, der Bioethiker John Harris von der University of Manchester, im »British Medical Journal« noch einen Schritt weiter; Harris ist Herausgeber des »Journal of Medical Ethics« und des Buchs »Enhancing Evolution« (Optimierung der Evolution). Er meint, Methylphenidat dürfte, wenn es für Kinder zugelas-

sen sei, doch wohl unschädlich genug sein, um gesunden Erwachsenen zum Aufpeppen ihres Gehirns zu dienen. In einem späteren Interview prognostizierte Harris eine allmähliche Freigabe von Ritalin; falls keine Langzeit-Nebenwirkungen aufträten, würde das derzeit noch verschreibungspflichtige Medikament letztlich rezeptfrei erhältlich sein wie Aspirin.

Viel Lärm um nichts?

Diese Überlegungen blieben nicht unwidersprochen. Andere Forscher und Ethiker bezweifeln, dass Medikamente, die Denkprozesse modulieren, jemals so sicher anwendbar sein werden wie ein rezeptfreies Schmerzmittel oder wie Kaffee und Tee. »Manche sagen, Neuro-Enhancement ist nichts weiter als das Aufsetzen einer Brille, damit man schärfer sieht«, bemerkt James Swanson von der University of California in Irvine; er hat an klinischen Studien über Amphetamine und Modafinil als Mittel gegen ADHS mitgewirkt. »Viele unterschätzen das Risiko, wenn die Leute solche Substanzen massenhaft einnehmen. Ein gewisser Prozentsatz wird wahrscheinlich abhängig, und bei einigen wird die geistige Leistung sogar abnehmen. Deshalb bin ich gegen einen breiten Einsatz.«

Manche Wissenschaftler meinen, die Debatte sei überflüssig, denn wirklich schlauer werde man doch nur durch mühsamen Wissenserwerb. Einige, die an Wirkstoffen gegen den Gedächtnisverlust bei Demenz forschen, halten Doping des gesunden Hirns bestenfalls für eine vage Möglichkeit. »Ich würde mir über die Folgen von Kognitionsverstärkern bei Gesunden nicht viele Sorgen machen, weil so etwas zurzeit gar nicht existiert«, sagt Rusiko Bourtchouladze; er hat ein allgemein verständliches Buch über Gedächtnisforschung verfasst und zu den Untersuchungen beigetragen, die zum Nobelpreis für Erich Kandel im Jahr 2000 führten. »Wahrscheinlich erleben wir sie gar nicht. Viel Lärm um nichts.«

Nach dieser Auffassung steht das komplexe Gemisch aus chemischen Signalen, Enzymen und Proteinen, die gemeinsam einen Gedächtnisinhalt formen, beim Gesunden in einem selbst regulierten Gleichgewicht, das kein Herumpfuschen verträgt. Der Verlust an Denkfähigkeit und Identität, den Demenzkranke erleiden, lässt sich vielleicht durch gezielten Ersatz fehlender Signalsubstanzen behandeln, und das mag die Nebenwirkungen entsprechender Medikamente rechtfertigen. Doch ein Eingriff in das delicate Gleichgewicht des gesunden Hirnstoffwechsels könnte unabsehbare Folgen haben. Beispielsweise beeinträchtigt eine Verstärkung des Langzeitgedächtnisses, in dem die Erinnerungen an die

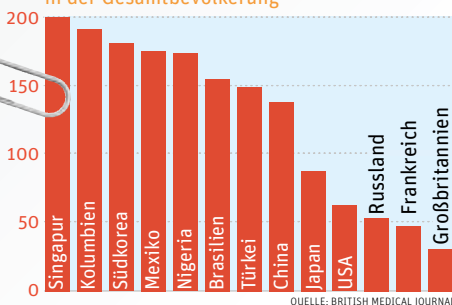


WER BRAUCHT NEURO-ENHANCER?

Die Bevölkerung altert (Grafik), Studenten und Angestellte leiden zunehmend unter Terminstress und Leistungsdruck (Fotos). Dadurch wächst die Nachfrage nach Medikamenten, die Konzentration und Merkfähigkeit steigern.

ERWARTETE ZUNAHME DER LANGLEBIGKEIT (1994–2020)

prozentuale Zunahme der Senioren (65 Jahre und älter) in der Gesamtbevölkerung



GETTY IMAGES / JUPITERIMAGES

DIAGRAMM UND TABLETTEN: LUCY READING/IKKANDA



LARRY DALE GORDON

Kindheit und an die Ferien der letzten Jahre gespeichert sind, vielleicht das Arbeitsgedächtnis – den Kurzzeitspeicher, mit dem wir uns vorübergehend eine Telefonnummer merken.

Einige Kritiker nennen die aktuelle Aufregung über Neuro-Enhancer einen Fall von »spekulativer Ethik«. Diese Tendenz macht sich auch in der Nanotechnik und anderen aktuellen Bereichen bemerkbar, sobald sich Ethiker, Wissenschaftler und Politiker über die sozialen Folgen von noch nicht existierenden Technologien Gedanken machen, seien es Smart Pills oder Amok laufende Nanoroboter. »Die Debatte über die technische Verbesserung des Menschen ... beruht größtenteils auf überzogenen Erwartungen und Technikhysterie«, schreibt Maartje Schermer von der Erasmus-Universität Rotterdam in der Zeitschrift »Neuroethics«.

Die Idee, Medikamente könnten das Denken bei Gesunden verbessern, ist fast ein Jahrhundert alt und hatte zwiespältige Konsequenzen. Der Chemiker Gordon Alles führte 1929 den synthetischen Wirkstoff Amphetamin als billigeren Ersatz für die pflanzliche psychoaktive Substanz Ephedrin ein. Er entwickelte auch den Hauptinhaltsstoff der Partydroge Ecstasy, MDMA, einen Abkömmling des Amphetamins. Im Zweiten Weltkrieg wurden verschiedene Amphetamin-Derivate verwendet, um die Soldaten wach zu halten und ihren Kampfgeist zu stärken. Deutsche und Japaner nahmen Methamphetamin ein, während Briten und Amerikaner Benzedrin einsetzten, ein mit Adderall fast substanzgleiches Amphetamin.

Eine wechselhafte Vorgeschichte

Bald wollten Forscher wissen, ob die empfundene Leistungssteigerung echt ist. Wie britische und amerikanische Psychologen in den 1940er Jahren feststellten, hatten Versuchspersonen unter Amphetamin eine sehr hohe Meinung von den eigenen Leistungen beim Schnelllesen, Multiplizieren und anderen Tests. Doch die Ergebnisse waren meist nicht besser als bei Einnahme von Koffein. Bei komplexeren Aufgaben nahm die Leistung oft sogar ab. »Da Amphetamine die Stimmung aufhellen, gaukeln sie einem vor, man sei besonders leistungsfähig«, erklärt Nicolas Rasmussen, Wissenschaftshistoriker an der University of New South Wales in Sydney (Australien) und Autor des Buchs »On Speed« (New York University Press, 2008). »Sie führen bei simplen Labortests, welche die Leistung bei langweiligen Aufgaben messen, zu besseren Ergebnissen durch Steigern des Arbeitseifers. Solche Tests lassen sich aber nicht mit einem Juraexamen oder einem Luftkampf vergleichen.«




Methylphenidat, den Amphetaminen chemisch nahe verwandt, kam in den 1950er Jahren als angeblich milderes Stimulans auf den Markt – aus Sicht des Herstellers »die glückliche Mitte der psychomotorischen Stimulation« –, aber seine biochemische und psychologische Wirkung ist bei höherer Dosierung die gleiche. Das goldene Zeitalter der Amphetamine endete vor etwa 40 Jahren. In den USA erreichte der Jahreskonsum damals mit zehn Milliarden Tabletten einen Höhepunkt, bevor die amerikanische Gesundheitsbehörde FDA (Food and Drug Administration) Amphetamine unter Rezeptpflicht stellte. Der Neurowissenschaftler Michael S. Gazzaniga von der University of California in Santa Barbara, einer der Autoren des erwähnten »Nature«-Kommentars, erinnert sich, dass ihm, während er Anfang der 1960er Jahre studierte, der Vater Benzedrin schickte.

Als Mitte der 1990er Jahre immer häufiger Methylphenidat gegen ADHS verschrieben wurde, untersuchte man mit modernsten bildgebenden Verfahren und raffinierten neuropsychologischen Tests die Wirkung der Sub-



HELFEN DIESE PSYCHOPILLEN WIRKLICH?

In Fachzeitschriften und Massenmedien werden Medikamente, die eigentlich zur Behandlung neurologischer Erkrankungen zugelassen sind, als Substanzen vorgestellt, die das Denkvermögen von Gesunden steigern können. Doch die Indizien dafür sind keineswegs eindeutig, und die Risiken sprechen gegen eine generelle Freigabe.

MEDIKAMENT	MEDIZINISCHE ANWENDUNG	WIRKSAMKEIT ALS NEURO-ENHANCER	RISIKEN
METHYLPHENIDAT (Ritalin, Concerta und andere) und AMPHETAMINE (Benzedrin, Adderall) 	Stimulanzien zur Behandlung des Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätssyndroms (ADHS) und von Narkolepsie (Schlafzwang)	steigern die kognitive Leistung bei bestimmten Aufgaben nach Schlafentzug; verbessern mitunter Planungsfähigkeit und eine Form des Arbeitsgedächtnisses; erhöhen offenbar die Leistung bei simplen repetitiven Aufgaben	verschlechtern die Leistung bei komplexen Aufgaben; Herz-Kreislauf-Komplikationen, Krampfanfälle, Halluzinationen und Abhängigkeit
MODAFINIL (Provigil) 	neueres Psychostimulans gegen Narkolepsie und extreme Müdigkeit bei Schichtarbeit oder Apnoe (Atemstillstand im Schlaf)	verbessert anscheinend Konzentration und Leistung bei beschränkten Aufgaben, etwa beim Merken von langen Ziffernfolgen	könnte süchtig machen; kann schwere Hautausschläge verursachen
DONEPEZIL (Aricept) 	Behandlung der Alzheimerkrankheit; erhöht die Verfügbarkeit des Neurotransmitters Acetylcholin zur Verbesserung der Hirnleistung	unterstützt Lernen und Gedächtnis, doch die Resultate sind widersprüchlich; wirkt oft erst nach mehreren Wochen; wird seltener <i>off-label</i> genutzt als die obigen Substanzen	könnte bei Gesunden die kognitiven Leistungen etwas verschlechtern



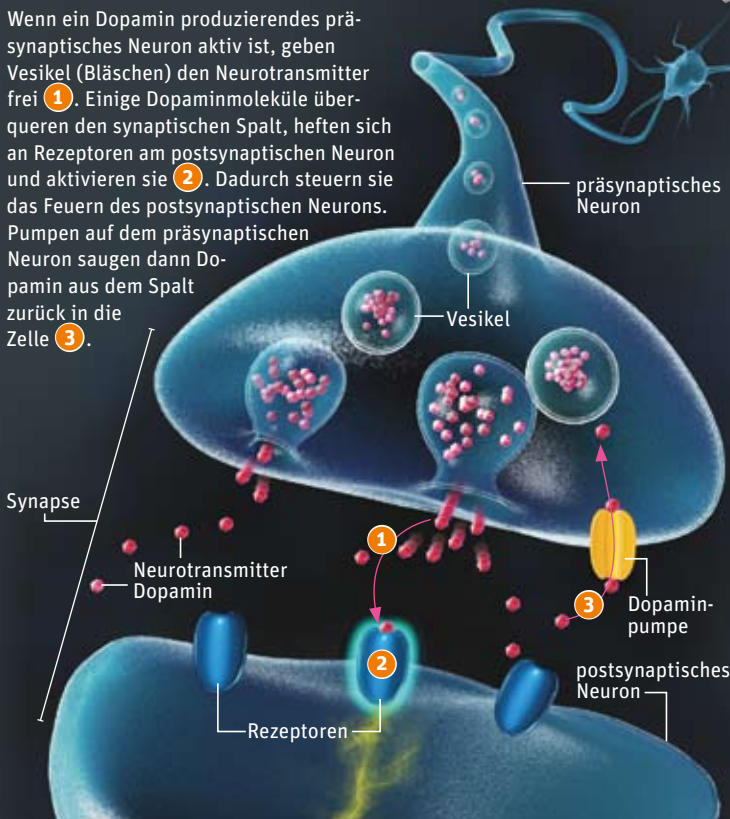
WIE ZWEI ENHANCER WIRKEN

Kognitionsverstärker wie Methylphenidat und Amphetamine verändern die Aktivität des Neurotransmitters Dopamin an den Synapsen, den Schaltstellen zwischen Nervenzellen. Eine Stärkung der durch Dopamin vermittelten Signale verbessert möglicherweise die Lernfähigkeit durch gesteigerte Aufmerksamkeit und erhöhtes Interesse an gestellten Aufgaben.



NORMALE SYNAPSENAKTIVITÄT

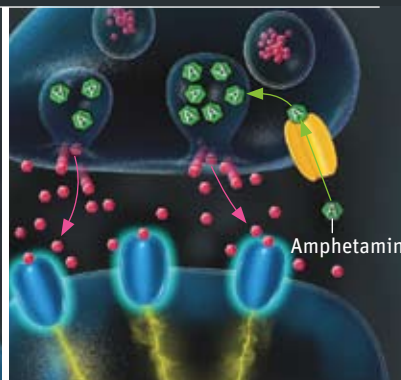
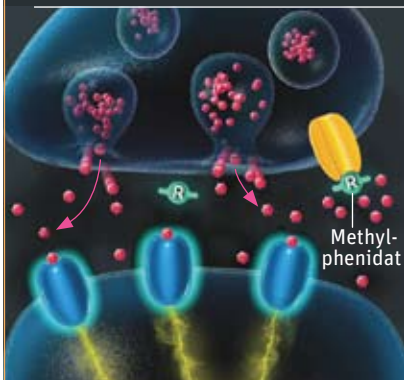
Wenn ein Dopamin produzierendes präsynaptisches Neuron aktiv ist, geben Vesikel (Bläschen) den Neurotransmitter frei **1**. Einige Dopaminmoleküle überqueren den synaptischen Spalt, heften sich an Rezeptoren am postsynaptischen Neuron und aktivieren sie **2**. Dadurch steuern sie das Feuern des postsynaptischen Neurons. Pumpen auf dem präsynaptischen Neuron saugen dann Dopamin aus dem Spalt zurück in die Zelle **3**.



MEDIKAMENTÖS VERSTÄRKTE SYNAPSENAKTIVITÄT

Methylphenidat (Ritalin, Concerta) blockiert die Wiederaufnahme von Dopamin. Dadurch steht mehr Dopamin für die Bindung an ein postsynaptisches Neuron zur Verfügung, und die Stärke des übermittelten Signals nimmt zu.

Amphetamine (Benedrin, Adderall) gelangen über den Pumpmechanismus in das präsynaptische Neuron und steigern die Freisetzung von Dopamin in den synaptischen Spalt. Auch in diesem Fall steht mehr Dopamin für die Rezeptoren des postsynaptischen Neurons bereit.



stanz auf Gesunde, um sie mit ADHS-Patienten zu vergleichen. Nach einer 1997 in der Zeitschrift »Psychopharmacology« veröffentlichten Untersuchung von Barbara Sahakian und Trevor Robbins von der University of Cambridge verbesserte Methylphenidat bei ausgeruhten gesunden jungen Männern zwar räumliches Arbeitsgedächtnis und Planung, nicht jedoch Aufmerksamkeit und Sprachgewandtheit. Mit fortschreitender Testdauer machten die Probanden mehr Fehler – vielleicht, weil sie sich infolge des Muntermachers überschätzten.

Bei gesunden älteren Männern beobachteten die Forscher kaum positive Wirkungen. Im Jahr 2005 konnte eine Arbeitsgruppe der University of Florida Medical School in Gainesville keinerlei kognitive Wirkung von Methylphenidat bei 20 durch Schlafentzug übermüdeten Medizinstudenten feststellen. Dass die Substanz jemals frei verkäuflich neben Koffeipräparaten im Regal stehen wird, ist auch deshalb unwahrscheinlich, weil sie Herzrhythmusstörungen auslösen und als Lifestyledroge missbraucht werden kann. Normale Dosierung führt zwar selten zur Abhängigkeit, aber in den 1970er Jahren war Sucht durch Inhalation oder Schnupfen von »West Coast« – damaliger Szenename von Methylphenidat – durchaus die Regel.

Die Allzeit-bereit-Pille

Angesichts der zwiespältigen Karriere der Amphetamine begrüßten Neurowissenschaftler und Ärzte Modafinil als neuen, harmlosen Muntermacher. Da das 1998 in den USA eingeführte Medikament befähigt, lange ohne Pause zu arbeiten, hat es sich als Lifestyledroge für Vielflieger etabliert, die ohne Jetlag in vier Zeitzonen zu Hause sein möchten.

James Cascio vom Institute for the Future in Palo Alto (Kalifornien) ließ sich von seinem Arzt Modafinil verschreiben, nachdem ihm Bekannte, die viel unterwegs waren, davon vorgeschwärmt hatten. Auf Überseereisen stellte er fest, dass der Stoff ihn nicht nur wach hielt, sondern auch geistesgegenwärtiger machte. »Ich war sehr angenehm überrascht, wie konzentriert und klar mir mein Denken vorkam«, erzählt Cascio, der das Mittel in einigen Artikeln erwähnt hat. »Ich hatte nicht das Gefühl, auf einmal ein Superhirn zu haben, sondern leichter in einen kognitiven Fluss einzutauchen, in einen Zustand, in dem ich ohne Ablenkung arbeiten konnte.«

Tests bestätigen Cascios Eindrücke zum Teil. Wie Sahakian und Roberts 2003 beobachteten, schnitten 60 ausgeruhte gesunde Männer bei einigen neuropsychologischen Tests besser ab, zum Beispiel beim Merken

ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: ANDREW SWIFT

von Zahlenfolgen. Auch andere Forscher fanden positive Effekte, obwohl Modafinil, wie Cascio betont, aus einem Schwachkopf kein Genie macht. Außerdem wurde in keiner dieser Studien die kognitive Wirkung über längere Zeiträume gemessen.

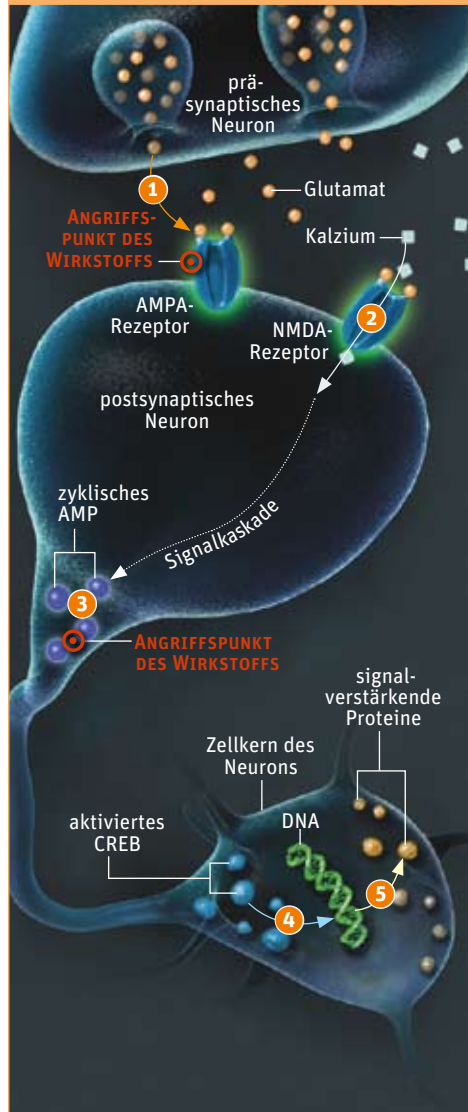
Von unreguliertem Zugang zu Modafinil oder Methylphenidat ist auch deshalb abzuraten, weil diese Stoffe individuell unterschiedlich wirken. Anwender mit geringerem Intelligenzquotienten scheinen deutlicher von Modafinil zu profitieren. Methylphenidat verbessert in Tests ein schwaches Arbeitsgedächtnis, während ein von vornherein gutes Gedächtnis kaum davon profitiert.

Weder Modafinil noch die Amphetamine wurden auf Grund tieferer Einsicht in die Funktionsweise des Gehirns entwickelt. Wie sich erst neuerdings zeigt, beeinflusst Modafinil mehrere Neurotransmitter, die das Feuern bestimmter Neuronengruppen auslösen. Vor Kurzem entdeckte Nora D. Volkow, Leiterin des National Institute of Drug Abuse, dass es sich dabei unter anderem um Dopamin handelt; dieser Neurotransmitter wird auch durch die Amphetamine verstärkt und ist für deren Suchtpotenzial verantwortlich. »Anders als früher vermutet beeinflusst Methylphenidat und Modafinil das Dopaminsystem offenbar auf sehr ähnliche Weise«, sagt Volkow. Bei Modafinil sei die Suchtgefahr aber geringer, da es sich nicht dafür eigne, über den Magen oder die Lunge einen starken Rauschzustand herbeizuführen. Erst 2006 wurde entdeckt, dass Modafinil böse Hautausschläge verursachen kann; seither lehnt die FDA den Einsatz gegen ADHS bei Kindern ab.

Auch wenn die alten Muntermacher nun als Kognitionsverstärker für Studenten, Börsianer und Softwareprogrammierer gepriesen werden, dürften sie kaum mehr bewirken als ein doppelter Espresso. Was ist ein kognitiver Enhancer genau? Innerhalb des American College of Neuropsychopharmacology wurde eigens eine Gruppe gebildet, um den Begriff zu definieren. Solche Substanzen könnten schließlich auch aus ganz anderen Forschungsbereichen hervorgehen. Zum Beispiel lieferten Befunde, die besagen, wie wir das Bild eines Säuglings oder den Namen eines Freundes dauerhaft im Gedächtnis speichern, den Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Medikamente gegen die Alzheimerkrankheit.

Die Hoffnung auf neuartige Enhancer speist sich vor allem aus solchen Fortschritten der Grundlagenforschung. An mehr als 30 verschiedenen Linien genetisch veränderter Mäuse lässt sich deren gegenüber normalen Tieren erhöhte Fähigkeit nachweisen, Informationen aufzunehmen und im Langzeitgedächtnis zu

MEDIKAMENTE GEGEN DAS VERGESSEN



Seit Langem – in einem Fall schon seit 20 Jahren – arbeiten Forscher an Medikamenten, die in die biochemischen Mechanismen des Langzeitgedächtnisses eingreifen.

Das Langzeitgedächtnis beruht offenbar darauf, dass der Neurotransmitter Glutamat sich an zwei Typen von Rezeptoren auf dem postsynaptischen Neuron heftet. Nachdem der AMPA-Rezeptor Glutamat gebunden hat (1), bewirkt er, dass der andere, ebenfalls mit Glutamat besetzte NMDA-Rezeptor einen Ionenkanal öffnet und Kalzium einströmen lässt (2). Die Ionen setzen eine Signalkaskade in Gang, die zur Bildung von zyklischem AMP führt (3). Dieses cAMP wiederum aktiviert Signalproteine, die in den Zellkern wandern und das CREB-Protein in den aktiven Zustand versetzen (4). CREB bindet an die DNA im Zellkern und veranlasst die Synthese von Proteinen, die dann zurück zur Synapse wandern und die Signalverbindung zwischen den beiden beteiligten Neuronen stabilisieren (5). Medikamente, die diesen Prozess fördern – entweder indem sie die Signalübertragung an den AMPA-Rezeptoren verstärken oder die Wirkung von cAMP verlängern –, sind bereits in der klinischen Prüfung.

MUNTER IN DEN KRIEG

Die Idee, eine Pille könne die geistige und körperliche Leistungsfähigkeit generell steigern, setzte sich im Zweiten Weltkrieg durch. An allen Fronten wurden Millionen Amphetaminpillen eingenommen. Hier überreicht ein Stabsarzt der britischen Royal Air Force dem Mitglied einer Bomberbesatzung eine Hand voll Muntermacher.

MIT FRIEDLICHEN GENEN DES COMMONWEALTH AIR TRAINING FLAMUSEUM, CANADA



speichern. »Zum ersten Mal in der Geschichte der Neurologie verstehen wir in Umrissen die Molekular- und Zellbiologie des Gedächtnisses«, sagt Alcino J. Silva, Neurobiologe an der University of California in Los Angeles. »Das können wir jetzt nutzen, um die Art, wie wir lernen und uns erinnern, zu verändern.«

Doch die meisten der 200 Mutationen, mit denen Wissenschaftler in aller Welt das Mäusegedächtnis zu steigern suchen, wirken sich negativ aus. Silva erinnert sich an eine Mauslinie in seinem Labor, die den möglichen Preis der Kognitionsverstärkung illustriert. Diese Tiere lernten zwar schneller als nicht mutierte Mäuse, waren jedoch unfähig, eine komplexe Aufgabe zu lösen. »Wenn man ihnen etwas Einfaches beibrachte, nahmen sie es schnell auf, aber alles Komplizierte überforderte sie«,

erklärt Silva. Er schätzt, dass es noch Jahrzehnte dauern kann, bis aus seiner Forschung brauchbare Medikamente hervorgehen.

Auch die wirtschaftlichen Hürden sind hoch. Von den ersten Unternehmen auf diesem Gebiet – einige von führenden Wissenschaftlern gegründet – sind mehrere gescheitert. Das Wissenschaftsmagazin »Science« nannte 2004 vier neue Firmen: Sention, Cortex Pharmaceuticals, Memory Pharmaceuticals und Helicon Therapeutics. Sention hat den Betrieb eingestellt. Cortex wankt und sucht verzweifelt einen finanzstarken Partner. Im Jahr 2008 kaufte Hoffmann-La Roche für einen Spottpreis die von Nobelpreisträger Kandel mitbegründete Firma Memory, nachdem sie Mitarbeiter entlassen musste und mehrere ihrer klinischen Studien erfolglos



INTERVIEW

»Zu viel Schwarzmalerei«

Die pharmakologische Steigerung unserer Gehirnleistung sollte nicht vorschnell verteufelt werden.

Bettina Schöne-Seifert ist Professorin für Ethik in der Medizin an der Universität Münster und Mitglied des Deutschen Ethikrats. Gemeinsam mit sechs weiteren Autoren hat sie kürzlich das Memorandum zum Neuro-Enhancement (kurz: NE) verfasst, also der Steigerung von Leistung, Gefühlen, Motivation. Das Memorandum erschien in der Novemberausgabe der Zeitschrift »Gehirn&Geist«.



DEUTSCHER ETHIKRAT

Spektrum der Wissenschaft: Das Memorandum zum Neuro-Enhancement befürwortet weit gehend das Hirndoping. Das haben einige Medien stark kritisiert und sprachen daraufhin sogar von einer Kampfansage – fühlen Sie sich getroffen?

Prof. Bettina Schöne-Seifert: Ja, meine Mitautoren und ich fühlen uns in bestimmten Punkten missverstanden. Schon Ihre Darstellung trifft nicht zu: Im Memorandum befürworten wir nicht den uneingeschränkten Gebrauch dieser Substanzen, die es in wirksamer Form noch gar nicht gibt, sondern eine offene und vorurteilslose Diskussion. Wir untersuchen die gängigen Verbotsargumente und finden die kategorischen unter ihnen nicht überzeugend. Bedenken, die auf individuelle oder gesellschaftliche Folgen abheben, nehmen wir durchaus ernst. Aber hier ist vieles Spekulation.

Spektrum: Es entsteht der Eindruck, Sie unterstützen jede Manipulation des Menschen. Das ist schon beim Sportdoping verboten und dort zu Recht verpönt.

Schöne-Seifert: Ein doppeltes Missverständnis. Fremdbestimmte oder risikoträchtige Maßnahmen stehen auch bei uns

gar nicht zur Debatte. Davon abgesehen ist Sportdoping immer kompetitiv und eine Verletzung bestehender Regeln. Beim NE, wo es etwa um Gedächtnissteigerung oder Stimmungsaufhellung ginge, müssen Gesellschaften diese Regeln doch erst erarbeiten. Es geht nicht darum, dass wir NE unbesehen richtig fänden. Aber wir diagnostizieren Schwarzmalerei und moralische Diffamierung, ohne dass dahinter schon klare Befunde stünden.

Spektrum: Es gab ja noch weitere Kritikpunkte ...

Schöne-Seifert: Ja. So wurde bemängelt, dass wir einen billigen Liberalismus vertreten, wo doch in der Realität die Freiheit des Einzelnen absehbar unter die Räder des Leistungsdrucks und der Pharmainteressen geraten werde. Das bleibt zu prüfen. Begründet werden muss jedenfalls nicht der Anspruch auf Freiheit, sondern deren Einschränkung.

Spektrum: Nun will doch jeder im Leben so gut und fit wie möglich abschneiden – körperlich, geistig, psychisch. Sind dafür nicht alle Mittel erlaubt?

Schöne-Seifert: Nur so weit diese Dinge nicht schädlich sind, zu problematischen

Entwicklungen führen oder den Charakter verbiegen. Wir reden keiner Ellbogengesellschaft das Wort.

Spektrum: Warum sollten wir unsere Hirnleistungen überhaupt künstlich verstärken?

Schöne-Seifert: Wir fordern doch nicht dazu auf! Aber wenn es eines Tages Präparate geben sollte, die uns geistig deutlich fitter machen, als es Sudokus oder Training allein schaffen, dann wäre dies in den ethischen Abwägungsprozessen jedenfalls ein großer Pluspunkt.

Spektrum: Im Bagatellbereich gibt es Muntermacher doch schon lange – Tee und Kaffee zum Beispiel.

Schöne-Seifert: Das Analogieargument gilt bei Kritikern als triviale Schönrederei. Aber ernsthaft: Wo liegt der normative Unterschied? Das Trinken von Kaffee ist Teil unserer Kultur geworden; ursprünglich galt er als umstrittenes Weckelixier, das vielen scheußlich schmeckte. Kaffee als banales Genussmittel, aber die deutlich »verbesserte« Koffeintablette, die uns die Zukunft bringen könnte, als Teufelszeug – das leuchtet nicht ein.

Spektrum: Noch ist doch alles Spekula-

blieben. Helicon überlebte nur durch die Großzügigkeit des Styroporbecher-Milliardärs Kenneth Dart. Die Firma arbeitet an einem Wirkstoff, der in den Glutamat-Stoffwechsel eingreifen soll; dieser Neurotransmitter steuert einen komplizierten zellulären Signalweg, der mit der Bildung langfristiger Gedächtnisinhalte zusammenhängt (siehe Kasten S. 51).

Eine Schwesterfirma von Helicon, Dart Neuroscience, übernimmt inzwischen die Entwicklung neuer Substanzen, so dass sich Helicon auf klinische Studien konzentrieren kann. Helicon hat mehr als 100 Millionen Dollar an Fördermitteln erhalten, ohne dass einer der Probestoffe ein spätes Prüfungsstadium erreicht hätte. »In meinen Vorträgen erkläre ich das gern so: Bei der Gründung von Helicon dachte ich, wir stellten Gedächtnis-



tion – es gibt bisher schließlich keine dauerhaft wirksamen Pillen zum NE. Wovon redet man eigentlich?

Schöne-Seifert: Richtig, wir reden von einer Möglichkeit, die vielleicht in 10 oder 20 Jahren Wirklichkeit wird – auch wenn die ersten Anzeichen schon da sind. Nur: Früher hat man bei problematischen technischen Entwicklungen – nehmen Sie Atomkraft, In-vitro-Fertilisation oder Gentechnik – zu Recht gesagt: Warum kommt ihr mit der Ethikdebatte erst, nachdem der Rubikon überschritten ist? Jetzt kommen wir rechtzeitig, noch bevor die Mittel überhaupt am Markt sind. Und da wird uns vorgehalten, dass wir damit nur einen absurden Diskurs schaffen, die Nutzung von NE-Präparaten anheizen und zu deren Verharmlosung beitragen. Das ist ungerecht, denn die Problematik lässt sich in Teilen schon absehen und diskutieren.

Spektrum: Aber sehen Sie das Thema nicht insgesamt zu positiv?

Schöne-Seifert: Keineswegs wollen wir verharmlosen oder zu bedenkenlosen Selbstexperimenten einladen.

Spektrum: Neuro-Enhancement soll nicht zur Heilung Kranker, sondern Gesunden zur mentalen Leistungssteigerung helfen. Könnte das nicht zu Veränderungen der Persönlichkeit führen?

Schöne-Seifert: Natürlich kann es zu solchen Veränderungen kommen, aber die können ja auch gewünscht sein. Ein besseres Gedächtnis ist ja nicht unbedingt etwas Schädliches. Ebenso, wenn jemand psychisch ausgeglichener, aufgeschlosse-

ner und sozialkompetenter würde. Wenn es erlaubt ist, sich durch Verhaltenstherapie zu verändern, warum sollte man das nicht auch medikamentös erreichen dürfen? Wenn NE allerdings das Vertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit beeinträchtigen würde, wäre das ein gewichtiges Gegenargument.

Spektrum: Sie plädieren also für ...

Schöne-Seifert: ... eine tabulose Debatte, vor dem Hintergrund, dass diese Dinge in der westlichen Welt bereits heimlich praktiziert werden.

Spektrum: Philosophen sprechen gerne vom »gelingenden Leben«. Rechtfertigt das jedwede medizinische Eingriffe ins Gehirn?

Schöne-Seifert: Natürlich nicht. Unerwünschte oder problematische Folgen würden sich ja auch in der Bilanz eines gelingenden Lebens negativ niederschlagen. Wir befürworten, dass Präparate für NE ganz offen in der Kontinuität mit anderen Möglichkeiten zur Leistungssteigerung gesehen und diskutiert werden. Soziale Probleme, die das womöglich schafft oder verstärkt, sollten in eigenem Recht untersucht und nicht von vornherein als Totschlagargument speziell gegen NE verwendet werden.

