

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

- ▶ Bodenverdichtung bedroht Landwirtschaft
- ▶ Quo vadis, Internet?
- ▶ Minibeschleuniger für den Labortisch
- ▶ ESSAY: Schönheit der Naturgesetze

www.spektrum.de

GEOLOGIE

Super-Vulkane

Sie brechen nur selten aus, könnten aber halb Nordamerika verwüsten

ASTRONOMIE

Großteleskope der nächsten Generation

PARKINSON

Neue Therapien gegen die Schüttellähmung?

TERRORISMUS

Sicherheit vor Nukleardiebstählen?

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,-€





Reinhard Breuer
Chefredakteur

Risiken am Rande der Wahrnehmung

Liebe Spektrum-Leser,

Seit Monaten qualmt und spuckt der Vulkan Merapi auf Java. Zahllose Aschewolken und Lavaströme speit er aus, und das noch stärker seit dem schweren Erdbeben von Yogyakarta Ende Mai. Die Vulkanologen rechnen damit, dass der Lavadom im Zentrum des Kraters jederzeit explodieren könnte.

Doch trotz aller Drangsal für die Bewohner der Region sind solche Ereignisse beinahe vernachlässigbar klein, gemessen an den großen und größten vulkanischen Eruptionen der Erdgeschichte. Während etwa der Mount St. Helens im Westen der USA vor 26 Jahren immerhin einen halben Kubikkilometer an Material ausschleuderte, wurden beim Ausbruch des Tambora in Indonesien im Jahr 1815 – der größten bekannten Vulkaneruption der Neuzeit – schätzungsweise rund 100 Kubikkilometer Material ausgestoßen.

Praktisch unbekannt ist, dass die wirklich großen Eruptionen der Erdgeschichte selbst den Tambora-Ausbruch nochmals um das Zehnfache übertroffen haben, mit katastrophalen Folgen nicht nur für halbe Kontinente, sondern auch für das Klima.

Zum Glück passiert das höchstens alle paar hunderttausend Jahre. Betroffen war bislang offenbar vor allem Nordamerika. Vor über 600000 Jahren brach zuletzt im Gebiet des heutigen Yellowstone-Nationalparks ein solcher »Supervulkan« aus, was das Land über tausende Kilometer im Umkreis verwüstete. In Nordamerika herrschte seither relative Ruhe – doch das muss nicht viel heißen. Die Erde lebt (S. 38).

Mit dem Gezerre um Irans vermutete Anstrengungen, eine eigene Atombombe zu bauen, wird leicht übersehen, dass Experten Nordkoreas Nukleartechnik als deutlich weiter fortgeschritten einstufen. Doch die Verhandlungen mit dem spätkommunistischen Staat stagnieren. Noch weiter nach hinten auf der Liste der Weltbedrohungen scheint in letzter Zeit auch die Gefahr des Nuklearterrorismus gerutscht zu sein.

Zu Unrecht: Weltweit lagern nach Expertenschätzungen 1850 Tonnen hoch angereichertes Uran in militärischen genauso wie in zivilen Kernreaktoranlagen. Sie sind zum Teil unzureichend vor Diebstahl geschützt. Welche Maßnahmen ergriffen werden, um diese Reaktoren auf niedrig angereichertes Uran umzustellen, schildern Alexander Glaser und Frank N. von Hippel von der Universität Princeton. Die beiden sind Physiker und bestens mit der Umrüstungstechnologie sowie den Problemen nuklearer Nichtverbreitung vertraut (S. 68).

Ausgezeichnet fand die »European Mathematical Society« den Beitrag von Thomas Bruss »Die Kunst der richtigen Entscheidung«, der vor gut einem Jahr bei Spektrum erschien (6/2005, S. 78). Der deutsche Mathematiker von der Universität in Brüssel erklärte darin, wie man trotz üblicher unvollständiger Information Fehlentscheidungen minimieren kann. Etwas, das sich wohl jeder – auch für seinen Alltag – wünscht. Bruss erhielt dafür den 1. Preis im Internationalen Wettbewerb »Raising Public Awareness of Mathematics«.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



JEAN-JOTTARD

▲ Preiswürdig: Der Mathematiker Thomas Bruss arbeitet über die Kunst der richtigen Entscheidung.

SPKTRGRAMM

12 In Abstoßung vereint · Riesenwolke im All · Goldener Käfig für Metalle · Hitzerekord am Meeresboden u. a.

15 Bild des Monats
Fledermaus mit Esskultur

FORSCHUNG AKTUELL

16 Formationstanz der Kreisel
Simulation von Strömen aus Elektronen mit gleicher Spinrichtung

20 Einblick ins Postamt der Zelle
Wie Proteine nach »Postleitzahlen« sortiert werden

22 Sozial motivierte Einseitigkeit 
Wieso sind die meisten Menschen Rechtshänder?

24 Die Mischung macht's 
Selbst harmlose Stoffe können in Kombination gefährlich werden

25 Strahlendes Kochsalz 
Stoßwellen bringen Salzkristalle zur Emission kohärenter Strahlung

THEMEN

▶ **28** ASTRONOMIE
Großteleskope der Zukunft

▶ **38** TITELTHEMA GEOLOGIE
Supervulkane könnten halb Nordamerika verwüsten

▶ **46** SCHÜTTELLÄHMUNG
Was in Nervenzellen bei Parkinson schief läuft

▶ **56** TEILCHENPHYSIK
Beschleuniger für den Labortisch

▶ **68** NUKLEARERRORISMUS
Maßnahmen gegen eine absehbare Gefährdung 

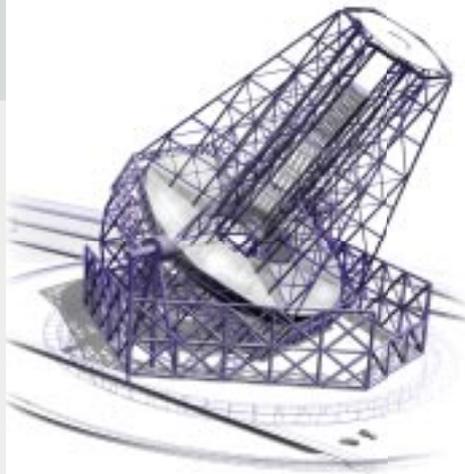
▶ **80** BODENVERDICHUNG
Sorge um das Ackerland 

▶ **90** INTERNET
Ist das Netz fit für die Zukunft?

94 COMPUTERBILDER
Kunst aus iterierten Funktionen

▶ **110** ESSAY
Von der Schönheit der Naturgesetze

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit  markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio



SEITE 28

ASTRONOMIE

Zukünftige Teleskopgiganten

Mit Geräten, die bis zu zehnmal so groß sind wie existierende Fernrohre, wollen Astronomen erdähnliche Planeten und die ersten Sterne im Universum beobachten. Die Technik dafür existiert bereits



SEITE 46

PARKINSONKRANKHEIT

Zermürendes Zittern

Zentral für das Entstehen der Schüttellähmung scheinen nach neueren Erkenntnissen Fehler bei der Faltung und der Abfallbeseitigung von Proteinen zu sein. Forscher sehen hier Ansatzpunkte für künftige Therapeutika

SEITE 56

PHYSIK

Teilchenbeschleuniger der übernächsten Generation?

Die Beschleuniger der Zukunft könnten wieder in ein normales Labor passen. Der Trick: Partikel werden mit Laserstrahlen durch ein Plasma getrieben



SEITE 68

NUKLEARERRORISMUS

Eine vermeidbare Bedrohung?

Wenn hoch angereichertes Uran aus Forschungsreaktoren in falsche Hände gerät, könnten die Folgen unabsehbar sein. Zahlreiche Initiativen versuchen derzeit, diese Gefahr zu bannen

SEITE 80

BODENFORSCHUNG

Schwerlast auf dem Acker

Die Qualität der besten Böden sinkt dramatisch. Die zu schweren Landmaschinen haben sie Besorgnis erregend verdichtet – ein auch ökologisch einschneidender Prozess, den es dringend aufzuhalten gilt



KOMMENTAR

- 27 **Springers Einwürfe**
Hat außer mir noch jemand Geist?

WISSENSCHAFT IM ...

- 54 **Alltag:** Geruchskiller Deodorant
67 **Rückblick:** Der Dreh des Pluto · Cooler OP
Tuberkulose durch Lesen? · Hygienische
Totenbeschau u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

- 76 **Weltmeisterschaft im Roboterfußball**

REZENSIONEN

- 100 **Wunder Mensch** von Alexander Tsiaras
Heillose Medizin von Jörg Blech
The New Physics von Gordon Fraser (Hg.)
Warum Frauen schneller frieren
von Martin Borré und Thomas Reintjes
Wir Wettermacher
von Tim Flannery
Der Nobelpreis
von Andreas Eschbach

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

- 107 **Spiele mit Widerständen**

WEITERE RUBRIKEN

- 5 **Editorial**
10 **Leserbriefe/Impressum**
106 **Preisrätsel**
114 **Vorschau**

TITELTHEMA GEOLOGIE

SEITE 38

Supervulkane

Ihr Ausbruch hätte apokalyptische Dimensionen: Ganze Länder würden meterhoch unter Asche begraben, und weltweit gäbe es einen Temperatursturz um bis zu 15 Grad. Jüngste Untersuchungen vermitteln tiefere Einsichten in Ursachen und Folgen dieser zum Glück sehr seltenen Ereignisse

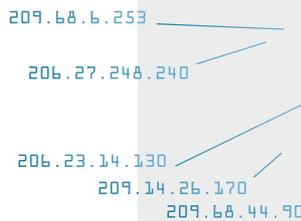
SEITE 90

KOMMUNIKATION

Die Zukunft des Internets

Vor dem Internet sind alle Daten gleich, egal ob E-Mails, Sensordaten oder Telefongespräche. Die wachsende Flut der Übertragungen soll das Internet der zweiten Generation bewältigen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



SEITE 94

COMPUTERBILDER

Bildgewordene Formeln

Mit Verfahren ähnlich wie bei Fraktalen erzeugt der Hobbyprogrammierer Edgar Fahrenkopf raffinierte Kunstwerke



TITELBILD



Bei der Eruption eines Supervulkans steigen am Rand eines gigantischen Einbruchkessels Aschesäulen bis zu 50 Kilometer hoch in den Himmel

BBC



◀ PSYCHEDELISCHER FILM

Kunstwerke aus iterierten Abbildungen – bewegt

Dreht man ganz langsam an einem der Knöpfe der Bilderzeugungsmaschine von Edgar Fahrenkopf (S. 94), so ändert sich ebenso allmählich das Bild. Lassen Sie Ihre Gedanken schweifen, während in dem abstrakten Film Blasen aus geheimnisvoller Substanz hervorquellen und vergehen

www.spektrum.de/fahrenkopf

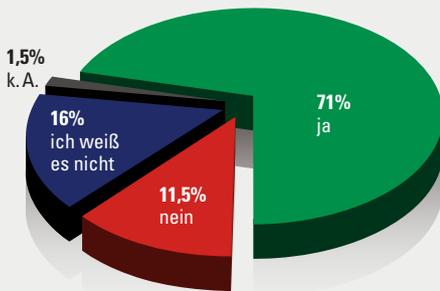
▶ WISSENSCHAFT IN DIE SCHULEN

Lehrmaterial zum Thema Parkinson (S. 46)

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu wissenschaftlicher Beschäftigung geben? Im Rahmen der Aktion »Wissenschaft in die Schulen!« ist didaktisches Material zum Problem der Parkinsonkrankheit abrufbar unter



www.wissenschaft-schulen.de



◀ LESERMEINUNG

Sterben in Würde

In der letzten Ausgabe fragten wir nach Ihrer Meinung zur Sterbehilfe und speziell zum ärztlich assistierten Suizid nach dem Modell von Oregon. Stand bis zur Drucklegung des Heftes: 45 Prozent befürworten das Modell. Gut 70 Prozent würden diese Form der Sterbehilfe persönlich in Anspruch nehmen (Grafik links). Die komplette Auswertung finden Sie unter

www.spektrum.de/sterbehilfe

◀ REZENSION

Kosmos-Atlas: Spinnentiere Europas von Heiko Bellmann

Mit dem Atlas legt Bellmann ein fotografisch brillantes Einstiegs- und Sachbuch für alle Spinneninteressierten vor. Es besticht durch seine opulenten Großaufnahmen. Der Schwerpunkt liegt auf der mitteleuropäischen Spinnenfauna. Neben einer kurzen Erläuterung zur Lebensweise der Familien wird den Bestimmungsmerkmalen einzelner Arten viel Raum gewidmet ...