Spektrum: Solche Mittel könnten auch den Konkurrenzdruck im Berufsleben verstärken. Wie stehen Sie dazu?

Schöne-Seifert: Kritisch. Man muss rechtlich verhindern, dass Arbeitgeber ihre Angestellten verpflichten könnten, solche Mittel zu nehmen. Das ginge auf keinen

Fall. Natürlich gibt es auch einen subtilen Nutzungszwang – auch den finden wir hochproblematisch. Allerdings geht ein gewisser Druck mit der Einführung vieler neuer Techniken einher. Denken Sie an Handys, Computer oder das Internet, die man heute nutzen muss, um beruflich konkurrenzfähig zu sein. Dennoch findet die Gesellschaft dies zumutbar.

Spektrum: Aber hier geht es doch um direkte Eingriffe in unseren Körper.

Schöne-Seifert: Genau, und deshalb muss man das Thema auch anders behandeln als Handys oder Computer.

Spektrum: Solche Mittel werden nicht billig sein. Verstärkt das eine Zweiklassengesellschaft?

Schöne-Seifert: Das ist ein Problem. Man wird abwägen müssen, ob es reicht, diese Dinge zu verbieten. Oder ob wir dafür sorgen sollten, dass die Mittel nicht zu teuer und die Barrieren deutlich niedriger werden als etwa für teure Nachhilfe.

Spektrum: Die Stoffe wurden aber nicht für das Neuro-Enhancement entwickelt.

Schöne-Seifert: »Zweckentfremdung« als solche ist ein ebenso zweifelhaftes Argument wie der Einwand, dass dies künstliche Substanzen seien. Die ganze Welt ist voller künstlicher Dinge. Wir sollten sie nicht nach ihrer Künstlichkeit beurteilen, sondern danach, ob sie uns zuträglich sind.

Interview: **Reinhard Breuer,**
Chefredakteur von
»Spektrum der Wissenschaft«

ENHANCER-KANDIDATEN

Die Pharmaindustrie entwickelt Mittel gegen verschiedene Formen der Demenz – von der altersbedingt zunehmenden Gedächtnisschwäche bis zur Alzheimerkrankheit. Wirkstoffe wie die rechts genannten, die oft noch nicht abschließend klinisch geprüft sind, könnten vielleicht auch Gesunden zur Verbesserung ihrer mentalen Fähigkeiten dienen. Die Frage bleibt, wie sicher und wirksam solche Stoffe für Menschen ohne kognitive Defizite tatsächlich sein werden.



MEDIKAMENTENTYP	WIRKMECHANISMUS	ENTWICKELT VON
Aktivatoren des nikotinischen Acetylcholinrezeptors	steigern entweder die Konzentration des Neurotransmitters Acetylcholin im synaptischen Spalt oder aktivieren direkt den nikotinischen Acetylcholinrezeptor. Fördern Aufmerksamkeit, Gedächtnis und andere Aspekte der Kognition	Abbott, CoMentis, EnVivo, Targacept / AstraZeneca und Xytis
Ampakine	wirken auf AMPA-Rezeptoren und steigern so die neuronale Antwort auf den Neurotransmitter Glutamat. Dies soll die Bildung von Langzeitgedächtnisinhalten fördern (siehe Kasten auf S. 51)	Cortex Pharmaceuticals, Eli Lilly, Glaxo-SmithKline / Neurosearch, Organon, Pfizer und Servier
Phosphodiesterase-Hemmer (PDE-Hemmer)	Ein PDE-Blocker ermöglicht dem Signalmolekül cAMP, in Hirnnerven länger aktiv zu bleiben, und steigert dadurch die Aktivität des für das Langzeitgedächtnis wichtigen Proteins CREB (siehe Kasten auf S. 51).	Helicon Therapeutics, Hoffmann-La Roche und Merck
Antihistaminika	blockieren den Histaminrezeptor H3 und erhöhen so Wachheit und Aufmerksamkeit. Ein in Russland gegen Heuschnupfen entwickeltes Medikament, das mit dem H1-Rezeptor interagiert, wird als Neuro-Enhancer klinisch geprüft	GlaxoSmithKline, Johnson & Johnson und Medivation / Pfizer



Gary Stix ist Redakteur bei »Scientific American«.

Galert, T. et al.: Das optimierte Gehirn. In: Gehirn&Geist 11/2009, S. 40 – 48.

Greely, H. et al.: Towards Responsible Use of Cognitive-Enhancing Drugs by the Healthy. In: Nature 456, S. 702 – 705, 2008.

Lee, Y. S., Silva, A. J.: The Molecular and Cellular Biology of Enhanced Cognition. In: Nature Reviews Neuroscience 10, S. 126 – 140, 2009.

Rasmussen, N.: On Speed: The Many Lives of Amphetamine. New York University Press, 2008.

Schermer, M. et al.: The Future of Psychopharmacological Enhancements: Expectations and Policies. In: Neuroethics 2, S. 75 – 87, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014860.

verstärker für meine Eltern her, und ich hatte kein graues Haar«, berichtet Tim Tully, Chefwissenschaftler bei Helicon, der die Firma mitbegründete, als er am Cold Spring Harbor Laboratory arbeitete. »Jetzt sind sie tot, ich bin ganz grau und weiß genau, dass es bei diesem Wettrennen um mich geht statt um sie.«

Trotz dieser Rückschläge entwickeln die Pharmafirmen weiterhin Kognitionsverstärker für die Alzheimerkrankheit und andere Formen der Demenz (siehe Tabelle oben). Man erprobt Verbindungen, die an Stelle von Glutamat auf andere Neurotransmitter einwirken – etwa auf Rezeptoren, die durch Nikotin aktiviert werden, aber nicht süchtig machen. Ein Grund für das Rauchen ist bekanntlich, dass Nikotin die Aufmerksamkeit steigert.

Die Lehren aus der Entwicklung von Mitteln gegen Demenz werden vielleicht auch zu Medikamenten führen, die normale kognitive Alterserscheinungen mildern. Wenn solche Pillen einigermaßen harmlos sind, könnten sie ihren Platz in Studentenheimen und Büros finden. »Die Pharmahersteller wissen, dass ein erfolgreicher Neuro-Enhancer das bestverkaufte Medikament aller Zeiten wäre«, erklärt Peter B. Reiner, Professor für Neuroethik an der University of British Columbia in Vancouver.

Doch neue Arzneien gegen kognitive Störungen werden vorderhand wohl noch nicht aus tiefen Einsichten in die Funktion unseres Nervensystems hervorgehen. Eher wird man zufällig entdecken, dass eine für ganz andere Zwecke zugelassene Verbindung das Denken

beeinflusst. Beispielsweise durchläuft gerade ein Stoff die letzten Testphasen als Mittel gegen Alzheimer, der ursprünglich in Russland als Antihistaminikum gegen Heuschnupfen entwickelt wurde. Das riesige Marktpotenzial verleitet einige Firmen zu fragwürdigen Methoden: Sie verkaufen ein Medikament, das in klinischen Studien gescheitert oder nicht zu Ende geprüft worden ist, als Nahrungsergänzungsmittel oder »medizinisches Nahrungsmittel«, weil solche Zulassungen weniger streng kontrolliert werden.

Stochern im Nebel

Neue Enhancer können auch entstehen, indem die Zulassung eines bereits etablierten Psychopharmakons erweitert wird. So erhielt Cephalon, der Hersteller von Modafinil, die Genehmigung der FDA, das Produkt für Schichtarbeiter zu vermarkten. Dieser Kundenkreis ist natürlich viel größer als die ursprüngliche Zielgruppe der Narkoleptiker, die an unkontrollierbarem Schlafdrang leiden. Cephalon musste an zwei Bundesstaaten und die US-Bundesregierung fast 444 Millionen US-Dollar Strafe zahlen, weil die Firma Modafinil und zwei weitere Psychopharmaka für unzulässige Anwendungen angepriesen hatte.

Der Drang, geistige Fähigkeiten zu optimieren – insbesondere Konzentration und Gedächtnis –, ist anscheinend fast unwiderstehlich. Pharmahersteller und Verbraucher drohen dabei die Risiken zu vergessen, die dieses Spiel mit den neuronalen Grundlagen unserer Persönlichkeit unvermeidlich nach sich zieht. <

1960

Motorradfahrten im Winter

»Ein junger Norweger hat sich für seine Winterfahrten dieses eigenartige Gefährt gebaut, mit dem er auch bei tiefem Schnee und ungebahnten Wegen mit Motorkraft vom Fleck kommen



Ein frühes Schneemobil baute dieser norwegische Erfinder.

kann. Ein normales Leichtmotorrad wurde zunächst zum Dreirad umgebaut, dann die Hinterräder mit breiten Gummiketten versehen, um die Flächenpressung zu verringern. Solange der Weg noch einigermaßen gebahnt ist, kann er damit fahren, für tiefen Schnee wird das Vorderrad auf einen Ski gestellt.« *Populäre Mechanik*, 5. Jg., Heft 1, Nr. 52, Januar 1960, S. 23

Der Duft von Blut

»Forscher der Universität Graz konnten kürzlich zeigen, daß die Anlockung der blutsaugenden Insekten durch Warmblütler neben anderen Faktoren durch ein im Blut vorhandenes Gemisch erfolgt, dessen Bestandteile die Aminosäuren Cystin und Cysteïn, Alanin, Glutamin sowie Milchsäure, Amine und Ammoniak sind. Die Komponenten sind für sich nicht wirksam, zu etwa gleichen Teilen gemischt dagegen noch in 2000facher Verdünnung. Aus dem Blut werden diese Stoffe durch die Haut in Dampfform abgegeben, wobei die Ausscheidung durch erhöhte Temperatur und Luftfeuchtigkeit gesteigert wird.« *Kosmos*, 56. Jg., Heft 1, Januar 1960, S. 8

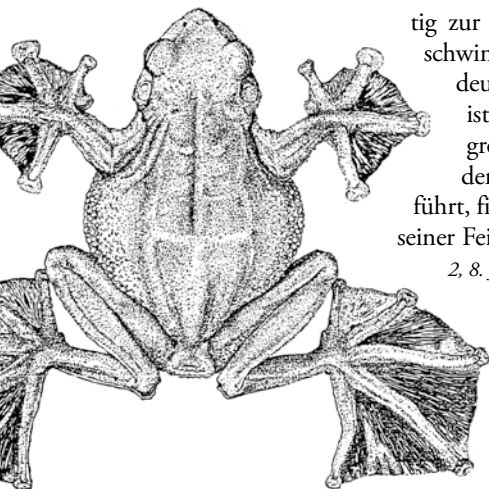
Temperaturschranke durchbrochen

»Durch Intensivierung der Energiekonzentration im Lichtbogen wurde es möglich, die Temperaturschranke von ca. 5000 °C zu durchbrechen. Die in den USA befindlichen Anlagen des sogenannten Hierarc-Verfahrens erzeugen Temperaturen von 8000 bis 16 000 °C. Im Hochintensivlichtbogen wird der Stromfluß so geregelt, daß die Anodenenergiekonzentration einen

kritischen Wert überschreitet, wobei dann der Energieüberschuß in Form eines hochintensiven Hochtemperatur-Plasmastrahls radial von der Anode abgeschleudert wird. Anwendungsgebiete dieser Hochtemperaturerzeuger sind z. B. der Raketenbau und andere Hochtemperaturumsetzungen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 13. Jg., Heft 1, Januar 1960, S. 28

Weitsprungkünstler

»Während eines mehrmonatlichen Aufenthaltes auf Java hat M. Siedlecki die Lebensgeschichte des bisher noch wenig bekannten javanischen Flugfrosches eingehend durchforscht. Wenn man einen Flugfrosch aufscheucht, so macht er einen überraschend weiten Sprung; sowohl kleine Männchen als auch große und schwere Weibchen sind imstande, auf eine Entfernung von 1 ½ – 2 m zu springen. Während des Sprunges bringt der Frosch den ganzen Körper in eine sehr charakteristische »Schwebestellung«. Die Vorderbeine sind mit dem Ellenbogengelenk stark an den Körper gepreßt, die Vorderarme sind seitlich gestellt; deswegen werden die Hautfalten an den Vorderbeinen in der Form einer flachen Membran ausgebreitet. Die Entwicklung einer so großen Oberfläche während des Sprunges kann mächtig zur Verminderung der Fallgeschwindigkeit beitragen. Die Bedeutung der Fallvorrichtung ist für dieses Tier eine sehr große. Auf den Bäumen, auf denen dieses Tier sein Leben führt, finden sich auch die meisten seiner Feinde.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 2, 8. Januar 1910, S. 35f.



In der charakteristischen »Schwebestellung« springt der javanische Flugfrosch Feinden davon.

Die Vorleser

»Der englische Generalpostmeister hat für London eine neue Art der Briefübermittlung für die Sonntage eingerichtet, die aber nur für Adressaten gilt, die Telephon haben. Das Schreiben muß mit Namen und Fernsprechnummer des Adressaten, sowie mit der Aufschrift: »Zur telephonischen Übermittlung am Sonntag« versehen, dem Londoner Haupttelegraphenam

1910

übergeben werden, welches gegen ½ 9 Uhr vormittags den Inhalt der Briefe telephonisch bestellt. Außer einer Grundgebühr werden für je 30 Worte 3 d. (25 Pf.) erhoben.« *Elektrotechnische Zeitschrift*, 31. Jg., Heft 2, 13. Januar 1910, S. 42

Hallo Mars, hier Erde

»Im Matin spricht der amerikanische Astronom William Pickering über die Möglichkeit einer Verständigung mit Marsbewohnern, vorausgesetzt, daß solche existieren und mit einer den Erdbewohnern adäquaten Intelligenz ausgerüstet sind. Am meisten Aussicht haben nach seiner Meinung Signale durch Sonnenspiegel von etwa einem Quadratkilometer Oberfläche. Falls eine Antwort erfolgte, müßte man sehr einfache sinnfällige arithmetische Probleme signalisieren. Wären Begriffe wie Plus, Minus, von drüben verstanden, so könnte man mit komplizierteren Dingen bis zur Herstellung eines Wörterbuches schreiten.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik*, 31. Jg., Nr. 2, 15. Januar 1910, S. 22f.

Meerschweinchen als SOZIALSTRATEGEN

Von ihren wilden Verwandten haben die Hausmeerschweinchen ein flexibles Sozialverhalten geerbt. Trotzdem müssen sie in der Jugend erlernen, worauf es dabei ankommt.

In Kürze

- ▶ In größeren Kolonien bilden Hausmeerschweinchen Untergruppen mit eigener Dominanzhierarchie und **festen Bindungen** zwischen Männchen und Weibchen. Diese Struktur funktioniert relativ stressarm.
- ▶ Die Integrationsfähigkeit der Meerschweinchen in soziale Strukturen hängt von den individuellen **Sozialisierungserfahrungen** während der Adoleszenz ab, der Übergangsphase zwischen Kindheit und Erwachsenenalter. Das beeinflusst auch ihre späteren Stressreaktionen.
- ▶ Die verschiedenen Arten wilder Meerschweinchen tendieren zu unterschiedlichen **Formen des Zusammenlebens**. Die Hausmeerschweinchen gleichen darin, trotz der viel höheren Verträglichkeit, ihrer Stammart.

Von Norbert Sachser und Sylvia Kaiser

Mindestens drei Dutzend Meerschweinchen wuseln in dem kleinen Gehege herum, gut die Hälfte davon erwachsene Männchen und Weibchen, dazu Jungtiere verschiedenen Alters. Trotz aller Lebhaftigkeit geht es erstaunlich friedlich zu. Dabei hat die Gruppe nur knapp zehn Quadratmeter zur Verfügung.

Schaut man den Nagetieren länger zu, beobachtet man viele soziale Kontakte. Hier balzt ein großer Bock ein Weibchen an, dort droht ein anderer kurz einem weiteren Männchen, und das flitzt daraufhin davon. Jüngere Tiere toben miteinander herum. Ein Muttertier sucht sich mit seinen lebhaft drängenden Neugeborenen eine ungestörte Ecke – Meerschweinchen kommen als »Nestflüchter« zur Welt. Harte Auseinandersetzungen sind nicht zu sehen, auch keine verschreckten, kümmernden oder immerzu gejagten Tiere.

So viel Harmonie bei engem Zusammenleben vieler erwachsener Artgenossen ist für Säugtiere nicht selbstverständlich. Vor allem dürfen Tierpfleger von den meisten Arten normalerweise nicht mehrere erwachsene Männchen mit Weibchen zusammensperren, ohne ernste Verletzungen oder Siechtum wegen übermäßigen Stresses zu riskieren: Schon die reine Anwesenheit von Weibchen pflegt Männchen zu heftigsten Auseinandersetzungen zu veranlas-

sen. Dass die Haltung Tieren nicht behagt, erkennen die Zoopfleger außerdem oft schon daran, dass sich kein Nachwuchs einstellt.

Doch sogar Hausmeerschweinchen vertragen sich nicht automatisch. Unter manchen Bedingungen kämpfen die Böcke bis aufs Blut, oder die Unterlegenen halten ihre Situation nicht aus und werden krank. Inzwischen verstehen wir, wie und unter welchen Voraussetzungen es größere Meerschweinchengruppen zu Stande bringen, in relativ engen Verhältnissen gut miteinander zurechtzukommen.

Die wilde Stammart des Hausmeerschweinchens benimmt sich unter ähnlichen Bedingungen völlig anders: Es gelingt nach unserer Erfahrung normalerweise nicht, von diesen Tieren mehrere erwachsene Männchen zusammen mit Weibchen im selben Gehege zu halten. Uns interessierte deswegen auch, inwiefern die Domestikation die Meerschweinchen physiologisch und in sozialer Hinsicht verändert hat. Dies haben wir mit verschiedensten Verhaltensbeobachtungen und begleitenden physiologischen Untersuchungen unter anderem der Stressreaktionen eingehend erforscht.

Hausmeerschweinchen stammen aus der Andenregion Südamerikas, wo die ländliche Bevölkerung sie noch heute gern zur Fleischversorgung hält. Erst Mitte des 16. Jahrhunderts brachten Spanier die ersten dieser Nager mit nach Europa. Hausmeerschweinchen sind größer, schwerer und plumper gebaut als die Stammart – hier der Einfachheit halber Wild-

meerschweinchen genannt (siehe Bilder S. 58). Vor wenigstens 3000 Jahren, wahrscheinlich noch ein paar Jahrtausende früher, haben die Menschen im Hochland der Anden aus ihnen Haustiere gezüchtet, sie also domestiziert.

Wenn sich Hausmeerschweinchen in einer kleinen Gruppe aus jeweils etwa zwei oder drei geschlechtsreifen Männchen und Weibchen miteinander arrangieren, so bildet jedes Geschlecht seine eigene lineare Dominanzhierarchie, die in der Regel lange unverändert besteht. Die Rangordnung der Weibchen ist nicht so leicht erkennbar, weil diese sich dann selten attackieren. Meist sieht man nur gelegentlich, dass ein bestimmtes Weibchen einem anderen aus dem Weg zu gehen pflegt oder dieses ihm manchmal droht.

Dagegen ist die Rangordnung der Männchen schnell ersichtlich (Grafik S. 59 oben

links), zum Beispiel daran, dass ein unterlegenes Tier dem ranghöheren tunlichst rasch ausweicht, sobald das in seine Nähe kommt. Wer Boss ist, duldet es vor allem nicht, wenn die anderen Männchen die Weibchen umwerben oder sogar sexuell aktiv werden. Bemerkt er dergleichen, dann rennt er sofort hin und verjagt den Widersacher. Kämpfe unter den Männchen treten in einer etablierten Gruppe aber normalerweise nicht auf. Selbst zu heftigen Drohgebärden und Angriffen kommt es die meiste Zeit wenig, und wenn, dann von Seiten des ranghöchsten Tiers. Werbe- und Sexualverhalten zu den Weibchen demonstriert mit Abstand am häufigsten der Boss. Nach unseren Beobachtungen dürfte ein Großteil des Nachwuchses von ihm stammen.

In einer großen Meerschweinchengruppe herrscht dagegen ein andersartiges soziales

Hausmeerschweinchen gelingt es, mit vielen Artgenossen auf engem Raum zusammenzuleben. Die erwachsenen Tiere errichten in der Situation Unterstrukturen mit festen Bindungen zwischen den Geschlechtern. Diese soziale Organisationsform verhilft allen Beteiligten zu einem wenig belastenden, stressarmen Dasein.

ABTEILUNG FÜR VERHALTENSBIOLOGIE, UNIVERSITÄT MÜNSTER





KATJA SIEGELER

Von Tieren dieser Art, dem **Gewöhnlichen Wildmeerschweinchen (*Cavia aperea*)**, stammen die **Hausmeerschweinchen** ab.

Ein typisches Habitat des **Gewöhnlichen Wildmeerschweinchens in Brasilien**: Das Gelände bietet den **Pflanzenfressenden Nagern viel Nahrung**, aber auch **Schutz**. Sie benötigen **nur kleine Streifgebiete** und bilden **Harems** aus – feste Strukturen mit einem **Männchen** und einigen **Weibchen**.

Muster (Grafik S. 59 oben, rechts). Wächst die Anzahl geschlechtsreifer Männchen und Weibchen durch den Nachwuchs langsam auf rund ein Dutzend und mehr, dann wandelt sich die lineare Rangstruktur in eine komplexere Organisationsform. Die Kolonie – in unseren Studien waren es bis zu 50 Tiere – gliedert sich nun in stabile Untergruppen aus jeweils bis zu vier Männchen und bis zu sieben Weibchen. Trotz der gestiegenen Dichte bekommen die Weibchen weiterhin genauso oft Junge wie in kleinen Gruppen, und auch die Zahl der Angriffe und Drohgebärden steigt im Verhältnis zur Tierzahl kaum.

Zwar bilden sich auf dem engen Raum keine streng abgegrenzten Reviere. Doch jede Untergruppe hat darin ihr bevorzugtes Aufenthaltsgebiet, das sie besonders in den Ruhephasen nutzt. Wiederum erstellen die Männchen jeder Teilgruppe untereinander eine lineare Rangordnung. Interessanterweise kümmern sie sich fast nur um die Weibchen ihrer eigenen sozialen Einheit: Nur diese Tiere balzen sie an. Sogar paarungsbereite – östrische –

Weibchen anderer Untergruppen ignorieren sie fast völlig – erstaunlich bei der geringen räumlichen Distanz, bei der sie solche Weibchen zwangsläufig intensiv wahrnehmen.

Noch bemerkenswerter ist: Die jeweils ranghöchsten Männchen, von uns Alphas genannt, etablieren zu den Weibchen ihrer Untergruppe feste soziale Bindungen, die mehrere Jahre lang bestehen können. Sie halten andere Männchen – auch die der eigenen Untergruppe – von diesen Weibchen fern, vor allem während deren Paarungsphasen. Nach unseren genetischen Analysen zeugen diese Alphas über 85 Prozent des Nachwuchses ihrer Bindungspartnerinnen. Der Rest stammt von den rangniedrigeren Männchen. Auch sie binden sich, wie wir zeigen konnten, an die Weibchen ihrer Einheit und versuchen sie anzubalzen. Nur lässt der Alphabock ihr Werben meist nicht zu. Sogleich kommt er angerannt und jagt sie weg.

Jene dauerhafte Untergliederung in Untergruppen, die sich gegenseitig tolerieren, ermöglicht den Meerschweinchenkolonien offenbar das relativ friedliche Zusammenleben. Denn diese stabile Struktur dürfte es allen Tieren erleichtern, sich unter verlässlichen Bedingungen zu orientieren, sowohl hinsichtlich der Artgenossen als auch der Raumverteilung. Die stärksten Männchen gehören zu verschiedenen Untergruppen. Zwischen ihnen sind heftige Auseinandersetzungen nicht mehr erforderlich, da sie die Geschlechtsbeziehungen der anderen dominanten Böcke respektieren und nicht um dieselben Ressourcen – insbesondere dieselben Weibchen – konkurrieren. Aber auch die rangniedrigeren Tiere finden in einer solchen Struktur eine Position, in der sie sich einrichten können.

Das bedeutet: Während bei kleinen Gruppen die Rangordnung hervorsticht, prägen bei großen die sozialen Bindungen zwischen



BEIDE FOTOS: MATTHIAS ASHER, UNIVERSITÄT MÜNSTER



Männchen und Weibchen das Bild. Unseres Erachtens erleichtert der Wechsel von der einfacheren Ordnung in die komplexere die Anpassung an hohe Populationsdichten. Wir halten das für einen besonderen sozialen Mechanismus, der einer größeren Kolonie Ruhe und entspannte Verhältnisse ermöglicht. Denn interessanterweise wechseln Hausmeerschweinchen immer – unabhängig von den Individuen – in die komplexere soziale Struktur, wenn eine Gruppe unter den beschriebenen Bedingungen anwächst.

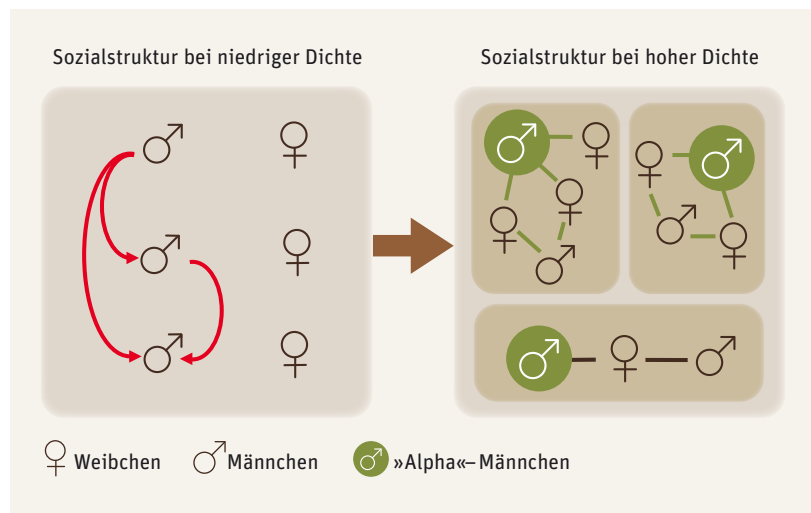
Es scheint die Nager psychisch tatsächlich nicht zu belasten, in einer vielköpfigen Kolonie zu leben. Nach unseren Befunden leiden darunter auch nicht die unterlegenen Tiere. Wir schließen das aus einer Reihe von Anzeichen. Zum einen handelt es sich um Verhaltensindizes: Die Anzahl der Auseinandersetzungen steigt nicht merklich, und die Weibchen bringen genauso regelmäßig Junge zur Welt wie in kleinen Gruppen. Doch zum anderen besagen das auch unsere physiologischen Daten, allen voran Stresshormonmessungen. Aufschlussreich war insbesondere das Hormon Cortisol, das die Nebennierenrinde ausschüttet. Es gilt als das eigentliche Stresshormon, da es psychische und physische Belastungen anzeigt.

Schutz durch Bindungspartner

Tiere, die bei hoher Populationsdichte in den Kolonien lebten, wiesen keine höheren Blutkonzentrationen des Cortisols auf als Tiere in kleinen Gruppen. Somit scheint das enge Zusammenleben mit vielen Artgenossen die Hausmeerschweinchen unter den geschilderten Voraussetzungen nicht sonderlich zu belasten.

Des Weiteren stellten wir fest, dass sich in den großen Kolonien hoch- und niederrangige Männchen bezüglich ihrer Stresshormonkonzentrationen nicht unterscheiden. Ein niedriger sozialer Status muss ein Tier somit nicht zwangsläufig physisch oder psychisch mehr belasten als die hohe Position das dominante Männchen. Nach unseren Studien ist dafür aber wichtig, dass die sozialen Beziehungen der Männchen untereinander geklärt sind. Andernfalls, wenn die Hierarchie nicht ausgehandelt ist und dies fortwährend zu Reibereien führt, gehen auch bei Hausmeerschweinchen die Stresshormonlevel in die Höhe.

Uns interessierte der Einfluss der Männchen-Weibchen-Beziehungen auf die physiologischen Reaktionen. In einer Reihe von Untersuchungen, die wir zusammen mit dem Tierpsychologen Michael Hennessy von der Wright State University in Dayton (Ohio) durchführten, konnten wir zeigen, dass die



Anwesenheit des Bindungspartners gegen akuten Stress schützt (siehe Grafik unten).

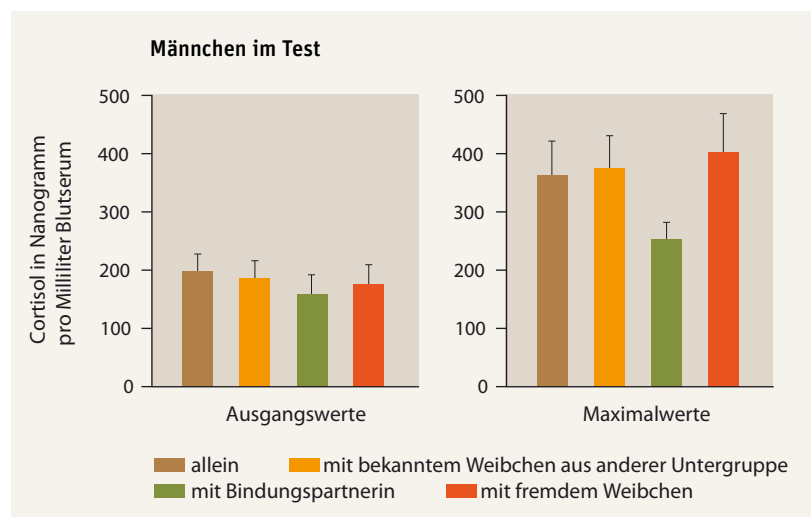
Wird ein Männchen aus einer Kolonie allein in ein ihm fremdes Gehege gesetzt, so tritt – wie bei allen Säugetieren – sehr schnell eine Stressreaktion auf. Innerhalb von ein bis zwei Stunden steigen die Cortisolkonzentrationen im Blut um etwa 80 Prozent an. Nach ein paar Stunden normalisiert sich der Hormonlevel wieder auf den der Ausgangssituation.

Wenn wir in diesen Studien zu einem Männchen unter sonst gleichen Bedingungen ein Weibchen aus der vertrauten Kolonie dazusetzten, das dort jedoch einer anderen Untergruppe angehörte, stieg das Cortisol sogar noch etwas mehr an. Und noch etwas höhere Werte bauten dieselben Männchen auf, wenn wir sie in dem fremden Gehege zudem mit einem völlig fremden Weibchen konfrontierten.

Deutlich anders reagierten dieselben Böcke, wenn sie in dem fremden Gehege ihr Lieblingsweibchen aus ihrer eigenen Untergruppe vorfanden. Jetzt stieg das Stresshor-

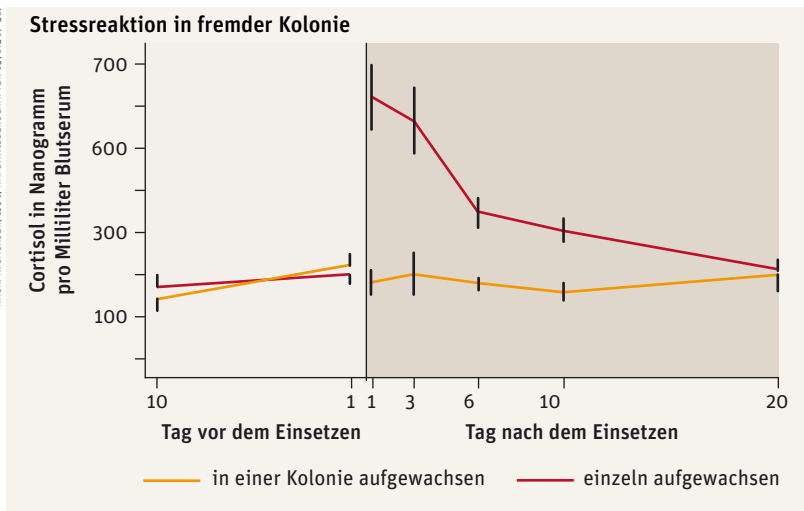
Bei zunehmender Dichte wechseln Hausmeerschweinchen in eine neue soziale Struktur. Nicht mehr die Hierarchie zwischen den Böcken, sondern die Bindungen zwischen Männchen und Weibchen stehen nun im Vordergrund.

In ein fremdes, leeres Gehege zu kommen, provoziert bei Meerschweinchenböcken eine starke Stressantwort. Das Stresshormon Cortisol steigt deutlich weniger, wenn das Männchen dort ein Weibchen antrifft, zu dem eine soziale Bindung besteht. Andere Weibchen bieten den Schutz nicht – im Gegenteil.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: N. SACHSER, 1986, BEHAVIOUR 97, S. 253-272
SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: N. SACHSER, M. DURSCHLAG & D. HIRZEL, 1998, PSYCHONEUROENDOKRINOLOGY 23 (8), S. 891-904

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK.
NACH: N. SACHSER, 1998, NATURWISSENSCHAFTEN 85, S. 307-317



Sozialisationserfahrungen in der Adoleszenz wirken sich auf das spätere soziale Verhalten und die Stressreaktionen von Hausmeerschweinchen entscheidend aus. Nur Männchen mit entsprechenden frühen Erlebnissen integrieren sich später problemlos in große Gruppen.

mon lange nicht so stark an wie in sämtlichen der anderen Testsituationen. Im Übrigen galt Gleiches umgekehrt auch für die Weibchen: War ein Bindungspartner anwesend, verkrafteten sie die aufregende Situation viel besser.

Diese Befunde zeigten uns, dass Hausmeerschweinchen von Bindungspartnern profitieren. Ist das andere Tier in einer neuen Lebenslage dabei, dann schaukelt sich die Stressantwort deutlich weniger hoch. Stressforscher wie Dietrich von Holst von der Universität Bayreuth prägen dafür den Ausdruck »soziale Unterstützung«.

Dass sich Hausmeerschweinchen bei hoher Populationsdichte miteinander stress- und aggressionsarm zu arrangieren vermögen, verdanken sie zum einen ihrer Domestikation, die sie verträglicher machte. Zum anderen vermuten wir, dass die Eigenschaft, nicht nur Dominanzbeziehungen, sondern auch soziale Bindungen auszubilden und zu respektieren, schon von der Wildform stammt. Interessanterweise beherrschen die Hausmeerschweinchen diesen differenzierten und toleranten Umgang mit Artgenossen allerdings nicht instinktiv, also quasi automatisch.

Denn nur Männchen, die in größeren gemischtgeschlechtlichen Gruppen aufwachsen, integrieren sich als Erwachsene ohne Probleme in fremde Kolonien. Am ersten Tag erkunden sie die neue Umwelt, aber sie greifen die ansässigen Männchen nicht an, und sie umwerben auch nicht die Weibchen. Während der nächsten Tage gliedern sie sich in das bestehende soziale Gefüge ein, ohne dass dabei größere Auseinandersetzungen auftreten. Manche nehmen dann sogar eine höhere soziale Position ein als früher. Bei diesen Tieren steigt während der Integrationsphase die Stresshormonkonzentration nicht (siehe Grafik oben). Sie verlieren auch kein Gewicht.

Ganz anders Männchen, die einzeln oder nur zusammen mit einem Weibchen aufwachsen: Sobald sie in der neuen Gruppe auf ein Weibchen treffen, balzen sie dieses heftig an. Und sie attackieren die Böcke, denen sie begegnen. Allerdings werden sie im Lauf des ersten Tages von den Alphamännchen besiegt. Danach ziehen sie sich in eine Ecke des Geheges zurück, meiden fortan Kontakte und werden auch von den anderen in Ruhe gelassen. Trotzdem nehmen sie bis zum dritten Tag zehn Prozent Gewicht ab. Der Cortisollevel, der in den ersten fünf Stunden auf fast das Dreifache ansteigt, normalisiert sich erst nach drei Wochen wieder (siehe Grafik links).

In einer Reihe von Studien haben wir die Hintergründe für diese Verhaltensunterschiede ermittelt. Kurz gesagt weisen unsere Ergebnisse auf eine entscheidende Rolle von sozialen Erfahrungen während der Adoleszenz hin, der Übergangsphase zwischen Kindheit und Erwachsenenalter. In diesem Alter wird das adäquate Verhalten durch Sozialisation gelernt. Wachsen die jungen Männchen in den Kolonien heran, so sind sie in der Phase in aggressive Auseinandersetzungen mit älteren, dominanten Böcken verwickelt. Hierbei erwerben sie diejenigen sozialen Fähigkeiten, die sie benötigen, um sich später mit gleichgeschlechtlichen Artgenossen stress- und aggressionsarm arrangieren zu können.

Wichtige Jugenderfahrungen

Lebt ein Männchen aber in der Adoleszenz allein oder nur zusammen mit einem Weibchen, dann erfährt es in dieser entscheidenden Entwicklungsphase keine aggressiven Interaktionen mit gleichgeschlechtlichen Artgenossen. Darum lernt es essenzielle soziale Fähigkeiten nicht. Die Folge davon sind eskaliertes aggressives Verhalten und starke hormonelle Stressreaktionen in den beschriebenen Situationen. Begegnungen zwischen zwei so aufgewachsenen Tieren müssen in der Regel abgebrochen werden, weil sonst schwer wiegende gesundheitliche Schäden auftreten würden, bis hin zum Tod. Für die Hausmeerschweinchenweibchen fanden wir Gleiches nicht. Unabhängig von ihren Sozialisationserfahrungen integrieren sie sich in fremde gemischtgeschlechtliche Sozialverbände immer stress- und aggressionsarm.

Soweit bisher untersucht, tendieren alle höheren Wirbeltiere dazu, beim Zusammenleben feste Dominanzbeziehungen zu errichten. Das gilt sogar für solche Arten, deren Angehörige von sich aus zu sozialer Toleranz, Kooperation und freundschaftlichen Beziehungen neigen. Selbst sie verzichten nicht auf die soziale Schichtung als ein anscheinend wesentliches Grundmuster. Wie viele Befunde zeigen, ist es

für die Individuen in Gruppen lebender Arten sogar essenziell, in eine derart geregelte soziale Struktur integriert zu sein. Denn nur bei klaren, somit verlässlichen Rangverhältnissen müssen weder ein niedriger sozialer Status noch eine hohe Individuenzahl eine Belastung darstellen. Unklare oder häufig wechselnde Dominanzverhältnisse wirken sich dagegen oft äußerst ungünstig auf das Befinden der Tiere aus. Die physiologischen Stresssysteme arbeiten dann auf Hochtouren. Schließlich werden die Betroffenen krank und können daran auch sterben.

Eine geklärte Position in der Hierarchie gibt dem Individuum Rückhalt – sogar dann, wenn es einen niedrigen Rang innehat. Doch es gibt nicht nur schlechte Einflüsse des sozialen Umfelds auf die körperlichen Stressreaktionen, die es möglichst einzuschränken gilt. Durch ihre Anwesenheit allein können Artgenossen auch in der Gegenrichtung, also Stress reduzierend wirken. Gerade aufregende Situationen mildern sich dadurch für ein Tier manchmal stark. Allerdings sind die Artgenossen nicht unbedingt austauschbar. Oft hilft nur ein Bindungspartner.

Wie man sich mit Artgenossen arrangiert, um einigermaßen verträglich miteinander aus-

zukommen, lernen Säugetiere anscheinend hauptsächlich während ihrer Sozialisation. Erfahrungen in der Jugend beeinflussen das Befinden, die physiologischen Reaktionen und die Krankheitsanfälligkeit der erwachsenen Tiere. Über die Sozialisation entscheidet sich, welche der genetisch vorgegebenen Verhaltensmöglichkeiten später auftreten. Hier stellen sich Weichen, wie ein Tier innerlich und äußerlich mit bekannten und fremden Artgenossen und mit aggressivem Verhalten umgeht.

Von Wildmeerschweinchen geerbt

Die Eigenschaft der domestizierten Meerschweinchen, bei hoher Individuenzahl stabile Bindungen zum anderen Geschlecht auszubilden, scheint, wie gesagt, ein Erbe der wilden Stammform zu sein. Denn diese Wildmeerschweinchenart, die in Südamerika weit verbreitet vorkommt, lebt dort in dauerhaften Paaren oder in kleinen Harems, also in Einheiten aus einem Männchen und bis zu drei Weibchen. Das ergaben Studien, die wir gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen der Universitäten Bielefeld, Bochum und São Paulo (Brasilien) durchführten. Dabei verwendeten wir auch radiotelemetrische Posi-

Die einzelnen Wildmeerschweinchenarten unterscheiden sich in ihren Tendenzen des Zusammenlebens. Der Hintergrund dafür sind spezifische Anpassungen an die jeweilige Umwelt. Die Gewöhnlichen Wieselmeerschweinchen (*Galea musteloides*, Foto unten) beispielsweise neigen zur Promiskuität: Die Weibchen initiieren eine Paarungsjagd und werden von mehreren Männchen begattet.



ABTEILUNG FÜR VERHALTENSBIOLOGIE, UNIVERSITÄT MÜNSTER

Die Wild- und die Haustierform von *Cavia aperea* wirken sehr verschieden. Beide lassen sich aber leicht kreuzen. Die Verhaltensweisen selbst blieben den Hausmeerschweinchen erhalten, jedoch äußern sie manche davon mehr, andere seltener als ihre nicht domestizierten Verwandten.



ABTEILUNG FÜR VERHALTENSBIOLOGIE, UNIVERSITÄT MÜNSTER

tionsbestimmungen sowie genetische Vaterschaftsanalysen.

Die kleinen Gruppen haben feste Streifgebiete, die sich nur wenig mit anderen überlappen. Die Haremschefs sind ausgewachsene Tiere von über 500 Gramm Gewicht. Bei hohen Populationsdichten fallen außerdem so genannte Vagabunden auf: etwas leichtere Männchen, die in der gesamten Population umherstreifen. Zudem treten so genannte Satellitenmännchen auf, die sich einem Harem für längere Zeit anschließen. Diese jungen Böcke wiegen keine 350 Gramm. Die meisten Jungtiere in einem Harem stammen tatsächlich von seinem Chef. Vereinzelt entdeckten wir zwar auch Würfe mit mehreren Vätern, aber im Vergleich zu vielen anderen Nagerarten war deren Anteil mit nur etwa jedem fünften Wurf klein.

Zunächst hatten wir angenommen, dass die Harems der Wildmeerschweinchen allein deswegen entstehen, weil sich erwachsene Männchen nicht vertragen. Auswahltests in unserem Institut zeigten allerdings, dass auch die Weibchen dabei eine aktive Rolle spielen. Offenbar geht die Bindung zu einem bestimmten Männchen ebenso von ihnen aus. Dagegen meiden die Weibchen desselben Harems in der Regel die Nähe der anderen Weibchen. Enge Kontakte und aufeinander bezo-



UND WENN ER WIEDER ÜBER DIE DUMMHIT DER MEERSCHWEINCHEN LÄSTERT, VERSAUEN WIR IHM SEINE RESULTATE MIT EINEM PLACEBO EFFEKT!

genes freundliches Verhalten sieht man im Freiland nur zwischen Männchen und Weibchen derselben Einheit.

Soweit bisher bekannt, gibt es etwa 15 verschiedene Arten von wilden Meerschweinchen. Alle leben in Südamerika. Sie werden vier verschiedenen Gattungen zugeordnet: *Cavia*, *Galea*, *Microcavia* und *Kerodon*. Mehrere dieser Arten werden inzwischen auch in Deutschland in Tiergärten und an Forschungsinstituten gehalten, auch bei uns an der Universität Münster. Die Hausmeerschweinchen stammen vom so genannten Gewöhnlichen Wildmeerschweinchen ab, der Art *Cavia aperea*. Sie gehören noch immer zur selben Art. Das Verhaltensrepertoire hat sich nicht verändert. Auch können sich beide Formen verständigen, lassen sich miteinander kreuzen, und die Nachkommen pflanzen sich problemlos weiter fort.

Verschiedene Paarungssysteme

Die einzelnen Meerschweinchenarten benehmen sich ganz unterschiedlich. Das macht sie für Analysen zur sozialen Evolution besonders interessant. Gut untersucht ist etwa die Art *Galea musteloides*, das Gewöhnliche Wieselmeerschweinchen (siehe Bild S. 61). Nicht nur im Äußeren, auch im Verhalten sieht man fast auf den ersten Blick klare Unterschiede zum Gewöhnlichen Wildmeerschweinchen. Diese Wieselmeerschweinchen vertragen sich in Gehegen mit großen gemischtgeschlechtlichen Gruppen ohne Weiteres. Wir beobachteten keine lang anhaltenden individuellen Beziehungen zwischen einzelnen Männchen und Weibchen. Östrische Weibchen tendieren stark dazu, sich mit mehr als einem Männchen zu paaren. Entsprechend bestimmten wir durchschnittlich für vier von fünf Würfen mehrere Väter.

Diese Verhaltensunterschiede der beiden Arten passen zu den jeweiligen ökologischen Gegebenheiten in ihren Lebensräumen. *Cavia aperea* hat sich an feuchte Graslandhabitate angepasst (siehe Bild S. 58). Dort ist reichlich Nahrung vorhanden und zudem gleichmäßig verteilt, so dass ein Weibchen mit einem recht kleinen Streifgebiet von ein paar hundert Quadratmetern auskommt. Es macht auch nichts, dass andere Weibchen teils auf derselben Fläche grasen. Bei so wenig Raumbedarf können die größten Böcke leicht ein oder sogar mehrere Weibchen für sich allein beanspruchen und sie gegen Rivalen verteidigen – woraus die Haremsstruktur resultiert.

Zugleich besteht in solchen Habitaten aber ein hoher Feinddruck durch Raubtiere. Neben den offenen Grasflächen benötigen die Meerschweinchen zum Verstecken unbedingt



Auch Monogamie tritt bei Meerschweinchen auf: Das Münstersche Wieselmeerschweinchen (*Galea monasteriensis*) bildet feste Paare.

KONSTANTIN AGELOPOULOS, UNIVERSITÄT MÜNSTER

höhere, dichte Vegetation. Bei Gefahr verharren sie darin fast bis zum letzten Moment völlig reglos. Säugetiere mit dieser Feindvermeidungsstrategie pflegen sich generell unauffällig zu benehmen und von Artgenossen fernzuhalten. Das Gewöhnliche Wildmeerschweinchen stellt in der Hinsicht keine Ausnahme dar. Hiermit mag zusammenhängen, dass diese Art keine großen Gruppen bildet und dass ein Männchen nur ganz wenige Weibchen zu verteidigen vermag.

Dagegen lebt die Art *Galea musteloides* in Halbwüsten, also in Gegenden mit spärlicher Vegetation. Dort finden die Nager nur auf großen Flächen genügend Futter. Entsprechend haben die Weibchen Streifgebiete von über 2000 Quadratmetern (Männchen sogar über 10000) – deutlich größer als bei *Cavia aperea*. Auf so weiten Flächen können die Männchen Weibchen anscheinend nicht monopolisieren. Deswegen entstand bei dieser Art wohl erst gar keine Tendenz zu sozialen Bindungen. Die Tiere paaren sich vielmehr relativ wahllos.

Unseren Studien zufolge herrscht bei den Meerschweinchenarten demnach nicht eine bestimmte soziale Organisationsform vor, die allenfalls leichte Abweichungen vom Hauptmuster erlaubt. Nicht einmal die Arten derselben Gattung verhalten sich gleich. Das beweisen sowohl Beobachtungen an einer anderen *Galea*- als auch an einer weiteren *Cavia*-Art.

Das so genannte Große Wildmeerschweinchen, *Cavia magna*, bildet keine Harems. Nach Freilanduntersuchungen scheinen die Tiere keine Bindungen aufzubauen und auch nicht in stabilen Gruppen zu leben. Offenbar paaren sie sich ziemlich beliebig. Diese Art hat sich damit anscheinend an die unvorhersehbaren ökologischen Gegebenheiten in ihrem Lebensraum angepasst, in dem nach hef-

tigen Regenfällen häufig Überflutungen auftreten.

Das Münstersche Wieselmeerschweinchen, *Galea monasteriensis*, lebt im Andenhochland Boliviens. Freilanduntersuchungen an dieser Wildmeerschweinchenart gibt es bisher nicht. Wir entdeckten sie erst kürzlich, als wir neue Wieselmeerschweinchen einführten, um unseren Bestand aufzufrischen. Von Anfang an stach ihr Verhalten von dem der uns bekannten *Galea*-Art ab. Denn die Münsterschen Wieselmeerschweinchen bilden feste Paare – sie leben monogam (Bild oben).

Zusammengefasst widersprechen diese neueren Befunde der Annahme, die Paarungs- und Sozialsysteme der Meerschweinchen und der mit ihnen verwandten südamerikanischen Nagetiere seien stammesgeschichtlich vorherbestimmt. Viel wahrscheinlicher sind sie in ihrer Vielfalt an die spezifischen Bedingungen der jeweiligen ökologischen Nische angepasst, was in Einklang mit den Theorien der Verhaltensökologie stünde.

In der Verhaltensbiologie gelten die Hausmeerschweinchen mittlerweile als ein Modellorganismus für die Analyse sozialer Strukturen und Prozesse. Der Zusammenhang von sozialer Umwelt, Verhalten und Belastung ist bei kaum einem anderen Tier so gut untersucht wie bei ihnen. Gleichzeitig haben wir und auch andere das Leben der wilden Vorfahren in ihrem natürlichen Habitat analysiert und die Veränderungen vom Wild- zum Haustier beim Domestikationsprozess ermittelt. Diese Untersuchungen lieferten nicht nur ein umfassendes biologisches Verständnis des Hausmeerschweinchens, sondern erbrachten auch allgemeine Gesetzmäßigkeiten der Ursachen und Konsequenzen sozialen Verhaltens bei Säugetieren, mit wichtigen Implikationen für den Menschen. ◀



Norbert Sachser hat an der Universität Münster eine Professur für Zoologie und leitet dort seit 1994 die Abteilung für Verhaltensbiologie. **Sylvia Kaiser** ist dort seit 1998 wissenschaftliche Assistentin. Sie habilitierte sich im Jahr 2004 im Fachbereich Biologie.

Asher, M. et al.: Large Males Dominate: Ecology, Social Organization, and Mating System of Wild Cavies, the Ancestors of the Guinea Pig. In: Behavioral Ecology and Sociobiology 63, S. 1509 – 1521, 2008.

Hennessy, M. B. et al.: Social Buffering of the Stress Response: Diversity, Mechanism and Functions. In: Frontiers in Neuroendocrinology 30(4), S. 470 – 482, 2009.

Sachser, N. et al.: Social Relationships and the Management of Stress. In: Psychoneuroendocrinology 23, S. 891 – 904, 1998.

Sachser, N., Kaiser, S.: The Social Modulation of Behavioural Development. In: Kappeler, P. (Hg.): Behaviour: Evolution & Mechanisms. Springer (im Druck).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014862.

Wie das Gehirn ZUR SPRACHE KOMMT

Die Neuropsychologin Angela Friederici erforscht die spezifisch menschliche Fähigkeit, Sprache zu verwenden. Ihr interdisziplinärer Ansatz überwindet die notorische Kluft zwischen Geistes- und Naturwissenschaft.

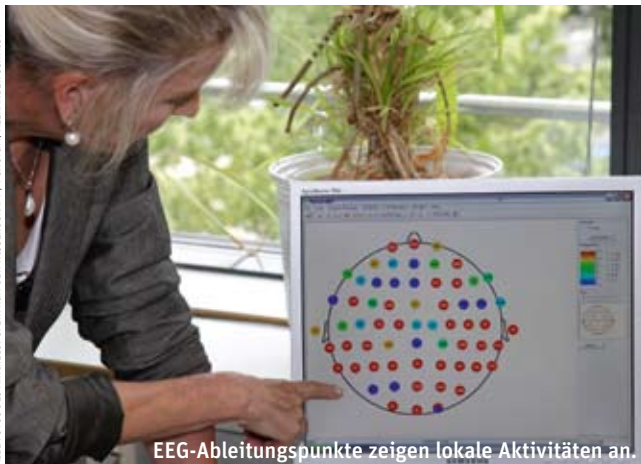
Von Michael Springer

Erst ganz am Ende seines monumentalen Romans »Auf der Suche nach der verlorenen Zeit« lässt Marcel Proust sein Alter Ego den Entschluss fassen, eben dieses Werk der Erinnerung in Angriff zu nehmen. Der Autor im Buch wird also beginnen, just das Buch zu schreiben, das wir Leser einige Seiten weiter bedauernd zuklappen werden – eine schöne selbstbezügelte Schleife. Auf diesen allerletzten Seiten überlegt Proust, was den Autor daran hindern könnte, seine Recherche zu vollenden. Er könnte zu früh sterben, oder ein Schlaganfall könnte ihn der Spra-

che berauben. Vielleicht endet er »genauso wie diejenigen, die am stärksten überzeugt sind, dass ihre Zeit abgelaufen ist, sich dennoch leicht überreden lassen, ihre Unfähigkeit, gewisse Wörter auszusprechen, habe nichts mit einem Schlaganfall, mit Aphasie zu tun, sondern müsse von einer Ermüdung der Zunge, einem dem Stottern ähnlichen Nervenzustand oder der auf eine Verdauungsstörung folgenden Erschöpfung herrühren.«

Das Wissen um den Zusammenhang zwischen Hirnläsionen und Sprachstörungen war um 1900 noch relativ neu, doch Marcel Proust war darüber durch seinen Vater, einen prominenten Nervenarzt, bestens informiert. Damals boten die unterschiedlichen Störungsbilder der Aphasie, hervorgerufen durch Hirnschlag oder Kopfverletzung, die einzige Chance, den Zusammenhang von Sprache und Gehirn zu erforschen. Erst mit der Elektroenzephalografie (EEG) und modernen bildgebenden Verfahren lässt sich der Zusammenhang zwischen Hirntätigkeit und Sprache detailliert untersuchen.

Ein Star der Forschung auf diesem Gebiet ist Angela Friederici. Sie personifiziert durch ihren Werdegang – von Germanistik über Psychologie zu Neurologie – den Brückenschlag zwischen Geistes- und Naturwissenschaft, ohne den heute kein tieferes Verständnis von Sprache möglich ist. Das Medium, in dem wir sprechen und lesen, denken und dichten, mailen und twittern, ist ein spezifisch menschliches Natur- und Kulturprodukt komplex verschalteter Neuronenbündel. Es bereitete mir großes Vergnügen, zu sehen, wie in den Augen von Frau Friederici, während wir uns mit der Sprache über die Sprache unterhielten, immer dann, wenn von der Aussicht auf neue Erkenntnisse die Rede war, die pure Forscherlust aufblitzte.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PUNCTUM, ALEXANDER SCHMIDT

EEG-Ableitungspunkte zeigen lokale Aktivitäten an.

ZUR PERSON

Angela D. Friederici studierte Linguistik und Psychologie an den Universitäten Bonn und Lausanne. 1976 promovierte sie in Bonn im Fach Linguistik und machte 1980 im Fach Psychologie ihr Diplom. 1986 habilitierte sie sich in Gießen in Psychologie. Nach ihrer Promotion forschte sie am Massachusetts Institute of Technology (MIT), an den Universitäten in Paris und San Diego, später am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nijmegen (Niederlande). 1989 übernahm sie den Lehrstuhl für Kognitive Psychologie der Freien Universität Berlin und wechselte 1994 als Gründungsdirektorin an das Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften. Sie leitet dort die Abteilung Neuropsychologie und untersucht die Vorgänge im menschlichen Gehirn beim Verständnis von Sprache. Sie hat drei Honorarprofessuren inne, in Psychologie (Universität Leipzig), in Linguistik (Universität Potsdam) und an der Charité (Universitätsmedizin Berlin). 1990 erhielt Angela Friederici den Alfred-Krupp-Preis für junge Hochschul-lehrer, 1997 den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis der DFG. Sie ist Mitglied der Nationalen Akademie der Wissenschaften, der Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Academia Europaea.



Spektrum der Wissenschaft: Frau Professor Friederici, wie kamen Sie zur Wissenschaft? Hatten Sie früh Interesse an empirischer Naturforschung, oder interessierte Sie mehr die Erforschung von Geist und Sprache?

Prof. Dr. Angela Friederici: Ganz am Anfang stand sicherlich mein Vater, der selbst Wissenschaftler war – Hämatologe – und mit dem ich einige Male ins Labor durfte. Beim Entschluss, was ich studieren wollte, stand aber eher die Sprache im Vordergrund. Deshalb habe ich zunächst Germanistik studiert. Ich merkte aber bald, dass das, was in den Grammatikbüchern steht, nicht unbedingt das ist, was der Mensch spricht. Mich faszinierte ein Gastdozent an der Universität Bonn, der ein Seminar über Sprachstörungen leitete. Von dem lernte ich, dass man durch bestimmte Hirnschädigungen, etwa bei einem Schlaganfall, nicht gleich die gesamte Sprache verliert, sondern nur spezifische Teilfähigkeiten.

Spektrum: Was für eine Fachrichtung hatte dieser Dozent?

Friederici: Günter Peuser war Linguist wie ich, hatte sich aber mit einem DFG-Projekt in einer Klinik für Sprachgestörte angesiedelt. Ich fand enorm interessant, dass man durch

eine Hirnschädigung auf einmal seine Grammatik verlieren kann. Man besitzt Wörter, man kann sich im Grunde genommen auch noch im Telegrammstil verständlich machen – aber die Grammatik ist weg. Ich erlebte, dass das, was wir als Geist bezeichnen, eine materielle Grundlage hat, eben das Gehirn. Und von da an bin ich meinen Weg gegangen.

Spektrum: Wie sah der aus?

Friederici: Nachdem ich die Germanistik hinter mir hatte, absolvierte ich noch ein volles Psychologiestudium, um Sprachprozesse zu verstehen. Die Sprache wird ja in der Germanistik als statisch beschrieben, aber der Prozess der Kommunikation ist ein psychologischer Vorgang. Als dritter Aspekt trat das Gehirn hinzu. Ich ging in die USA und lernte in einem Jahr sozusagen Hirnforschung im Kleinformat. Ich war dort in Boston am Massachusetts Institute of Technology tätig, und gleichzeitig sah ich am Veterans Administration Hospital an den Patienten die Relation zwischen Sprache und Gehirn.

Spektrum: Sie untersuchen, wie das Gehirn Sprache verarbeitet. Das ist ja ein interdisziplinärer Ansatz: Die geisteswissenschaftliche Sprachwissenschaft wird kombiniert mit na-

**SPRACHE
UND GEHIRN**

Broca-Areal und Wernicke-Areal bilden die Hauptkomponenten des Sprachzentrums. Beide liegen bei den meisten Menschen in der linken Hirnhälfte – das Broca-Areal im linken Frontallappen, das Wernicke-Areal weiter hinten im linken Schläfenlappen. Benannt ist das Broca-Areal nach dem französischen Chirurgen Paul Broca (1824 – 1880), der es 1861 entdeckte. Das Wernicke-Areal wurde im Jahr 1874 von dem deutschen Neurologen Carl Wernicke (1848–1905) beschrieben. Aus der Art der Sprachstörung bei Schädigung eines dieser Areale schloss man damals, dass das Broca-Areal vor allem für die Sprachproduktion zuständig ist, das Wernicke-Areal eher für das Verstehen. Erst moderne bildgebende Verfahren, vor allem die Kernspintomografie, zeigen im Detail, wie diese Areale über unterschiedliche Nervenstränge komplex zusammenwirken, und welche Hirnareale zusätzlich im Spiel sind, wenn Menschen zuhören, sprechen oder lesen.

»Es ist schon faszinierend, dass Kinder in aller Welt mit jeder Sprache zurechtkommen«



turwissenschaftlicher Hirnforschung. Haben Sie dabei erlebt, dass Natur- und Geisteswissenschaft oft immer noch zu wenig voneinander wissen?

Friederici: Ich glaube, das hat etwas mit der Ausbildung zu tun. Die läuft doch jeweils sehr fachintern. Inzwischen hat man dazugelernt und arbeitet im Graduiertenprogramm, wenn es auf die Promotion zugeht, schon eher interdisziplinär. Ich glaube, wenn man die Kluft überwinden will, muss man bei den Studenten anfangen und sie in interdisziplinäre Kontexte einbinden. Wenn Sie hier durch unser Institut gehen, treffen Sie Philosophen, Psychologen, Linguisten, Mathematiker, Physiker, Chemiker, Geologen – wir haben alle hier. Für Sie wäre es wahrscheinlich schwierig, auf Anhieb zu sagen, wer welche Profession hat. Der Physiker kann Ihnen etwas über Sprachverarbeitung erzählen – und ich verstehe ein bisschen was von Physik.

Spektrum: Aber wie kamen Sie zur Physik? Es ist doch leider so, dass in den »harten«, empirienahen Wissenschaften die Männer dominieren.

Friederici: Dazu kann ich auf Grund meiner Laufbahn eigentlich wenig sagen. Sprache ist etwas, was man vielleicht doch Frauen zu-traut. Wenn man dann dafür noch Hirnforschung braucht, ist das wohl eher akzeptabel, als wenn man gleich in die ganz harte Physik geht. Kommunikation und Sprache sind keine Männerdomänen, und das hat mir vielleicht den Weg ein bisschen geebnet.

Spektrum: Was haben Sie über Sprachverarbeitung herausgefunden? Es gibt ja in der Linguistik die Frage: Was ist an Grammatik angeboren, und was muss ein Kind erst mehr oder weniger mühsam erlernen?

Friederici: Es ist schon faszinierend, dass Kinder in aller Welt mit jeder Sprache zurechtkommen. Sprachen sind ja sehr unterschiedlich, und das spätere Erlernen einer Zweitsprache fällt oft sehr schwer. Das Kind sucht offenbar von Anfang an Regularitäten im Sprach-Input, und das erleichtern ihm die Eltern durch häufiges Wiederholen und besonderes Betonen: »Hat die Milch denn geschmeckt? War die Milch denn gut? Ist die Milch heute gut?«

Indem das Kind solche Wiederholungen hört, ein Wort in einem ganz bestimmten Kontext, der sich aber ändert, kann das Kind dieses eine Wort, wenn es auch noch besonders betont wird, herausfiltern: Aha, das ist ein Wort, das irgendwie etwas Besonderes bedeutet, wahrscheinlich hat es etwas mit dem zu tun, was ich gerade esse. Das ist das eine. Das andere ist, wie Kinder Grammatik erlernen. Da haben wir gerade ein sehr interes-

santes Experiment gemacht. Wir ließen sehr kleine Kinder – die waren erst vier Monate alt! – aus deutschen Elternhäusern ein wenig italienische Grammatik lernen.

Spektrum: Wie kann man so ein Experiment überhaupt kreieren?

Friederici: Im Italienischen geht ein bestimmtes Hilfsverb mit einer ganz bestimmten Verbform zusammen. Ein Beispiel wäre im Deutschen »Er ist gelaufen«, dagegen die Form »Er wird laufen«. Das gilt im Italienischen auch. Wir haben nun den Kindern in vier so genannten Lernphasen von weniger als 3,5 Minuten jeweils 64 Sätze vorgespielt, die immer korrekt waren; immer ging das eine Hilfsverb mit der einen Verform zusammen und das andere mit der anderen Form. Wir haben aber die Verben variiert – 32 verschiedene Verben. Das Einzige, was immer konstant blieb, war das Hilfsverb und die Flexionsform des Verbs. Und die Kinder haben nach insgesamt 13 Minuten diese Regel kapiert. Wir präsentieren nach jeder Lernphase richtige und falsche Kombinationen, also das falsche Hilfsverb mit einer nicht passenden Endung, und sehen dann, dass das Gehirn die richtigen von den falschen Sätzen unterscheidet.

Spektrum: Wie sehen Sie das?

Friederici: Wir erkennen Unterschiede im ereigniskorrelierten Hirnpotenzial ...

Spektrum: ... also nicht allein im Verhalten des Kindes.

Friederici: Nein, das können wir in dem Alter noch nicht sehen, sondern wir leiten die Hirnaktivitäten mittels Elektroenzephalogramm (EEG) ab. Das Ergebnis halte ich für einen erstaunlichen Beweis dafür, wie früh diese Suche nach sprachlichen Regularitäten schon losgeht.

Spektrum: Sie würden aber nicht so weit gehen wie einerseits Noam Chomsky, andererseits Steven Pinker, die behaupten, dass es eine angeborene Universalgrammatik gibt?

Friederici: Ich würde gern daran glauben, aber im Moment hat das noch keiner bewiesen. Wenn wir jedoch Universalgrammatik nicht verstehen als eine Grammatik, die schon ganz bestimmte Formen hat, sondern eher als eine Fähigkeit, Regularitäten im Sprach-Input zu erkennen, dann sind unsere Resultate ein erster Schritt dahin. Aber danach müsste man noch beweisen, dass just jene vier, fünf Parameter, die Chomsky als universell ansieht, auch diejenigen sind, welche die Kinder als erste können, während andere Variationen der Sprache erst später dazukommen.

Spektrum: Aber zeichnet es den Menschen aus, dass schon kleine Kinder unerhört schnell im Begreifen solcher Differenzen und Strukturen sind?



Friederici: Absolut. Wir haben das jetzt für grammatische Relationen gezeigt. Letztes Jahr haben wir eine Studie über die sehr unterschiedlichen Betonungen innerhalb der Sprache veröffentlicht. Im Deutschen wird *Máma*, *Pápa* immer auf der ersten Silbe betont, im Französischen auf der zweiten: *Mamán*, *Papá*. Wir testeten vier bis fünf Monate alte Kinder, einmal in Paris und einmal hier in Deutschland. Die Frage war zum einen: Würden die Kinder diese Betonungsmuster unterscheiden können? Zum anderen: Haben sie schon eine Präferenz für die in ihrer Sprache üblichen Betonungsmuster? Beides konnten wir bestätigen, wiederum durch EEG-Ableitungen der entsprechenden Hirnaktivitäten.

Spektrum: In Ihrem Beispiel des kleinen Kindes, das den Begriff »Milch« lernt, spielt offenbar die Betonung eine große Rolle. Sie haben viel über die so genannte Prosodie geforscht – die Sprachmelodie, das Heben und Senken der Stimme.

Friederici: Ja, heute haben wir die Möglichkeiten, per Computer ganz bestimmte Parameter der Sprachmelodie oder den Tonhöhenverlauf systematisch zu verändern. Schon lange wurde vermutet, dass ein Kleinkind über die Prosodie einen guten Einstieg in die Sprache gewinnt. Ein Beispiel ist die prosodische Phrasengrenze. Wenn ich sage: »Peter verspricht (Pause) Anna zu helfen«, verlängert sich die Silbe vor der Pause, und der Tonhöhenverlauf ändert sich. Neben der Sprechpause geht es um Längen- und Tonhöhenverlauf. Und jetzt kommt's: Bei den meisten Sprachen der Welt ist jede prosodische Grenze auch

eine syntaktische Phrasengrenze. Das heißt: Wenn das Kind einmal gemerkt hat, dass eine Sprechpause es ihm erlaubt, den Satz in Einzelteile zu zerteilen, dann hat es auch gleich den syntaktischen Phrasensprung.

Spektrum: Sozusagen ein gesprochener Beistrich.

Friederici: Genau, das Komma. Wir haben im EEG einen ganz bestimmten Effekt gefunden, der immer bei solchen prosodischen Phrasengrenzen auftaucht. Beim Erwachsenen sehe ich diese Hirnantwort auch, wenn ich die Pause wegnehme. Der Tonhöhenverlauf und die kleine Verlängerung der vorherigen Silbe genügen; der Erwachsene ist sensibel genug, das zu merken. Bei sehr jungen Kindern – fünf Monate – sehen wir eine ähnliche Reaktion, die aber ausbleibt, wenn wir die Pause wegnehmen. Das heißt, das Kind ist noch auf diese ganz starken Hörreize angewiesen. Es dauert lange, bis es die feinen Parameter wie Tonhöhen- und Längenverlauf in der Akustik benutzt, um zu erkennen: Hier ist eine Phrase zu Ende.