Aus der Rezension von Kathrin Pisarew

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter

www.spektrumdirekt.de/5x5

5x5 Die Rezension des Monats von spektrumdirekt	
1 • 2 • 3 • 4 • 5	
Inhalt	■ ■ ■ ■ ■
Vermittlung	■ ■ ■ ■ ■
Verständlichkeit	■ ■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■
Preis/Leistung	■ ■ ■ ■ ■
Gesamtpunktzahl	22



◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Kunst aus Afrika

Primitive Kunst oder nur anonyme Volkskunst – so das gängige Vorurteil. Welche Vielfalt und Qualität die Werke afrikanischer Kulturen erreichten und welche Bedeutung sie hatten, illustriert dieser Beitrag über eine Dauerausstellung im Ethnologischen Museum Berlin

Dieser Bildartikel ist für Abonnenten nach Anmeldung mit der Kundennummer zugänglich über

www.spektrum-plus.de



Sie suchen einen Artikel aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

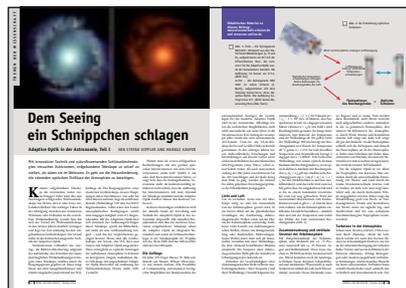
Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Direktsuche« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos



VULKANISMUS ▶
Wird der Ätna zum Pulverfass?
 Europas größter und aktivster Vulkan gilt als relativ friedlich. Neuere Untersuchungen offenbaren aber seinen Trend zu unberechenbarem Verhalten



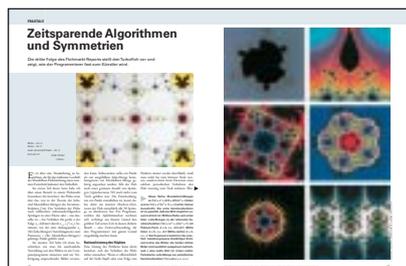
SDW DOSSIER 6/2003
Die unruhige Erde (II)
 ▶ Schloten, die Schlamm speien
 ▶ Die verbeulte Erde
 ▶ Lauschangriff auf seismisches Geflüster



ADAPTIVE OPTIK ▶
Dem »Seeing« ein Schnippchen schlagen
 Wie Astronomen mit Hilfe innovativer Technik versuchen, die störenden optischen Einflüsse der Atmosphäre bei erdgebundenen Teleskopen zu beseitigen



SUW 10/2004
Adaptive Optik
 ▶ Schwarze Löcher
 ▶ Asteroiden-Abwehr
 ▶ Im Herzen eines Galaxienhaufens



FRAKTALE ▶
Zeitsparende Algorithmen und Symmetrien
 Diese Folge des Flohmarkt-Reports stellt den Turbofloh vor und zeigt, wie der Programmierer fast zum Künstler wird



SDW DOSSIER 2/2004
Mathematische Unterhaltungen III
 ▶ Der Froschkönig und der Attraktor
 ▶ Alice im hyperbolischen Wunderland
 ▶ Polyederkissen

 www.spektrum.de/do2_2004



NEURONALE STAMMZELLEN ▶
Kopfgeburten
 Es galt als unumstößliche Erkenntnis der Neurobiologie: Erwachsene Gehirne bilden keine neuen Nervenzellen. Irrtum, sie tun es – und zwar ein Leben lang. Aber die Selbstreparatur der Gehirne hat Grenzen



G&G 3/2006
Was wir schön finden
 ▶ Neue Lügendetektoren
 ▶ Von wegen altes Eisen
 ▶ Glibber mit Grips

 Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
 Telefon: 06221 9126-741

Sprachentwicklung war ausschlaggebend

Orang-Utans, Juli 2006

Der Autor fragt, warum sich von allen Menschenaffen einzig unsere Vorfahren zu einer derart herausragenden Intelligenz aufschwangen. Die Antwort gibt die sehr nette Karikatur von O.H. Das Orang-Utan-Kind, das von einer Forscherin beobachtet wird, fragt seine Mama, indem es auf die Wissenschaftlerin zeigt: »Sie ist mir den ganzen Tag nachgelaufen – darf ich sie behalten?« Diese O.H.-Orang-Utans können also sprechen, und Sprache ist das Instrument, um Erleben gedanklich von der Fessel an die unmittelbare Gegenwart zu befreien. Sprache erlaubt es, das Geschehen durch Vergleich mit Vergangenen zu analysieren und auf wünschenswertes Künftiges zu extrapolieren, macht also die Zukunft planbar.

Prof. Peter R. Gerke, Gräfelting

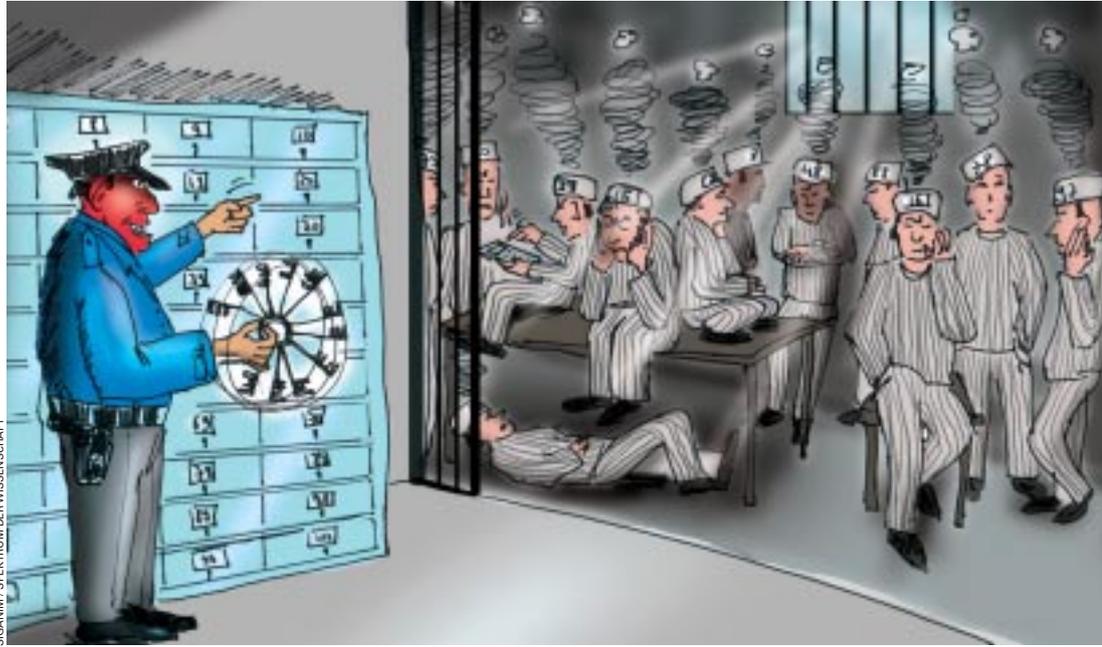
Sterbehilfe kontra Abtreibungen

Dem Tod zur Hand gehen
Essay, Juli 2006

Herr Dahl schreibt, dass in Oregon einer von 1000 Todesfällen betroffen ist. Nimmt man das auch für Deutschland an, dann wären es bei uns (bei zirka 1 Million Todesfällen pro Jahr) 1000 Menschen, überwiegend ältere, und zwar unheilbar kranke Personen.

Vergleicht man das mit rund 140 000 Abtreibungen im Jahr, wobei es sich um werdendes und meist gesundes Leben handelt, dann ist wohl die Meinung eines toleranten, selbst christlichen Menschen eindeutig.

Prof. Otto Schult, Jülich



Putzen, aber nicht beißen

Tierische Geschäfte, Juni 2006

Auf S. 54 ist oben ein Foto zu sehen und daneben wird über den Putzerfisch (*Labroides*) berichtet. Dass er »putzt«, ist vollkommen richtig, aber er beißt nicht.

Der Fisch, der anderen Fischen gesundes Gewebe herausbeißt, ist der Säbelzahn-schleimfisch (*Aspidontus*). Er sieht fast genauso aus wie *Labroides* und ahmt sogar sein charakteristisches, wippendes Schwimmen nach.

Ursula Scharafin, München

Des Wärters Absichten durchkreuzen

Freiheit für die Kombinatoriker
Mathematische Unterhaltungen,
Juni 2006

Dr. Ulrich Heim aus Lübeck, Ulysse Keller aus Zürich und Maik Nicke aus Dresden haben eine Möglichkeit gefunden, wie die Gefangenen die sadistischen Absichten des Wärters durchkreuzen können.

Durch das Ausweisetauschen realisiert der Wärter

eine Permutation p der Zahlen von 1 bis n . Die im Artikel beschriebene Strategie der Häftlinge ist, mit der eigenen Fachnummer j anzufangen und dann $p(j)$, $p(p(j))$, ... zu öffnen. Nennen wir eine Permutation, die einen Zyklus der Länge größer $n/2$ enthält, eine sadistische Permutation.

Die Gegenstrategie verläuft wie folgt: Die Häftlinge denken sich eine eigene Permutation q aus (indem sie sich eine neue, geheime Nummerierung geben) und wenden nicht p an, um das jeweils nächste Fach zu finden, sondern qp (»das Produkt von q und p «), das ist die Permutation, die dadurch entsteht, dass man erst p und dann q anwendet.

An Beispielen sieht man sehr schnell, dass das Produkt einer sadistischen Permutation p und irgendeiner Permutation q im Allgemeinen nicht wieder sadistisch ist. Das bedeutet allerdings auch, dass die Häftlinge durch ein geschicktes q einen Sadismus einführen können, wo vorher keiner war.

Weitere Erkenntnisse scheint es dazu nicht zu geben; Eugene Curtin, einer der

▲ In diesem grausamen Spiel zu gewinnen ist fast unmöglich, aber nicht ganz aussichtslos.

Autoren des Originalartikels, hat in derselben Richtung nachgedacht, ist aber nicht zu Ergebnissen gekommen. Plausibel ist die Vermutung, dass der Effekt von q dem des Zufalls gleichkommt. Dann hätte qp die übliche Sadismuswahrscheinlichkeit von knapp über $1 - \ln 2$. Man würde also einem sadistischen Wärter vielleicht den Spaß verderben und ansonsten keinen Schaden anrichten. *Red.*

Zusammenballung von Gefangenen

Malaria in Deutschland, Juni 2006

»Die letzten Ausbrüche ... gab es im Anschluss an den Zweiten Weltkrieg, als Soldaten ihre Lager in den Rheinwiesen aufschlugen.« Für den, der weiß, wie das wirklich war, ist dieser Satz eine Ungeheuerlichkeit.

Erstens waren es keine Soldaten, sondern Kriegsgefangene, die sich ergeben hat-

ten, sowie von den amerikanischen Befreiern willkürlich aufgegriffene Männer im Alter von 14 bis 80 Jahren, darunter Arm- und Beinamputierte. Zweitens schlugen sie nicht ihre Lager auf, sondern wurden vielmehr auf engstem Raum auf den feuchten Wiesen der Rheinniederung zusammengepfercht – in allen »Rheinwiesenlagern« zusammen mehr als eine halbe Million Menschen. Eine größere Ballung von Gefangenen hat es in der Geschichte nicht gegeben. Und diese Verhältnisse machen einen Ausbruch von Malaria plausibel.

Prof. Hubert Meister, Weilheim

Abnahme der Schallintensität

Hast du Töne? Wissenschaft im Alltag, Juni 2006

Die Abnahme der Lautstärke in Dezibel bezieht sich auf die Abnahme der Schallintensität, also der Schalleistung pro Fläche. Die Oberfläche einer Kugelwelle berechnet sich als $4\pi r^2$, das heißt die Intensität nimmt mit der zweiten, nicht mit der dritten Potenz der Entfernung zur punktför-

migen Schallquelle ab. Bei der Linienquelle ist es dementsprechend nur die einfache, nicht die zweite Potenz von r.

Ludwig Matzner, Mödling, Österreich

Bettnetze gegen Malaria

Arm, reich, männlich
Editorial, Juni 2006

Sie schreiben, dass der Einsatz von imprägnierten Bettnetzen und das Aussprühen der Häuser die Malaria eindämmen könnte. Wieso reicht es nicht, einfache unimprägnierte Bettnetze einzusetzen? Die Mücken werden dadurch abgehalten. Fangen lassen sie sich mit Hochspannungselektrogeräten schnell, ungefährlich und insektizidfrei.

René Rößing, per E-Mail

Antwort der Redaktion:

Einfache Bettnetze würden die Mückenbelastung nicht verringern und damit auch nicht die Gefahr, im Haus beim abendlichen Plausch gestochen zu werden. Die elektrische Bekämpfung ist in Afrika wegen der unzuverlässigen oder fehlenden Stromversorgung wenig praktikabel,

außerdem für viele Einheimische zu teuer.

Kein echtes Paradoxon

Was hier steht, ist nicht wahr
Springers Einwürfe, Juli 2006

Das zitierte antike Lügenparadoxon ist kein echtes Paradoxon, sondern hat folgende Lösung:

Epimenides, der Kreter, sagt, dass alle Kreter lügen. Er ist selber Kreter, also lügt auch er. Also ist das Gegenteil wahr, und einige Kreter sagen die Wahrheit. Das Letztere entspricht auch weitgehend der Wahrheit.

Es ist erstaunlich, dass Kurt Gödel das nicht erkannt haben soll.

Dr. Renate Fiebig, per E-Mail

Antwort des Autors:

Tatsächlich ist der Satz »Alle Kreter lügen« noch kein Paradoxon, da hat Frau Fiebig Recht. Wohl aber ist die Verschärfung, der selbstbezügliche Satz »Dieser Satz ist nicht wahr«, paradox, und Gödels Beweis stützt sich auf einen selbstbezüglichen Satz dieses Typs.

Errata

Dieselmotoren, Wissenschaft im Alltag, April 2006

Unser Leser Anton Grüll aus München wies darauf hin, dass Dieselmotoren kein Kraftstoffgemisch, sondern nur Luft verdichten. Während beim Benzin-Motor ein Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichtet und dann über einen Funken gezündet wird, wird beim Dieselmotor die Luft verdichtet und dadurch erhitzt. Dann wird der Kraftstoff eingespritzt und das Gemisch entzündet sich von selbst.

Erde sicher vor tödlichem Strahlenblitz
Spektrum, Juli 2006

Vor 440 Millionen Jahren sind die Trilobiten nicht vollständig, sondern nur zum größten Teil ausgestorben.

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistent: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevoigtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könniker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Doris Gerstner, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Claus-Peter Sesin, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, D-70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/1, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fsj/partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sülteimer, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Driehel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephsplatzstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01.01.2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen
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 der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 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: © 2006 (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. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson



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





MATT HERNE

PALÄONTOLOGIE

Krokodile stammen aus Down Under



STEVE SALISBURY, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

▲ Dieses Fossil von *Isisfordia duncani*, dem Urahn der heutigen Krokodile, wurde in Australien entdeckt. Lebendig könnte das Tier wie in der Zeichnung (links) aussehen haben.

GEOLOGIE

Hitzerekord am Meeresboden

■ Heiße Quellen am Meeresgrund sind vor allem von vulkanisch aktiven Regionen im Pazifik bekannt. An ihnen tritt Meerwasser aus, das zuvor im Boden versickert und in die Nähe von Magmakörpern gelangt ist. Dort wird es aufgeheizt, bevor es wieder aufsteigt. Normalerweise haben diese Quellen eine Temperatur von etwa 350 Grad Celsius. Wegen des hohen Drucks am Meeresgrund bleibt das Wasser trotzdem flüssig.

Die heißeste bisher bekannte Tiefseequelle lag im Pazifik und erreichte 402 Grad Celsius. Nun haben Wissenschaftler um Andrea Koschinsky von der Inter-

national University Bremen bei einer Expedition mit dem Forschungsschiff Meteor 3000 Meter tief im Atlantik einen neuen Rekordhalter entdeckt. Ein Tauchroboter registrierte dort eine Temperatur von 407 Grad Celsius.

Dies entspricht genau dem »magischen« Wert, bei dem sich salzhaltiges Meerwasser unter dem hohen Druck in der Tiefsee in ein überkritisches Fluid verwandelt: ein Mittelding zwischen Flüssigkeit und Gas, das ungewöhnliche Eigenschaften aufweist. Insbesondere kann es die umliegenden Gesteine besser auslaugen als flüssiges Wasser.

»Das Ergebnis sind superheiße Lösungen ungewöhnlicher Zusammensetzung«, erklärt Koschinsky. *Pressemitteilung der International University Bremen, 22. 5. 2006*

◀ Der Tauchroboter »Quest 5« misst die Temperatur an der heißesten bekannten Tiefseequelle. Dort leben Organismen, die sich von dem mineralreichen Wasser ernähren.



MARUM, UNIVERSITÄT BREMEN

ASTRONOMIE

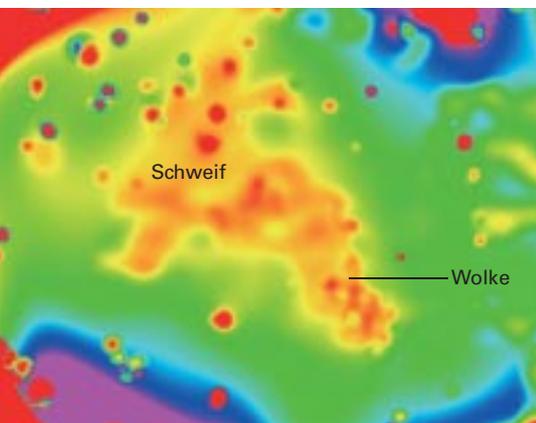
Riesenwolke rast durchs All

■ Sie ist 5 Milliarden Mal so groß wie unser Planetensystem und hat die milliardenfache Masse der Sonne. Damit ist sie die größte bekannte Wolke aus heißem Gas im Universum. Entdeckt wurde das Ungetüm auf Röntgenbildern des Weltraumteleskops XMM-Newton. Darauf ist zu erkennen, wie die Wolke mit der enormen Geschwindigkeit von etwa 750 Kilometern pro Sekunde durch den Galaxienhaufen Abell 3266 rast. Mit seinem gewaltigen Gravitationspotenzial erhitzt dieser den Gasball nicht nur auf Temperaturen von mehreren Millionen Grad Celsius, sondern zerrt zugleich heftig an ihm.

Dadurch verliert die Wolke pro Stunde Materie von rund einer Sonnenmasse, welche sie – ähnlich wie ein Komet – als Schweif hinter sich herzieht. Für das Forscherteam um Alexis Finoguenov von der Universität von Maryland in Bal-

Paläontologen sind in Australien auf die versteinerten Überreste des ältesten modernen Krokodils gestoßen. Das nur etwa 1,1 Meter lange Tier lebte vermutlich in der Kreidezeit vor ungefähr 98 bis 95 Millionen Jahren. Damit schließt der Fund, den die Wissenschaftler *Isisfordia duncani* taufen, eine Lücke in der Entwicklungsgeschichte der Panzerechsen. Es gibt zwar ältere krokodilähnliche Fossilien, aber kaum Überreste aus der mittleren Kreidezeit – jenem Zeitalter, in dem die Aufspaltung in die heutigen Familien der echten Krokodile, Alligatoren und Gaviale stattfand. *Isisfordia duncani* könnte ihr letzter gemeinsamer Vorfahr gewesen sein, vermutet das Entdeckerteam um Steve Salisbury von der Universität von Queensland in Brisbane. Das wiederum legt nahe, dass die modernen Krokodile in Australien entstanden sind. Bislang galt Amerika als Wiege dieser Reptilien.

Proceedings of the Royal Society B, Online-Vorabveröffentlichung, 14. 6. 2006



ESA / XMM-NEWTON / ALEXIS FINGOENOV ET AL., UMBC

Auf dieser farbkodierten Röntgenaufnahme erscheint die neu entdeckte Gaswolke im Galaxienhaufen Abell 3266 als orangefarbene Fläche. Ihr Schweif weist nach links oben.

timore ist der Gasball nicht nur wegen seiner ungewöhnlichen Ausmaße interessant, sondern auch, weil er Rückschlüsse auf die Strukturbildung im Universum zulässt. Wahrscheinlich wird sich das abgestreifte Gas in ferner Zukunft zusammenballen und neue Sterne, ja vielleicht sogar Galaxien bilden. *The Astrophysical Journal, 6/2006, S. 790*

PLANETOLOGIE

Gekippter Enceladus

Wie alle Trabanten der Riesenplaneten wird auch der eisige Saturnmond Enceladus in seinem Innern durch Gezeitenkräfte aufgeheizt, die am stärksten in der Äquatorregion wirken. Deshalb war es eine große Überraschung, als die Raumsonde Cassini ausgerechnet an seinem Südpol die heißeste Stelle ausmachte: Hier ist der Himmelskörper um rund 15 Grad Celsius wärmer als auf der restlichen Oberfläche. Als Folge davon sprudeln Geysire und finden sich Risse in der Eisdecke, von Nasa-Forschern fantasievoll Tigerstreifen genannt.

Wissenschaftler um Francis Nimmo von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz haben nun Ergebnisse von Computersimulationen publiziert, die eine Lösung für dieses Rätsel bieten. Demnach stieg vor einiger Zeit aus dem Innern des Planeten eine riesige Blase aus besonders heißem Material zur Oberfläche empor – und zwar dort, wo die Gezeitenkräfte am stärksten sind: am Äquator. Sie erzeugte mit ihrer relativ geringen Dichte, die den Auftrieb her-



Durch eine Kippbewegung hat Enceladus eine Blase aus heißem Material (rot und gelb) von der Äquatorregion zum Südpol verlagert.

NASA, JPL/SSI

vorrief, zugleich eine Unwucht, welche Enceladus taumeln ließ. Im Endeffekt drehte sich der Planet dadurch so, dass die Blase am Südpol landete. Damit erreichte Enceladus wieder jene stabile Konfiguration, bei der sich rund um den Äquator mehr Masse konzentriert als an den Polen. *Nature, 1. 6. 2006, S. 614*

ZOOLOGIE

Totgesagte leben länger

Laut Bibel holte Jesus den toten Lazarus ins Leben zurück. Wenn in der Natur plötzlich Tierarten wieder auftauchen, die als ausgestorben galten, sprechen Biologen daher vom »Lazarus-Effekt«. Ein solches »Wunder« hat sich nun in Südostasien ereignet. Dabei war die vermeintliche Leiche nicht nur einige Tage, sondern ganze 11 Millionen Jahre alt.

Vor zehn Jahren entdeckten Forscher auf laotischen Märkten gebratene Exemplare eines Tiers, das nach einer seltsamen Kreuzung zwischen Ratte und Eichhörnchen aussah und bei den Einheimischen »Kha-Nyou« hieß. Anfang 2005 klassifizierten Kollegen die gebratene Köstlichkeit schließlich als neue Art, die sie Felsenratte oder wissenschaftlich *Laonastes aenigmamus* taufen und zum Vertreter einer bislang unbekannteren Familie erklärten. Doch kürzlich bezweifelten Forscher um Mary Dawson vom Carnegie Museum of Natural History diese Zuordnung. Sie identifizierten das Tier

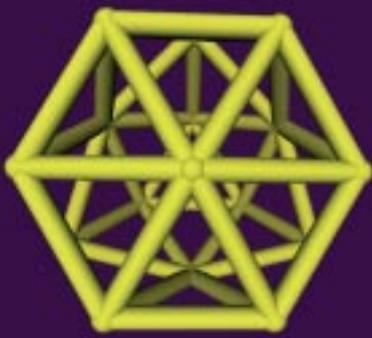
als Mitglied der ausgestorbenen Familie der Diatomyidae, von der das jüngste bekannte Fossil 11 Millionen Jahre alt ist.

Nun machte der Hobbyzoologe David Redfield, emeritierter Professor für Science Education an der Florida State University in Tallahassee, die Wiederauferstehung perfekt. Ihm gelang es, ein lebendes Exemplar von dem Nager zu fangen und auf Film zu bannen. *Pressemitteilung der Florida State University, 13. 6. 2006*



Quicklebendig: die angeblich vor 11 Millionen Jahren ausgestorbene laotische Felsenratte

UTHAI TREESUCON, FLORIDA STATE UNIV.



PNAS / LAI-SHENG WANG, WASHINGTON STATE UNIV.

CHEMIE

Goldener Käfig für Atome

Die bekannten Fullerene waren die ersten frei stehenden Hohlraumstrukturen, die aus Atomen nur eines Elements bestanden – in diesem Fall Kohlenstoff. Ähnliche Käfige aus Metallen ließen sich bisher nicht erzeugen. Metallatome haben nämlich die Tendenz, sich so kompakt wie möglich zusammenzulagern. Das Ergebnis sind dichte Kugelpackungen, für die der pyramidale Orangenstapel beim Obsthändler ein schönes Beispiel ist. Amerikanische

Der nun nachgewiesene kleinste bekannte Metallkäfig besteht aus 16 Goldatomen.

Forscher um Lai Sheng Wang vom Pacific Northwest National Laboratory konnten nun jedoch zeigen, dass Moleküle aus 16 bis 18 Goldatomen tatsächlich Käfige bilden. Deren Innenraum bietet mit einem Durchmesser von gut 0,6 millionstel Millimetern genau einem Fremdatom Platz.

Die Forscher erzeugten ein Gemisch negativ geladener Goldcluster verschiedener Größe, indem sie das Metall per Laser verdampften und den Dampf kontrolliert kühlten. Die verschiedenen schweren Moleküle wurden dann massenspektrometrisch aufgetrennt. Ihre Struktur ließ sich zwar nicht direkt sichtbar machen, aber indirekt erschließen. Dazu nahmen die Forscher so genannte Photoelektronenspektren der Cluster auf und verglichen sie mit solchen, die sie für verschiedene Geometrien berechnet hatten.

PNAS online early edition, 19.5.2006

PHYSIK

In Abstoßung vereint

Wissenschaftler haben die molekulare Hassliebe entdeckt. Sie schufen ein Paar aus Rubidiumatomen, das nicht wie üblich durch Anziehungskräfte zusammengehalten wird, sondern durch die gegenseitige Abstoßung der beiden Partner. Dazu schlossen Experimentalphysiker um Johannes Hecker Denschlag von der Universität Innsbruck extrem kalte Atome in ein optisches Gitter aus Laserstrahlen ein. Dabei gerieten manchmal zwei Teilchen an ein und denselben Gitterplatz. Zunächst sorgte das Lichtfeld dafür, dass sie von dort nicht weg konnten und es miteinander aushalten mussten. Dann aber senkten die Wissenschaftler die Feldstärke und gaben den Atomen ihre Freiheit zurück. Trotzdem blieben die Paare zusammen.

Die Erklärung für diesen paradoxen Effekt lieferten Theoretiker um Rudi Grimm und Peter Zoller von der Universität Innsbruck. Wegen der gegenseitigen Abstoßung besitzt ein Atompaar eine höhere potenzielle Energie als ein Einzelatom. Das sollte die Partner eigentlich auseinander treiben. Allerdings müsste dazu die potenzielle in kinetische Energie umgewandelt werden. Diese ist aber für die winzigen Teilchen im Lichtfeld aus quantenphysikalischen Gründen auf bestimmte Werte beschränkt. Der Trick bestand nun darin, das Feld so einzustellen, dass kein Bewegungszustand existierte, der genau die Abstoßungsenergie der Rubidiumatome aufnehmen konnte. Und so musste das Paar nolens volens zusammenbleiben.

Als Anwendungsmöglichkeiten des neuen Systems nennen die Wissenschaftler die Erforschung der Hochtemperatur-Supraleitung und die Entwicklung von Quantencomputern.

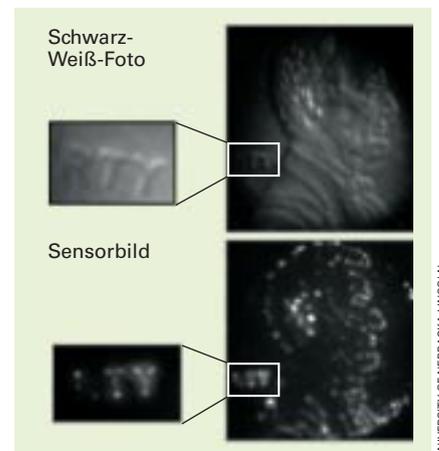
Nature, 15.6.2006, S. 853

Zwei Rubidiumatome im optischen Gitter: Trotz Abstoßung bleiben sie zusammen.

TECHNIK

Sensor ertastet Münzprägung

Fingerspitzengefühl kann man Robotern bisher nicht gerade bescheinigen. Doch Ravi Saraf und Vivek Maheshwari von der Universität von Nebraska in Lincoln wollen das ändern. Sie haben einen Sensorfilm entwickelt, der filigrane Oberflächenstrukturen ähnlich gut ertasten kann wie der menschliche Finger. Er enthält sich abwechselnde, nur wenige Nanometer dicke Schichten aus Gold- und Kadmiumsulfid-Partikeln, die jeweils durch eine hauchdünne Kunststoffolie getrennt sind.



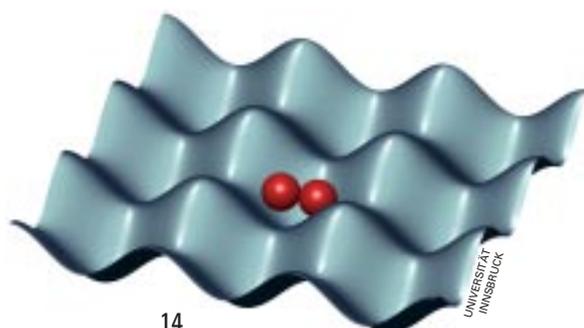
UNIVERSITY OF NEBRASKA-LINCOLN

Der neue Tastsensor kann das Bild von Abraham Lincoln auf einer US-Münze erspüren.

Den Abschluss bilden Elektroden aus Gold auf der einen und aus durchsichtigem Indiumzinnoxid auf der anderen Seite. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung fließt ein Tunnelstrom durch das Kadmiumsulfid und regt es zum Leuchten an. Die Stärke des Stroms und der Lumineszenz hängt in hohem Maß vom Abstand der Schichten ab und steigt drastisch, wenn diese zusammengepresst werden. Wird also lokal Druck auf die flexible Kunststoffhaut ausgeübt, mit der die Goldelektrode überzogen ist, leuchtet der Sensor an dieser Stelle auf. Eine CCD-Kamera unter dem Indiumzinnoxid erfasst das Lichtmuster. Zum Test drückten die Forscher eine US-Cent-Münze mit dem Bild von Abraham Lincoln auf ihren Sensor – und konnten ein gestochen scharfes Porträt des ehemaligen US-Präsidenten bewundern.