Spektrum: Sie haben zu Anfang Ihrer Laufbahn auch Probleme der Raumvorstellung untersucht, insbesondere, wie Astronauten unter Bedingungen der Schwerelosigkeit oben von unten unterscheiden.

Friederici: Das habe ich sogar in »Spektrum der Wissenschaft« (2/1987, S. 48) zusammen mit dem Astronauten Reinhard Furrer publiziert. Ich hatte lange Diskussionen mit Willem Levelt, dem damaligen Direktor des Max-Planck-Instituts für Psycholinguistik in Nijmegen (Holland), der sich sehr für Raumwahrnehmung interessierte. Er verfolgte ein Gedanken-

Mit dem Elektroenzephalogramm lässt sich die Hirnaktivität während der Verarbeitung einer sprachlichen Aufgabe (siehe Bild links) auf Tausendstelsekunden genau ableiten.

»Ich weiß nicht, was Bewusstsein ist! Können Sie es mir sagen?«



experiment, welches fragte, ob unten immer da ist, wohin die Schwerkraft zieht: Wie würde der Mensch reagieren, wenn die Schwerkraft fehlt? Da habe ich gesagt: Es gibt ja die Möglichkeit, das experimentell zu untersuchen.

Spektrum: Mit Parabelflügen?

Friederici: Nein, in der Erdumlaufbahn im Rahmen der Spacelab-D1-Mission. Wie sich zeigte, stimmte Levelts Hypothese fast, aber nicht ganz. Er meinte: In der Schwerelosigkeit richte ich mich nach meinen visuell verfügbaren Koordinaten, also der sichtbaren Umwelt. Andere Forscher meinten, in der Schwerelosigkeit richtet man sich nach den Füßen, anders gesagt, der Körper ist das Koordinatensystem. Nun haben wir einen Trick eingebaut, der auf einen Hinweis eines der Astronauten zurückging. Der sagte: Ja, aber was ist, wenn in der Schwerelosigkeit der Kopf zur Seite gelegt wird? Dann ist ja die Körperachse in Relation zum Kopf geknickt. Hier unten auf der Erde bekomme ich diese Information dadurch, dass ich die Halsmuskeln seitlich spanne; in der Schwerelosigkeit fehlt sie mir. Das führte zu der Alternativhypothese: Der Kopf ist das Koordinatensystem. Und das hat sich letztlich bestätigt. Genauer gesagt, der Ort auf der Netzhaut entscheidet.

Spektrum: Aber ist nicht in der Umlaufbahn die Erde immer unten?

Friederici: Die Erde wurde ausgeblendet. Wir präsentierten in einer Art Taucherbrille zwei Punkte, einen schwarzen und einen weißen. Diese wurden um feste Winkel gedreht. Die im Spacelab schwebende Versuchsperson musste nun sagen, ob der schwarze Punkt relativ zum weißen oben oder unten liegt. Die visuelle Umwelt wurde mittels Bäumen im Hintergrund simuliert, welche entweder aufrecht oder quasi auf dem Kopf standen – ein aufwändiges Experiment, das viel Zeit kostete. Aber irgendwie hatte es ja auch mit Sprache zu tun. Ich habe daraus einen schönen Habilitationsvortrag gemacht und mich wieder meinen eigentlichen Forschungen gewidmet.

Spektrum: Haben Sie bei der Sprachverarbeitung geschlechtsspezifische Unterschiede feststellen können?

Friederici: Jahrelang untersuchte ich Männer und Frauen und stieß nie auf Unterschiede in der Verarbeitung von Grammatik oder Ähnlichem. Aber in der Prosodie sahen wir erstmals Unterschiede. In Arbeiten zusammen mit der Psychologin Annett Schirmer fanden wir auf einmal eine sehr große Varianz in den Daten und trennten nach Männern und Frauen. Das Experiment zielte darauf ab, den Inhalt eines Satzes zu verarbeiten, der entweder positiv oder negativ war: »Ich bin gerade durch die Prüfung gefallen« oder »Ich habe ge-

rade die Prüfung bestanden«. Wir haben nun die Prosodie mit der Aussage gekreuzt: positive Prosodie – fröhliche Satzmelodie – auf dem negativen Satz und umgekehrt. Dann maßen wir die Hirnaktivierung per EEG bei Männern und Frauen. Nach dem Satz kam ein kleines Wort wie »Glück« oder »Unglück«, und darauf haben wir die Reaktion gemessen.

Bei Frauen hatte nun direkt nach dem Satz nur die Prosodie Einfluss, während bei den Männern nur der Inhalt wirkte. Dann haben wir das Wort um einige Millisekunden verschoben, und da reagierten Männer und Frauen gleich. Die Frage war nun, ob man auch Männer dazu bringen könnte, sich auf die Prosodie zu konzentrieren. Wenn man das macht, reagieren sie wie Frauen. Aber wenn man keine Instruktion gibt, dann gehen die Männer erst einmal nach dem Inhalt und die Frauen nach der emotionalen Satzmelodie.

Spektrum: Kann man damit klären, ob das angeboren oder erlernt ist?

Friederici: Wir vermuten, dass es für Frauen auch von ihrer genetischen Ausstattung her sinnvoll ist, auf emotionale Prosodie zu reagieren, weil sie das in Mutter-Kind-Interaktionen sehr viel häufiger brauchen. Da sich Kinder in einem Alter, wo sie sich noch nicht artikulieren können, durch emotionale Prosodie mitteilen, ob sie etwas gut oder schlecht finden, sollten Mütter darauf reagieren können. Aber das ist eine Spekulation, die man bei einem Glas Wein diskutieren kann, die nicht durch Daten direkt belegt ist.

Spektrum: Bleiben wir bei Spekulationen: In der aktuellen Neurophilosophie wird lebhaft über das Leib-Seele-Problem spekuliert, über den freien Willen und die Zurechnungsfähigkeit von Verbrechern. Haben Sie eine Position zu diesen Fragen?

Friederici: Mein Kollege Wolfgang Prinz hier im Haus hat sich mit dem Thema beschäftigt, und ich würde mich ihm gerne anschließen und sagen: Wenn es den freien Willen nicht gibt, ist er jedenfalls eine gute und für die Gesellschaft sinnvolle Konstruktion.

Spektrum: Und was ist Bewusstsein?

Friederici: Ich weiß nicht, was das ist! Können Sie es mir sagen? Häufig wird Bewusstsein als Gegenteil vom Unbewussten definiert, und das stimmt sicherlich nicht. Eher kann ich über die so genannten Qualia sprechen, also über etwas, dessen nur ich mir bewusst bin – aber ich weiß nicht, ob das nicht auch eine Illusion ist. Wenn man bedenkt, was an unbewussten Prozessen abläuft ... Wir haben die Sprachverarbeitung bei Personen kurz vor einer Operation getestet, wenn sie im Lauf der Anästhesie verschiedene Stadien des Unbewussten durchlaufen.



»Meine Zukunft sehe ich in Studien, die Hirnfunktion und -struktur immer enger zusammenführen«



Das Gespräch führte **Michael Springer**, freier Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014870.

Spektrum: Sie lassen sie zählen, so lange sie können?

Friederici: Zählen können sie bald nicht mehr, weil ja die Artikulation nicht mehr funktioniert, aber hören und verstehen können sie noch sehr lange. Seit man das weiß, hält man sich mit flapsigen Äußerungen während der Operation etwas zurück. Die Patienten könnten sich hinterher daran erinnern.

Spektrum: Heißt das, es gibt einen fließenden Übergang vom Bewussten zum Unbewussten?

Friederici: Wenn ich Bewusstes und Unbewusstes als Naturwissenschaftler fasse, ja. Als Philosoph kann ich mich von einem fließenden Übergang freimachen und sagen: Das ist jetzt mein ganz eigenes bewusstes Erlebnis. Wir haben ein gemeinsames Verständnis dafür, was Qualia und subjektives Bewusstsein sein sollen – aber wir können es nicht testen.

Spektrum: Das Wesen des Bewusstseins ist für Sie eine Frage, die empirisch-naturwissenschaftlich nicht zu klären ist?

Friederici: Da ich über die Jahre ja doch zur Naturwissenschaftlerin geworden bin, kann ich mir nur schwer ein Experiment ausdenken, welches das klären könnte.

Spektrum: Wo sehen Sie Ansätze für weitere Forschungen?

Friederici: Wir haben ja immer untersucht, wo die Aktivitäten im Gehirn sind, und da haben wir häufig gesehen, dass es nicht nur ein Areal ist, das eine Leistung erbringt, sondern Netzwerke. Die können wir funktionell beschreiben; das heißt, wir wissen, welche Hirnareale agieren müssen, um eine ganz bestimmte Aufgabe zu lösen. Der nächste Schritt, für den uns früher die Methoden fehlten, ist nun die Frage: Wo sind die nötigen Faserverbindungen? Ist das funktionelle Netzwerk auch strukturell testbar? Da sehen wir interessante Unterschiede zwischen dem erwachsenen und dem sich entwickelnden Gehirn. Die neuen Verfahren der Kernspintomografie erlauben seit einigen Jahren, die Verbindungen zwischen verschiedenen Arealen am lebenden Gehirn anzuschauen ...

Spektrum: ... während Sie früher auf EEG-Untersuchungen angewiesen waren.

Friederici: Mit dem EEG kann ich zwar Millisekunde für Millisekunde sehen, was das Gehirn gerade macht. Aber die Lokalisation ist schlechter, weil ich immer von der Kopfoberhaut zurückrechnen muss, wo die darunterliegende Aktivierung herkommt. Mit der funktionellen Kernspintomografie kann ich einzelne aktive Areale betrachten, doch dafür ist die Zeitauflösung schlechter; da komme ich nicht unter eine halbe Sekunde, und da ist in der Sprachverarbeitung inzwischen schon viel passiert. Doch beides zusammen erlaubt nun die

Frage: Diese Hirnaktivitäten, die wir sehen, sind die unabhängig, treten die nur zufällig zusammen auf? Ziel ist natürlich der Nachweis einer materiellen Verbindung, so dass wir sagen können: Die entsprechenden Hirnareale sind über eine Faserverbindung miteinander verbunden. Erst das beweist, dass diese Hirnareale wirklich kooperieren.

Spektrum: Und was haben Sie gefunden?

Friederici: Im Gebiet zwischen Broca-Areal und Wernicke-Areal (siehe Kasten S. 68) erkennen wir zwei Faserverbindungen. Eine geht oben herum, dorsal, und eine verläuft unten, ventral. Beim Erwachsenen ist die dorsale Verbindung aktiv, bei Kindern die untere, ventrale.

Spektrum: Was bedeutet das?

Friederici: Wir haben gezeigt, dass beim Kind die dorsale Faserverbindung noch nicht voll entwickelt ist, sondern nur die ventrale. Genauer gesagt, wir messen den Grad der Myelinisierung der Nervenfasern und sehen: Die Umhüllung der Fasern mit Myelin, einer elektrisch isolierenden Biomembran, entwickelt sich bei der dorsalen Verbindung erst sehr spät.

Spektrum: Von welchem Alter reden wir da?

Friederici: Das sind sieben Jahre alte Kinder. Interessant ist nun: Bei Erwachsenen sehen wir immer die beiden Hirnareale aktiv, wenn es um das Verarbeiten von komplexen Sätzen mit Einbettungen geht: »Peter wusste, dass Maria, die Hans, der gut aussah, liebte, Johann geküsst hatte.« Erwachsene können so etwas verarbeiten, ein Kind nicht. Siebenjährige Kinder haben schon Schwierigkeiten mit einem Satz, bei dem ich das Objekt nach vorne gestellt habe: »Den Bär schubst der Tiger.« Die Hypothese, die wir freilich erst noch beweisen müssen, ist nun, dass Kinder solche komplexen Sätze erst dann verarbeiten können, wenn diese Faserverbindung voll myelinisiert ist.

Spektrum: Und was wird später aus den anderen, schon sehr früh aktiven ventralen Verbindungen?

Friederici: Die bleiben bestehen und dienen jenen automatischen Verarbeitungsprozessen, die immer mitlaufen. Diese sind für kleinere Einheiten im Satz zuständig. Wenn ich zum Beispiel eine Präposition habe wie »im«, dann weiß ich, das danach ein Bezugswort kommen muss; das läuft weiter über die entwicklungs geschichtlich ältere Schiene.

Spektrum: Was wollen Sie mit Ihren Forschungen erreichen?

Friederici: Meine Zukunft sehe ich in solchen Studien, die Funktion und Hirnstruktur immer enger zusammenführen. Damit sollten wir genauer verstehen, was im Hirn passiert, wenn wir Sprache lernen. Wovon ich Ihnen hier erzähle, das sind nur die ersten Schritte dahin. <

EXTREM GEWAGT

Schwere Erdbeben, Wirbelstürme und Überschwemmungen treten viel häufiger auf, als nach der klassischen Statistik zu erwarten wäre. Neue Forschungsansätze suchen nach einer besseren Erfassung extremer Ereignisse.

Von Frank Grotelüschen

In Kürze

- ▶ Traditionell versucht man, zufallsbestimmte Ereignisse mit der **Gauß-Verteilung** zu beschreiben. Dem liegen gewisse Annahmen zu Grunde, die zum Beispiel bei Erdbeben oder Monsterwellen nicht erfüllt sind.
- ▶ Extreme Ereignisse sind selten, aber nicht so selten, wie sie nach der traditionellen Annahme sein müssten: Die Verteilungskurve hat **dicke Schwänze (fat tails)**.
- ▶ Mit etlichen neuen Methoden versucht man diesen Phänomenen beizukommen: **nichtlinearen Modellen, Extremwertstatistik** und neuen Formen der **Zeitreihenanalyse**.

Monsterwellen treffen auf Schiffe, beschädigen sie schwer oder lassen sie sogar sinken (Bild rechts). Rekorderdbeben legen ganze Regionen in Schutt und Asche. Jahrhundertfluten überrollen Deiche und überschwemmen das Hinterland. Ungewöhnlich starke Hurrikane verwüsten Großstädte, extreme Regenfälle und Hagelschauer vernichten Ernten. Und eine handfeste Finanzkrise vernichtet innerhalb von Monaten Milliardenwerte an Aktienkapital.

All diese Extremereignisse haben eines gemeinsam: Sie treten höchst selten auf, können dabei aber enorme Schäden anrichten. Wann, wo und wie stark sie zuschlagen, scheint dem Zufall überlassen. Zwar versuchen Wissenschaftler seit Jahrzehnten, halbwegs verlässliche Prognosen und Frühwarnsysteme zu entwickeln. Erfolg haben sie damit bislang aber kaum. Erdbeben, Tornados oder Börsenkrisen lassen sich entweder gar nicht vorhersagen, oder die Prognosen sind zu vage, als dass sie konkreten Nutzen hätten.

Nun hofft die Fachwelt auf einen neuen Ansatz. Statt nur innerhalb der einzelnen Disziplinen nach besseren Prognoseverfahren zu suchen, arbeiten die Wissenschaftler zunehmend auch interdisziplinär und fahnden nach mathematischen Parallelen. »Wir hoffen, dass verschiedene Disziplinen voneinander lernen und wir neue, grundlegende Erkenntnisse gewinnen«, sagt Professor Holger Kantz vom

Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden. Sollten sich tatsächlich Gemeinsamkeiten zwischen Wetterextremen, Finanzkrisen und Erdstößen zeigen, dürften demnach auch die Prognosen treffsicherer werden. Noch steht dieser Ansatz der Extremforschung am Anfang. Doch erste Erfolge deuten sich bereits an.

Die Idylle des Physikers: lineare Modelle

Wie schön wäre es doch, wenn das Einzige, was die Bewegung des Meerwassers beeinflusste, die Gezeiten wären! Auf die Weltmeere wirken eine konstante und eine periodisch variierende Kraft, nämlich die Anziehungskräfte der Sonne und des Mondes (genauer gesagt: deren räumliche Variation); dem überlagert sich die ebenfalls zeitlich periodische Erdrotation, und alle Effekte addieren sich – ungefähr, was für Prognosezwecke allemal ausreicht. Deswegen ist das Extremereignis, bei dem alle Effekte maximal sind und das gleiche Vorzeichen haben, die so genannte Springflut, an und für sich keine Katastrophe; man kann sich ja darauf einstellen. Die Deiche versagen erst, wenn zusätzlich starke Winde das ohnehin hohe Wasser landeinwärts drücken.

Neuere Hilfsmittel wie Satellitenbilder oder wie hier eine Handykamera liefern Belege dafür, dass Monsterwellen kein Seemannsgarn sind. Diese Bilder entstanden 2002 vor der Küste von Neufundland.



MIT FRDL. GEN. VON LYMAN DUGGAN, NAVAL ELECTRONICS INC., ([HTTP://TV-ANTENNA.COM/HEAVY-SEAS/3/INDEX.HTM](http://TV-ANTENNA.COM/HEAVY-SEAS/3/INDEX.HTM))



DIE MATHEMATIK DES UNBERECHENBAREN

In den letzten Jahren haben sich die Extrem-Forscher gleich mehrere mathematische Werkzeuge zugelegt. Sie lassen sich in drei Kategorien einordnen:

► **Der traditionelle Ansatz ist die Extremwertstatistik.** Während gewöhnliche Datenanalysen außergewöhnliche Werte oft als »Ausreißer« ignorieren, bezieht die Extremwertstatistik diese gezielt mit ein. So schauen sich die Experten an, wie viele heftige Stürme in den letzten zehn Jahren über eine bestimmte Region gezogen sind und welche Stärke sie hatten. Anhand dieser Zahlen schätzen sie ab, mit wie vielen Stürmen man es in Zukunft zu tun haben wird und wie stark ein Jahrhundertsturm sein könnte. Auf der Basis dieser Extrapolation werden Deichprojekte, Brücken oder Hochhäuser dimensioniert. Auch viele Versicherungen und Rückversicherer bedienen sich dieser Methode, um Risiken abzuschätzen und Beiträge zu kalkulieren. Der Nachteil: Die Extremwertstatistik macht weder Aussagen über die zu Grunde liegenden Mechanismen noch über den Zeitpunkt, an dem ein Extremereignis auftreten wird.

Während die klassische Extremwertstatistik davon ausgeht, dass aufeinanderfolgende Messwerte völlig unabhängig voneinander sind, geben neuere Erweiterungen der Theorie diese Annahme auf. Dadurch lässt sich zum Beispiel beim Hochwasserschutz der Meeresspiegelanstieg, der durch den Klimawandel zu erwarten ist, berücksichtigen.

► **Seit einigen Jahren erfahren die Spielzeugmodelle** einen lebhaften Aufschwung. Hier versuchen die Forscher, die Mechanismen, die für ein Extremereignis – Erdbeben, Börsencrash oder Jahrhundertsturm – verantwortlich sind, mit stark vereinfachten theoretischen Modellen nachzubilden und dadurch die Grundlage für genauere Prognosen zu schaffen. Mit Formeln und Computersimulationen erschaffen die Experten Systeme, die sich durch Rückkopplungsschleifen und Wechselbeziehungen beim gerings-

ten Anstoß aufschaukeln können. Systematisch können alle möglichen Randbedingungen eingestellt und die unterschiedlichsten Szenarien im Zeitraffer durchgespielt werden. So ist es möglich, mit einem einfachen Sandhaufenmodell nachzuvollziehen, wie oft in einer Region größere Erdbeben drohen.

Allerdings lässt sich nur selten sicher beurteilen, inwieweit ein Spielzeugmodell die Realität abbildet oder aber Zusammenhänge vorgaukelt, die in Wirklichkeit gar nicht bestehen. Oft ist es schwierig, für ein komplexes Phänomen ein geeignetes Spielzeugmodell zu finden. So vermutet man zwar, dass Sandhaufenmodelle wesentliche Eigenschaften von Erdbeben reproduzieren, weil sie den Gesetzen der selbstorganisierten Kritizität folgen. Überzeugende Nachweise dafür stehen jedoch noch aus.

► **Bei der Zeitreihenanalyse** notieren die Fachleute nicht nur, wie viele Ereignisse in einem bestimmten Zeitraum aufgetreten sind, sondern werten im Detail die Korrelationen zwischen ihnen aus. Insbesondere studiert man die Wiederkehrzeitverteilung, also die Verteilung der Zeitabstände zwischen – zum Beispiel – zwei Nulldurchgängen einer bestimmten Variablen. Damit lässt sich herausfinden, ob bestimmte Ergebnisse gehäuft auftreten oder stets in einigem Abstand stattfinden.

Eine mathematische Spektralanalyse, die besagt, aus welchen Grundfrequenzen sich ein Signal zusammensetzt, kann verborgene Periodizitäten sichtbar machen. So lässt sich allein per Zeitreihenanalyse ausmachen, dass eine Springflut durch die Überlagerung zweier periodischer Einflüsse entsteht.

Modernere Methoden, basierend auf der fraktalen Geometrie, können auch komplexere, nichtlineare Zusammenhänge enthüllen. Damit hofft man auf charakteristische Anzeichen wie zum Beispiel bestimmte Fluktuationen auf dem Börsenparkett zu stoßen, die den Extremereignissen zuverlässig vorangehen. Die Zeitreihenanalyse funktioniert jedoch nur, wenn ausreichend Daten über das Ereignis vorhanden sind.

Dicke Schwänze einer glockenförmigen Kurve verheißen Übles: Extreme Ereignisse kommen häufiger vor, als man denkt

Bekannte, periodisch variierende Ursachen, die sich in ihren Wirkungen »linear«, das heißt einfach durch Addition überlagern – das ist die Idealvorstellung. Von ihr möchten die Theoretiker möglichst wenig aufgeben, wenn es daran geht, die hässliche Realität zu beschreiben. Das Phänomen ist nicht offensichtlich periodisch? Dann kann man zumindest versuchen, in den Daten aus der Vergangenheit einen periodischen Anteil ausfindig zu machen. Daraus erwachsen zum Beispiel Theorien von Konjunkturzyklen – leider mit sehr beschränkter Vorhersagekraft.

Die Ursachen sind unbekannt oder zumindest unserer Beobachtung nicht zugänglich? Dann nennt man sie zufällig – und muss deswegen nicht gleich die Flinte ins Korn werfen. Wir unterstellen, dass unsere Variable – zum Beispiel der Wasserstand, ein Börsenkurs oder die mechanische Spannung

im Gestein unter unseren Füßen – durch lauter zufällige Einzelereignisse beeinflusst wird. Wir müssen sie im Einzelnen nicht kennen; es genügt, wenn sie alle von der gleichen Art sind (»derselben Zufallsverteilung gehorchen«), nicht voneinander abhängen und ihre Effekte sich linear überlagern.

Unter diesen Voraussetzungen folgen nämlich die zufälligen Fluktuationen unserer Variablen der Gauß-Verteilung, deren charakteristische Glockenkurve den letzten Zehnmarktschein zierte. Sie beschreibt zufällige Fluktuationen in sehr vielen physikalischen Systemen recht passabel.

Just für die genannten Extremereignisse jedoch weicht sie an entscheidender Stelle von der Realität ab. Je größer eine Abweichung, desto seltener tritt sie auf; das gilt in der Realität wie in der Theorie. Deswegen nähern sich das linke und das rechte Ende der Glo-

ckenkurve (ihre »Schwänze«) immer mehr der Nulllinie an. Das tun die aus der Realität gewonnenen Kurven auch, nur viel langsamer; ihre Schwänze sind dicker (*fat tails*). Daher kommen bei Erdbeben und Monsterwellen Ereignisse, denen die Gauß-Verteilung eine absurd kleine Wahrscheinlichkeit (»einmal pro hundert Millionen Jahre«) zuschreiben würde, durchaus vor.

Sie sind damit zwar viel häufiger, als die Theorie behauptet, aber immer noch selten. Deswegen gibt es über Megabebeben, Jahrhundertfluten und Rekorddürren viel zu wenig Daten, auf deren Grundlage man leistungsfähige Theorien entwickeln und überprüfen könnte. Eine Grafik mit einem Maßstab, der auch die großen Häufigkeiten der kleinen Ereignisse darzustellen erlaubt, muss die dicken Schwänze unweigerlich so dünn wiedergeben, dass sie ohne Weiteres zu übersehen sind (Spektrum der Wissenschaft 12/2009, S. 92).

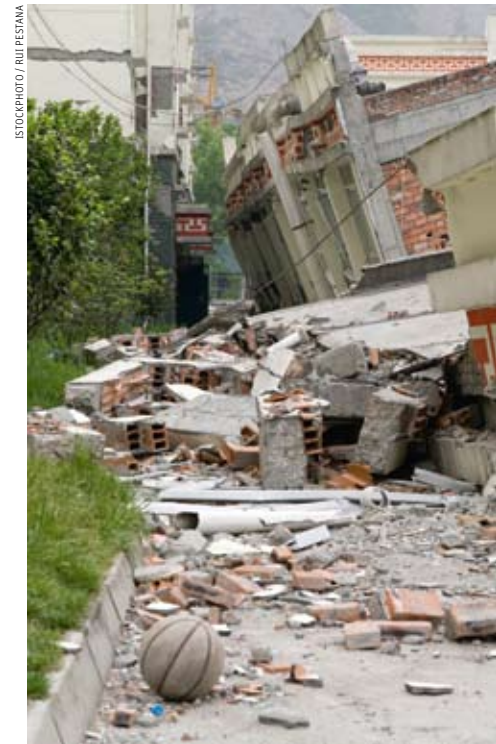
Nichtlineare Monsterwellen

Warum versagt in diesen Fällen die ansonsten vielfach bewährte Theorie? Eine Erklärung ist: Die Linearitätsannahme ist nicht erfüllt. Die meisten Systeme, die Extremereignisse zulassen, sind nichtlinear. Diese Eigenschaft öffnet der Unvorhersagbarkeit und dem Chaos Tür und Tor, selbst dann, wenn der Zufall überhaupt keine Rolle spielt (Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2008 »Ist Mathematik die Sprache der Natur?«, S. 47). Kleinste Ursachen genügen, um große Wirkungen zu entfalten. Weder analytisch mit Bleistift und Papier noch numerisch mit Supercomputern lässt sich voraussagen, wie sich solche Systeme verhalten werden.

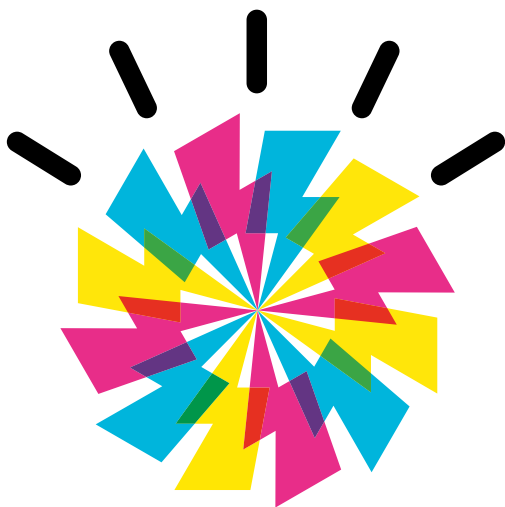
Ein Beispiel für nichtlineares Verhalten sind Monsterwellen. Experten schätzen, dass pro Jahr bis zu zehn große Schiffe durch diese *Freak Waves* in die Tiefe gerissen werden. Ein lineares Modell vermag diese Wellen nicht ausreichend zu erklären: Beschreibt man den Seegang als Überlagerung verschiedener Sinuswellen derart, dass die Beobachtungen passabel reproduziert werden, dann liefert das Modell nur etwa ein Fünfzigstel der Anzahl von Extremwellen, die es laut Satellitenaufnahmen tatsächlich gibt.

Manche Fachleute arbeiten daher bereits Vermutungen über nichtlineare Effekte aus. »Treffen in diesem nichtlinearen Szenario zwei Wellen aufeinander, kann die eine Energie von der anderen abzapfen, oder beide generieren eine neue, dritte Welle«, erläutert Eric Heller, Professor für Physik und Chemie an der Harvard University. »Solche Effekte können durch das Zusammenspiel von ozeanischen Wirbeln, Wind und Erhebungen am Meeresgrund verursacht werden.«

So könnte etwa ein ozeanischer Wirbel Wellen in ähnlicher Weise bündeln wie ein Brennglas das Licht. Im Brennpunkt einer solchen Wellenlinse bauen sich dann bevorzugt riesige Wasserwände auf. Ausgehend von dieser Vorstellung will Heller nun eine Vorhersage für Monsterwellen erstellen. Als entscheidende Maßzahl dient der *Freak Index*. Liegt er für ein Seegebiet oberhalb des Wertes 2, sollten die Schiffe eine Ausweichroute wählen. Man errechnet ihn aus einer Analyse der Richtungen, in welche die Wellen in einem bestimmten Seegebiet laufen. Diese wiederum lassen sich aus der Anzahl und Verteilung der Stürme ableiten, die in der Nähe toben. Ziel



Das Erdbeben vom 12. Mai 2008 in der chinesischen Provinz Sichuan hat ungefähr 50 000 Menschen das Leben gekostet. Das Bild zeigt die zerstörte Schule des Ortes Ying Xiu.



Ideen für einen smarten Planeten

Stromnetze, die Strom sparen.

Ein beträchtlicher Teil des Stroms, den wir erzeugen, geht auf dem Weg zum Verbraucher verloren – ein Verlust, den wir uns nicht mehr leisten können. Deshalb müssen wir unsere Stromnetze intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Einspeisung, Netzauslastung und Verbrauch mit einem integrierten System in Echtzeit erfassen und steuern. Das minimiert Verluste, erleichtert die Einbindung neuer, nachhaltiger Energiequellen und hilft den Kunden, ihren Verbrauch bewusster zu steuern. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/energy





CHRISTOPH PÖPPE

ist ein Vorhersagehorizont wie bei einem Seewetterbericht. Für die kommenden ein, zwei Tage wäre die Prognose relativ präzise, danach ließen sich nur noch Trendergebnisse treffen.

Zumindest haben Heller und seine Fachkollegen bereits eine brauchbare Arbeitsdefinition für eine Monsterwelle gefunden: Für eine bestimmte Meeresregion wählt man von 100 Wellen die 33 höchsten aus und bildet ihren Mittelwert. Jede Welle, die um mehr als das 2,2-Fache höher ist als dieser Mittelwert, gilt als *Freak Wave*. Damit ist nicht nur der 35-Meter-Brecher im Südatlantik gemeint, sondern auch die Neun-Meter-Welle in der Nordsee, die sich bei ansonsten mäßigem Seegang unvermittelt auftürmt.

Für andere Extremphänomene steht eine präzise Begriffsklärung noch aus, ebenso wie eine allgemein gültige Definition, was ein Extremereignis überhaupt ist. Denn die abnormalen Abweichungen zeigen sich in höchst unterschiedlichen Formen – als außergewöhnliche Magnitude eines Erdbebens, als extreme Dauer einer Dürre, als Phase überschäumender Aktivität bei einem Finanzcrash.

Immerhin haben die Forscher bereits einige Kategorien zum Einteilen der Phänomene gefunden. Ein Ereignis wie ein Erdbeben, bei dem das System sich selbst aufschauelt, wird als endogen bezeichnet, im Gegensatz zu einem exogenen Ereignis wie einem Meteoriteneinschlag. Ein Ereignis, das sich an Ort und Stelle wiederholen kann (Monsterwelle im Gegensatz zu Brückeneinsturz), heißt rekurrent. Und während ein unbelebtes System wie das Wetter rein physikalisch zu beschreiben ist, spielen Biologie und Soziologie mit hinein, wenn die Katastrophe, sagen wir ein Epilepsieanfall oder ein Börsencrash, ein belebtes System trifft.

Für manche Phänomene, insbesondere Erdbeben, gibt es ein brauchbares, stark vereinfachtes Modell (»Spielzeugmodell«, siehe Kasten S. 76): den Sandhaufen. Kleinere oder größere Sandlawinen gehen ab, wenn die Steilheit des Sandbergs an einer bestimmten Stelle einen kritischen Wert überschreitet, mit dem Effekt, dass sich auf die Dauer ein bevorzugter Neigungswinkel einstellt (Spektrum der Wissenschaft 3/1991, S. 62). Die theoretische Analyse dieser »selbstorganisierten Kritizität« (*self-organized criticality*, SOC) liefert Vorhersagen, die sich zum Beispiel auch an Erdbeben bestätigen lassen. So sind – wenig

Dass der Neckar über die Ufer tritt (hier der Pegel an der Alten Brücke in Heidelberg), kommt nicht gerade selten vor – aber nicht so häufig, dass irgendeine Regelmäßigkeit erkennbar wäre.

überraschend – kleine Beben häufiger als große. Aber so etwas wie eine »typische« Ereignismagnitude sucht man vergebens. Ausgehend von der SOC-Hypothese konnte das Team um Holger Kantz zeigen, dass sich Mega-Ereignisse zeitlich abstoßen und in ein und derselben Region nicht in kurzem Abstand aufeinanderfolgen. Mit diesem Wissen lässt sich abschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit in naher Zukunft mit einem Extremereignis zu rechnen ist.

Ob es prinzipiell möglich ist, ein Erdbeben konkret vorherzusagen, ist umstritten. Um ein Großbeben etwa in San Francisco vorauszu sehen, müsste man mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern überwachen können, wie sich im Inneren der San-Andreas-Verwerfung die Spannungen zwischen den tektonischen Platten aufbauen, um sich dann ruckartig zu entladen. Da das völlig unmöglich ist, sind die Aussagen bisher wenig hilfreich. Was hat man schon von der Auskunft, dass im Großraum San Francisco in den nächsten drei Jahrzehnten mit 63-prozentiger Wahrscheinlichkeit mit einem Beben der Stärke 6,7 zu rechnen ist?