Science, 9.6.2006, S. 1501

Mitarbeit: E. Buyer, S. Hügler und S. Huhndorf



UNIVERSITÄT INNSBRUCK

Fledermaus mit Esskultur

Durch kulturelle Überlieferung lernen wir, was essbar ist und was nicht. Gleiches gilt erstaunlicherweise für Fledermäuse. Das haben nun Rachel A. Page and Michael J. Ryan von der Universität von Texas in Austin nachgewiesen. Auf diesem Foto verspeist eine Fransenlippenfledermaus (*Trachops cirrhosus*) gerade genüsslich einen Túngara-Frosch. Schon länger weiß man, dass die nachtaktiven Räuber diesen Leckerbissen am Quakgeräusch erkennen und von giftigen Amphibien unterscheiden können. Doch woher haben sie derlei Kenntnisse?

Um das herauszufinden, spielten Page und Ryan einzelnen Exemplaren von *T. cirrhosus* den Ruf der eklig schmeckenden Aga-Kröte *Bufo marinus* vor, befestigten am Lautsprecher aber ein Stück leckeren Fisch. Es brauchte durchschnittlich etwa hundert Rufe, bis das Versuchstier endlich von dem vermeintlich ungenießbaren Happen probierte – und auf den Geschmack kam. Nun zogen die Forscher eine zweite Fledermaus hinzu. Nach nur fünf- bis sechsmaligem Quaken aus dem Lautsprecher folgte diese dem Beispiel ihrer erfahrenen Artgenossin – ein klarer Fall von sozialem Lernen.



Formationstanz der Kreisel

Wandernde Pulks aus einheitlich rotierenden Elektronen könnten die Basis künftiger Computer bilden. Physiker an der Universität Marburg haben das Verhalten solcher »Spinströme« in Halbleitern rechnerisch simuliert.

Von Joachim Eiding

Da Elektronen eine Ladung tragen, lassen sie sich durch elektrische Felder steuern. Darauf beruht letztlich die moderne Halbleitertechnik mit Silizium. Durch stetige Verkleinerung der elektronischen Schaltkreise ließ sich in der Vergangenheit die Leistungsfähigkeit der Computerchips stetig steigern. Schon in wenigen Jahren dürfte die Miniaturisierung jedoch an physikalische Grenzen stoßen. Deshalb denken Physiker bereits seit Längerem über Alternativen zur heutigen Elektronik nach. Dabei bietet sich an, eine andere Eigenschaft des Elektrons zu nutzen: den Spin.

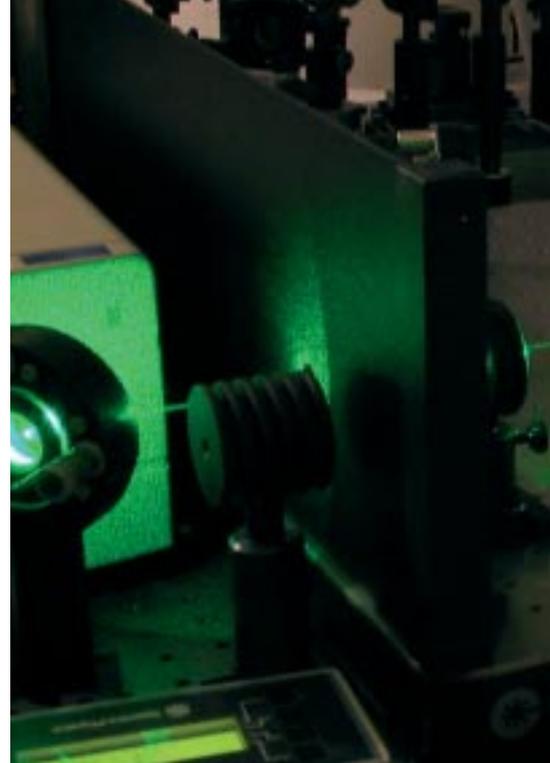
Darunter kann man sich anschaulich eine Kreisbewegung vorstellen – ähnlich dem Drall eines angeschnittenen Tennisballs. Sie verleiht dem elektrisch geladenen Teilchen zusätzlich ein magnetisches Moment. Die genauen Eigenschaften dieses Spins lassen sich allerdings nicht mit der klassischen Physik, sondern nur mit einer Kombination aus Quantenmechanik und Relativitätstheorie verstehen. Demnach kann das magnetische Moment des Elektrons nur zwei verschiedene Werte annehmen: Je nachdem, ob sich das Teilchen rechts- oder linksherum dreht, spricht man von »spin-up« oder »spin-down«. In einem

Magnetfeld haben die beiden Zustände verschiedene Energie und lassen sich so unterscheiden.

Diese Zusammenhänge nutzt ein neuer Zweig der Informatik, der vor rund zwanzig Jahren aufkam: die Spintronik. Die heutige Elektronik assoziiert die An- und Abwesenheit eines Stroms mit den Binärziffern »1« und »0«. Eine analoge Zahldarstellung lässt sich mit den Zuständen »spin-up« und »spin-down« realisieren. Voraussetzung dafür ist allerdings eine hohe Spinpolarisation: Der Drall möglichst vieler Elektronen sollte gleich ausgerichtet sein. »Das Traummaterial für die Spintronik würde eine hundertprozentige Spinpolarisation an der Fermi-Kante zeigen«, erklärt die Chemikerin Claudia Felser von der Universität Mainz. Unter dieser Kante verstehen Physiker die Trennlinie zwischen mit Elektronen besetzten und unbesetzten Energiezuständen.

Polonaise paralleler Spins

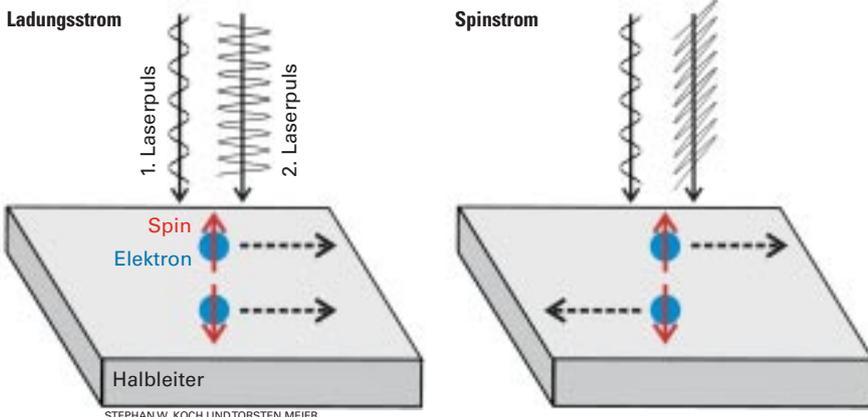
Eine Möglichkeit zur Realisierung spintronischer Schaltkreise besteht darin, statt der in der Elektronik genutzten Ladungsströme so genannte Spinströme zu erzeugen, in denen die wandernden Teilchen alle dieselbe Spinrichtung haben. US-Forschern um David Awschalom an der Universität von Kalifornien ist das



erstmals 1997 gelungen, indem sie in Halbleitern durch Zugabe von Mangan ferromagnetisches Verhalten induzierten und dann ein äußeres Magnetfeld anlegten. Vor drei Jahren schafften es dann deutsche Wissenschaftler um Wolfgang Rühle an der Universität Marburg, Spinströme auch rein optisch anzuregen.

Das hat viele Vorteile. Man kann normale, nicht vorbehandelte Halbleiter verwenden, braucht weder mechanische Kontakte noch äußere Felder und hat die Möglichkeit, die Ströme durch ultrakurze Laserpulse – im Bereich von Femtosekunden (10^{-15} Sekunden) – sehr schnell anzuschalten.

Kürzlich hat die Forschergruppe um die Physiker Stephan W. Koch und Torsten Meier von der Universität Marburg das Verhalten solcher Spinströme in einem Festkörper erstmals auch im Computer simuliert (*Physical Review Letters*, Bd. 95, Artikel 086606). Dazu schrieb das Team ein umfangreiches Programm, das



◀ Mit zwei gekoppelten Laserstrahlen unterschiedlicher Frequenz lassen sich, je nachdem, ob sie parallel oder senkrecht zueinander polarisiert sind, Ladungs- oder Spinströme hervorrufen. Im ersten Fall bewegen sich alle Elektronen in dieselbe Richtung. Im zweiten Fall dagegen wandern die Teilchen, deren Spin nach oben weist, nach rechts, die anderen nach links. An der Ladungsverteilung insgesamt ändert sich dabei nichts.

STEPHAN W. KOCH UND TORSTEN MEIER



In dieser Versuchsanordnung konnten Marburger Physiker mit Laserlicht in Halbleitern Ströme von Elektronen erzeugen, deren Spins alle in dieselbe Richtung wiesen.

WOLFGANG RÜHLE

es auf Parallelrechnern laufen ließ. Dabei wurden nicht nur Spin-, sondern zum Vergleich auch Ladungsströme simuliert.

Beide können entstehen, wenn man einen Halbleiter mit sehr kurzen Zweifarben-Laserpulsen beleuchtet. Die Strahlung katapultiert Elektronen aus dem Valenzband – unter Hinterlassung von Löchern – ins energetisch höhere Leitungsband des Festkörpers, wo die Teilchen dank einer gewissen Überschussenergie relativ weit oben landen. Dort können sie dann wandern. Allerdings wird ihre Energie durch den Zusammenstoß mit anderen Partikeln und die Wechselwirkung mit dem Kristallgitter allmählich aufgezehrt. Dadurch purzeln die Elektronen mit der Zeit zunächst auf die Unterkante des Leitungsbands herunter. Von dort fallen sie schließlich ins Valenzband zurück und landen wieder in einem der bei der Anregung entstandenen Löcher.

Das bloße Anheben von Elektronen ins Leitungsband ließe sich auch mit einem einfachen, einfarbigen Laserpuls erreichen. Damit die gewünschten Spin- und Ladungsströme entstehen, brauchen die angeregten Teilchen jedoch gewissermaßen einen Extraschub. Den liefert der zweite Puls, dessen Strahlungsfrequenz nur halb so groß ist. Er muss eng mit dem ersten abgestimmt sein, sodass sich beide in definierter Weise überlagern.

Eine entscheidende Rolle spielt auch die Polarisation, das heißt die Orientierung der Ebene, in der die Lichtwellen der beiden Pulse schwingen. Wenn sie übereinstimmt, bilden sich Ladungsströ-

me. Stehen die Polarisierungsebenen der beiden Lichtwellen senkrecht zueinander, kommt es dagegen zu Spinströmen.

Hierbei werden die Elektronen nach der Orientierung ihres magnetischen Moments in zwei gleich große Gruppen getrennt, die sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen: Diejenigen Teilchen, deren Spin nach oben zeigt, fließen zum Beispiel nach rechts und die mit nach unten gerichtetem Spin nach

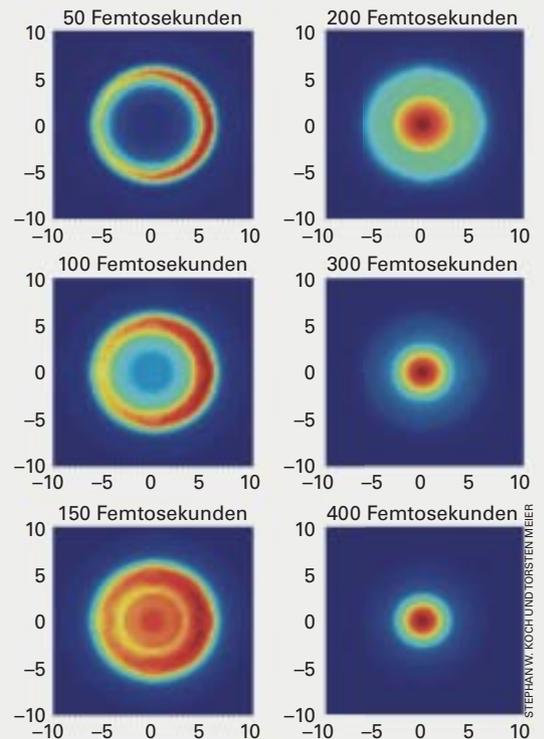
links. Weil dabei gleich viele Elektronen zur einen wie zur anderen Seite wandern, kommt es zu keiner Nettoverschiebung der elektrischen Ladungen. Es fließt also kein Ladungsstrom.

Mit ihren Simulationen konnten die Marburger Physiker wichtige Details über das Verhalten der Spinströme ermitteln. So zeigte sich, dass die Polarisation sehr lange erhalten bleibt – ein erfreulicher Befund. Außerdem wandern die Elektronen in Spin- und Ladungsströmen den Berechnungen zufolge im Mittel gleich schnell. Es gab allerdings auch ein eher negatives Ergebnis: Die Spinströme kamen schon nach ungefähr 125 Femtosekunden zum Erliegen. Damit klangen sie schneller ab als die Ladungsströme, deren Lebensdauer immerhin rund 150 Femtosekunden beträgt.

Die Marburger Forscher konnten bei ihren Simulationen auch den Grund für diesen zunächst überraschenden Unterschied herausfinden. In beiden Fällen verlieren die wandernden Elektronen Energie durch Kollisionen mit den Atomen des Kristallgitters. Die Spinströme werden jedoch zusätzlich durch Zusammenstöße zwischen den wandernden Teilchen selbst gebremst, da die eine Hälfte von ihnen in die entgegengesetzte Richtung wie die andere strebt. Bei La- ▷

Abklingen eines Ladungsstroms

Per Computer ließ sich das Abklingen eines optisch angeregten Ladungsstroms zweidimensional nachvollziehen. In den gezeigten Momentaufnahmen der Simulation ist mittels Farbkode die Anzahl der Elektronen angedeutet, die jeweils den auf den Achsen angegebenen Impuls (in willkürlichen Einheiten) in horizontaler und vertikaler Richtung haben: Sie nimmt von blau über grün und gelb nach rot zu. Kurz nach der Laser-Anregung ist der Impuls noch bei den meisten Elektronen nach rechts gerichtet und nur bei wenigen nach links. Die Komponenten nach oben oder unten gleichen sich aus. Durch Stöße mit dem Kristallgitter verringert sich der Impuls der Teilchen schon nach wenigen hundert Femtosekunden und verteilt sich einheitlich auf alle Raumrichtungen. In der Visualisierung erhält dadurch der anfänglich inhomogene Ring eine einheitliche Farbe, füllt sich und schrumpft schließlich.