Die Blase erkennen, bevor sie platzt

Zumindest für eine kurzfristige Warnung einige Stunden vor einem Beben gibt es Fortschritte. So hat das Team um den Oldenburger Physikprofessor Joachim Peinke und seinen Kollegen Mohammed Reza Rahimi Tabar von der Sharif University of Technology in Teheran eine neue Form der stochastischen Zeitreihenanalyse entwickelt. Die Experten suchen in den seismischen Signalen, die einem Erdbeben vorausgehen, nach verräterischen Mustern, zum Beispiel charakteristischen Häufungen von Mikrobenen oder kurzen Phasen trügerischer Ruhe. Peinke und seinen Kollegen ist es gelungen, fünf bis zehn Stunden vor dem Beben einen prägnanten Übergang in den seismischen Signalen aufzuspüren. Es sieht so aus, als würden sich viele kleine, über eine bestimmte Region verteilte Mikrobenen plötzlich miteinander synchronisieren. »Bislang haben wir rund 25 Beben im Nachhinein ausgewertet«, sagt Peinke. »In allen Fällen hat unsere Methode die Vorläufer des Bebens zuverlässig erkennen können.«

Das Verfahren kommt aus der Turbulenzforschung (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 92). Turbulente Strömungen sind chaotisch, weisen aber in der Hierarchie der immer kleiner werdenden Wirbel eine Struktur auf, die man für Prognosezwecke nutzen kann. Mit demselben Ansatz arbeiten die Oldenburger Forscher daran, Windböen vorherzusagen, um Windkraftanlagen vor Überlastung zu schützen (Spektrum der Wissenschaft

2/2002, S. 10), und das Geschehen auf Finanzmärkten zu analysieren.

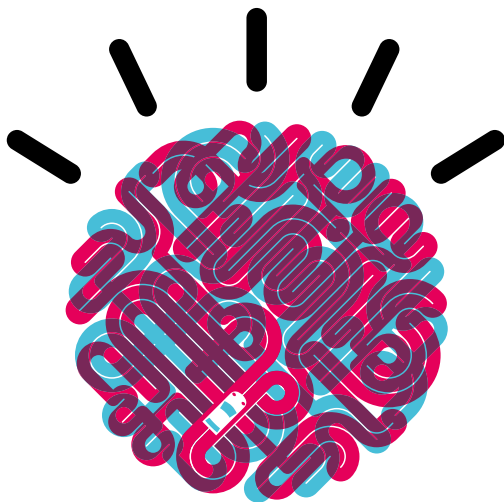
Mit den üblichen Methoden der Statistik sind Extremereignisse wie die jüngste Finanzkrise nicht zu erfassen. Die Standardverfahren der Ökonomen gehen davon aus, dass auch die größten Blasen lediglich exponentiell wachsen: Von Monat zu Monat nimmt der Börsenwert der betroffenen Unternehmen um einen konstanten Faktor zu, wie eine Geldanlage mit Zins und Zinseszins. »Wir haben festgestellt, dass eine Blase immer überexponentiell wächst«, sagt Didier Sornette, Inhaber des Lehrstuhls für unternehmerische Risiken an der ETH Zürich. »Das wäre so, als würde sich auf einem Sparkonto der Zinssatz jedes Jahr verdoppeln: erst fünf, dann zehn, dann 20 Prozent.« Das Wachstum beschleunigt sich, bis die Blase unweigerlich platzt.

Allerdings ließen die konventionellen Methoden nicht erkennen, ob sich die Finanzwelt im Jahr 2008 in einem solch kritischen Zustand überexponentiellen Wachstums befand oder nicht. Deshalb hielten Finanzexperten die Entwicklung viel zu lange für gesund. Alan Greenspan, ehemaliger Chef der US-Notenbank, vertrat die Meinung, eine Blase sei erst dann zu erkennen, wenn sie platze. »Das ist falsch«, sagt Sornette. »Mit unseren mathematischen Methoden können wir eine Blase schon bis zu drei Monate vor ihrem Höhepunkt anhand der überschießenden Wachstumsraten entdecken.« Sornette geht in seinen Modellen davon aus, dass bei der Bildung einer Blase »schlafende« Rückkopplungsschleifen aktiviert werden. Demnach sind extreme Ereignisse nicht einfach die selten auftretenden Werte in den Ausläufern einer statisti-

FOTOLIA / FINGOLFIN



Eines der häufigen Erdbeben in Peru hat 2007 eine gewaltige Erdspalte aufgerissen – ein attraktives Reiseziel für den Katastrophentourismus.



Ideen für einen smarten Planeten

Straßen, die helfen, Staus zu verhindern.

Die Straßen von heute sind dem Verkehr nicht mehr gewachsen. Allein die Staus in der EU haben 2007 mehr als 135 Mrd. Euro gekostet, Umweltfolgen nicht mitgerechnet. Bevor wir nun immer neue Straßen bauen, sollten wir die vorhandene Infrastruktur besser und intelligenter nutzen: Zum Beispiel durch Verkehrsmanagement-Systeme, die Pendlerströme effizient steuern. Das reduziert Staus, Benzinverbrauch, Abgase. Und liefert Stadtplanern wichtige Hinweise für die Gestaltung der Städte von morgen. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/traffic





SEQUENZ: ISTOCKPHOTO / SEAN MARTIN

Der Wirbelsturm, der am 20. August 2006 zwischen Bennett und Watkin im US-Bundesstaat Colorado den Boden berührte, erzeugte binnen weniger Sekunden eine gewaltige Staubwolke.

schen Verteilung. Vielmehr gehören sie zu einer zweiten Verteilung, die im Normalfall allerdings nicht wirksam ist. Vor Entstehen des Extremereignisses schaltet der Prozess gewissermaßen um und wechselt sein Verhalten. Ein mathematisch schwer zu fassender Mechanismus, bei dem Fachleute spekulieren, dass er eng mit der Komplexität menschlichen Verhaltens zusammenhängt. So hat der Mensch die Eigenart, auf Vorhersagen zu reagieren und sein Verhalten und damit auch das System zu ändern; das gilt übrigens für richtige wie für falsche Prognosen.

Eine Vorhersage kann auf zweierlei Art falsch sein: indem sie einen Fehlalarm produziert oder indem sie ein tatsächlich eintretendes Ereignis schlicht verpasst. Ein guter Vorhersagealgorithmus sollte bei kleiner Fehlalarmrate eine hohe Trefferquote liefern. In aller Regel gibt es jedoch nur einen Parameter,

den man an einem solchen Algorithmus einstellen kann: die Empfindlichkeit («Sensitivität»). Bei hoher Empfindlichkeit schlägt er beim größten Teil der echten Ereignisse Alarm, verursacht jedoch Kosten durch häufige Fehlalarme; umgekehrt ist es bei niedriger Sensitivität. Hier gilt es einen brauchbaren Kompromiss zu finden.

Doch schon die Brauchbarkeit eines bestimmten Vorhersagemodells zu bestimmen, ist alles andere als einfach. Dazu ermitteln die Experten mit speziellen Verifikationsverfahren, wie viele der Prognosen tatsächlich eingetroffen sind und wie viele nicht, um dann das Verhältnis von Treffern und Fehlalarmen auszurechnen. Ein Modell, das nur wenige, dafür aber ernst zu nehmende Warnungen ausstößt, kann dabei durchaus besser sein als ein anderes, das mehr Treffer, aber auch viele Fehlalarme produziert.

Allerdings versagen die üblichen Verifikationsverfahren oft bei Prognosemodellen für Extremereignisse – weil diese so selten sind. »Die Wahrscheinlichkeit, dass so ein Ereignis stattfindet, tendiert gegen null – und damit auch die Trefferrate eines Vorhersagemodells«, sagt Cristina Primo Ramos vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) im englischen Reading. Genau das macht die Resultate der üblichen Verifikationsverfahren wenig aussagekräftig: Manchmal bescheinigen sie einem Prognosemodell eine Qualität, die es gar nicht hat, oder sie unterschätzen seine Fähigkeiten ganz erheblich.

Wann kommt der nächste Tornado?

Abhilfe verspricht der »Extreme Dependency Score« – eine komplizierte Formel, mit der sich die Trefferquoten verschiedener Prognosemodelle genauer vergleichen lassen. Das Problem dabei: Die Zahl der Fehlalarme bleibt außen vor. »Deshalb muss man die Formel stets mit anderen Verfahren kombinieren«, sagt Primo Ramos.

Auch die Vorhersage extremer Wetterereignisse gestaltet sich schwieriger als ursprünglich erwartet. So gab der Nationale Wetterdienst der USA (National Weather Service, NWS) noch vor fünf Jahren das strategische Ziel aus, im Jahr 2012 einen Tornado 13 Minuten vor seinem Eintreffen voraussagen zu können. Inzwischen musste der NWS einen Rückzieher machen: Erst 2025 soll es eine verlässliche Tornadoprognose geben – mit einer Vorwarnzeit von dann 30 Minuten. Noch mangelt es an Daten über Hagelstürme, Tor-

nados und Platzregen. Zum anderen sieht es so aus, dass gerade bei Extremereignissen winzigste Änderungen in der Atmosphäre dramatische Folgen haben können. Ob sich ein Tornado bildet oder nicht, scheint sich manchmal innerhalb von Minuten zu entscheiden – schlechte Voraussetzungen für eine sichere Prognose.

Auch die Vorhersageverfahren für Hurrikane sind alles andere als perfekt. Aber eine gewisse Schätzung für die Häufigkeit solcher Wirbelstürme brauchen die Versicherungen schon, um die Beiträge für ihre Policen zu kalkulieren. Bis 2005 orientierten sie sich ausschließlich am statistischen Durchschnitt der vergangenen Jahrzehnte. Doch dieser Ansatz funktioniert nur, wenn die Hurrikanrate konstant ist – wovon man angesichts des Klimawandels nicht mehr ausgehen darf.

Um dennoch zu verlässlichen Prognosen zu kommen, hat die Firma Risk Management Solutions (RMS) einen ungewöhnlichen Weg eingeschlagen: Jedes Jahr trommelt das Beratungsunternehmen ein Gremium aus sieben Experten zusammen, die verschiedene Zweige der Hurrikanforschung repräsentieren. Das Panel evaluiert den aktuellen Stand der Forschung und bewertet rund 100 Prognosemodelle, welche die Hurrikanrate in den nächsten fünf Jahren voraussagen. Schließlich gewichtet das Gremium die Modelle, und mit Hilfe dieses gewichteten Ensembles kalkuliert RMS die Hurrikanrisiken und gleichzeitig auch die Versicherungsbeiträge für die US-Golfküste. Und die dürften deutlich steigen. Denn laut RMS wird die Zahl extremer Hurrikane in den nächsten fünf Jahren signifikant zunehmen. ◀



Frank Grotelüsch hat in Mainz und Hamburg Physik studiert. Er lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

Alberverio, S. et al. (Hg.): Extreme Events in Nature and Society. Springer, Heidelberg 2007.

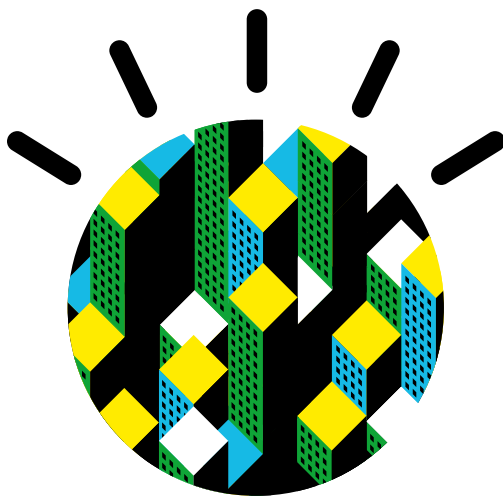
Bunde, A. et al. (Hg.): The Science of Disasters. Climate Disruptions, Heart Attacks, and Market Crashes. Springer, Heidelberg 2002.

Coles, S.: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer, Heidelberg 2001.

Kantz, H., Schreiber, T.: Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge University Press, Cambridge 2003.

Sornette, D.: Why Stock Markets Crash. Critical Events in Complex Financial Systems. Princeton University Press, Princeton 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014867.



Ideen für einen smarten Planeten

Städte, die uns das Leben leichter machen.

Bis 2050 werden 70% der Weltbevölkerung in Städten leben. Wenn die urbanen Infrastrukturen mit diesem Ansturm Schritt halten sollen, müssen wir sie intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Städte als komplexe Ökosysteme begreifen und die Infrastrukturen für Verkehr, Wasser, Abfall, Verwaltung, Sicherheit, Energie miteinander vernetzen. Davon profitieren alle Aspekte der Lebensqualität – von sauberer Luft über staufreie Straßen bis zur Schulbildung unserer Kinder. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/city



FEUER unter dem WASSER

Der Untergrund der Ozeane ist mit Lava bedeckt, die an submarinen Vulkanen ausgestoßen wurde. Forscher konnten jetzt im Detail klären, woher all das geschmolzene Gestein stammt und wie es aus dem Erdinneren zum Meeresboden gelangt ist.

In Kürze

- ▶ An den **mittelozeanischen Rücken** bildet Magma, das vom Erdmantel aufsteigt, unablässig neuen Meeresboden.
- ▶ Lange war unbekannt, wie das geschmolzene Gestein aus der Tiefe an die Oberfläche gelangt, ohne unterwegs seine Zusammensetzung zu ändern. Nun konnte Herkunft und **Wanderung des Magmas** im Detail geklärt werden.
- ▶ Ausgangspunkt sind mikroskopisch kleine Tröpfchen verflüssigten Gesteins in bis zu **150 Kilometer Tiefe**.
- ▶ Diese Tröpfchen steigen durch **kanalisiertes poröses Fließen** auf, indem sie Teile des umgebenden Gesteins auflösen und sich zu Schmelzfäden vereinigen. Aus den Poren werden so allmählich Kanäle, die sich vereinigen und das Magma schließlich bis dicht unter die Erdkruste führen.

Von Peter B. Kelemen

Im Dunkel der fast unzugänglichen Tiefsee spielen sich 85 Prozent der weltweiten Vulkanausbrüche ab. Zwar merkt praktisch niemand etwas davon; dennoch sind diese Eruptionen keineswegs bedeutungslos. Sie erzeugen jene gewaltigen, etwa sieben Kilometer dicken Gesteinsplatten, die den Boden aller Meeresbecken bilden und ozeanische Kruste genannt werden.

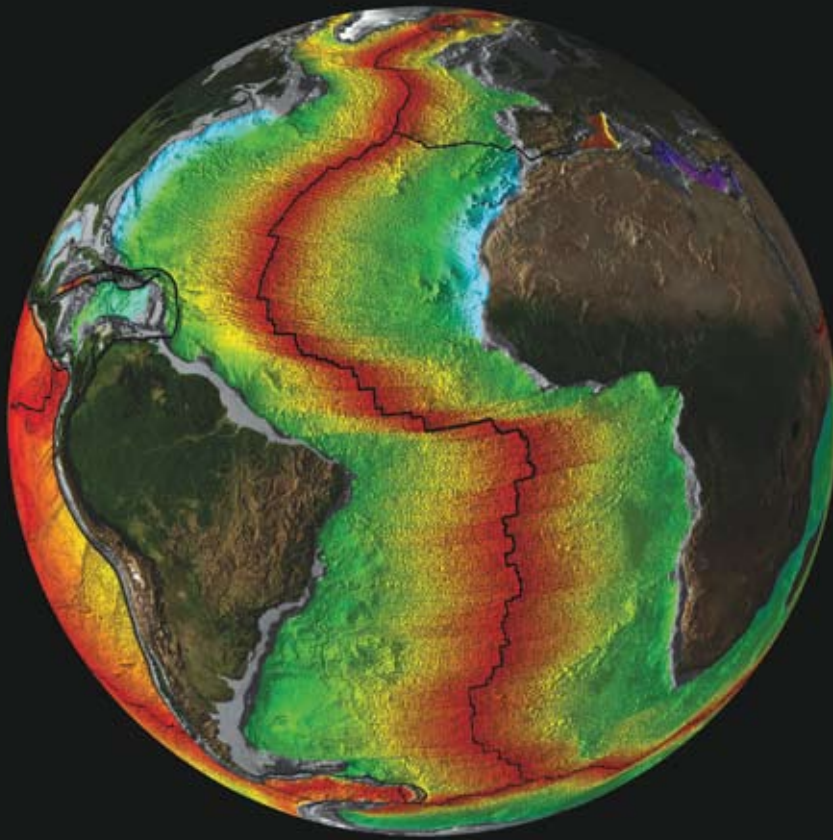
Die Entstehung des Meeresgrunds aus glutflüssigen Gesteinsmassen ist schon seit den 1960er Jahren bekannt. Damals zeigten Sondierungen der Tiefsee mit Sonargeräten, dass sich praktisch ununterbrochene Ketten aus Vulkanen – die mittelozeanischen Rückensysteme – wie die Nähte auf einem Baseball um den Globus winden. Schon bald wurde auch klar, warum dort unablässig Lava austritt. Gemäß der Theorie der Plattentektonik wird die ozeanische Kruste an diesen Vulkanketten auseinandergezogen; in die entstehende Lücke dringt glutflüssiges Magma aus dem Erdinneren ein. Doch aus welcher Tiefe es stammt und wie es zur Oberfläche gelangt, blieb offen.

Inzwischen haben Untersuchungen an Blöcken alten Meeresbodens, die jetzt auf den Kontinenten liegen, sowie mathematische Modelle der Wechselwirkung zwischen geschmolzenem und festem Gestein eine Fülle neuer Erkenntnisse geliefert. Daraus ließ sich

ein detailliertes Bild der Geburt ozeanischer Kruste zusammensetzen. Es hat wenig zu tun mit der populären Vorstellung, wonach sich rot glühende Gesteinsschmelze in einer riesigen Magmakammer unter einem Vulkan sammelt und dann gewaltsam durch eine Spalte den Weg an die Oberfläche bahnt.

Tatsächlich beginnt der Vorgang mehrere dutzend Kilometer unter dem Meeresboden, wo winzige Tropfen geschmolzenen Gesteins durch mikroskopisch kleine Poren zwischen den Mineralkörnern wandern – mit einer Geschwindigkeit von nur etwa zehn Zentimetern pro Jahr; das ist etwa so schnell, wie Fingernägel wachsen. Weiter oben vergrößern sich die Tropfen und zwingen sich durch Ritze und Klüfte. Schließlich vereinigen sie sich zu mächtigen Lavaströmen, die sich so rasend schnell über den Meeresboden ergießen, wie ein Lastwagen über die Autobahn braust. Die jüngsten Erkenntnisse darüber, wie Magma in großen Tiefen festes Gestein durchdringt, erklären aber nicht nur die Entstehung der ozeanischen Kruste, sondern werfen vielleicht auch ein neues Licht auf die Bildung anderer Transportsysteme für Flüssigkeiten wie die Adernetze von Fließgewässern auf dem Festland.

Unter den Vulkanen der mittelozeanischen Rücken und den unzähligen, übereinandergestapelten Lavaströmen, die zu Krustengestein wurden, liegt der Erdmantel. Diese 2850 Kilometer dicke Schicht hoherhitzen Gesteins



Der Mittelatlantische Rücken (schwarze Linie), eine 10 000 Kilometer lange Reihe von Vulkanen am Grund des Atlantischen Ozeans, ist die längste Gebirgskette der Welt. Die Farbe zeigt das Alter der Gesteinskruste unter dem Meer an. Am jüngsten (rot) ist der Meeresboden in der Nähe des Rückens. Zu den Kontinenten hin wird er immer älter.

WIE MITTELOZEANISCHE RÜCKEN ENTSTEHEN

Manchmal schmilzt eine pilzartig aufsteigende Säule aus heißem Mantelgestein – ein so genannter Plume – einen Kontinent von unten an und dünnt ihn aus. Wenn gleichzeitig Strömungen im Erdmantel oder andere tektonische Kräfte eine Zugspannung auf das Gestein an dieser Stelle ausüben, bricht es. Geologen sprechen von kontinentalem Rifting. In seinem Verlauf bildet sich ein Grabenbruch oder Rift Valley. In diese Senke ergießt sich bei Vulkanausbrüchen basische Lava, die zu Basalt erstarrt, aus dem auch der Meeresboden besteht.

Wenn die tektonischen Kräfte die beiden Seiten des Rifts auseinanderziehen, senkt sich der Graben weiter ab und gelangt schließlich unter den Meeresspiegel, so dass er überflutet wird: Ein neuer Ozean ist geboren. Die Vulkane des Grabenbruchs bilden nun einen mittelozeanischen Rücken, an dem fortwährend neue Erdkruste zwischen den beiden auseinanderdriftenden Bruchstücken des alten Kontinents entsteht.

CIRES, UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER, ELLIOT LIM UND JESSE VARNER, UND NOAA / NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER (WWW.NGDC.NOAA.GOV/MGG); NACH: R. DIETMAR MÜLLER ET AL., »AGE, SPREADING RATES AND SPREADING SYMMETRY OF THE WORLD'S OCEAN CRUST«, IN: GEOCHEMISTRY, GEOPHYSICS, GEOSYSTEMS, VOL. 9, 2008 (DOI:10.1029/2007GC001743)

stellt den mittleren Bereich des Erdinneren dar und umschließt den metallischen Erdkern. An der kühlen Erdoberfläche erscheinen Gesteine, die von dort stammen, dunkelgrün. Könnte man sie an ihrem Entstehungsort betrachten, wären sie dagegen rot oder sogar weiß glühend. An der Oberfläche des Mantels herrscht eine Temperatur von etwa 1300 Grad Celsius. Sie nimmt nach unten pro Kilometer um rund ein Grad zu. Das Gewicht des darüberliegenden Gesteins lässt auch den Druck mit der Tiefe steigen – um etwa 330 Atmosphären (33 Megapascal) pro Kilometer.

Gestein aus großer Tiefe

In Kenntnis dieser Zusammenhänge entwickelten Forscher Ende der 1960er Jahre die Vorstellung, der Ursprung der ozeanischen Kruste liege tief im Erdmantel, wo im Gestein – als ob es schwitzen würde – winzige Magmatröpfchen entstünden. Selbst eine minimale Druckentlastung, verursacht durch den Aufstieg von Material (ohne Abgabe von Wärme), führt dort zur Bildung von Schmelze in mikroskopisch kleinen Poren.

Wie dieses Magma an die Oberfläche gelangt, war allerdings schwieriger zu erklären. Zwar hat Schmelze eine geringere Dichte als festes Gestein gleicher Temperatur und erfährt daher einen Auftrieb: Sie zeigt das Bestreben, in Bereiche niedrigeren Drucks aufzusteigen. Doch Analysen von Gesteinsproben von den

mittelozeanischen Rücken, wo das austretende Magma erstarrt, ergaben eine andere chemische Zusammensetzung, als die Ergebnisse von Laborexperimenten erwarten ließen.

In so genannten Diamantstempelzellen erhitzten und quetschten Forscher Kristalle aus Mantelgestein. Dabei erwies sich, dass die Zusammensetzung des Magmas von der Tiefe abhängt, in der es sich bildet. Mantelgestein besteht vor allem aus zwei Mineralsorten: Olivin und Pyroxen (das in den zwei Formen Ortho- und Klinopyroxen vorkommt). Je höher Druck und Temperatur sind – je tiefer im Erdmantel sich also das schmelzende Gestein befindet –, desto mehr vom Olivin abgeleitetes Material enthält das entstehende Magma. Lavaproben aus den mittelozeanischen Rücken stammten demnach, wie ihre Analyse ergab, fast alle aus Tiefen unterhalb von 45 Kilometern.

Dieser Befund löste eine lebhafte Debatte darüber aus, wie Schmelze durch eine mehrere dutzend Kilometer dicke Gesteinsschicht aufsteigen und dabei ihre ursprüngliche Zusammensetzung bewahren kann. Unterwegs sollte das Magma nämlich Atome mit dem Gestein austauschen, das es durchquert. Dabei löst es Orthopyroxen auf und scheidet Olivin ab. Würde das Magma langsam durch kleine Poren im Gestein aufwärts wandern, wie die Forscher vermuteten, müsste der daraus gebildete Meeresboden deshalb die Zusammensetzung von Schmelze aus der obersten Mantelzone in

Unterhalb von 45 Kilometern ist der Erdmantel zähplastisch wie Karamell, der in der Sonne gelegen hat

weniger als zehn Kilometer Tiefe widerspiegeln. Doch den Analysen zufolge war das nicht der Fall. Die Ursprungsschmelze der meisten Lavaproben von mittelozeanischen Rücken hatte bei der 45 Kilometer langen Wanderung an die Oberfläche also anscheinend kein Orthopyroxen aus den umliegenden Gesteinen gelöst. Wie konnte das sein?

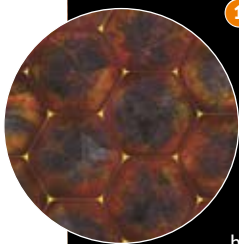
Anfang der 1970er Jahre gaben die Geologen eine Antwort, die der populären Vorstellung von Vulkanen nahekommt: Die Schmelze musste auf dem größten Teil ihrer Wegstrecke rasch durch breite Spalten aufgestiegen sein. Dabei blieb ihr keine Zeit, mit den umgebenden Gesteinen Atome auszutauschen. Außerdem käme Schmelze im Zentrum einer Spalte nicht mit den Rändern in Berührung. Zwar gibt es im oberen Mantel, der bis etwa 700 Kilometer hinabreicht, wegen des hohen

Drucks normalerweise keine offenen Klüfte. Doch könnte die Auftriebskraft der Schmelze, so die Vermutung einiger Forscher, in manchen Fällen ausreichen, um das darüberliegende feste Gestein aufzubrechen – ähnlich wie ein Eisbrecher sich seinen Weg durch das polare Packeis erzwingt.

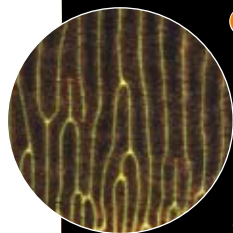
Tatsächlich fanden Adolphe Nicolas von der Universität de Montpellier (Frankreich) und seine Kollegen Hinweise auf solche Risse, als sie seltene Gesteinsformationen untersuchten, die als Ophiolithe bekannt sind. In der Regel verdichtet sich ozeanische Kruste durch Alterung und fortschreitende Abkühlung so sehr, dass sie an den Subduktionszonen – tiefen Gräben, wie sie den Pazifik säumen – in den Mantel zurücksinkt. Ophiolithe hingegen sind Stücke alten Meeresbodens, die beim Zusammenstoß zweier tektonischer Platten, statt

MEERESBODEN AUS MANTELSCHWEISS

Der Untergrund der Meeresbecken besteht aus einer sieben Kilometer mächtigen Schicht von Vulkangestein. Ausgangsmaterial dieser so genannten ozeanischen Kruste sind winzige Magmatröpfchen, die sich in weiten Bereichen des Erdmantels bilden – fast so, als ob das Gestein dort schwitzen würde. Durch kanalisiertes poröses Fließen gelangt der Inhalt dieser unzähligen Tröpfchen an den mittelozeanischen Rücken schließlich an die Oberfläche und schließt dort die Lücke zwischen den auseinanderdriftenden älteren Krustenplatten.



1 Gestein »schwitzt«: Heißes Mantelgestein beginnt zu schmelzen, wenn es, ohne abzukühlen, in Regionen mit geringerem Druck aufsteigt. Die Schmelze (gelb) sammelt sich in mikroskopisch kleinen Poren zwischen den festen Kristallen (braun), aus denen das Gestein besteht.



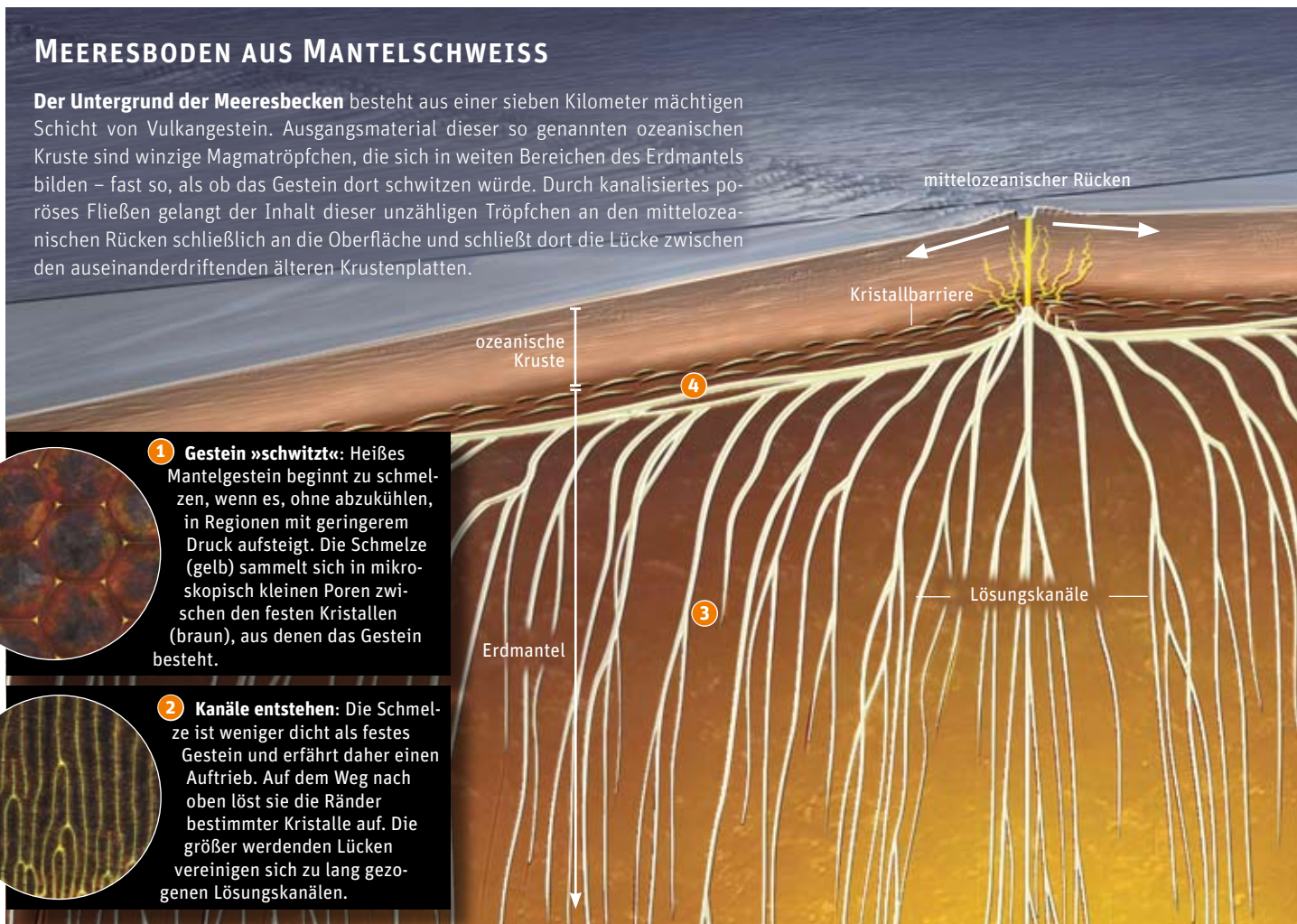
2 Kanäle entstehen: Die Schmelze ist weniger dicht als festes Gestein und erfährt daher einen Auftrieb. Auf dem Weg nach oben löst sie die Ränder bestimmter Kristalle auf. Die größer werdenden Lücken vereinigen sich zu lang gezogenen Lösungskanälen.

3 Schmelze kriecht langsam: Die Schmelze steigt nur wenige Zentimeter pro Jahr auf, weil die Lösungskanäle mit Gesteinskörnern verstopft sind, die sie nicht auflösen kann. Allmählich vereinigen sich Millionen von Schmelzfäden zu größeren Kanälen.

4 Hindernisse stoppen Aufstieg: Nahe der Kruste verliert die aufsteigende Schmelze so viel Wärme, dass sie teilweise auskristallisiert und Barrieren bildet. Diese leiten das verbliebene Magma schräg aufwärts zum Rücken hin, weil sie mit zunehmender Entfernung von ihm immer tiefer liegen.

5 Spalten reißen auf: Unter dem mittelozeanischen Rücken blockiert auskristallisierte Schmelze den Aufstrom völlig. Magma sammelt sich in linsenförmigen Taschen, bis der Druck darin so stark angestiegen ist, dass das kältere, spröde Gestein darüber zerbricht.

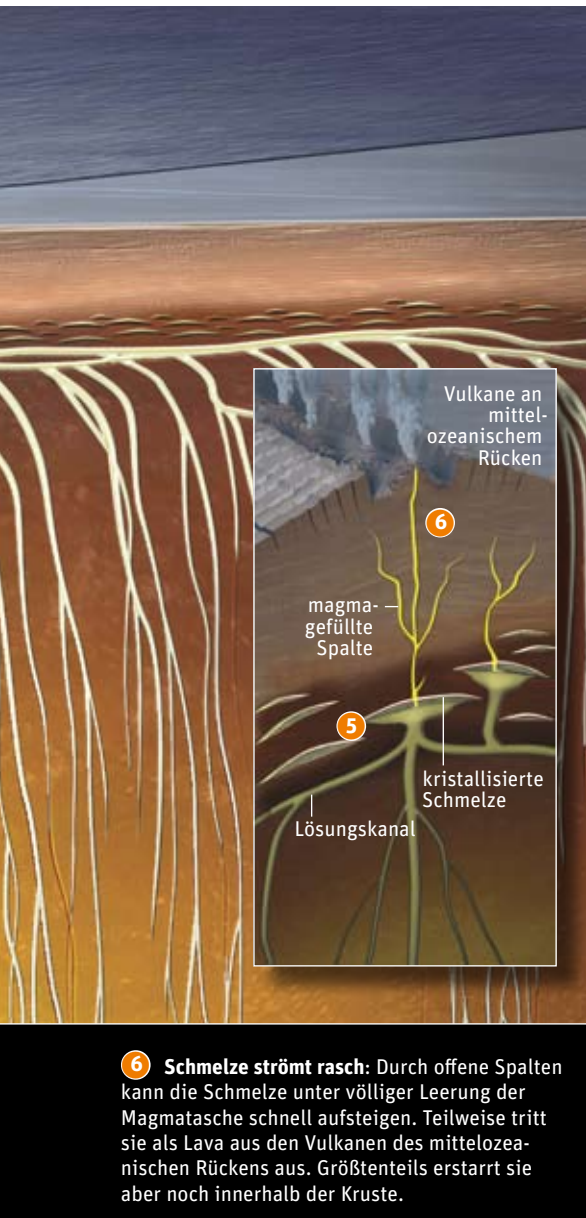
KEVIN HANB



abzutauchen, aufs Festland geschoben wurden. Sie bestehen aus so genannter Lithosphäre, die außer der Kruste auch noch die oberste, starre Schicht des Mantels enthält.