STEPHAN W. KOCH UND TORSTEN MEIER

ANZEIGE

ANZEIGE

▷ dungsströmen kommt es zwar auch zu Kollisionen zwischen einzelnen Elektronen, aber weil diese sich in die gleiche Richtung bewegen, wird dabei nur Impuls zwischen ihnen übertragen, während sich an der Strömungsgeschwindigkeit insgesamt nichts ändert.

Die Simulationen zeigten ferner, wie sich die stärksten Ladungs- und Spinströme erzeugen lassen. Der niederfrequente Laserpuls sollte dazu wesentlich intensiver sein als der hochfrequente, wobei das optimale Intensitätsverhältnis, das jedoch von zahlreichen Faktoren abhängt, etwa bei vier liegt.

Diese Erkenntnis nutzt den Informatikern, die auf die Spintronik als Com-

putertechnik der Zukunft setzen und dazu möglichst starke und langlebige Spinströme brauchen. »Unsere theoretischen Ergebnisse werden zum einen weitere Experimente motivieren und sind zum anderen sehr hilfreich, um das mögliche Anwendungspotenzial von ultraschnell erzeugten Ladungs- und Spinströmen besser zu verstehen«, erläutert Koch die Bedeutung seiner Arbeit.

Bis zu neuartigen Rechnern, die auf der Spintronik beruhen, ist es allerdings noch ein weiter Weg. »Momentan sind die meisten Untersuchungen auf Laborniveau«, gesteht der Marburger Forscher. Es geht also primär um Grundlagenforschung mit dem Ziel, die Physik hinter

den Effekten zu verstehen. Bis Informatiker das neue Prinzip technisch anwenden können, dürften nach Einschätzung von Koch einige Jahre vergehen.

Praktiker wie George Bourianoff vom Chip-Hersteller Intel geben sich noch zu rückhaltender. Er rechnet nicht vor 2020 mit den ersten einsatzfähigen Spintronik-Computern. Für die Marburger Forscher ist die nächste große Herausforderung nun, die Lebensdauer der optisch erzeugten Spinströme entscheidend zu vergrößern; denn ein paar hundert Femtosekunden reichen keinesfalls aus.

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.

MOLEKULARBIOLOGIE

Einblick ins Postamt der Zelle

Viele Proteine tragen am Anfang ihrer Aminosäurekette eine Art Postleitzahl, die ihren Bestimmungsort signalisiert. Strukturforscher haben nun detaillierte Aufschlüsse über die Funktion der zugehörigen Sortiermaschine gewonnen.

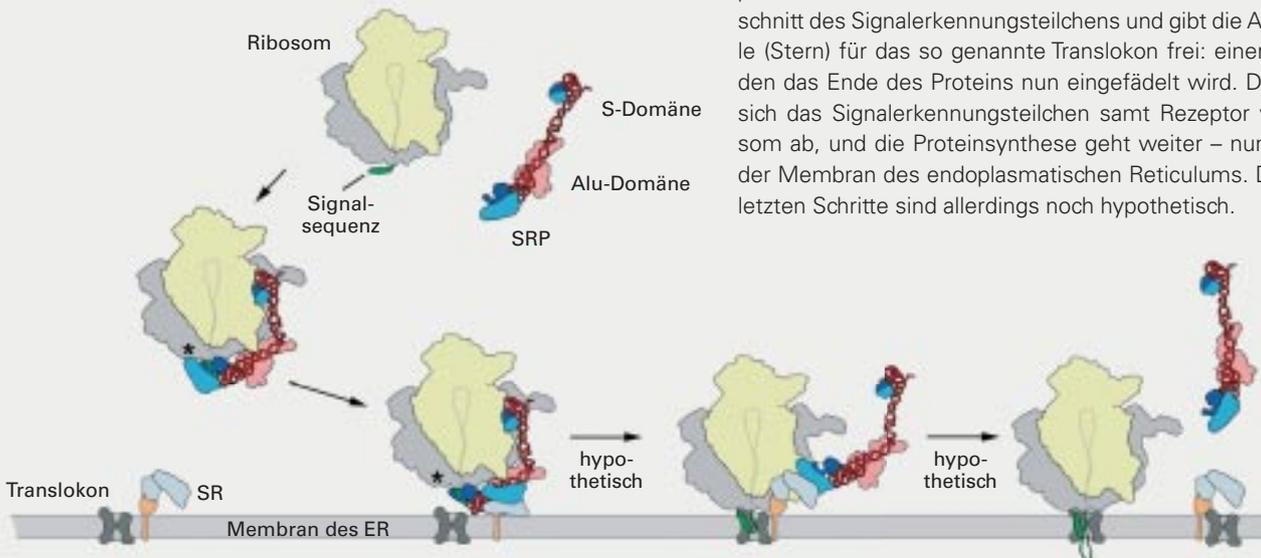
Von Michael Groß

Eine Zelle, ganz gleich ob Neuron, Blutkörperchen oder Bakterium, kann nur dann funktionieren, wenn sich die Proteine, die zum Beispiel als Enzyme den Stoffwechsel steuern oder als Antennen Signale empfangen, jeweils am richtigen Ort befinden. Hergestellt werden diese Eiweißstoffe von den Ribosomen, die zunächst einmal frei im Zytoplasma schwimmen: dem flüssigen, aber hochviskosen Medium des Zellinnenraums.

Wie die Zelle Postleitzahlen abliest

Ein raffinierter Vorgang stellt sicher, dass Proteine, die eine Signalsequenz am Anfang tragen, schon während ihrer Synthese in das so genannte endoplasmatische Reticulum (ER) eingefädelt werden. Zunächst beginnt ein Ribosom mit der Herstellung des betreffenden Eiweißstoffs gemäß der Bauanleitung

auf der zugehörigen Boten-RNA. Dabei erzeugt es als Erstes die Signalsequenz (grün). Sobald diese aber aus ihm hervorgelugt, heftet sich ein Signalerkennungsteilchen (SRP) daran und stoppt die weitere Proteinsynthese. Der Komplex aus beiden lagert sich an einen Rezeptor (SR) auf der Membran des endoplasmatischen Reticulums an. Dabei verschiebt sich ein Abschnitt des Signalerkennungsteilchens und gibt die Andockstelle (Stern) für das so genannte Translokon frei: einen Kanal, in den das Ende des Proteins nun eingefädelt wird. Danach löst sich das Signalerkennungsteilchen samt Rezeptor vom Ribosom ab, und die Proteinsynthese geht weiter – nun direkt an der Membran des endoplasmatischen Reticulums. Die beiden letzten Schritte sind allerdings noch hypothetisch.



ROLAND BECKMANN

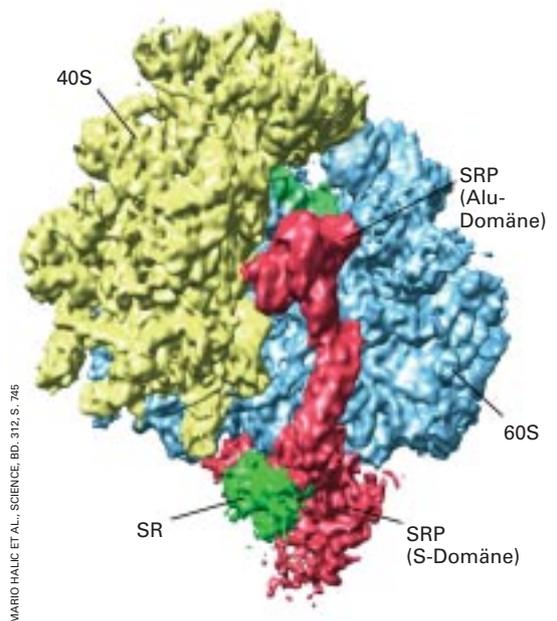
Dorthin würden somit alle frisch synthetisierten Proteine gelangen. Doch die meisten werden an anderen Orten gebraucht. Die einen müssen zum Beispiel in einer Membran als Schleuse für Ionen oder als Andockstelle für Botenmoleküle fungieren. Andere haben ihren Arbeitsplatz in einer Organelle (membranumschlossenen Unterabteilung der Zelle), wo sie etwa bei der Energiegewinnung oder dem Abbau unerwünschter Stoffe mitwirken. Wieder andere sind zum Export aus der Zelle bestimmt. Für alle diese Versandprobleme gibt es eine Art Postleitzahl in der Abfolge der Aminosäuren, aus denen die Proteine bestehen. Gleich am Anfang tragen diese Kettenmoleküle eine so genannte Signalsequenz, die nicht zu ihrer eigentlichen Funktion beiträgt und nach Ankunft am Zielort meist abgetrennt wird.

Wo es eine Postleitzahl gibt, muss auch ein Lesegerät vorhanden sein, das sie erkennt. Günther Blobel von der Rockefeller-Universität in New York hat nicht nur schon in den 1970er Jahren die Idee der Adressierung mittels Signalsequenz entwickelt – wofür er 1999 den Nobelpreis erhielt –, sondern später auch das zugehörige Lesegerät entdeckt und es Signalerkennungsteilchen (SRP, nach

Ein Ribosom, das aus einer kleinen (40S) und einer großen Untereinheit (60S) besteht, konnte nun von Münchner Forschern im Verbund mit einem Signalerkennungsteilchen (SRP) und einem Teil von dessen Rezeptor (SR) »fotografiert« werden.

englisch *signal recognition particle*) getauft. In der Zielmembran, in die das betreffende Protein eingebaut oder durch die es hindurchgefädelt werden soll, gibt es einen dazu passenden Rezeptor namens SR. Für jene Proteine, die exportiert oder in Organellen eingeschleust werden, existiert in der Membran außerdem ein spezieller Kanal: das so genannte Translokon.

Ab dem Jahr 2000, als nach langen Mühen endlich die hochkomplexe Architektur des Ribosoms aufgeklärt war, konnten sich die Strukturbiologen mit Aussicht auf Erfolg auch den molekularen Ensembles rund um die Proteinfabrik zuwenden. So gewann Roland Beckmann, der das »Transportgeschäft« bei Blobel erlernte hatte, vor gut zwei Jahren einen ersten Einblick in den Aufbau der Sortiermaschine. Seine Arbeitsgruppe an der



Berliner Charité bestimmte zusammen mit der von Joachim Frank in New York die Struktur eines aktiven Ribosoms, aus dessen Ausgangstunnel die Signalsequenz des gerade entstehenden Proteins bereits weit genug hervorlugte, um ein SRP zu binden (*Nature*, Bd. 427, S. 808).

Die Forscher hatten die Umrisse der Moleküle mittels Kryo-Elektronenmikroskopie ermittelt. Dabei erreichten sie zwar nur eine Auflösung von 1,2 Nanometern, was nicht ganz zur Lokalisierung einzelner Atome ausreicht. Doch zusam- ▷

▷ men mit den schon genauer bekannten Strukturen des Ribosoms und einzelner SRP-Fragmente ergab sich ein aufschlussreicher Schnappschuss vom ersten Schritt im Sortierprozess.

Dabei erkennt ein Molekül die Signalsequenz und klammert sich daran fest. Das bringt die Proteinsynthese erst einmal zum Stillstand. Nun konnte Beckmann, der vor Kurzem eine Professur an der Universität München antrat, auch den nächsten Schritt bei der Postsortierung im Bild festhalten, nämlich wie das SRP mit dem aktiven, aber auf Pause geschalteten Ribosom im Schlepptau an dem SRP-Rezeptor (SR) auf der Membran andockt (*Science*, Bd. 312, S. 745).

Obwohl es sich nur um Momentaufnahmen aus einem komplizierten Bewegungsablauf handelt, machen die beiden Schnappschüsse doch einige wichtige Einzelheiten klar. So zeigte das 2004 erhaltene Strukturbild überraschend genau, wie das SRP beim Anheften an die Signalsequenz die Proteinbiosynthese zeitweilig blockiert.

Das Lesegerät enthält eine »Sollbruchstelle«, an der es sich mit einer Nuclease leicht in zwei Untereinheiten aufspalten lässt, die als S- und Alu-Domäne

bekannt sind. Erstere haftete in der elektronenmikroskopischen Aufnahme von 2004 an der Signalsequenz hinter dem ribosomalen Ausgangstunnel. Die Alu-Domäne hingegen reichte wie ein Arm um das bauchige Ribosom herum – was auf einfache und einleuchtende Weise erklärt, wie das SRP die Eiweißfabrik zum Innehalten zwingt.

Platz frei zum Einfädeln des Proteins

Auf ähnliche Weise erlaubt die jüngste, kompliziertere Strukturanalyse (Bild S. 21) weitere Einblicke in die Funktion der zelleigenen Sortiermaschine. Demnach schiebt sich der neu hinzugekommene Puzzlestein, der SRP-Rezeptor, zwischen das Ribosom und die S-Domäne des SRP. Diese wird dadurch teilweise vom Ribosom weggeklappt und gibt so einen Bereich frei, der als Bindungsstelle für das Translokation, also den Proteinkanal, dient.

Die Alu-Domäne haftet dagegen weiter am Ribosom – und das sogar fester als zuvor. Die Proteinsynthese bleibt somit unterbrochen, bis der Kontakt mit dem Translokation hergestellt ist. Wie viele andere Signalprozesse und die Proteinbiosynthese selbst wird auch der Andockvorgang an den SRP-Rezeptor

durch einen damit gekoppelten Abbau des Moleküls Guanosintriphosphat (GTP) reguliert.

Was zur Vervollständigung des Prozesses nun noch fehlt, ist die Wechselwirkung des jetzt bekannten Ribosom-SRP-SR-Komplexes mit dem Translokation. Vermutlich destabilisiert die Bindung des Ribosoms an den Kanal, durch den die wachsende Aminosäurekette dann hindurchgefädelt wird, die Wechselwirkung mit SRP und SR. Beide lösen sich folglich ab, und die Proteinsynthese kann weitergehen.