Ein berühmtes Beispiel für Ophiolithe findet sich im Oman. Dort ist während der noch andauernden Kollision der Arabischen mit der Eurasischen Platte ehemaliger Meeresboden gestrandet. In diesen und anderen Ophiolithen fand das Team von Nicolas ungewöhnliche, helle Gänge. Es interpretierte sie als Risse, in denen Schmelze vor Erreichen des Meeresbodens erstarrte.

Das Problem war nur, dass die Gänge mit Gestein ausgefüllt sind, das aus einer Schmelze kristallisierte, die in den obersten Bereichen des Mantels entstanden war – also nicht unterhalb von 45 Kilometern, woher die meiste Lava an mittelozeanischen Rücken stammt.



6 Schmelze strömt rasch: Durch offene Spalten kann die Schmelze unter völliger Leerung der Magmatasche schnell aufsteigen. Teilweise tritt sie als Lava aus den Vulkanen des mittelozeanischen Rückens aus. Größtenteils erstarrt sie aber noch innerhalb der Kruste.

Zudem dürfte das Eisbrecher-Szenario nicht auf die Schmelzregion an solchen Rücken übertragbar sein: Unterhalb von etwa zehn Kilometern ist der heiße Mantel hier nicht brüchig, sondern zähplastisch wie Karamell, der zu lange in der Sonne gelegen hat.

Magma erzeugt Schmelzkanäle

Das Rätsel bestand also weiter. Um es zu lösen, begann ich an einer alternativen Hypothese für den Lavatransport unter mittelozeanischen Rücken zu arbeiten. Ende der 1980er Jahre entwickelte ich die Theorie, dass aufsteigende Schmelze weniger Olivin abscheidet, als sie Orthopyroxen auflöst. Unter dem Strich sollte ihr Volumen also zunehmen.

In den 1990er Jahren erstellte ich zusammen mit drei Kollegen – Jack Whitehead von der Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts), Einat Aharonov, heute am Weizmann-Institut für Wissenschaft in Rehovot (Israel), und Marc Spiegelman vom Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University in New York – ein mathematisches Modell dieses Vorgangs. Es zeigte, wie der Lösungsvorgang allmählich die Zwischenräume der Kristalle erweitert. Dadurch vergrößern sich die Poren und vereinigen sich zu langgezogenen Kanälen, die sich ihrerseits zu dickeren Röhren zusammenschließen. Unseren numerischen Simulationen zufolge sammeln sich so mehr als 90 Prozent des Magmas in weniger als 10 Prozent des verfügbaren Raums. Millionen mikroskopisch kleiner Schmelzfäden münden also letztendlich in nur einige Dutzend hochgradig poröser Kanäle mit Durchmessern von 100 oder mehr Metern.

Selbst in den breitesten von ihnen bleiben zunächst aber noch viele Kristalle des ursprünglichen Mantelgesteins erhalten. Sie verstopfen die Röhren und behindern den Durchfluss. Deshalb kommt die Schmelze nur um wenige Zentimeter pro Jahr voran. Mit der Zeit jedoch passiert genügend Magma die Kanäle, um alle Orthopyroxen-Kristalle aufzulösen. Zurück bleiben nur Kristalle von Olivin und anderen in der Schmelze nicht löslichen Mineralen. Von da an hat das Magma in solchen Kanälen nicht mehr die Zusammensetzung, die der Gleichgewichtssituation unter dem herrschenden Druck entspricht, sondern dokumentiert die Tiefe, in der es zuletzt einem Orthopyroxen-Kristall begegnet ist.

Als eine der wichtigsten Konsequenzen dieses so genannten kanalisiertes porösen Fließens erweist sich, dass nur der Teil der Schmelze, der sich an den Rändern der Kanäle befindet, Orthopyroxen aus dem umliegenden Gestein löst. Magma im Inneren steigt dagegen in unveränderter Zusammensetzung auf. Nume-

GLOSSAR

DUNIT: fast ausschließlich aus dem Mineral Olivin bestehendes Gestein, das ein charakteristisches Netz heller Adern im oberen Mantel bildet

KANALISIERTES PORÖSES FLIEßEN: Bezeichnung für die Art, wie Magma durch die festen Gesteinsschichten im Erdinneren wandert, indem es sich durch langgezogene Poren zwischen einzelnen mikroskopisch kleinen Kristallen zwängt

LAVA: geschmolzenes Gestein, das bei einem Vulkanausbruch an der Erdoberfläche austritt

MAGMA: geschmolzenes Gestein vor dem Austritt an der Erdoberfläche

MITTELOZEANISCHE RÜCKEN: submarine Gebirgsketten, an denen durch Vulkanausbrüche neuer Meeresboden entsteht

MINERALE: Gesteinskomponenten definierter Zusammensetzung und Kristallstruktur. Sie können aus einem oder mehreren Elementen bestehen. Olivin enthält zum Beispiel Silizium, Sauerstoff und Magnesium, das teilweise durch Eisen ersetzt ist

OPHIOLITH: Bruchstück ozeanischer Kruste und der steifen obersten Schicht des Mantels, das bei der Kollision tektonischer Platten auf das Festland geschoben wurde

INTERESSANTE FAKTEN

- Im Mittel dauert es 100 Jahre, bis ein sechs Meter breites Stück neuer ozeanischer Kruste entsteht.
- Das heiße Gestein des Erdmantels setzt sich aus festen Mineralkristallen zusammen. Aber **ähnlich wie ein Gletscher**, der aus festen Eiskristallen besteht, kann Mantelgestein bis zu zehn Zentimeter pro Jahr fließen – etwa so schnell, wie Fingernägel wachsen.
- An mittelozeanischen Rücken ausgetretene Lava strömt mit der enormen Geschwindigkeit von teils mehr als 100 Kilometern pro Stunde über den Meeresboden.

rische Simulationen lieferten somit den entscheidenden Hinweis darauf, dass die Schmelze sich selbst ihren Weg aus großen Tiefen im Mantel nach oben bahnen kann – aber nicht durch Zerbrechen des Gesteins, sondern durch dessen partielle Auflösung. Arbeiten im Gelände erbrachten später auch handfeste Belege für kanalisiertes poröses Fließen in Ophiolithen.

Nur aus der Luft lässt sich der Ophiolith-Block im Oman voll und ganz würdigen. Die mächtige Formation besteht aus einem fast durchgehenden, 500 Kilometer langen und bis zu 100 Kilometer breiten Gesteinsband. Wie bei allen Ophiolithen ist der aus dem Mantel stammende Teil großenteils rostbraun verwittert und auffällig von tausenden Adern gelbbraunen Gesteins durchzogen. Geologen haben schon vor langer Zeit festgestellt, dass es sich dabei um so genannten Dunit handelt.

Außerhalb der Adern ist das Gestein gemäß seiner Herkunft aus dem oberen Mantel reich an Olivin und Orthopyroxen. Der Dunit dagegen besteht zu mehr als 95 Prozent aus Olivin – dem Mineral, das beim Aufstieg der Schmelze durch den Mantel zurückbleibt. Orthopyroxen fehlt völlig – im Einklang mit der

Hypothese, dass es komplett aufgelöst wurde, bevor das Magma den obersten Teil des Mantels erreichte. Dies und andere Befunde machen klar: Bei den Dunitadern handelt es sich um einstige Förderschloten, durch die unter einem mittelozeanischen Rücken Schmelzen aus großer Tiefe im oberen Mantel aufgestiegen waren. Man sieht gleichsam eingefrorene Momentaufnahmen von Kanälen, die sich durch Herauslösen einer Gesteinskomponente und Abscheidung einer anderen gebildet haben.

So aufregend diese Erkenntnisse waren, gaben sie allerdings keine erschöpfende Antwort auf eine zweite Frage, die Geophysiker schon lange beschäftigte. Die mächtigen Lavaströme an mittelozeanischen Rücken stammen aus einem schmalen Streifen mit einem Querschnitt von nur etwa fünf Kilometern. Dagegen zeigen seismische Messungen, die zwischen festem und teilweise geschmolzenem Gestein unterscheiden können, dass Magma in einem hunderte Kilometer breiten Areal bis zu einer Tiefe von mindestens 100 Kilometern vorkommt. Wie wird aufsteigendes Magma aus einem so großen Gebiet in einen schmalen Streifen am Rückenriff kanalisiert?

WASSER IM WATT FLIESST WIE MAGMA IM MANTEL



Wasser bahnt sich beim Fließen über einen Strand ein Kanalnetz ähnlich dem, das geschmolzenes Gestein beim Aufsteigen durch das feste Erdinnere erzeugt. Zwar entstehen diese Netze auf unterschiedliche Weise: Wasser am Strand hebt Sandkörner an und bewegt sie mechanisch, während Schmelze einen Teil des umliegenden Gesteins auflöst. Doch lässt die Ähnlichkeit der gebildeten Strukturen vergleichbare physikalische Gesetzmäßigkeiten dahinter vermuten.

In beiden Fällen entstehen regelmäßige Muster trotz zufälliger Ausgangsbedingungen. Am Strand fließt Grundwasser, das bei Ebbe austritt, rasch auf niedriger gelegene Stellen zu. Dabei reißt es Sandkörner mit und gräbt immer tiefere Kanäle, die auch Wasser aus anderen Rinsalen abführen, die auf sie treffen (a). Auf diese Weise sammelt sich das Grundwasser von zufällig verteilten Austrittsstellen in einer Reihe fast gleich weit voneinander entfernter Abflussrinnen, die sich stromabwärts vereinigen (b). Analog entstehen auch Bäche und Flüsse, die einen großen Strom speisen. Solche Erosionsmuster minimieren den Energieverbrauch. Je tiefer und breiter ein Kanal ist, umso weniger Energie geht durch die Reibung zwischen dem strömenden Wasser und dem Sand darunter verloren.

Das gleiche Prinzip liegt der chemischen Erosion im Erdmantel zu Grunde. Indem Schmelze

das umgebende Gestein auflöst, erweitert sie allmählich die Poren, durch die sie wandert. So entstehen Lösungskanäle, die wachsen und sich vereinigen. So kann das Magma schneller aufsteigen; denn der viskose Widerstand, welcher der Reibung entspricht, verringert sich mit zunehmender Porengröße. Ähnlich wie am Strand speisen viele kleine, aktive Kanäle einige wenige größere. Zum Teil erklärt dieses Muster, warum submarine Vulkanausbrüche fast nur an mittelozeanischen Rücken stattfinden und nicht an zufällig über den Meeresboden verteilten Stellen.

Unter veränderten Bedingungen können Kanäle, die vorher miteinander verschmolzen sind, sich auch wieder verzweigen. Am Strand lädt Wasser seine Sandfracht ab, wenn das Gefälle abnimmt. Dadurch entstehen Hindernisse im Hauptkanal (c). Wie in einem Delta an der Mündung eines Flusses ins Meer sammelt sich Wasser hinter diesen Barrieren. Von Zeit zu Zeit fließt es über und erzeugt neue Rinnen, die wiederum verstopfen und austrocknen. Zu ähnlichen Verzweigungen kommt es in der obersten Mantelzone. Sie ist kühler als der Bereich darunter. Dadurch kristallisiert ein Teil der Schmelze aus und verstopft den Kanal. Doch ab und zu durchbricht Magma diese Kristallbarrieren und dringt auf Wegen, die es sich neu bahnt, weiter vor – manchmal bis zum Meeresboden.

Im Jahr 1991 schlugen David Sparks und Mark Parmentier, damals beide an der Brown University in Providence (Rhode Island), eine Erklärung vor. Sie beruht darauf, dass die älteren Teile der aus ozeanischer Kruste und oberstem Mantel bestehenden Lithosphärenplatten beim Wegdriften vom mittelozeanischen Rücken allmählich erkalten und dabei dichter und schwerer werden, so dass sie immer weiter in den wärmeren, zähplastischen Mantel einsinken. Deshalb liegen der Meeresboden und die Untergrenze der ozeanischen Kruste weitab von ihrem Entstehungsort im Mittel zwei Kilometer tiefer als am Rückenriff. Zudem kühlt die kalte Kruste den oberen Mantel ab, wodurch sich der Teil von ihm, der zur starren Lithosphäre gehört, verbreitert und sein unterer Rand sich weiter nach unten verlagert.

Auf der Grundlage dieser Zusammenhänge schufen Sparks und Parmentier ein Computermodell für das poröse Fließen im Mantel. Ihren Simulationen zufolge verliert die aufsteigende Schmelze so viel Wärme, dass ein Teil davon in der obersten Mantelregion kristallisiert und eine undurchlässige Deckschicht erzeugt. Da sich diese Barriere mit abnehmender Entfernung vom heißen mittelozeanischen Rücken in immer größerer Tiefe befindet, bildet sie ein schräges Dach, an dem entlang die Restschmelze zum Rückenriff hingeleitet wird.

Wieso gibt es Vulkanausbrüche?

Geländebeobachtungen und theoretische Modelle lieferten somit einleuchtende Antworten auf die beiden wichtigsten Fragen. Aufsteigendes Magma behält seine chemische Zusammensetzung bei und tauscht keine Atome mit dem umliegenden Mantelgestein aus, weil es innerhalb breiter Dunitkanäle isoliert bleibt. Diese Kanäle führen zu den mittelozeanischen Rücken hin, da erkaltende Schmelze im obersten Mantel auskristallisiert. Doch schon erhob sich eine dritte Frage: Falls der Aufstieg, wie von uns postuliert, ein kontinuierlicher Prozess ist, warum tritt dann nicht fortwährend geschmolzenes Gestein am Meeresboden aus, sondern nur von Zeit zu Zeit in Form heftiger Vulkanausbrüche?

Wiederum entwickelten wir auf der Basis von Beobachtungen im Gelände eine Theorie. An den Ophiolithen des Oman hatten Nicolas und seine Kollegin Françoise Boudier in Montpellier Mitte der 1990er Jahre gezeigt, dass sich die Schmelze im obersten Mantel, dicht unter der ozeanischen Kruste, in linsenförmigen Taschen sammelt, die einige bis dutzende Meter hoch und dutzende bis hunderte Meter breit sind. Meine Kollegen und ich konnten das damit erklären, dass sich Mantelgesteine in einer bis zu zwei Kilometer dicken



Zone unterhalb der Kruste anders verhalten als in größeren Tiefen. Da sie dort Wärme an den kalten Meeresboden verlieren, kristallisiert ein Teil der Schmelze aus und wirkt als Pfropf, der den weiteren Aufstieg des von unten nachdrängenden Magmas verhindert. Dieses beginnt sich deshalb in linsenförmigen Taschen unter dem auskristallisierten Material zu sammeln, was den Druck dort steigen lässt.

In größeren Tiefen wäre das Gestein wegen der hohen Temperatur plastisch verformbar. Es würde fließen und so für eine Druckentlastung sorgen. Doch hier macht der Wärmeverlust an den darüberliegenden Meeresboden das Gestein steif und spröde. Unter dem zunehmenden Druck zerbricht es deshalb vereinzelt über den Magmataschen. So entstehen Spalten, durch welche Schmelze bis zur Untergrenze der jungen Kruste gelangt. Dort sammelt sie sich großenteils und erstarrt. Dadurch erzeugt sie neues Gestein, ohne an der Oberfläche auszutreten. Manchmal allerdings erzwingt sich die Schmelze den Weg bis ganz hinauf und ergießt sich in bis zu zehn Meter dicken und zehn Kilometer langen Lavaströmen über den Meeresboden.

Diese detaillierten Erkenntnisse über die Transportnetze von Schmelze in großen Tiefen unter dem Meeresboden ähneln in vieler Hinsicht dem, was über Gewässernetze an der Erdoberfläche bekannt ist. Ähnlich wie kleine Flüsse sich in den Untergrund eingraben und zu breiten Strömen vereinigen, erzeugt die chemische Erosion im tieferen Erdmantel ein Netz, in dem viele schmale Schmelzrinnen sich zu größeren Kanälen zusammenschließen. Beim Auskristallisieren im oberen Mantel bildet das Magma »Dämme«, die es umlenken – ähnlich den natürlichen Dämmen, die ein schlammiger Fluss an der Mündung ins Meer ablagert. Beide brechen von Zeit zu Zeit. Dann treten vorübergehend aus einem einzigen Kanal große Mengen an Flüssigkeit aus. Forschungsarbeiten über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Bildung von Gewässer- und Magmatransportnetzen zu Grunde liegen, könnten also zu einer einheitlichen Theorie führen, die das Verhalten von beiden erklärt. ◀

Ehemalige ozeanische Kruste wurde im Oman auf die Eurasiatische Platte geschoben. Die Erosion hat den mächtigen Gesteinsblock braun verfärbt – vorher war er überwiegend grünlich schwarz – und in eine zerklüftete Berglandschaft verwandelt.



Peter B. Kelemen ist Professor am Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University in New York. Als er 1980 im Himalaja Ophiolithe kartierte, fragte er sich zum ersten Mal, wie Magma wohl durch den festen Teil des Erdinneren aufsteigt. Seither hat er mit Feldforschungen im Gelände, mit mathematisch-chemikalischen Modellen am Computer und mit fluiddynamischen Experimenten im Labor nach der Antwort gesucht.

Braun, M. G., Kelemen, P. B.:

Dunite Distribution in the Oman Ophiolite: Implications for Melt Flow through Porous Dunite Conduits. In: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3(11), 6. November 2002.

Kelemen, P. B. et al.:

Extraction of Mid-Ocean Ridge Basalt from Upwelling Mantle by Focused Flow of Melt in Dunite Channels. In: *Nature* 375, S. 747–753, 29. Juni 1995.

Spiegelman, M. W. et al.:

Causes and Consequences of Flow Organization during Melt Transport: The Reaction Infiltration Instability. In: *Journal of Geophysical Research* 106(82), S. 2061–2077, 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014875.

KÄSEREI

Fleißige Mikroben

Dass aus Milch ein leckerer Brotbelag wird, verdanken wir Bakterien und Schimmelpilzen.

Von Stefanie Reinberger

Eine appetitlich angerichtete Käseplatte bildet oft den Abschluss eines Festtagsmenüs. Die reiche Auswahl an Sorten verdanken wir einem der ältesten biotechnologischen Verfahren. Ausgewählte Mikroorganismen erzeugen sie aus Milch, einer wässrigen Emulsion von Fetten, Proteinen, Kohlenhydraten, Mineralstoffen und Vitaminen. Freilich erst nach bestandener Qualitätskontrolle: Rückstände von Medikamenten wären Ausschlusskriterien, ebenso Mikroorganismen, die das anschließende Pasteurisieren durch Sporenbildung überleben könnten. Dazu gehören Clostridien, die den Käse gären und dadurch sauer bis bitter schmecken lassen würden.

Durch Hinzufügen oder Abtrennen von Rahm, dem Milchlaktose, stellt der Käser nun den gewünschten Fettgehalt ein. Anschließend pasteurisiert er den Rohstoff, zerstört also Krankheitskeime und andere unerwünschte Mikroorganismen durch Erhitzen auf 72 bis 75 Grad Celsius, bis 90 Grad für Quark.

Im nächsten Schritt erfolgt die »Dicklegung«. Vom Kasein, das rund 80 Prozent der Eiweißmenge ausmacht und in der Milch in kugelförmigen Mizellen vorliegt, spalten Enzyme Seitengruppen ab, so dass die Kaseinmoleküle lange Ketten bilden und miteinander vernetzen

können. Es entsteht eine gallertartige Masse, Dickete oder Gallerte genannt. Sollen Quark, Frischkäse oder Sauermilchkäse wie Hand-, Koch- und Harzer Käse produziert werden, liefern Mikroorganismen die benötigten Enzyme; diese so genannten Säuerungskulturen sorgen später auch durch ihren Stoffwechsel für die Reifung des Lebensmittels. Sind dagegen Hart-, Schnitt- oder Weichkäse das Ziel, kommt Lab zum Einsatz. Dieses Enzymgemisch entnahm man früher dem Labmagen von Kälbern – es dient zum Verdauen der Muttermilch – oder gewann es aus Pflanzen wie dem Labkraut. Heute wird es meist biotechnologisch hergestellt.

Die Dickete wird in kleine Stücke geschnitten, den Käsebruch. Das traditionelle Schneidewerkzeug dazu ist die Käseharte, heute ein Edelstahlrahmen mit parallel gespannten Drähten. Je feiner der Bruch, desto fester wird das Endprodukt. Weichkäse wie Camembert oder Brie entstehen deshalb aus walnussgroßen Stücken, für mittelweichen Käse, etwa Gouda und Butterkäse, müssen sie haselnussgroß sein, und für Hartkäse dürfen sie gerade mal die Größe eines Reiskorns haben. Den richtigen Zeitpunkt zum Schneiden ermitteln Käser übrigens auch heute noch überwiegend manuell.

Wird die Masse nun langsam auf bis zu 55 Grad Celsius erhitzt, zieht sie sich zusammen, und überschüssige Flüssigkeit, die Molke, tritt aus. Bei der Produktion festerer Käse wird der Bruch dann mit einem Tuch aus dem Kessel gehoben – auch in der Großproduktion – und in eine Form gebracht, während man etwa für den weichen Gouda die Molke ablaufen lässt. Bei Camembert und Brie wird der Bruch per Schöpfkelle umgefüllt.

Schnittkäse muss nun gepresst werden – je nach Sorte zwischen 2 und 24 Stunden. Darauf folgt meist für eine halbe Stunde bis zu mehreren Tagen ein Bad in einer hochprozentigen Natriumchlorid-

WUSSTEN SIE SCHON?

► **Der älteste erhaltene Käse** wurde in einem ägyptischen Steingefäß gefunden und ist rund 4200 Jahre alt. Forscher gehen aber davon aus, dass das Prinzip der Käseerei bereits in der Jungsteinzeit entdeckt wurde: In Tiermägen, die man zum Transport von Milch genutzt hat, entstand gelegentlich Käse auf Grund von Labresten.

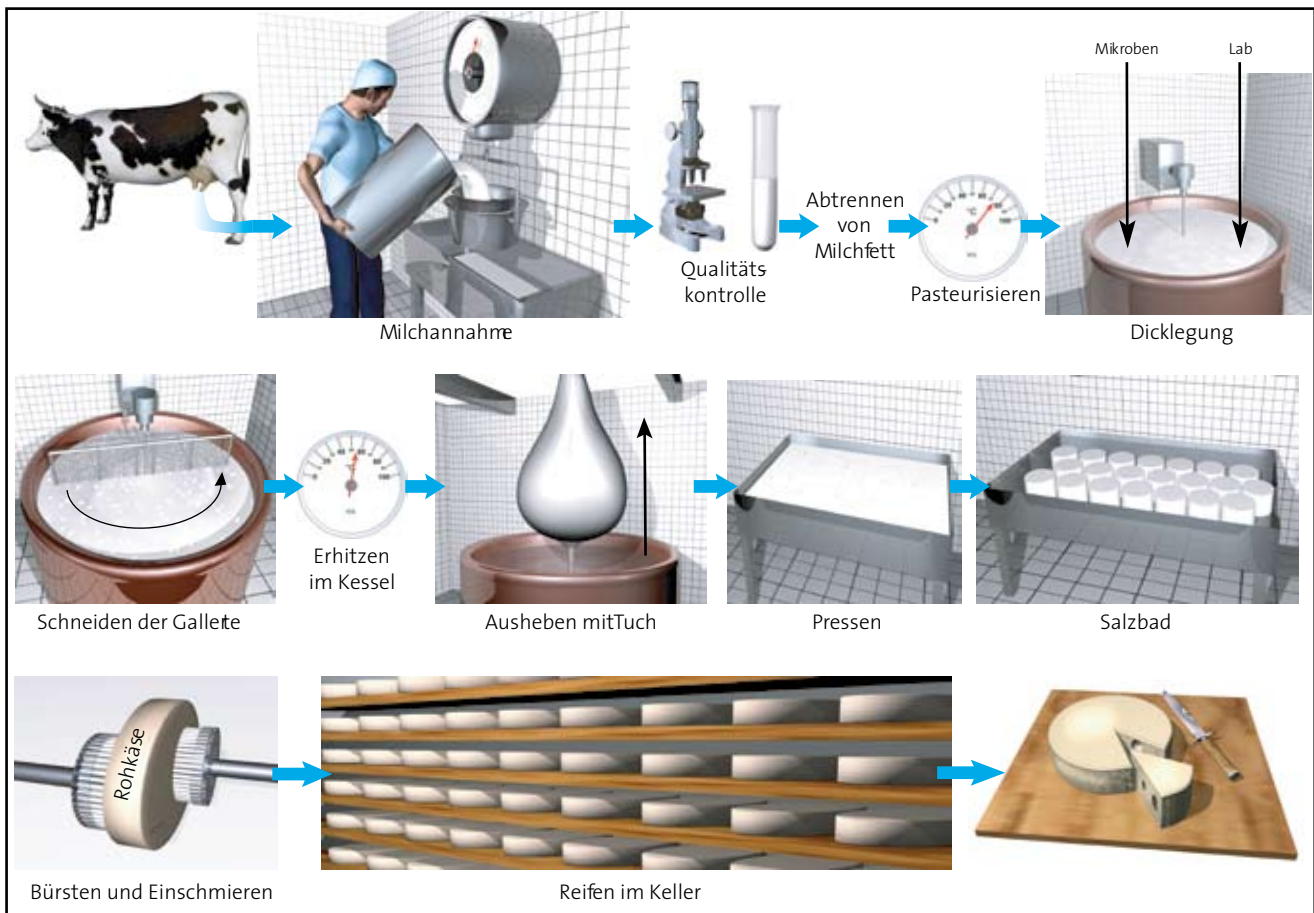
► **Löcher im Käse** sind Resultat des Stoffwechsels der Milchsäurebakterien – beim Umsetzen der Laktose wird unter anderem Kohlendioxid frei, das nach der Rindenbildung nicht mehr entweichen kann und Blasen bildet. Besonders große Löcher, etwa im Emmentaler, stammen von Propionibakterien, die ebenfalls CO₂ produzieren sowie Propionsäure, die einen wichtigen Beitrag zum Aroma leistet. Die kleinen Löcher des Tilsiters entstehen schon vor der Reifung, weil der Käsebruch, nur locker geschüttet, nicht gepresst wird.

► **Wer den Milchzucker Laktose** nicht verdauen kann, darf gereiften Hartkäse in der Regel bedenkenlos essen: Mikroorganismen bauen den Zucker fast vollständig ab; eine Kennzeichnung

als laktosefrei erfordert dann nur eine spezielle Prüfung des Milchzuckeranteils. Bei Quark, Frisch- oder Weichkäse ist allerdings eine gezielte enzymatische Spaltung vonnöten: Das Enzym Laktase kommt dazu entweder direkt in die Milch, oder die Laktose wird herausgefiltert, dann behandelt und ein Teil der Spaltprodukte zurückgegeben.

► **Niedriger Fettgehalt** und trotzdem der gewünschte Geschmack und das käsetypische Mundgefühl? Zeitgemäße Light-Produkte fordern die Kunst der Käsemeister heraus. So verstärken diese durch speziell zusammengesetzte Reifungskulturen das Aroma. Durch gröberes Schneiden der Dickete behält der Käse einen höheren Wassergehalt und wirkt cremiger.

► **Rohmilchkäse ist heute** eine eher seltene Spezialität meist kleinerer Käsereien, denn er wird aus unpasteurisierter Milch hergestellt: Nach dem Melken rührt der Käser Milchsäurebakterien und gegebenenfalls Schimmelpilzkulturen ein, dann reines Labextrakt, damit die Milch gerinnt. Rohmilchkäse ist deshalb kennzeichnungspflichtig.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANIM

lösung. Das Salz entzieht dem Laib weitere Flüssigkeit und bildet eine Rinde. Einige Sorten wie der Roquefort werden damit eingerieben (Trockensalzen), bei anderen wie dem Cheddar wird es dem erneut klein gehackten Rohkäse untergemischt.

Rohkäselaike sind bröckelig, blass und geschmacksarm. Das ändert sich während der Reifung, die Tage, Wochen oder Monate dauern kann. Mikroorganismen setzen dabei vor allem Milchzucker (Laktose) um, aber auch Fett und Proteine. Dabei entstehen jene Stoffe, die für Aroma, Farbe und Konsistenz sorgen – sofern im Käsekeller das richtige, der Sorte entsprechende Klima herrscht. Die Laibe werden während des Reifens regelmäßig gewendet und mit Salzlösung gebürstet. Dabei entsteht die »Käseschmiere«. In dieser äußeren Schicht herrscht das für die jeweils erwünschten Mikroorganismen erforderliche biochemische Milieu, während andere Mikroben sich nicht ansiedeln können. Sie geben Enzyme ab, die das Kaseinnetzwerk zum Teil abbauen und zu geschmacksrelevanten Verbindungen umwandeln. Obwohl diese Prozesse nur an der Oberfläche ablaufen, beeinflussen sie doch das Aroma des gesamten Lebensmittels.

Diese Helfershelfer sind mitunter Bakterien und Pilze, die natürlicherweise in der Luft vorkommen. Andere werden zugesetzt wie die Rotschmierekulturen, die für die rötlich-bräunliche Rinde von

Ob Großbetrieb, mittelständische Käserei oder Almdirektvertrieb, ob Hart- oder Weichkäse, stets sind es dieselben grundlegenden Prozessschritte, in denen das Lebensmittel Käse entsteht. Ausnahme: Das Pasteurisieren entfällt beim Rohmilchkäse.

Romadur, Limburger oder Munster verantwortlich sind. Bei Weichkäsesorten à la Camembert gibt der Käsemeister die Kulturen für die typische Weißschimmelrinde sogar schon vor der Dicklegung in die Milch. Blauer Edelschimmel, der Roquefort und Gorgonzola verfeinert, wird mit langen Nadeln in den Rohkäse geimpft. Nicht geschmiert wird Emmentaler, der heute meist eine ölige Schutzschicht bekommt, die den Käse atmen und Flüssigkeit verdunsten lässt. Wachsschichten hingegen schließen ihn luftdicht ab, was einige Aroma bildende Reaktionen stört und den Geschmack weniger intensiv werden lässt. Bis zu 600 Käsesorten soll es in Deutschland laut Internetquellen geben. Da dürfte für jeden Geschmack etwas dabei sein.

Die Biologin **STEFANIE REINBERGER** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

COMPUTER an der Angel

Um sensible Daten wie Passwörter und Bankverbindungen im Internet auszuspähen, setzen Kriminelle auf raffinierte Techniken – und auf einen naiven Umgang der Nutzer mit elektronischer Post.

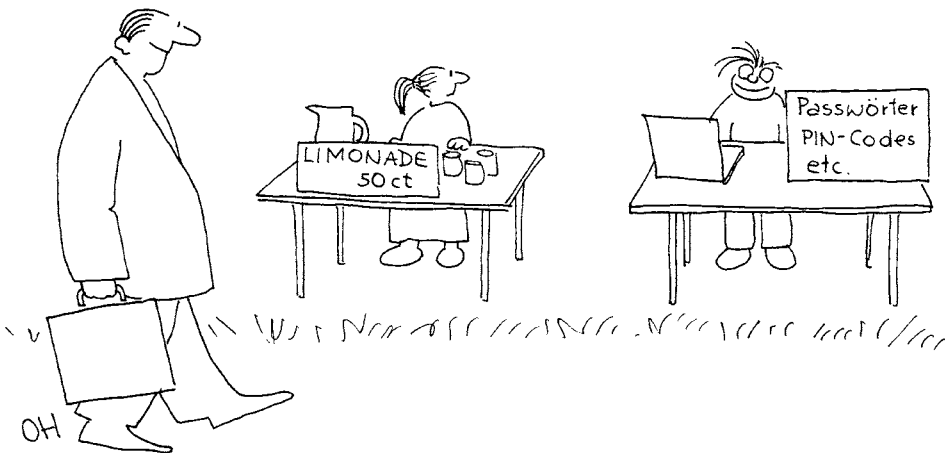
Von Lorrie Faith Cranor

Wer würde da nicht erschrecken? Innerhalb weniger Wochen warnten mich E-Mails, dass meine Onlinebankdienste Gefahr liefen, deaktiviert zu werden, mein E-Bay-Passwort geändert werden müsse und Rechnungen für Musik-Downloads noch offenstünden. Zudem enthielt das elektronische Postfach noch die Information, die Zugangsdaten zu meinem Mailservice würden sich ändern, das Angebot einer Fluggesellschaft, gegen einen ansehnlichen Betrag an einer Onlineumfrage teilzunehmen sowie einen Spendenaufruf anlässlich drohender Hungersnöte in der Dritten Welt. Alle diese

Nachrichten stammten dem Absender wie dem Erscheinungsbild der Mail nach von namhaften Unternehmen und Organisationen. Aber mit Ausnahme der Aufforderung von E-Bay stammten sie ausnahmslos von Kriminellen.

So genannte Phishing-E-Mails fischen nach Informationen, die sich zu Geld machen lassen: Zugangsdaten zu Bankkonten, Kreditkartennummern, Benutzernamen und Passwörter zu Onlineshops. Diese elektronischen Briefe sehen unverdächtig aus, stammen oft scheinbar von bekannten Firmen und fordern stets zu einer dringlichen Aktion auf, um entweder negative Konsequenzen zu vermeiden oder eine Belohnung zu erhalten. Der Empfänger soll typischerweise vertrauliche Informationen in ein Formular eintragen, einen Weblink anklicken oder einen Anhang öffnen. Nicht selten werden in den letzten beiden Fällen unbemerkt Trojaner genannte Schadprogramme auf dem Computer des Empfängers installiert, die einen Zugriff auf die erwünschten Daten verschaffen oder den Rechner bei künftigen Angriffen im Netz mit einspannen.

Die Anti-Phishing Working Group, ein internationales Konsortium aus Organisationen, die dem Internetbetrug den Kampf angesagt haben, behält solche Aktivitäten im Auge, einschließlich der Zahl der in jedem Monat entdeckten Phishing-Webadressen. Im April 2007 erreichten diese einen Spitzenwert von 55 643, im Juni 2009 wurde der zweithöchste Wert





von 49084 gemessen. Wurden 2007 noch 92 bis 178 Firmennamen und -logos pro Monat missbraucht, um Opfer zu täuschen, waren es in der ersten Hälfte 2009 259 bis 310. Nach Angaben der Forschungs- und Beratungsfirma Gartner fielen 2007 geschätzte 3,6 Millionen Amerikaner Phishing-Attacken zum Opfer, ihr Verlust belief sich auf mehr als 3,2 Milliarden US-Dollar; im Jahr darauf war die Opferzahl auf mehr als fünf Millionen gestiegen, aktuelle Zahlen liegen noch nicht vor (Stand November 2009; zur Situation in Deutschland siehe Kasten S. 94).

Phish? Eine Rockband?

Spezielle E-Mail-Filter und Webbrowser warnen vor Phishing-Attacken, doch leider gelingt es kriminellen Softwareentwicklern immer wieder, kommerziellen Sicherheitsprogrammen einen Schritt voraus zu sein. Zudem ist ein Teil des Problems nicht technischer Natur: Phishing hat nur dann Erfolg, wenn der E-Mail-Empfänger sich täuschen lässt beziehungsweise entsprechende Schutzprogramme

entweder nicht aktiviert oder ihre Warnungen missachtet. Deshalb untersucht meine Forschungsgruppe an der Carnegie Mellon University die Möglichkeiten, Internetnutzer zu schulen. Umgekehrt hilft diese Forschung, Anti-Phishing-Software zu entwickeln, die mit höherer Wahrscheinlichkeit korrekt benutzt wird.

Als wir 2004 mit unserem Projekt begannen, rekrutierten wir Personen auf den Straßen von Pittsburgh. Die meisten hatten keine Ahnung, wovon wir sprachen, und nahmen an, dass der Begriff Phishing etwas mit der US-amerikanischen Rockband Phish zu tun habe. Die wenigsten wussten eine Betrugsmail zu erkennen. Selbst die von einem Webbrowser angezeigten Sicherheitswarnungen wurden nur selten verstanden.

Das irritierte, denn Firmen, Behörden und Industrieverbände widmeten damals bereits Websites diesem Thema, um die Bevölkerung aufzuklären. Wir recherchierten und kamen zu dem Schluss: Viele waren in zu technischem Jargon verfasst und überforderten

In Kürze

- ▶ Als Phishing bezeichnet man das **Ausspähen sicherheitsrelevanter Informationen** wie Passwörter oder Bankverbindungen.
- ▶ Phisher verleiten ihre Opfer durch **fingierte Mails** dazu, sensible Daten in Abfragemasken einzugeben. Alternativ versuchen sie, deren Computer mit Spionagesoftware zu infizieren.
- ▶ Da Phishing **menschliche Schwächen** ausnutzt, verspricht eine Kombination von Schulung und anerkannter Sicherheitssoftware den besten Schutz.

SUSPEKTE SEITEN

Misstrauen Sie Webseiten mit folgenden Eigenheiten:

- **Alter der Domain**
kleiner gleich zwölf Monate
- **bekannte Logos**
Die Seite gehört zu keiner Domain des Logoeigners.
- **verdächtige Adresse**
URL beinhaltet das @-Zeichen, einen Bindestrich, eine IP-Adresse oder mehr als fünf Punkte.
- **verdächtige Links**
Der Link auf der Seite enthält ein @, einen Bindestrich oder einen Schreibfehler.
- **lexikalische Signatur**
Die URL stimmt nicht mit der Adresse der durch Google hoch bewerteten gleichnamigen Webseite überein.

Computernutzer mit einem Überangebot an Informationen, andere lieferten zu wenig konkrete Ratschläge, wie man sich schützen könne.

Bei Untersuchungen unter Laborbedingungen zeigte sich auch bald, dass ein eher theoretisches Bewusstsein dieser Bedrohung nicht genügt, um auch ein adäquates Verhalten zu motivieren. Nicht selten werden Warnhinweise, wie sie Firmen an ihre Mitarbeiter und Kunden verschicken, schlicht ignoriert. Probanden ließen sich sogar leichter verleiten, fingierte Mails zu lesen als offenkundig sicherheitsrelevante Nachrichten.

Mein Team entwickelte ein Trainingssystem, das Cartoons einsetzt. Die Figur Phish-Guru unterrichtet mögliche Opfer darin, wie sie sich selbst schützen können. Als besonders effektiv erwies es sich, unsere Probanden vor dem Training mit simulierten Phishing-Mails zu überrumpeln: Auch eine Woche nach der Unterweisung erinnerten sie sich an ihre Lektionen und ließen sich nicht täuschen.

Darauf aufbauend entwickelte mein Doktorand Steve Sheng ein Onlinetrainingspiel

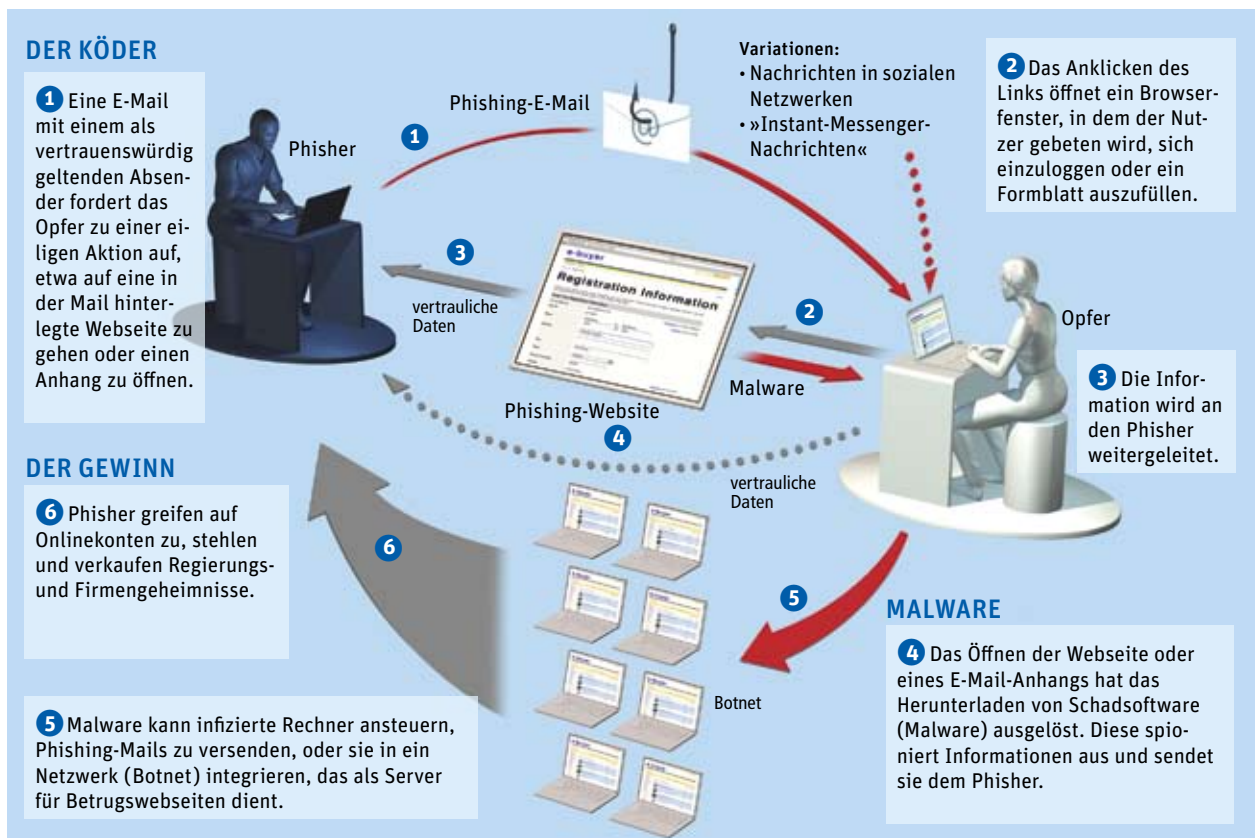
namens Anti-Phishing Phil, das nicht nur das Rüstzeug dafür liefert, verdächtige Webadressen zu erkennen, sondern auch die Erfahrung vermittelt, wie es ist, einem Phisher ins Netz zu gehen (siehe Bild S. 95). In Labor- und Feldstudien konnten wir die Wirksamkeit dieser Software nachweisen. Die Zahl falsch-negativer Erkennung, also irrtümlich für seriös gehaltener Webseiten, nahm ebenso deutlich ab wie falsch-positive Identifizierungen, die irrtümliche Ablehnung harmloser Seiten. Wer Anti-Phishing Phil erlebt hatte, schnitt im Durchschnitt auch besser ab als Teilnehmer anderer Trainingsprogramme.

Da die Entwickler von Schadsoftware dazulernen und ihre Strategien ändern, genügt eine einmalige Fortbildung leider nicht. Selbst professionelle Computeranwender müssen sich immer wieder auf den aktuellen Stand bringen. Die Anti-Phishing Working Group (APWG) berichtet, dass beispielsweise die Infektion von Computern mit Trojaner genannten Schadprogrammen, die Passworte und andere persönliche Daten ausspähen, dramatisch zunimmt. Attacken, die auf ihre Opfer hin

WIE PHISHING FUNKTIONIERT

Um Zugangskodes zu erfahren, verschicken Verbrecher Mails, die anscheinend von einer vertrauenswürdigen Firma oder Per-

son stammen. Wer der darin enthaltenen Aufforderung folgt, riskiert hohen finanziellen Schaden.



maßgeschneidert sind, sind ebenfalls ein Trend; man spricht anschaulich vom Speer-Phishing. Beispielsweise werden E-Mails an Firmenangehörige verschickt, als deren Absender ein Manager des Unternehmens firmiert. Wie leicht lässt man sich täuschen und öffnet den Anhang oder klickt auf den Weblink.

Gute Seiten, schlechte Seiten

In vielen Browsern sind bereits Sicherheitsfilter eingebaut, andere entdecken verdächtige Websites mit Hilfe von Add-ons, also kleinen Zusatzprogrammen. Doch alle Raffinesse der Entwickler ist vergebens, wenn deren Warnungen nicht verstanden werden. Solche Probleme melden Gruppen wie die unsere an die Hersteller. Schon deshalb empfiehlt es sich, Internetsoftware immer auf dem neuesten Stand zu halten.

Zusätzlich zur Erkennbarkeit beeinflusst auch die Verlässlichkeit das Nutzerverhalten. Eine hohe Rate falsch-positiver Entscheidungen erschüttert die Glaubwürdigkeit eines Filters, und seine Warnungen werden leicht

ignoriert. Die von uns getesteten Werkzeuge kombinieren verschiedene Methoden, um Betrugsnachrichten und kriminelle Websites zu identifizieren. So gibt es Listen erkannter Webadressen (Blacklists), die ständig aktualisiert werden, beziehungsweise Tabellen seriöser Seiten (Whitelists).

Einige Filter analysieren besuchte Internetseiten anhand von Heuristiken (siehe auch die Randspalte links). So sind Webadressen verdächtig, die denen wohl bekannter Marken ähneln wie etwa »www.annazon.com« (ein Kriterium, das wir auch in unseren Schulungen lehren). Da Betrugsseiten typischerweise nur Stunden bis Wochen aktiv sind, überprüfen die Programme auch das Alter einer Seite. Dieses Kriterium kann die Erkennungsrate drastisch verbessern. So testeten wir 2008 acht Anti-Phishing-Programme mit neuen Betrugsseiten. Programme, die sich ausschließlich auf Blacklists stützten, erkannten zunächst nur 20 Prozent davon, und erst nach fünf Stunden erreichten die meisten eine Quote von immerhin 60 Prozent. Solche aber, die zudem Heuristiken nutzten, identifi-

ERKENNEN PHISHIGER E-MAILS

Ein Markenname, einer Institution oder gar der Name eines Mitarbeiters suggerieren Vertrauenswürdigkeit. Anhand diverser Merkmale können Computernutzer und spezielle Programme fingierte Nachrichten aber dennoch als solche erkennen.

TYPISCHE MERKMALE


professionelles Layout, bekanntes Firmenlogo

eilige Angelegenheit, die eine Aktion fordert

Warnung, falls Aktion nicht erfolgt

HINWEIS AUF PHISHING-MAILS
Wird der Cursor über den Link geführt, entspricht die in einer Browserzeile erscheinende Adresse nicht der im Text angezeigten.

Betreff: Musterbank Eilige E-Mail-Verifikation
Von: »Musterbank« Kreditkarten@Musterbank.de
Datum: Mon, 06. Juli 2009, 15.12.43
An: Mustermann@provider.de
Priorität: Normal
Optionen: [View Full Header](#) | [View Printable Version](#)



Sehr geehrte(r) Musterbankkunde,

Diese E-Mail wurde Ihnen vom Musterbank-Server gesandt, um Ihre E-Mail-Adresse zu verifizieren. Sie müssen diesen Vorgang abschließen, indem Sie [hier](#) oder auf den Link weiter unten klicken und sich mit Ihrem Musterbank-Nutzernamen und Passwort anmelden. Dies dient Ihrem eigenen Schutz – weil einige unserer Kunden keinen Zugang mehr zu ihren E-Mail-Adressen haben und wir dies verifizieren müssen. Aus Gründen der Sicherheit sind wir gezwungen, Ihren Kontozugang einzuschränken, falls Ihre Zugangsdaten nicht innerhalb der nächsten 72 Stunden verifiziert werden.

Um Ihre E-Mail-Adresse zu bestätigen und Zugang zu Ihrem Bankkonto zu erhalten, klicken Sie auf den Link weiter unten. Falls nach Anklicken des Links nichts geschieht, kopieren Sie den Link und fügen Sie ihn in die Adressleiste Ihres Webbrowsers ein.

<http://www.MusterBank.de/EMailVerifikation>

Vielen Dank
 Ihr Kontomanagement

http://musterbank-OnlineKonto.de/KontoZusammenfassung.htm?verify=email

KRITERIEN FÜR SOFTWAREFILTER

HTML- oder JavaScript-Kode – der auch in seriösen E-Mails vorkommt – ermöglicht es, verlinkte Internetadressen zu verbergen.

Webadressen von Firmen vermitteln Authentizität, der Link aber leitet zu einer anderen Seite.

Phishing-Domains sind meist kurzlebig; ein Filter kann entsprechende Listen befragen, ob die in der Mail verlinkte Webseite schon länger existiert.

zierten von Anfang an fast 90 Prozent der Phishing-Attacken.

Erfolg versprechen auch Analysetechniken des Maschinenlernens. Mein Mitarbeiter Norman Sadeh versucht mit diesen Verfahren Merkmale auszumachen, die bezeichnend für Phishing sein können. Zum Beispiel gibt es in solchen Mails oft Weblinks, die im lesbaren Text wie die Adresse einer bekannten und seriösen Website aussehen – tatsächlich aber durch den hinterlegten Computercode auf die Seite des Angreifers führen. Andere Adressen enthalten oft fünf und mehr Punkte und weisen auf Domainnamen, die erst kürzlich den internationalen Domainservern gemeldet wurden. Doch diese beiden Kriterien sind nicht hundertprozentig scharf, denn es gibt Betrugs-E-Mails ohne diese Merkmale, und mitunter treffen sie auch auf seriöse E-Mails zu. Deshalb trainieren meine Mitarbeiter unser Programm PhishPatrol anhand einer großen Sammlung seriöser und betrügerischer E-Mails. Es analysiert sie und lernt selbstständig, welche Merkmalkombination höchstwahrscheinlich korrekt auf Phishing hinweist. Inzwischen erkennt PhishPatrol mehr als 95 Prozent der kriminellen E-Mails und liefert nur bei etwa 0,1 Prozent der seriösen Nachrichten fälschlicherweise Warnungen.

Wir haben auch einige der dort genutzten Strategien mit anderen Ansätzen kombiniert. Jason Hong leitete in unserer Gruppe die Entwicklung der Software Cantina, die den Inhalt einer Internetseite und verschiedene andere Merkmale bewertet. Cantina nutzt zu-

nächst einen gängigen Algorithmus, um auf dieser Seite fünf Begriffe zu identifizieren, die offenbar wichtig, im Internet insgesamt aber vergleichsweise ungebräuchlich sind. Eine solche lexikalische Signatur der Login-Seite von E-Bay ergäbe vielleicht »E-Bay, Mitgliedsname, einloggen, Hilfe, vergessen«. Würde man umgekehrt diese fünf Ausdrücke in die Google-Suchmaschine eintragen, sollte die Login-Seite von E-Bay unter den obersten Suchergebnissen erscheinen. Phishing-Websites, die sich den Anschein dieser Seite geben, dürften eher nicht auftauchen. Denn eines der Kriterien, das Googles proprietärer Algorithmus zum Ranking von Seiten nutzt, ist die Anzahl der von anderen Adressen dorthin führenden Links. Allerdings ist das keine unfehlbare Methode, besonders dann, wenn eine seriöse Website erst kürzlich kreiert wurde; folglich ist es nur eines von mehreren Merkmalen, das Cantina berücksichtigt.

Täuschend echt – simulierte Internetportale

Im Kampf gegen diese Form der Onlinekriminalität entdeckt auch die Gegenseite immer neue Angriffsmöglichkeiten: Phishing-Nachrichten werden via Instant Messenger und Handy-SMS versandt; Teilnehmer des beliebten Onlinespiels »World of Warcraft« erhielten fingierte E-Mails des Betreibers. Über die Kurznachrichtendienste sozialer Netzwerke wie Facebook wurden »klassische« Pornolockangebote verbreitet – etwa mit Betreffzeilen wie »Würden diese Fotos wirklich ins Netz

PHISHING IN DER BUNDESREPUBLIK

Nach Angaben des Bundeskriminalamts stieg die Zahl der registrierten Fälle in den Jahren 2005 bis 2007 von 2500 auf 4200, sank aber 2008 zunächst auf 1778, vermutlich auf Grund der flächendeckenden Einführung des iTAN-Systems beim Onlinebanking. Entwarnung gibt die Behörde aber nicht: Seit Ende 2008 klettern die Zahlen wieder nach oben, und vermehrt wurde das iTAN-System überwunden.

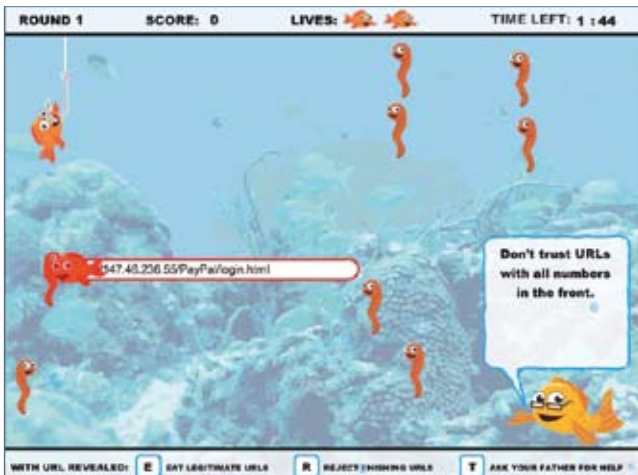
Auch die Schadenssummen wachsen, sie erreichten 2008 häufig Beträge von 10 000 Euro. Neben Bankdaten hätten es Kriminelle laut BKA zunehmend auf die digitale Identität der Bürger abgesehen. Der Diebstahl von Kreditkartennummern, Zugangsdaten bei Auktionshäusern oder Passwörtern für soziale Netzwerke und Aktiendepots nahm 2008 um rund zehn Prozent auf mehr als 37 000 Fälle zu.

Laut BKA kommen in Europa inzwischen hauptsächlich Trojaner zum Einsatz, die unbemerkt die Eingaben des Nutzers protokollieren. Sie gelangen als Anhang einer Mail auf den Computer, via Download oder als Drive-by-Infection, einer unbemerkten »Ansteckung« beim Besuch einer infizierten Webseite. Insgesamt sollen 25 bis 30 Prozent der in Deutschland mit dem Inter-

net verbundenen Rechner bereits von Schadsoftware befallen sein, schätzen Hersteller von Anti-Virus-Programmen und Sicherheitsdienstleister.

Das BKA empfiehlt deshalb:

- nie ohne Firewall und Virenschutz ins Internet
- Virenschutz-, Browser- und E-Mail-Software aktuell halten
- Vorsicht beim Öffnen von Mail-Anhängen
- keinen Links folgen, die per Mail einer angeblichen Bank kommen
- keine TANs eingeben, wenn keine Überweisung vorgenommen wird
- ungewöhnliche Fehlermeldungen beim Onlinebanking sofort der Bank melden und den eigenen Zugang sperren lassen
- regelmäßig Kontoauszüge prüfen
- für alle sicherheitsrelevanten Internetaktivitäten wie das Onlinebanking einen extra Rechner verwenden
- Vorsicht bei Jobangeboten im Internet: Wer sich als *mule* anwerben lässt, macht sich mindestens der Geldwäsche schuldig.



gestellt?«, die einen Link enthielten, der zu einer simulierten Facebook-Login-Seite führte. Raffinierterweise leiteten die Phishing-Seiten nach Eingabe der Zugangsdaten tatsächlich an die richtige Adresse weiter. In eine ähnliche Falle kann die Einwahl in ein öffentliches WLAN führen.

Eine Variante des Phishing erlebt derzeit ein exponentielles Wachstum: betrügerische Schutzsoftware. So wurden Besucher der Webseite der »New York Times« im vergangenen September nach dem Anklicken eines Werbebanners vor einer möglichen Infektion ihres Rechners gewarnt und der Erwerb eines Anti-Virus-Programms empfohlen. Wer dem nachgab, war sein Geld los, denn was sich dann installierte, gab nur vor, ein Schutzprogramm zu sein. Tatsächlich richtete die Malware eher Schaden an, da sie die Sicherheitsstufe des Internet Explorers und Windows-Systemeinstellungen veränderte. Nach Auskunft der APWG hatte sich die Zahl solcher Fälle betrügerischer (*rogue*) Anti-Malware-Programme international von etwa 22 000 im Januar auf mehr als 152 000 im Juni 2009 erhöht. Der besondere Reiz für die Phisher: Solche Software ist für echte Schutzprogramme schwer zu erkennen, solange sie nicht zusätzlich Trojaner und dergleichen installiert. Denn letztlich gibt sie nur vor, etwas anderes zu sein, als sie ist. Gut 200 Gangs weltweit folgen diesem »Geschäftsmodell«.

Längst sind keine Kleinkriminellen mehr am Werk, sondern Profis. Organisierte Phisher-Banden wie die vermutlich von Osteuropa aus agierende »Rock Phish Gang« setzen Tausende von mit Trojanern infizierte Computern ahnungsloser Nutzer für ihre Attacken ein. Dass es sich nicht um ein marginales Problem handelt, verdeutlicht die Statistik. Laut der jüngsten Erhebung von Panda Labs, einem Forschungsnetzwerk und Anbieter von Schutzsoftware, waren von mehr als 20 Mil-

lionen Rechnern weltweit Mitte 2009 54 Prozent mit Schadsoftware aller Art infiziert, während es Ende 2008 noch 35 Prozent gewesen waren.

Befallene Computer versenden Betrugs-mails und maskieren so die Internetadresse der eigentlichen Phishing-Website. Eine andere von diesen Banden genutzte Taktik, um den Ausgangspunkt eines netzweiten Angriffs zu verschleiern, ist die von Sicherheitsexperten Fast-Flux genannte Methode: Den Kriminellen gelingt es, die Domainname-Server zu manipulieren, also die Knotenrechner, die eine Adresse wie »www.spektrum.de« in eine aus Zahlen bestehende Adresse umsetzen. Die Banden sorgen durch ihren Eingriff dafür, dass die Server ständig die zum Domainnamen der Betrugsseite korrespondierende numerische Adresse ändern.

Überraschenderweise werden Phishing-E-Mails nicht unbedingt von dubiosen Servern schwer kontrollierbarer Inselstaaten verschickt. Nach Auskunft von Avira, einem deutschen Hersteller von Sicherheitssoftware, stammen mehr als 14 Prozent der deutschen Phishing-E-Mails auch von deutschen Servern. Im internationalen Vergleich allerdings kommen sie nur auf zwei bis drei Prozent, den Spitzenplatz infizierter Webseiten belegt inzwischen China mit 36 Prozent im Juni 2009 vor den USA mit »nur« 29 Prozent.

Bei aller technischen Raffinesse sind Phisher mitunter doch auf menschliche Hilfe angewiesen, und hier kommen wieder arglose Gutgläubigkeit oder Gier ins Spiel. Um ihre Identität beim Zugriff auf ein fremdes Konto zu verdecken, rekrutieren sie *mules* (Maulesel) für angebliche Heimarbeitsplätze oder scheinbare Gefälligkeiten. Deren Tätigkeit besteht im Transferieren von Geld. Kommen Ermittler diesen oft ahnungslosen Personen auf die Spur, gilt der Grundsatz: Unwissenheit schützt nicht vor Strafe. ◀

Onlinetraining gegen Onlinekriminalität: Bei »Anti-Phishing Phil« schlüpfen Spieler in die Rolle des Fisches Phil, der sich entscheiden muss, ob er einen mit einer URL verbundenen Wurm frisst oder ihn zurückweist (links). Während und nach jeder Runde wird das Verhalten kommentiert, und es werden Tipps gegeben (rechts). In Laborstudien erkannten derart geschulte Probanden infizierte Webseiten sehr viel besser als solche, die mit Standardmaterial trainiert wurden.



Lorrie Faith Cranor lehrt Informatik an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh (Pennsylvania) und leitet dort ein Labor zum Themenbereich »Schutz persönlicher und sicherheitsrelevanter Daten«. Mit Wombat Security Technologies Inc. will sie die entwickelten Anti-Phishing-Verfahren vermarkten.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014874.

TECHNIK

Technologien im Zeitgewand

Joachim Radkau zeigt uns die deutsche Technikgeschichte in einer überwältigenden Vielfalt der überraschendsten Zusammenhänge.

Gibt es einen typisch deutschen Weg in der Entwicklung der Technik? Joachim Radkau, Professor für Neuere Geschichte, insbesondere Technikgeschichte, an der Universität Bielefeld, antwortet mit einem klaren Ja. Typisch deutsch sei, dass es hier zu Lande Technisierung um jeden Preis nie gegeben habe.

»Nie« ist vielleicht ein bisschen übertrieben. Auch in Deutschland sehen viele Leute Anlass, über die »Technikverliebtheit der Ingenieure« oder »Überingenieurisierung« zu klagen, ganz zu schweigen von der Hilflosigkeit, die Otto Normalverbraucher bei der Programmierung elektronischer Konsumgüter, auch deutscher Markenprodukte, überfällt. Gleichwohl hat Radkau damit einen entscheidenden Wesenszug der deutschen Technik herausgearbeitet.

In seinem Buch tritt er für die »vernünftige Langsamkeit« des technischen Fortschritts ein, wodurch auch die Bedürfnisse von Mensch und Umwelt besser berücksichtigt würden. Voller Zustimmung zitiert er den britischen Historiker Arthur Shadwell, der 1908 beim Vergleich der industriellen Leistungsfähigkeit von England, Deutschland und Amerika resümierte: »Die Deutschen sind langsam, zielbewusst, sorgfältig, methodisch gründlich in ihrer Arbeit ... Sie sind kein unternehmendes und abenteuerliches Volk, ... sie brauchen Zeit zum Nachdenken

und Handeln; sie brauchen ihre Regelmäßigkeit, ihre gewohnte Umgebung, ihren vorgezeichneten Weg. Aber sie haben eine unerreichte Fähigkeit darin, den richtigen Weg herauszufinden und ihn unbeirrt zu verfolgen.« Tugenden, die man heute den Japanern, Koreanern oder Chinesen zuschreibt.

Nicht der so genannte »First Mover« setze eine neue Technologie durch; zum Sieger im Wettbewerb würden die »Fast Followers«, Unternehmen, die aus den Rückschlägen der Erstentwicklung lernen und das Produkt ohne Geburtsfehler und Kinderkrankheiten in Serie bringen. Auf diese Art ist Deutschland Exportweltmeister geworden.

Dass die heutige Krise diesen Status relativiert, konnte Radkau natürlich nicht voraussehen. Aber dass zu viel Euphorie und »Hypes« genauso wie zu starker Pessimismus (»Technikfeindlichkeit«) dem Fortschritt nicht zuträglich sind, daran lässt er keinen Zweifel. Am Beispiel der geplatzten Dotcom-Spekulationsblase vom März 2000 kritisiert er die unreflektierte Übernahme »modischer« Technologien, die von Management-Theoretikern und -Praktikern herbeigeredet und von ganzen Herden wiederholt werden. Indem er sich eine ganze Reihe berühmt-berüchtigter Konzernlenker vorknöpft, darunter die Daimler-Bosse Reuter und Schrempp, avanciert er unbeabsichtigt zum Propheten der aktuellen Finanz- und



Wirtschaftskrise. Als hätte er es geahnt, kriegen auch Spitzfindigkeiten wie »Technologiekonzern«, »globales Unternehmen« oder »Shareholder Value« ihr Fett weg.

Erstmals hatte der Autor das Ergebnis seiner langjährigen Studien 1989 unter gleichem Titel als Taschenbuch vorgelegt. Die Öffnung des Eisernen Vorhangs bescherte Radkau über Nacht ein neues Studienfeld, das der jüngsten Ausgabe zu einem zusätzlichen Kapitel »Deutsche Wege und Sackgassen in der Technikgeschichte der DDR« verholfen hat. Mit einer überwältigenden Materialfülle, zwei zusätzlichen Kapiteln, in denen der Historiker seine eigene Rolle reflektiert, sowie Register und Literaturhinweisen, die rund ein Fünftel des Bands ausmachen, ist »Technik in Deutschland« zu einem wahren Monumentalwerk herangewachsen. Obwohl der Text flüssig ist und sich spannend liest, erschlägt einen die schiere Fülle an Information.

Nach einer Einführung und einigen grundsätzlichen Dingen behandelt das zweite Kapitel die Periode vom Beginn des 18. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts. Weil Energie und Rohstoffe weit über den Bedarf hinaus zur Verfügung stehen, werden die besten Quellen genutzt, und das sind Wasser und Holz – regenerative Quellen. Deswegen bezeichnet Radkau diese Periode als »hölzernes Zeitalter«. Sie wird dann allmählich verdrängt durch »Schnellfabrikation«, die einhergeht mit »Ersparnis des Holzes und der Zeit (und der Löhne)«.

Die bisher durch die Textilbranche geprägte Industrielandschaft mit ihren Handelsunternehmen profitiert gewaltig von den 1848er Reformen in Preußen, die beispielsweise das Aktienrecht und die Eisenbahn betreffen. Zum Ende des Jahrhunderts entstehen ganz neue Branchen: Maschinenbau, Chemie und Elektrotechnik, die von Techniker-Unternehmern geleitet werden: Borsig, Siemens, Duisberg oder Bosch. Dass Deutschland in dieser Zeit den Vorsprung Englands ein- und überholt, liegt in der typisch deutschen Verquickung von Banken und Industrieunternehmen; Beispiele sind Siemens und



»Ikarus«: Gemälde von Bernhard Heisig für den 1975 eingeweihten Palast der Republik der DDR. Früher erkannte man in dem Bild einen sozialistischen Ikarus, dem es entgegen der antiken Sage gelingt, sich bei seinem Sonnen- (oder auch Sputnik-)Flug in der Luft zu halten. Mittlerweile wird er eher mit dem – von Heisig ebenfalls mehrfach gemalten – Christus am Kreuz assoziiert.

Rathenau. Die City of London interessierte sich nicht für Industrie und Technik.

Die Gründerjahre des national erstarkten Deutschlands mit seinen aufkeimenden Sicherheitsinteressen sind auch die Geburtsstunde der modernen Umweltpolitik. Die Dampfkesselüberwachungsvereine (DÜV) als Keimzellen des TÜV, Kläranlagen sowie Luft- und Wasserreinhaltung, Hygiene mit Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit sind nur einige Antworten auf das von Behörden, Ingenieuren, Verbänden und Arbeiterklasse empfundene Umweltrisiko, das mit der technischen Entwicklung einherging.

Die nächste Periode wird durch die Weltkriege dominiert. Radkau macht die Besonderheiten der Vor-, Kriegs- und Nachkriegszeiten an Phänomenen wie Massenproduktion und Technisierung in allen Bereichen des Lebens fest, nicht ohne den großen Einfluss staatlicher Interessen zu thematisieren. Besonderes Augenmerk widmet er der damals im Weltmaßstab führenden deutschen Elektro- und Chemieindustrie sowie dem Automobilbau, der anfangs gar nicht die heute gewohnte übermächtige Stellung hatte. In der neu gegründeten Bun-

desrepublik führt der Ausbau der Straßeninfrastruktur zu einem Aufschwung der Autoindustrie par excellence – Sinnbild für das technologisch untermauerte deutsche Wirtschaftswunder. Selbstverständlich unterlässt der Verfasser es nicht, über Atom- und Kernenergiepolitik sowie Aufstieg, Entwicklung, aber auch den Untergang ganzer Branchen zu schreiben.