Diesen Schritt auch noch im Bild festzuhalten dürfte allerdings schwierig werden, weil für die Röntgenstrukturanalyse dasselbe gilt wie für die Fotografie in ihren Anfangstagen: Wer vor der Kamera posiert, muss stillhalten. Ribosomen in voller Aktion können das jedoch nicht. Für den dritten Schnappschuss werden die Forscher sich also einen neuen Trick ausdenken müssen, um die Synthese so lange anzuhalten, bis sie die Akteure in flagranti auf Platte gebannt haben.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford, England.

VERHALTEN

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Sozial motivierte Einseitigkeit

Ist die verbreitete Rechtshändigkeit ein Erbe aus der Frühzeit der Evolution, bevor es überhaupt Säugetiere gab?

Von Sandra Upson

Die Frage, warum die meisten Menschen Rechtshänder sind, könnte die gleiche Antwort haben wie die, warum Fische Schwärme bilden. Das meinen jedenfalls Giorgio Vallortigara von der Universität Triest (Italien) und Leslie Rogers von der Universität von Neuengland in Armidale (Australien). In beiden Fällen – so die These der zwei Neurowissenschaftler – bringen soziale Faktoren Individuen dazu, ihr Verhalten so aufeinander abzustimmen, dass für jeden in der Gruppe ein evolutionärer Vorteil herauspringt.

Rund 85 Prozent der Menschen bevorzugen die rechte Hand, die von der linken Hirnhälfte gesteuert wird. Ein denkbarer Vorteil der Lokalisierung einer

Funktion in der einen Hemisphäre wäre, dass dadurch die andere frei wird für weitere Aufgaben. Allerdings erklärt das nicht, warum die Aufgabenverteilung zwischen linker und rechter Hirnhälfte bei den meisten Menschen übereinstimmt. Lange galt die bevorzugte Rechtshändigkeit bei unserer Spezies als Nebenprodukt der Lateralisierung des Gehirns, die mit der Entwicklung der Sprache einherging. Doch Erkenntnisse aus jüngster Zeit haben diese Erklärung gekippt. So deckte eine Serie von Studien Hirnlateralisierungen bei vielen Tierarten auf – von den Fischen über die Vögel bis zu den Primaten.

Wenn die Spezialisierung der Hirnhälften auf identische Aufgaben so weit im Tierreich verbreitet ist, muss das nach

Ansicht von Vallortigara und Rogers einen Vorteil im Daseinskampf bringen. Kürzlich präsentierten die beiden Belege für ihre Idee, wonach soziale Zwänge Asymmetrien in derselben Richtung hervorbringen sollten (*Behavioral and Brain Sciences*, Bd. 28, S. 575). So verweisen sie darauf, dass Küken aggressiver reagieren, wenn sie von links bedroht werden. Wie Rogers außerdem herausfand, bilden Hühner mit stärker lateralisierten Gehirnen stabilere soziale Gruppen. Indem sich die Tiere bevorzugt von rechts nähern, so die Hypothese der Neurologin, verstricken sie sich weniger in Kämpfe miteinander und können Fressfeinde besser erkennen und attackieren.

▶ Fünf von sechs Menschen sind Rechtshänder. Nach neuen Erkenntnissen könnte dieses Ungleichgewicht auf einem Konformitätsdruck beruhen, der weit zurück in die Stammesgeschichte reicht. Demnach brachte die gemeinsame Bevorzugung einer Seite im Sozialverband jedem Individuum Vorteile.

Auch Fische scheinen von einer solchen Lateralisierung zu profitieren. Bei bestimmten Arten schwimmt die Mehrheit überwiegend nach links, wenn ein Räuber angreift, bei anderen dagegen nach rechts. Auf den ersten Blick leuchtet der Vorteil dieses Verhaltens nicht unbedingt ein – schließlich könnte ein Fressfeind lernen, dass ein Angriff von einer bestimmten Seite aus mehr Erfolg verspricht. Allerdings garantiert das gleichartige Abbiegen aller Fische, dass der Schwarm zusammenbleibt. Damit haben die Tiere eine höhere Überlebenschance, als wenn sie panisch nach allen Seiten auseinander stieben.

Schimpansen stochern mit links

Was aber bedeuten die Beobachtungen an Hühnern und Fischen für die Händigkeit beim Menschen? »Vielleicht müssen wir daraus schließen, dass die Lateralisierung älter ist als die Säugetiere selbst«, spekuliert Robin Dunbar, Evolutionsbiologie an der Universität Liverpool (England). »Säuger bevorzugen eine Seite und haben ein lateralisiertes Gehirn, einfach weil das auch bei ihren Vorfahren so war – bis zurück zu den ersten Fischen.«

Das passt zu jüngsten Untersuchungen an Affen. Elizabeth V. Lonsdorf vom Lincoln Park Zoo in Chicago und William D. Hopkins vom Yerkes-Primatenforschungszentrum der Emory-Universität in Atlanta (Georgia) fanden heraus, dass Populationen wild lebender Schimpansen ererbte Präferenzen für eine

Hand zeigen, wenn sie ein Werkzeug für eine bestimmte Aufgabe benutzen. Zum Beispiel hielten zwei Drittel der beobachteten Tiere beim Stochern nach Termiten in einem Loch das dazu verwendete Stöckchen in der linken Hand. Bisher war nur von Primaten in Gefangenschaft berichtet worden, dass sie eine Hand bevorzugen, allerdings die rechte. Viele schrieben das dem Kontakt mit Menschen und dem Nachahmungstrieb der Tiere zu.

Es gibt allerdings auch andere Erklärungen für die Lateralisierung – etwa dass sie zusammen mit einem größeren Genpaket vererbt wurde, das einen davon unabhängigen Vorteil bringt. »Mir widerstrebt die Idee einer einzelnen Ursache für die Rechtshändigkeit, weil es so ein schwer fassbares Problem ist, das nur indirekte Schlussfolgerungen erlaubt«, sagt der Neurologe Jeffrey Hutsler von der Universität von Michigan in Ann Arbor.

Wenn konformes Verhalten evolutionäre Vorteile bringt, warum sind dann die Linkshänder nicht ausgestorben? So wie die Sicherheit vor Fressfeinden mit der Gruppengröße steige, meint Vallortigara, nehme auch der Konkurrenzkampf zu. Und hier haben Abweichler die Nase vorn. So sind Untersuchungen zufolge bei Sportarten Mann gegen Mann wie dem Boxen Linkshänder im Vorteil. Nonkonformisten brauchen also keine Minderwertigkeitskomplexe zu haben.

Sandra Upson ist freie Wissenschaftsjournalistin in New York.

ANZEIGE

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

PHARMAKOLOGIE  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Die Mischung macht's

Pflanzenschutzmittel und andere Chemikalien können auch in Dosen, bei denen sie einzeln harmlos sind, gemeinsam giftig wirken.

Von David Biello

Tyrone Hayes und seine Kollegen an der Universität von Kalifornien in Berkeley fanden in vierjährigen Untersuchungen an Fröschen eine alte Befürchtung bestätigt: Chemikalien können sich in ihren Schadwirkungen potenzieren.

Die US-Forscher setzten Kaulquappen neun Pflanzenschutzmitteln aus, die sie auf einem Getreidefeld in Nebraska nachgewiesen hatten: vier Herbizide, zwei Fungizide und drei Insektizide. Einzelnen wirkten sich die Substanzen bei den im Freiland festgestellten niedrigen Konzentrationen von etwa 0,1 milliardstel Anteilen nicht negativ auf die Entwicklung der künftigen Frösche aus. Wurden sie jedoch in den gleichen geringen Mengen gemeinsam eingesetzt, starb ein Drittel der Kaulquappen an Infektionen.

Die überlebenden Tiere brauchten mehr als zwei Wochen länger bis zur Umwandlung in erwachsene Frösche und waren zu diesem Zeitpunkt deutlich kleiner als normal. »Übertragen auf den Menschen hieße das, dass das Neugeborene umso weniger wiegt, je länger die

Schwangerschaft gedauert hat«, sagt Hayes. »Demnach würde das Milieu in der Gebärmutter das Wachstum behindern, statt es zu fördern.«

Die Untersuchung des US-Forschers ist nicht die einzige, die belegt, dass Chemikalien in an sich harmlosen Konzentrationen in Verbindung mit anderen Stoffen sehr wohl nachteilig wirken können. Das gilt selbst dann, wenn die zweite Substanz natürlichen Ursprungs ist.

Potenzierungseffekte von Pestiziden

So stellte Rick Relyea von der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) fest, dass Kaulquappen von Ochsenfröschen in Gegenwart geringer Mengen eines einzelnen Pestizids den Geruch eines Fressfeindes nicht mehr vertrugen: Rund 90 Prozent von ihnen starben bei Zusatz des Unkrautvernichters Carbaryl, wenn das Wasser gleichzeitig einen charakteristischen Duftstoff räuberischer Molche enthielt. Waren die Tiere nur einem von beiden Stoffen ausgesetzt, ging keines zu Grunde. Vermutlich versetzt, so die Hypothese von Relyea, das Pestizid die Kaulquappen in einen allgemeinen Alarmzustand, der

tödliche Ausmaße erreicht, wenn ein weiterer Stressfaktor hinzukommt.

Aber nicht nur Pflanzenschutzmittel zeigen solche Potenzierungseffekte. Ein anderes schon länger bekanntes Beispiel sind Phthalate, die als Weichmacher in vielen Kunststoffen vorkommen. Wie L. Earl Gray jr. von der US-Umweltschutzbehörde EPA (*Environmental Protection Agency*) und andere herausfanden, können diese Substanzen die sexuelle Entwicklung männlicher Ratten beeinträchtigen. »Wir haben Männchen von mit Phthalat behandelten Müttern, bei denen die Hoden unter den Nieren liegen oder frei in der Bauchhöhle vagabundieren«, erklärt der Forscher das von ihm mitentdeckte Syndrom.

Auch in diesem Fall verstärkt sich bei Kombination mit anderen Weichmachern, aber auch mit bestimmten Pestiziden oder Substanzen in Industrieabwässern der schädliche Effekt. So verursachte bei Versuchen mit schwangeren Ratten die gemeinsame Verabreichung zweier Phthalate in Mengen, bei denen sie einzeln keine Deformation hervorriefen, bei 25 Prozent der Embryonen eine Missbildung der Harnröhre (Hypospadie).

Diese neuen Befunde liefern weitere Belege für die These, dass Industriechemikalien die Wirkung natürlicher Hormone nachahmen und so das endokrine System durcheinander bringen. Außerdem aber stellen sie Behörden, die Grenzwerte für Schadstoffe festlegen, vor eine schier unlösbare Aufgabe. Angesichts Zehntausender von Chemikalien, die weltweit regelmäßig in Gebrauch sind, ist es rein rechnerisch überhaupt nicht möglich, alle denkbaren Kombinationen von bis zu einem Dutzend Substanzen durchzutesten, um herauszufinden, welche davon ab welchen Konzentrationen Schaden anrichten.

»Statt einzelner Chemikalien müssen wir breitere Verbindungsklassen und ihre Wechselwirkungen betrachten«, erklärt Elaine Francis, Direktorin des EPA-Programms für Pestizide und Giftstoffe. Aber solche Untersuchungen stehen erst am Anfang, und bis zu bindenden Vorschriften

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ **Mischungen an sich unschädlicher Pflanzenschutzmittel töteten ein Drittel der ihnen ausgesetzten Kaulquappen und beeinträchtigten die Entwicklung der restlichen Tiere.**

ist es noch ein weiter Weg, zumal sich die Industrie verständlicherweise sträubt und die Gültigkeit von Forschungsergebnissen immer wieder anzweifelt.

So weist Marian Stanley, Vorsitzende des Phthalat-Ausschusses beim American Chemical Council, darauf hin, dass sich nach den Ergebnissen mindestens einer Studie Nager, die unter dem Weichmacher-Syndrom litten, sehr wohl paaren und Nachwuchs haben konnten. »Ausagen über die Additivität von Phthalaten betreffen Extreme, die vielfach ohne biologische Relevanz sind«, erklärt sie.

Dennoch bleiben Substanzgemische, deren Komponenten sich in ihrer Wirkung verstärken, ein dringliches Problem. So stellt der Geologische Dienst

der USA in seinem neuesten Gewässerzustandsbericht fest, dass sich bei stichprobenartigen Analysen von Flusswasser in neunzig Prozent der Fälle mindestens zwei Pestizide nachweisen ließen. »Über die möglichen Auswirkungen solcher Gemische verschiedener Verunreinigungen auf Menschen, Wasserlebewesen und Wildtiere, die sich von Fischen ernähren, ist noch kaum etwas bekannt«, konstatiert der Hydrologe Robert Giliom, Hauptautor des Berichts. »Unsere Ergebnisse machen deutlich, dass die Untersuchung der Schadwirkungen von Stoffgemischen eine hohe Priorität haben sollte.«

David Biello ist Redakteur bei Scientific American.

PHYSIK

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Laserstrahlen aus Kochsalz

Forscher haben eine unerwartete neue Quelle für Laserstrahlung aufgedeckt: Stoßwellen können gewöhnliche Salzkristalle dazu veranlassen, kohärentes Licht auszusenden – bisher allerdings nur in Computersimulationen.

Von Stefan Maier

Manchmal lohnt es sich, etwas genauer hinzuschauen, wo andere gar nicht erst suchen. John Joannopoulos und seine Kollegen am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge ging so im wahrsten Sinn des Wortes ein Licht auf – noch dazu eines jener besonderen Sorte, wie nur Laser sie erzeugen. Das Erstaunlichste daran: Ausgestrahlt wird es von gewöhnlichem Kochsalz (*Physical Review Letters*, Bd. 96, Artikel 013904).