Schließlich stellt Radkau in diesem Kapitel die Frage, wie es zur Humanisierung der Technik kommen kann. Ist sie Folge- oder Nebenprodukt des beständigen technischen Wandels oder notwendiger, radikaler Bruch mit der Hightech-Euphorie? Er sieht den Widerspruch zwischen Umweltschutz und betriebswirtschaftlicher Gewinnmaximierung, ist aber überzeugt, dass in der deutschen »Tugend der Langsamkeit« riesiges Potenzial steckt, um mit Hilfe von Politik und Öffentlichkeit diesen Widerspruch auszugleichen. Dass Deutschland auf diese Weise zum Pionier und führenden Umwelttechnikexporteur geworden ist, hätte Radkau ruhig als Argument ins Feld führen können.

»Gerade zur erfolgreichen Innovation braucht es Vorsicht und Erfahrung. Wer be-

dächtig die Mitte hält, bleibt oben, kommt voran und überlebt.« Diese These kann man teilen oder nicht, eine fulminante Hinführung zu ihr ist das Werk allemal.

Radkau verbindet Einzelpersönlichkeiten mit Gesetzen, Politik mit Bildung, Erfindungen mit Banken und Finanzierung, untersucht die (innovationsfeindliche!) Rolle von Patenten, hat ein Auge auf die Arbeiterbewegung, verknüpft Nationales mit geopolitischem Geschehen, bemüht Erfolge, Unfälle, Ereignisse aus Zeitung, Kultur, Kunst und Literatur. Das ist wahre Multidisziplinarität! Es wäre nur zu wünschen, dass Radkau uns eine weitere Fortsetzung seiner hochspannenden Techniklektüre schenkt.

Reinhard Löser

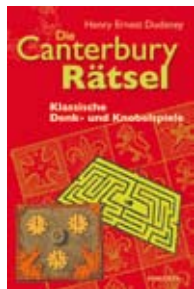
Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Ebenhausen bei München.

Joachim Radkau

Technik in Deutschland

Vom 18. Jahrhundert bis heute

Campus, Frankfurt am Main 2008.
533 Seiten, € 29,90



MATHEMATIK

Der Rätselklub als Helfer der Polizei

Diese historische Rätselsammlung verbindet auf charmante Weise harte Kopfnüsse mit gepflegter Unterhaltung.

Henry Ernest Dudeney (1857–1930) ist in der englischsprachigen Welt als Rätselerfinder bekannt und beliebt. Mit über 100 Jahren Verspätung sind seine »Canterbury Puzzles« von 1907 nun auf Deutsch erschienen. Heinrich Hemme, der Aachener Physiker und unermüdliche Rätselsammler, hat die Herausgabe übernommen.

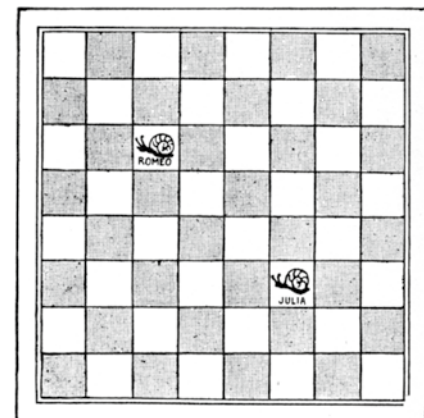
Die Rätsel sind von ganz unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad und in verschiedene Rahmenhandlungen eingebettet. Beispielsweise verkürzen sich die Pilger auf dem Weg zu dem titelgebenden Ort Canterbury die Zeit mit Rätselraten.

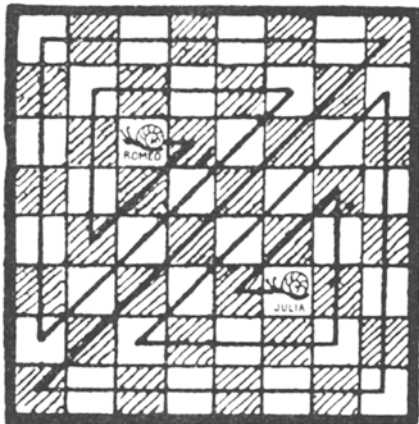
Dudeney erzählt jede der Rahmenhandlungen auf eine reizvoll altmodische Weise, die für den heutigen Leser oft schon ins Amüsante umschlagen mag. So begleiten wir etwa den beim König in Ungnade gefallenen und ins Verlies gesperrten Hofnarren auf seiner Flucht durch Labyrinth und ver-

schlossene Türen, die es zu knacken gilt. Später werden uns Einblicke in die Arbeit eines Londoner Rätselklubs gewährt, der der Polizei bei schwierigen Fällen schon einmal auf die Sprünge hilft. Aber Dudeney hält sich fern von profanem Mord und Totschlag: Beschattete Ehemänner entpuppen sich im Zuge der Aufklärung stets als vollendete Gentlemen, und kein entlarvter Übeltäter wird allzu hart bestraft. Schließlich befasst sich der Klub mit den Rätseln in erster Linie um ihrer selbst willen und weniger aus kriminalistischem Ehrgeiz.

Wie findet der Schneck Romeo zu seiner geliebten Julia, wenn er – waagrecht, senkrecht oder diagonal von Feld zu Feld kriechend – jedes Feld genau einmal besucht und dabei die geringstmögliche Anzahl an Richtungsänderungen vollzieht?

Diese Leidenschaft, der die Freude am Tüfteln über den eventuell zu erlangenden Ruhm geht, spricht auf geradezu rührende Weise aus jeder Seite des Buchs. Bis auf zwei, drei Ausnahmen sind dann auch alle Rätsel echte Rätsel und keinesfalls »kindische Idiotie«, wie Dudeney in seiner Einleitung solche Aufgaben nennt, deren Lösung keinen interessanten Gedanken beinhaltet. Im Gegenteil, Dudeney sieht sich einer Rätselkultur verpflichtet, bei der inhaltlicher Tiefgang das entscheidende Kriterium ist, so dass der Leser über das unmittelbare Vergnügen hinaus noch etwas mitnimmt.





Die Lösung dieses recht schwierigen Rätsels benötigt 14 Richtungswechsel und ist bis auf eine Spiegelung eindeutig.

Tatsächlich wird ein Mathematiker in manchen Rätseln einfache, aber wichtige Prinzipien aus Graphen- und Zahlentheorie wiedererkennen. Das Buch kommt ganz ohne die mathematische Fachsprache aus – Dudeney selbst besuchte niemals eine Universität, sondern war seit seinem 13. Lebensjahr im öffentlichen Dienst beschäftigt. Doch die große Mehrheit der Rätsel ist mathematischer Natur. Viele befassen sich mit Zahlenspielen, Wiegeproblemen oder der Geometrie, wie das berühmte Problem des Kurzwarenhändlers: Man zerschneide ein dreieckiges Tuch mit gleichlangen Seiten in vier Teile und ordne diese Teile so um, dass sich ein Quadrat ergibt. Dieses Rätsel stell-

te Dudeney seinerzeit sogar feierlich der Royal Society.

Sehr empfehlenswert für alle, die Spaß an mathematischen Knobelien und ein Faible für die feine englische Art haben.

Annika Günther

Die Rezensentin ist promovierte Mathematikerin und wissenschaftliche Angestellte an der RWTH Aachen.

Henry Ernest Dudeney

Die Canterbury Rätsel

Klassische Denk- und Knobelspiele

Aus dem Englischen von Jens Knipp.

Anaconda, Köln 2009. 287 Seiten, € 7,95



RELIGION

Die Idee von Gott als Kulturleistung

Aus aktuellem Anlass greift der Philosoph Daniel Dennett eine skeptische Grundidee der Aufklärung wieder auf.

Viele Menschen sind religiös, und viele Menschen haben beruflich mit Naturwissenschaft zu tun. Da bleibt es schon aus statistischen Gründen nicht aus, dass es viele Wissenschaftler gibt, die religiös sind. Die Frage ist, wie beides sich verträgt.

Eine verbreitete Antwort beruft sich darauf, dass die Wissenschaft vieles erklären kann, sogar immer mehr, aber niemals alles. Es gibt nun einmal Bereiche, die sich empirischem Faktensammeln und logischem Schließen entziehen, und dafür fühlt sich traditionell die Religion zuständig. Insbesondere sind moralische Werturteile nicht einfach aus bloßen Fakten abzuleiten. Allein aus der Tatsache, dass in einer Löwenherde das männliche Oberhaupt seine Machtstellung einschließlich des sexuellen Verfügungsrechts über alle weiblichen Mitglieder durch Gewaltanwendung oder Drohung mit derselben aufrechterhält, folgt noch nicht, dass ich diese natürliche Ordnung der Dinge in meiner eigenen Umgebung praktizieren soll.

Solche Fehlschlüsse vom Sein zum Sollen hat der schottische Philosoph David Hume (1711–1776) schon im 18. Jahrhundert kritisiert – doch von der Vorstellung, das Sollen werde dem Menschen durch übernatürliche Offenbarung mitgeteilt, hielt dieser skeptische Aufklärer noch viel weniger. Humes »Dialoge über natürliche Religion« waren für

damalige Verhältnisse so gewagt, dass er sie zu Lebzeiten nicht publizierte, und die katholische Kirche setzte die postume Schrift auch prompt auf den Index der verbotenen Bücher.

Humes Sakrileg bestand darin, dass er religiöse Phänomene nicht als übernatürliche Erscheinungen betrachtete, sondern als etwas ganz Natürliches. Er fragte: Was bringt Menschen eigentlich auf die Idee, es gebe einen Schöpfer der Welt, der Gebete erhört, Wunder wirkt und Gebote offenbart? Und: Brauchen wir Religion, damit wir uns moralisch verhalten?

Diese Fragen stellt nun der US-amerikanische Philosoph Daniel Dennett erneut. Aktuellen Anlass bieten ihm die Attacken religiöser Gruppen gegen ihnen nicht genehme naturwissenschaftliche Resultate, insbesondere der Schulkampf von Anhängern des »Intelligent Design« gegen die Evolutionslehre. Aber Dennetts breit angelegte Untersuchung kann auch uns tolerante Europäer interessieren, die in der Religion des christlichen Abendlands kaum mehr

den Gegner von Vernunft und Wissenschaft erblicken, sondern vielmehr einen Ursprung moralischer Gebote und herrlicher Kathedralen.

Dennett legt keine antireligiöse Streitschrift vor wie die Briten Richard Dawkins (»Der Gotteswahn«, siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 118) und Christopher Hitchens (»Der Herr ist kein Hirte«). Er sucht den Dialog und präsentiert zu diesem Zweck Argumente, die jeder, ob religiös oder nicht, nachvollziehen kann. Eigentlich betreibt er das Handwerk eines vergleichenden Religionswissenschaftlers, angereichert um einen evolutionären Blick auf Kulturphänomene. Da Menschen von Anfang an in Gruppen (über-)lebten, waren sie auf Kooperation angewiesen. Andererseits ist jeder von Natur aus sich selbst der Nächste; darum braucht die Gruppe, um zu bestehen, starke Gründe für ihren Zusammenhalt. Wer nicht kooperiert, muss bestraft werden, Altruismus wird belohnt – auch wenn keiner zusieht? Allwissende Augen, selbst unsichtbar, die imaginär Strafe und Belohnung verteilen, garantieren stabile Gruppen.

Solche natürlichen Erklärungen für Gottesvorstellungen sind plausibel und müssen Gläubige nicht vor den Kopf stoßen. Denn die können achselzuckend sagen: Das mag so sein, aber ich glaube dennoch an einen Gott, der das Zusammenleben der Menschen entsprechend eingerichtet hat. Darauf würde Dennett – wie vor ihm Hume – erwidern: Das kannst du halten, wie du willst, aber frage dich, wozu dein Gott nötig ist. Was erklärt er?

So ist das ganze Buch gebaut. Dennett behandelt ein religiöses Argument nach dem anderen und verschmälert die Basis

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

des Glaubens, bis nur noch ein Gott übrig bleibt, der sich restlos natürlich erklären lässt. Das wäre allerdings, wenn es ihn dennoch gäbe, ein recht perfider Gott, der sich in der Natur versteckt, um den Menschen die größtmögliche Anstrengung abzuverlangen – einen wirklich reinen Glauben, für den kein vernünftiger Grund spricht. Gegen einen solchen Glauben um jeden Preis gibt es freilich auch kein vernünftiges Argument mehr.

Dennetts Schrift ist stets anregend und unterhaltsam, oft sehr erhellend, gelegentlich weitschweifig, aber er arbeitet niemals mit unsauberen Tricks. Die verwundbarste Stelle seines langen Arguments für eine

evolutionäre Religionstheorie ist wohl, dass Dennett den von Richard Dawkins geprägten Begriff des Mems aufgreift, um damit die ideelle Widerstandsfähigkeit von Religionen zu erklären. Das Mem als kulturelles Analogon zum biologischen Gen mag für naturwissenschaftlich Geschulte ein passables Sprungbrett ins Reich der Ideen und Ideologien sein. Es erfordert aber viel Überzeugungsarbeit – die Dennett in einem langen Anhang fleißig zu leisten versucht –, den Verdacht auszusräumen, das Mem sei mehr, nämlich eine biologistische Theorie der Kultur.

Ob Religion nun ein Mem ist oder nicht: Dennett beschreibt überzeugend, wie die

Gottesidee als dem Menschen nützliche Kulturleistung entstand, sich verselbstständigte, sich dogmatisch gegen Kritik panzerterte und nun auf unserer modernen Kultur aufsitzt wie ein Schmuck – oder ein Alb.

Michael Springer

Der Rezensent ist ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Daniel C. Dennett

Den Bann brechen

Religion als natürliches Phänomen

Aus dem Amerikanischen von Frank Born. Verlag der Weltreligionen im Insel Verlag, Frankfurt am Main 2008. 531 Seiten, € 28,80

MATHEMATIK

Ein folgenreicher Briefwechsel

Keith Devlin rollt die Geschichte der Wahrscheinlichkeitstheorie an einer Korrespondenz aus dem 17. Jahrhundert auf.



Am 24. August 1654 schrieb Blaise Pascal (1623–1662) an Pierre de Fermat (1607–1665) einen Brief zu der Frage, wie die Spieleinsätze eines Würfelspiels zu verteilen sind, wenn dieses vorzeitig abgebrochen wird. Dieses Schreiben gilt als die Geburtsstunde der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Der Schriftverkehr der beiden französischen Mathematiker aus dem Sommer 1654, der leider nicht vollständig erhalten geblieben ist, bildet auch den Rahmen für die vorliegende historische Darstellung durch den britischen Mathematiker und Wissenschaftsjournalisten Keith Devlin.

Das Glücksspiel bewegt die Menschen schon seit Jahrtausenden. Bereits 550 v. Chr. finden sich erste Darstellungen auf griechischen Vasen. Aber die Erfassung von Häufigkeiten der einzelnen Wurfresultate gelang den ansonsten so gebildeten Griechen nicht. Ausgerechnet ein Bischof, Wibold von Cambrai, legt im ausgehenden 1. Jahrtausend die ersten heute noch bekannten Untersuchungen zu diesem Thema vor. In der weiteren Entwicklung beginnt man sich dann auch mit Kartenspielen auseinanderzusetzen. Luca Pacioli (1445–1514) formuliert erstmals schriftlich das Problem, das Pascal und Fermat 160 Jahre später in ihren Briefen angehen und lösen.

Girolamo Cardano (1501–1576) notiert in seinem »Buch vom Würfelspiel« (»Liber

de ludo aleae«) die Gesetze zur Addition von Wahrscheinlichkeiten (für einander ausschließende Ereignisse) und zu deren Multiplikation (für voneinander unabhängige Ereignisse). Galileo Galilei (1564–1642) weist erstmals in empirischen Untersuchungen nach, dass verschiedene Augensummen unterschiedlich häufig vorkommen – die Neun zum Beispiel häufiger als die Zehn.

Für das Problem mit dem vorzeitig abgebrochenen Würfelspiel – jedes Buchkapitel greift einen Teil des genannten Briefwechsels auf – muss man in die Zählung der möglichen Ausgänge auch jene Runden einbeziehen, die man beim echten Spiel nicht mehr spielen würde, weil das Endergebnis bereits feststeht. Nur dann kann man die Gesamtereignismenge und damit auch die Wahrscheinlichkeiten aller Spielausgänge korrekt erfassen. Dieser Argumentation konnten nicht alle Zeitgenossen folgen. Am Ende hatte Fermat die elegantere Lösung gefunden, während Pascals Werk eine größere Allgemeinheit für sich in Anspruch nehmen kann.

Angenehm entspinnen sich die Gedankenspiele der Protagonisten vor dem Hintergrund ihrer geschilderten Biografien. So erfahren wir, dass Pascal sich auch mit Physik befasste und unter anderem zu dem (korrekten) Schluss kam, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe absinkt – bis zum Vakuum. Hierüber geriet er mit René Descartes in

Dissens. Gegen Ende seines Lebens widmet er sich religiösen Themen, während Cardano mit seinen Überlegungen zum Würfelspiel schlicht seine Gewinnchancen und damit seine Einkünfte verbessern wollte.

In weiteren, meist biografisch unterlegten Abschnitten schildert Devlin Anwendung und Weiterentwicklung der Ideen Pascals und Fermats. So entwickelte John Graunt (1620–1674) mit der Schaffung von Sterbetafeln und deren Auswertung die Basis der Versicherungsmathematik. Die Familie Bernoulli und ihre Beiträge finden sich gleich in zwei Kapiteln, und die Glockenkurve von Carl Friedrich Gauß (1777–1855) darf natürlich nicht fehlen. Der Pfarrer Thomas Bayes (um 1702–1761) fand Sätze zu bedingten Wahrscheinlichkeiten; und wenn die amerikanischen Sicherheitsbehörden die Ergebnisse eines Programms, das die bayessche Analyse anwandte, für voll genommen hätten, dann hätten sie vielleicht die Anschläge vom 11. September 2001 verhindern können – so der Autor.

Keith Devlin gelingt es, der häufig ungeliebten Mathematik neben einem historischen Rahmen auch ein »Gesicht« zu geben. Ein von der ersten bis zur letzten Seite spannendes und angenehm zu lesendes Werk, das jedem zum Lesen empfohlen sei.

Swen Neumann

Der Rezensent ist freier Publizist in Bremen.

Keith Devlin

Pascal, Fermat und die Berechnung des Glücks

Eine Reise in die Geschichte der Mathematik

Aus dem Englischen von Enrico Heinemann. C.H.Beck, München 2009. 204 Seiten, € 17,90



MARION KÄLKE

»Biostatistik ist mehr als ein Spiel mit Zahlen«

Mathematik, Medizin, Musik, Film und Theater – Burkhard Haastert ist ein vielseitiger Mensch. Seine Interessen haben ihm die Entscheidung über seinen Berufsweg nicht immer leicht gemacht. Nach einer Pilgerreise auf dem Jakobsweg tat er vor wenigen Jahren den kühnsten Schritt: Er gab seine feste Stelle am Deutschen Diabetes-Zentrum auf und bringt jetzt im Kundenauftrag Ordnung ins Dickicht medizinischer und gesundheitsökonomischer Daten.

Burkhard Haastert studierte Mathematik in Freiburg und Bonn und promovierte in Hamburg. Sein Schwerpunkt war die Algebra. Der reinen Mathematik blieb er auch danach noch als wissenschaftlicher Assistent in Hamburg und Basel treu. Am Institut für Statistik in der Medizin der Universität Düsseldorf wandte er sich dann der angewandten Mathematik zu. Anschließend arbeitete er 15 Jahre lang am Institut für Biometrie und Epidemiologie im Deutschen Diabetes-Zentrum in Düsseldorf (Leibniz-Zentrum für Diabetes-Forschung). 2005 gründete er seine Firma mediStatistica, die er zunächst nebenberuflich führte. Seit 2007 lebt und arbeitet er als selbstständiger Unternehmer in einem Dorf bei Neuenrade im Sauerland. mediStatistica bietet Wissenschaftlern, Unternehmen, Versicherungen und Verbänden des Gesundheitswesens statistische Unterstützung bei der Analyse medizinischer und pharmazeutischer Daten an. Haastert bildet zudem Studenten oder andere Interessierte in der Biostatistik aus. In seiner Freizeit macht er gern Jazzmusik und interessiert sich für Film und Theater.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Dr. Haastert, Sie haben Kurzfilme gedreht und Theaterstücke inszeniert, und Sie spielen Posaune in einer Big Band. Wie passt die Mathematik in dieses Bild?

Dr. Burkhard Haastert: Mathematik ist für mich das Spiel der Gedanken, da geht es um abstrakte Strukturen. Als Regisseur habe ich zusammen mit den Darstellern Strukturen aus Textvorlagen in ein Spiel zwischen Menschen übertragen. Und die Jazzmusik ist das Spiel der Töne und Gefühle um vorgegebene Harmoniestrukturen herum.

Spektrum: Seit einigen Jahren befassen Sie sich mit Biostatistik. Was versteht man darunter?

Haastert: Ich beschäftige mich häufig mit epidemiologischen Studien, werte also Faktoren aus, die für Gesundheit, Krankheit und Therapie in der Bevölkerung entscheidend sind. So habe ich 1990 in Düsseldorf am Institut für Statistik in der Medizin die Lebensdauer von neuartigen Klebebrücken der Zahnmedizin ermittelt. Am Deutschen Diabetes-Zentrum war ich unter anderem an der ersten KORA-Studie beteiligt, bei der es darum ging, zu erfassen, wie häufig Diabetes Typ II in der älteren Bevölkerung im Augsburger Raum auftritt.

Spektrum: Nur der Mediziner kann wissen, welche Daten relevant sein können, nur der Statistiker kann sie methodisch sauber auswerten. Klappt da immer die Verständigung?

Haastert: In der klassischen Humanmedizin gibt es die Biostatistik schon seit den 1970er Jahren. Daher habe ich meist mit Wissenschaftlern zu tun, die verstehen, wie komplex statistische Methoden sein müssen, um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen. Gemeinsam diskutieren wir dann, was sich aus den Daten schließen lässt und was nicht.

Spektrum: Woher rührt überhaupt Ihr Interesse an der Medizin?

Haastert: Mein Vater ist Internist und hat vieles aus der Praxis in die Familie hineingetragen. Mich haben diese Gespräche so beeindruckt, dass ich fast in seine Fußstapfen getreten wäre. Aber die Aussicht auf das arbeitsintensive Auswendiglernen schreckte mich ab, und so fiel die Entscheidung für die Mathematik, die mich schon in der Schule am meisten faszinierte. Am Ende habe ich über die Biostatistik doch noch zur Medizin gefunden. Das Gespräch mit Ärzten, das Interdisziplinäre, die Möglichkeit, in andere Fachgebiete hineinzuschauen, sind für mich starke Reize.



BURKHARD HAASPERT

Klarheit über seine Lebensziele suchte Burkhard Haaspert auf dem Jakobsweg. Durchblick im Dickicht medizinisch relevanter Daten verschafft er seitdem mit seiner Firma mediStatistica Kunden wie MBR Optical Systems. Ihr Produkt haemospect nutzt mathematische Verfahren, um aus der Absorption und Reflexion von Licht, das auf die Haut fällt, den Hämoglobingehalt des Bluts zu messen – ohne eine Tropfen Blut zu entnehmen.



MBR OPTICAL SYSTEMS, WUPPERTAL

Spektrum: Haben Sie sich deshalb von der reinen Mathematik verabschiedet?

Haaspert: Nicht allein, ich bin auch Realist. An der Universität schlugen sich Mathematiker meist mit Assistentenstellen oder Stipendien durch. Als sich für mich keine gute Perspektive abzeichnete, habe ich einen anderen Weg gewählt.

Spektrum: Vermissen Sie nicht die schöngeistige reine Mathematik?

Haaspert: Das war eine ideale und ästhetische Welt, in der es um Wahrheiten geht. In der Realität der Biostatistik ist selbst ein signifikantes Ergebnis nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit richtig. Dafür aber gewinne ich Lebensnähe, erhalte einen Einblick in gesellschaftliche Vorgänge und die Gesundheitspolitik.

Spektrum: Doch wohnen zwei Seelen in Ihrer Brust, denn zu Gunsten von Kamera und Bühne hatten Sie Ihre Tätigkeit am Deutschen Diabetes-Zentrum eine Zeit lang auf eine halbe Stelle reduziert.

Haaspert: Ein Intermezzo, als Statist und Regisseur verdiente ich einfach nicht genug. Seitdem widme ich mich wieder mehr der Musik – in meiner Freizeit.

Spektrum: Was hat Sie bewogen, einen sicheren Posten nach 15 Jahren gegen das Wagnis der Selbstständigkeit einzutauschen?

Haaspert: Die Stelle gefiel mir sehr, bot mir aber nicht mehr viele Entwicklungsmöglichkeiten. Um Abstand zu bekommen, bin ich den Jakobsweg gegangen. Das war ein sehr intensives Erlebnis. Ich habe ein Jahr gebraucht, um es aufzuarbeiten, und dann wusste ich, dass ich in meinem Leben durch eine Selbstständigkeit am meisten bewegen könnte.

Spektrum: Wie haben Sie diesen Schritt vorbereitet?

Haaspert: Praktischen Rat holte ich mir beim Amt für Wirtschaftsförderung in Düsseldorf und von einer Unternehmensberaterin; die Leibniz-Gemeinschaft hat mich mit ihrem Programm für Gründer, Leibniz X, unterstützt. Glücklicherweise brauchte ich nicht viel Startkapital – ein Notebook und die notwendige Software haben als Investition gereicht.

Spektrum: Worin unterscheidet sich Ihre heutige Tätigkeit von der am Diabetes-Zentrum?

Haaspert: Auch dort verstand ich mich als Dienstleister und war auf Anwendungen konzentriert. Schöner ist jetzt allerdings, dass ich mir neue Forschungsfelder erschließen kann. Ich verfolge zahnmedizinische Projekte, beschäftige mich mit HIV und Aids, habe Aufträge auf dem Gebiet der Altenpflege.

Spektrum: Wie setzen Sie sich auf dem Markt durch?

Haaspert: Inzwischen habe ich mir ein solides Kundennetzwerk aufgebaut. In meiner Branche halten die Beziehungen lange: Wenn man einmal gut zusammengearbeitet hat, kommen die Kunden wieder. Und ich führe mit Forschergruppen vor allem epidemiologische Projekte durch, die drittmittelgefördert sind. Damit stoße ich auf große Nachfrage.

Spektrum: Geht es heute im Gesundheitswesen nicht oft primär ums Geld?

Haaspert: Ich mache auch Analysen zu finanziellen Aspekten, und da ist immer die Frage, wie viel Gesundheit wir uns leisten können. Eine Diskussion auf der Basis objektiver Daten ist von Vorteil.

Spektrum: Sehen Sie sich in fünf Jahren immer noch als Einzelkämpfer?

Haaspert: Ich mag die Einsamkeit. Früher war ich sie gewohnt, als ich über Dinge nachdachte, die weltweit höchstens 50 Menschen verstanden. Aber ich würde meine Erfahrungen gerne an jüngere Kollegen weitergeben, neue Impulse und Ideen gemeinsam mit anderen aufgreifen. ◀

Das Gespräch führte **Marion Kälke**, Wissenschaftsjournalistin in Düsseldorf.

JUNIOR RESEARCH PROFESSORSHIP IN MOLECULAR NEUROBIOLOGY AT THE SCUOLA NORMALE SUPERIORE, PISA (ITALY)



The Scuola Normale Superiore of Pisa (SNS), Italy, invites applications for a renewable three-year position from scientists with at least two years of post-doctoral experience in the field of Molecular Neurobiology.



Depending on the experience of the candidate, the salary will be in the range between 40.000 and 46.000 EU/year. Research funds will be available following the procedures of the SNS.



Interested applicants should submit CV, a research project and the indication of three referees to the Director of the SNS. **Application deadline is January 29, 2010.**

More details about the position and submission details can be found at

<http://jobopportunities.sns.it/biology>

All inquiries can be addressed to biology@sns.it



SCUOLA
NORMALE
SUPERIORE
PISA

Scuola Normale Superiore is characterized by a unique mixture of research and education. Faculty of Sciences offers classes in Physics, Chemistry, Biology, Mathematics and Information Sciences.

www.sns.it



**The best career
is a Dutch career!**

The best of the best? Follow your dream and become a **research fellow** at the Radboud University Nijmegen Medical Centre in the Netherlands. www.umcn.nl/fellows

Radboud University Nijmegen



Medical Centre

Spanish National Cancer Research Centre (CNIO)

Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas

Melchor Fernández Almagro, 3, 28029 Madrid, Spain



"la Caixa" | CNIO INTERNATIONAL PhD PROGRAMME in Madrid



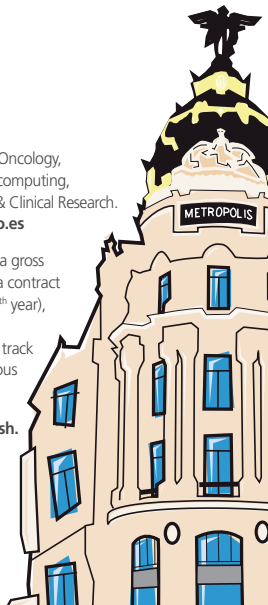
Participating research programmes: Molecular Oncology, Cancer Cell Biology, Structural Biology and Biocomputing, Molecular Pathology, Human Cancer Genetics & Clinical Research.
For details on research at the CNIO: www.cnio.es

Ten four year fellowships will be available with a gross annual stipend of € 18,069 (first 2 years) and a contract with a gross annual salary of € 26,700 (3rd & 4th year), plus € 6,400 for tuition fees/travel.
Candidates should have an excellent academic track record, a solid knowledge of English and previous research experience.

The working language at the CNIO is English.

For full information and to apply:
www.cnio.es/PhD

Application deadline:
15th March 2010



CNIO-CAJA NAVARRA

INTERNATIONAL POSTDOCTORAL PROGRAMME IN MADRID

Call closes
31st December
2009

✱✱ a project
chosen by
our clients ✱✱
Can

Highly motivated individuals are encouraged to apply for the following of CNIO's research programmes:

Molecular Oncology, Cancer Cell Biology, Structural Biology and Biocomputing, Molecular Pathology, Human Cancer Genetics and Clinical Research.

For details on research at the CNIO: www.cnio.es

We seek:

- Exceptional researchers with a PhD or MD degree obtained no more than 3 years prior to the deadline. Candidates may also apply if they will obtain their degree before May 2010.
- Candidates must have at least one first author publication (including joint authorship) in a high impact factor journal at the time of application.

The CNIO offers:

- An excellent and stimulating working environment with a multidisciplinary approach to cancer research.
- State-of-the-art equipment and core facilities.
- A competitive salary of € 32,000 to € 36,000 (gross) per year, depending on experience.

For further information and to apply:
www.cnio.es/postdoc



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

naturejobs

Spektrum der Wissenschaft and *Naturejobs* have joined forces. Now, with *Naturejobs*, you can place your jobs, courses, announcements and events in *Spektrum* as well as *Nature*, extending your reach among scientists, academics and students in Germany, Austria and Switzerland.

For more information, please contact *Naturejobs*:

Hildi Rowland

T: +44 (0)20 7014 4084

E: h.rowland@nature.com

Kerstin Vincze

T: +44 (0)20 7843 4970

E: k.vincze@nature.com

www.naturejobs.com

nature publishing group

Schwarze Sterne

Entgegen klassischer Vorstellung könnten bestimmte Quanteneffekte die Geburt Schwarzer Löcher verhindern. Stattdessen würden dann so genannte Schwarze Sterne entstehen

ESA, NASA UND FELIX MIRABEL (THE FRENCH ATOMIC ENERGY COMMISSION & THE INSTITUTE FOR ASTRONOMY AND SPACE PHYSICS/CONICET OF ARGENTINA)

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Haben schöne Eltern mehr Töchter?

Sex sells, auch in den Sozialwissenschaften. Dabei ignorieren Forscher wie Medien oft die Grundregeln der Statistik

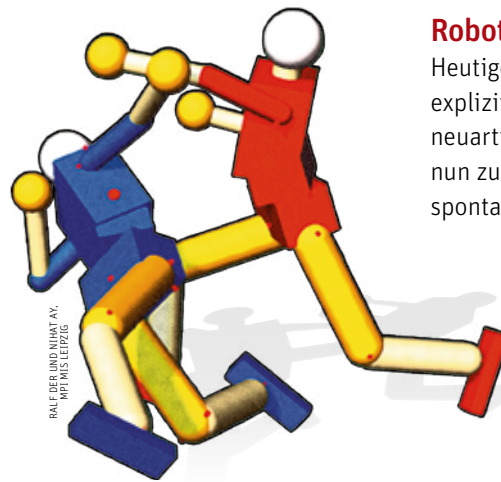
Neues aus Altamerika

Dichter Urwald, vereinzelt Dörfer: Dieses Bild galt für das Amazonien vor Kolumbus als ausgemacht. Falsch, sagen Archäologen heute

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



Roboter mit Eigenleben

Heutige Roboter tun nur, wozu sie explizit programmiert wurden. Ein neuartiger Ansatz verhilft Kunstwesen nun zu autonomem Verhalten – spontane Ringkämpfe eingeschlossen

AMY GLIP

Verstärker für Impfstoffe

Im Zusammenhang mit der Impfung gegen die Schweinegrippe sind Wirkverstärker ins Zwielficht geraten. Zu Unrecht, zumal sie neuartige Vakzine überhaupt erst ermöglichen werden