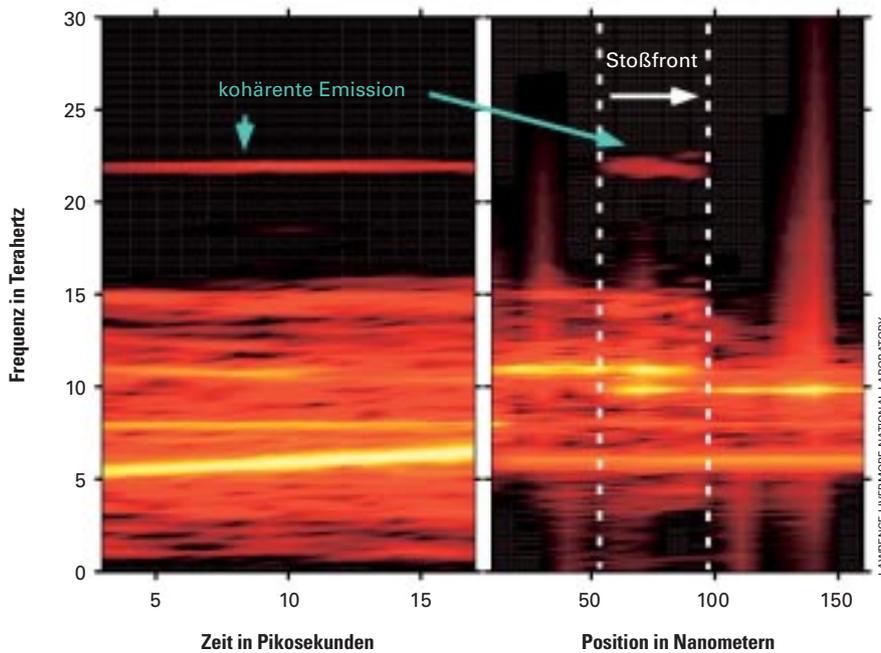
Schon fast fünfzig Jahre sind seit der Entwicklung des ersten Lasers vergangen, und es fällt inzwischen schwer, einen Bereich unseres Lebens zu finden, der nicht von ihm beeinflusst ist. Abspielgeräte für CDs und DVDs, Lichtshows in Diskotheken, Produktionsabläufe in der Industrie und die Erkundung der Tiefen des Alls sind nur einige Beispiele für den erfolgreichen Einsatz dieser Erfindung. Nach Meinung zahlreicher Experten hat ihr Siegeszug jedoch gerade erst begonnen; denn bisher lässt sich damit auf einfache, preiswerte Art

nur Strahlung in einem relativ kleinen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums erzeugen: im sichtbaren Bereich und im kurzwelligen Infrarot.

Das Geheimnis des Laserstrahls liegt darin, dass er, vereinfacht gesprochen, jeweils aus einer einzigen sehr intensiven elektromagnetischen Welle besteht, die über lange Strecken nicht abreißt. Das unterscheidet ihn vom Licht einer Glühbirne. Diese sendet eine Vielzahl kurzer Fetzen von Lichtwellen aus, die mit ihrer unterschiedlichen Frequenz, Orientierung und Taktung ein chaotisches Durcheinander bilden. Zwar produziert auch der Laser viele einzelne kurze Wellenzüge. Aber diese sind so harmonisch aufeinander abgestimmt, dass sie sich zu einer sehr langen, perfekten Sinuswelle überlagern – eine Eigenschaft, Physiker Kohärenz nennen.

In Lasern entsteht sie dadurch, dass angeregte Atome beim Übergang in den Grundzustand Licht einer bestimmten Wellenlänge aussenden, das dann benachbarte Atome zu demselben Übergang stimuliert. Deshalb passen die einzelnen Wellenzüge so exakt zueinan- ▷

ANZEIGE



Die Computersimulation der Lichtabstrahlung eines Kochsalzkristalls unter dem Einfluss einer Stoßwelle ergab diese Frequenzspektren in Abhängigkeit von Zeit und Ort. Im Bereich der Stoßfront tritt demnach bei einer Frequenz von 22 Terahertz eine laserartige, kohärente Emission auf.

strahlten Wellenfetzen in der richtigen Weise überlagern.

Damit haben die US-Forscher eine völlig neue, sehr einfache Methode zum Erzeugen von Laserlicht gefunden. Ihr Ergebnis ist auch deshalb bemerkenswert, weil die Frequenz der Strahlung im Terahertzbereich liegt. Diese Spektralregion an der Schnittstelle zwischen Hochfrequenzelektronik und Optik gilt bisher als eine Art blinder Fleck. Terahertzstrahlen lassen sich nämlich nur schlecht erzeugen. Dabei wären sie auf vielen Gebieten sehr nützlich, weil sie zahlreiche Materialien inklusive biologischen Gewebes durchdringen können und wegen ihrer geringen Energie – anders als Röntgenstrahlung – dabei keine Schäden verursachen. Mögliche Anwendungsgebiete reichen von der Werkstoffprüfung über die Sicherheitstechnik bis zur Erkennung von Tumoren.

Bisher ist der neue Laser zwar nur eine theoretische Möglichkeit. Joannopoulos plant jedoch, den Schritt zur Praxis zu tun, und will demnächst in den Salzkristallen in seinen Labors Stoßwellen auslösen. Dies ließe sich zum Beispiel durch Beschuss mit kräftigen Laserblitzen oder vielleicht sogar mit winzigen Projektilen erreichen.

Auch wenn sich dabei die Ergebnisse der Simulation bestätigen, heißt das allerdings nicht, dass der neue Laser schon bald auf den Labortischen der Forschungsinstitute stehen wird. Bereits das theoretische Modell hat nämlich durchaus auch einige Unzulänglichkeiten, die den Einsatz in der Realität behindern könnten. So ist die kohärente Strahlung der Simulation zufolge ziemlich schwach. Außerdem tritt sie nur bei sehr tiefen Temperaturen auf. Dennoch verdient die erste prinzipiell neue Laserquelle seit über zwanzig Jahren allemal eine Chance auf genauere Prüfung.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

▷ der. Seit dieses Prinzip vor einem halben Jahrhundert entdeckt wurde, haben Forscher bisher nur einen weiteren Weg zur Herstellung von kohärentem Licht gefunden. Dazu ist jedoch gleich ein ganzer Teilchenbeschleuniger vonnöten, der Elektronen auf identisch gekrümmte Flugbahnen bringt, sodass sie einheitliche Strahlung aussenden.

Der Schritt zu einem solchen »Freielektronen-Laser« Anfang der 1980er Jahre bedeutete somit eine erhebliche Zunahme an Komplexität. Joannopoulos und Kollegen gehen mehr als zwanzig Jahre später nun in die umgekehrte Richtung: Statt eines Beschleunigers brauchen sie nur einen simplen Kochsalzkristall.

Da der aus positiv und negativ geladenen Ionen besteht, die in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind, sendet er elektromagnetische Strahlung aus, wenn man ihn in starke Schwingungen versetzt. Auf den ersten Blick deutet zwar nichts darauf hin, dass diese Strahlung kohärent sein sollte. Die amerikanischen Forscher mochten diese Möglichkeit dennoch nicht ausschließen und prüften sie am Computer. Mit einem komplizierten theoretischen Modell berechneten sie die Auswirkungen einer Stoßwelle in einem Kochsalzkristall. Dabei zeigte sich, dass Ionen in der unmittelbaren Umgebung der Stoßfront elektromagnetische Strahlung mit wohldefinierten Frequenzen aussenden sollten – für Fachleute ein Hinweis auf Kohärenz.

Nach diesem ersten ermutigenden Resultat wollten es die Forscher genauer

wissen. Dazu mussten sie den Durchgang der Stoßwelle unter Einbeziehung jedes einzelnen Ions im Kristall simulieren. Selbst für Salzkörner mit einer Dicke weit unterhalb derjenigen eines menschlichen Haars bedurfte es dafür eines Supercomputers, wie es nur wenige auf der Welt gibt. Einer steht zum Beispiel am Lawrence Livermore Nationallaboratorium in Kalifornien. Dorthin wandten sich daher die Wissenschaftler, um für 158 bis 253 Nanometer lange und 17 Nanometer breite Kristalle aus bis zu drei Millionen Atomen so genannte Moleküldynamiksimulationen durchzuführen.

Atome schwingen im Gleichtakt

Das Ergebnis bestätigte ihre Erwartungen. Die simulierten Kristalle sendeten beim Durchgang der Stoßwelle zwar auch eine große Menge inkohärenter Strahlung verschiedenster Frequenzen aus. Doch daneben zeichnete sich ein enges Frequenzband bei etwa zwanzig Terahertz im fernen infraroten Bereich des Spektrums ab (siehe Bild oben). Dies war die gesuchte kohärente Strahlung.

Offenbar werden entlang der Stoßfront große Mengen von Ionen in dem Kristall zu synchronen Schwingungen angeregt. Damit ist die Grundvoraussetzung für die Emission kohärenter Strahlung erfüllt. Deren Frequenz hängt nur von der Geschwindigkeit der Stoßwelle und dem Abstand der Ionen ab. Die Periodizität der Kristallstruktur gewährleistet, dass sich die an der Stoßfront ausge-



Hat außer mir noch jemand Geist?

Wenn ich unter meinesgleichen bin, habe ich meist keinen Grund, anzuzweifeln, dass Mitmenschen denkende Wesen sind, welche die Welt genauso bewusst erleben wie ich. Nur: Woher weiß ich das? Ich kann lediglich aus dem beobachteten Verhalten der anderen auf ihr Innenleben schließen. Vielleicht sind alle Lebewesen außer mir Zombies, pure Reiz-Reaktions-Automaten? Vielleicht habe nur ich allein Bewusstsein, innere Erlebnisse, einen »Geist«?

Dieses Problem des »Fremdpsychischen« beschäftigte bis vor Kurzem ausschließlich Philosophen; denn für alle praktischen Belange macht es keinen Unterschied, ob ich mich von Bio-Automaten umgeben fühle oder von »echten« Mitmenschen. Erst seit über die Frage debattiert wird, ob Computer eine Art Bewusstsein entwickeln können, gewinnt das Problem neue Bedeutung. Wie finden wir heraus, ob eine Maschine sich ihrer selbst bewusst wird? Indem wir ihr Agieren – im so genannten Turing-Test – mit dem eines Menschen vergleichen. Erneut gilt: Fremdpsychisches erfahren wir nur über beobachtetes Verhalten.

Eine überraschende Variante des Problems entsteht aus der Fähigkeit moderner Medien, eine fiktive Wirklichkeit vorzuspiegeln, in der uns ähnelnde Wesen – ob Menschen oder Trickfiguren – autonom zu agieren scheinen. Wir sind bereit, mit den Leinwandfiguren im Kino mitzufühlen, als wären sie wirkliche Personen. Sogar primitivste Zeichentrickfilme, in denen etwa nur ein größeres Rechteck etwas verzögert hinter einem kleineren bewegt wird, deuten wir als geometrisch abstrahierte Verfolgungsjagd. Offenbar ist das menschliche Gehirn darauf angelegt, Vorgänge in der Umgebung sehr freigebig als »intentional« zu interpretieren – als absichtliche Handlungen bewusster Agenten.

Der Neurowissenschaftler Raymond Mar von der Universität Toronto (Kanada) ist kürzlich der Frage nachgegangen, wie unser Denkkorgan diese Interpretationsarbeit leistet (*Nature*, Bd. 441, S. 922). Dazu beobachtete er per Magnetresonanztomografie die Hirnaktivität von Versuchspersonen, die Filmszenen betrachteten. Wie sich zeigte, feuerten selektiv zwei Regionen im Schläfenlappen, von denen schon bekannt war, dass sie mit dem Erkennen von Absicht zu tun haben. Diese Hirnaktivität schwächte sich leicht ab, blieb aber bestehen, wenn dieselben Szenen mittels Computer so verfremdet wurden, dass sie wie gezeichnete Cartoons aussahen. Dagegen fehlte sie völlig, wenn die Probanden bedeutungslose Vorgänge wie das Schwingen eines Pendels betrachteten.

Das Ergebnis unterstreicht, wie weit unsere Bereitschaft zur intentionalen Deutung fast jeden Vorgangs geht. Dies erklärt wohl auch, warum Menschen zunächst alle Naturereignisse als absichtliche Aktionen personaler Mächte – der »Götter« – interpretiert haben. Einen späten Abglanz dieser intentionalen Weltdeutung sehe ich in dem vom Deutschunterricht bekannten Stilmittel der »belebten Beschreibung«. Als ich oben den primitiven Trickfilm erwähnte, hatte ich Schwierigkeiten, nicht gleich zu schreiben: Das große Rechteck »folgt« dem kleinen. Es fällt schwer, einen noch so unbelebten Vorgang Umgangssprachlich zu charakterisieren, ohne ihn wie einen gezielten intentionalen Akt zu beschreiben – was insbesondere uns populärwissenschaftlichen Autoren ständig Probleme bereitet: Die Sonne »steigt über den Horizont«, ein Wind »erhebt sich«, Feuer »greift um sich«, der Bach »plätschert« und »murmelt«, ein Baum »spreizt seine Äste«. Für unsere Sprache ist die Welt noch durch und durch beseelt.



ANZEIGE

Riesenteleskope

Im 20. Jahrhundert hat sich die Größe der Teleskope alle paar Jahrzehnte verdoppelt. Jetzt wollen Astronomen diesen Trend übertreffen und in wenigen Jahren ein Teleskop bauen, das drei- bis sechsmal so groß ist wie existierende Geräte.

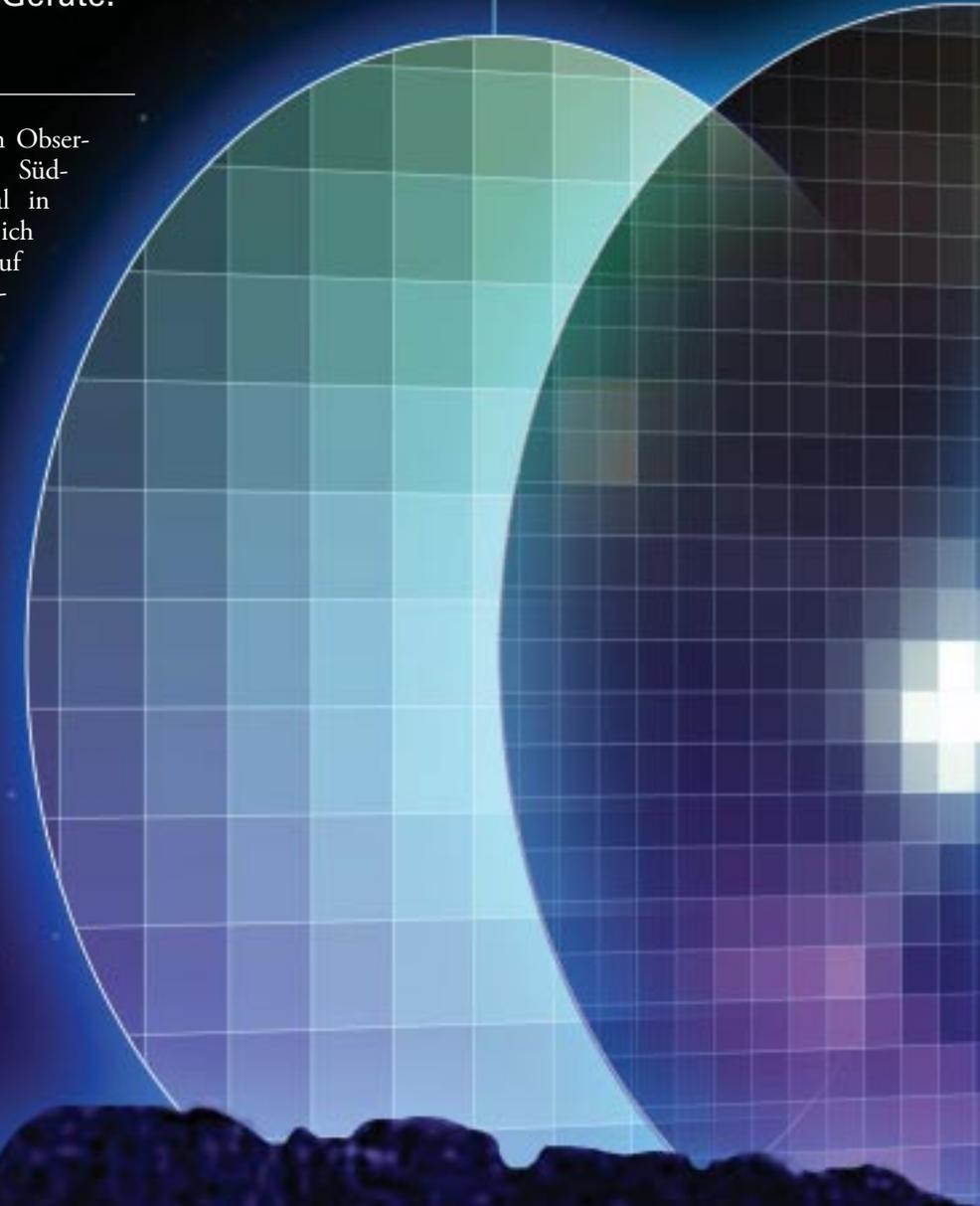
Very Large Telescope (ohne adaptive Optik)
 Spiegeldurchmesser: 8,2 Meter
 Auflösung: 0,4 Bogensekunden
 Belichtungszeit: 620 Sekunden

Von Roberto Gilmozzi

Die schönsten Augenblicke am Observatorium der Europäischen Südsternwarte auf dem Paranal in Chile sind für mich, wenn ich nach einem langen Arbeitstag abends auf das Deck gehe. So nennen wir die Plattform auf dem Berggipfel, welche die vier acht Meter großen Fernrohre des Very Large Telescopes (VLT) beherbergt. Die Weite des Sternhimmels über mir, die sanften Bewegungen der Teleskopkuppeln, das politisch unkorrekte Vergnügen, eine Pfeife zu rauchen, sowie die dunkle Atacama-Wüsteringsum, die vor dem schwach schimmernden Horizont kaum zu erkennen ist, sorgen für ein magisches Erlebnis.

Während diese vier 430 Tonnen schweren Maschinen wie in einem Ballett langsam dem sich drehenden Himmelsgewölbe folgen, denke ich über mein Glück nach, an einem so eindrucksvollen Projekt beteiligt zu sein. Wie auch die anderen großen Teleskope unserer Zeit – das Keck-Observatorium auf Hawaii, das Weltraumteleskop Hubble und die 27 Anten- ▷

Von einem verschmierten Fleck zu funkelnder Sternenpracht: Ein Großteleskop mit adaptiver Optik liefert schärfere Bilder als das Weltraumteleskop Hubble. Diese Simulation basiert auf einer VLT-Aufnahme der Sternentstehungsregion NGC 3603 im nahen Infrarotlicht.



der Zukunft

Hubble Space Telescope
Spiegeldurchmesser: 2,4 Meter
Auflösung: 0,04 Bogensekunden
Belichtungszeit: 1600 Sekunden

Very Large Telescope (mit adaptiver Optik)
Spiegeldurchmesser: 8,2 Meter
Auflösung: 0,012 Bogensekunden
Belichtungszeit: 160 Sekunden

Overwhelmingly Large Telescope (Entwurf)
Spiegeldurchmesser: 100 Meter
Auflösung: 0,001 Bogensekunden
Belichtungszeit: eine Sekunde

NCC-3000 ESP PHOTOGRAPHY: SIM FILMS



▷ nen des Radiointerferometers Very Large Array in New Mexico –, verkörpert das VLT die fortschrittlichsten Technologien unserer Zivilisation. Verfolgte man zurück, wie die Einzelteile des VLT entstanden, so würde deutlich, dass letztendlich Millionen von Menschen daran beteiligt sind.

Dennoch sind die Astronomen nicht zufrieden. Kaum hatte das VLT seinen Betrieb aufgenommen, begannen wir bereits damit, von größeren Nachfolgern zu träumen. Seit 1998 bin ich Mitglied eines Teams, das Pläne für ein optisches Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 100 Metern schmiedet, einen Giganten namens Owl, der seinen Namen nicht nur wegen seiner ausgezeichneten Nachtsicht trägt – Owl ist das englische Wort für Eule –, sondern auch, weil er überwältigend groß ist, was auf Englisch »overwhelmingly large« heißt. Dieses Gerät würde das Deck des Paranal nahezu vollständig ausfüllen.

Um die großen Probleme der heutigen Astronomie zu beantworten, reichen existierende Teleskope nicht aus. Gibt es erdähnliche Planeten in anderen Sonnensystemen? Existiert dort Leben? Wann und wie sind die ersten Galaxien entstanden? Was sind die Dunkle Materie und die Dunkle Energie?

Die Suche nach Antworten drängt uns zum Bau neuer Teleskope, deren Dimension alles, was wir heute kennen, weit übersteigt. Mehrere Wissenschaftsorganisationen haben den Bau dieser Geräte als vorrangiges Ziel der Astronomie definiert. Für die Nationale Akademie der Wissenschaften der USA kommt es nach dem James-Webb-Weltraumteleskop an zweiter Stelle. Am Zeichenbrett entstehen mehrere Entwürfe: neben Owl das Thirty Meter Telescope (TMT) und das 24 Meter große Giant Magellan Telescope (GMT).

IN KÜRZE

► Große Teleskope können lichtschwächere Objekte entdecken und schärfere Bilder liefern. Die derzeit größten Geräte für Beobachtungen des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarotlichts haben Spiegeldurchmesser von acht bis zehn Metern. Für die kommende Generation sind **Teleskope mit einem Durchmesser von bis zu 100 Metern** in Gespräch.

► Riesenteleskope müssen eine **adaptive Optik** besitzen, um den störenden Einfluss der Erdatmosphäre auszugleichen. Damit können sie feinere Details erkennen als das Weltraumteleskop Hubble – und das für weniger Geld. Mit solchen Geräten könnten Forscher **nach erdähnlichen Planeten suchen** und die ersten Sterne und Galaxien im Universum erforschen.

In den letzten Jahrzehnten war jede Teleskopgeneration etwa doppelt so groß wie ihre Vorgängergeneration und ihre Entwicklung nahm jeweils mehrere Jahrzehnte in Anspruch. Das ist die astronomische Version des Moore'schen Gesetzes, dem zufolge sich die Komplexität mikroelektronischer Schaltkreise regelmäßig in einer bestimmten Anzahl von Monaten verdoppelt. Die »kalifornische Progression« im 20. Jahrhundert illustriert diesen Trend deutlich: 1917 entstand das 2,5 Meter große Hooker-Teleskop auf dem Mount Wilson bei Los Angeles, 1948 folgte das fünf Meter große Hale-Teleskop auf dem Mount Palomar bei San Diego und schließlich 1993 das Keck-Teleskop mit seinen beiden 10-Meter-Spiegeln auf dem Mauna Kea (Hawaii). Führt man diese Entwicklung in die Zukunft fort, so müsste um das Jahr 2025 ein 20-Meter-Teleskop in Betrieb gehen.

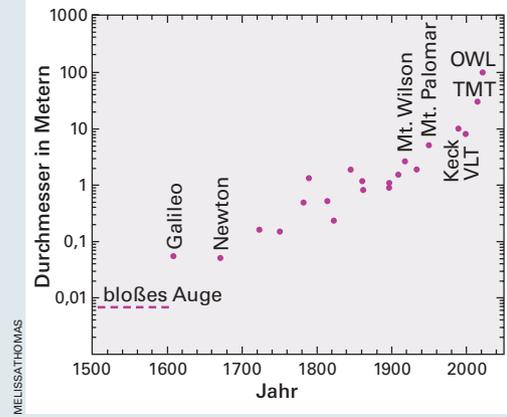
Schießen also Forscher, die im kommenden Jahrzehnt Teleskope mit Durchmessern von 25 oder gar 100 Metern realisieren wollen, weit über das Ziel hinaus? Wer die Herausforderungen beim Bau von Großteleskopen betrachtet, stellt fest, dass die Astronomen nicht den Sinn für die Realität verloren haben: die dafür notwendige Technologie existiert zum größten Teil bereits.

Zusammengesetzte Spiegelflächen

In einem Spiegelteleskop wird das einfallende Licht zunächst vom großen Hauptspiegel reflektiert und gebündelt. Dann erfolgt eine weitere Reflexion am kleineren Sekundärspiegel, der das Licht auf einen für den Forscher bequemen Punkt bündelt. Dort können sie das Bild betrachten, fotografieren oder spektroskopisch analysieren. Sprechen Astronomen von der Größe eines Fernrohrs, dann meinen sie den Durchmesser des

Evolution der Teleskope

Riesenteleskope wie Owl und TMT würden den historischen Trend zu immer größeren Öffnungen fortsetzen.



Hauptspiegels, denn er bestimmt, wie viel Licht das Instrument auffängt. Verdoppelt man den Durchmesser des Hauptspiegels, so lassen sich Objekte aufspüren, von denen nur ein Viertel der Lichtmenge zu uns kommt. Dies bedeutet, dass Objekte einer bestimmten Leuchtkraft noch in der doppelten Entfernung ausgemacht werden können.

Andererseits kann das Licht vom Nachthimmel auch durch empfindlichere Messgeräte besser genutzt werden. Als das fünf Meter große Hale-Teleskop auf dem Mount Palomar Ende der 1940er Jahre in Betrieb ging, wurden damit Fotoplatten belichtet, die nur wenige Prozent des einfallenden Lichts registrierten. Moderne elektronische Detektoren besitzen hingegen eine Empfindlichkeit von nahezu 100 Prozent.

Ein Teleskop, das mit diesen Detektoren ausgestattet ist, nutzt dieselbe Lichtmenge wie ein fünfmal größeres, das mit Fotoplatten arbeitet. Heutige Teleskope empfangen zehnmal so viel nutzbares Licht wie ihre Vorgänger. Die Detektoren können kaum noch empfindlicher werden, und deshalb besteht der nächste Schritt darin, die Hauptspiegel zu vergrößern. Ingenieure und Astronomen diskutieren gegenwärtig darüber, welchen größtmöglichen Durchmesser sie in naher Zukunft verwirklichen können.

Bislang war der Bau neuer Großteleskope durch die Möglichkeiten beschränkt, große Glasrohlinge für die Spiegel herzustellen, in die nötige Form zu bringen und zu schleifen. Die Wellen-

Galileo



CORBIS, GUSTAV TOMSICH



Newton

CORBIS, JIM SUGAR

Mt. Wilson



CORBIS, ROGER RESSMEYER (MT. WILSON, MT. PALOMAR UND KECK I)

Hale-Teleskop (Mount Palomar)



Keck-I-Teleskop (Mauna Kea)



längen des sichtbaren Lichts sind wesentlich kürzer als die der Radiostrahlung, und deshalb sind große Radioantennen viel einfacher zu bauen: Ihre Oberflächen müssen längst nicht so genau gearbeitet sein wie diejenigen optischer Teleskope.

Die Oberfläche des fünf Meter großen Parabolspiegels des Hale-Teleskops ist auf 50 Nanometer genau geschliffen. Stellen wir uns vor, der Spiegel sei so groß wie der Atlantische Ozean, dann würde die größte Abweichung von der exakten Parabolform gerade einmal fünf Zentimeter betragen! Kein Wunder, dass

es mehrere Jahre dauerte, bis diese Form genau erreicht war.

Heute werden die Spiegel computergesteuert geschliffen. Bei den vier 8,2 Meter großen Spiegeln des VLT dauerte das jeweils ein Jahr, wobei die Form des Spiegels ständig überprüft wurde. Ihre Oberflächen sind mindestens so präzise gearbeitet wie die des Hale-Teleskops, wenn nicht sogar etwas besser, obwohl ihre Form – ein Hyperboloid, das die bestmögliche Fokussierung liefert – erheblich komplexer ist. Das Schleifen des Spiegels stellt heute also keine Hürde mehr dar.

Schwieriger ist es, die Glasrohlinge herzustellen. Um acht Meter große Rohlinge zu produzieren, mussten die Teleskophersteller neue Fabrikationsstätten einrichten und immer wieder dazulernen. Mehrere Rohlinge zerbrachen, bevor einer gelang. Wesentlich größere Spiegel können mit dieser Technik nicht hergestellt werden.

Deshalb greifen die Ingenieure heute auf eine Idee zurück, die dem italienischen Astronomen Guido Horn d'Arturo 1936 kam: einen großen Teleskopspiegel aus mehreren baugleichen ▽



BEIDE FOTOS: EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY (ESO)

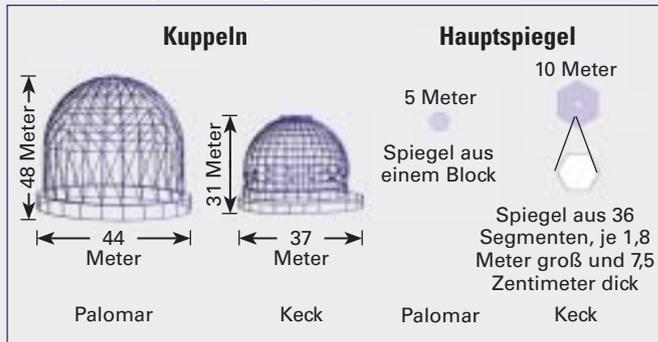


Das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte auf dem Paranal in Chile besteht aus vier Teleskopen mit einem Durchmesser von jeweils 8,2 Metern, die zu einem Interferometer verbunden werden können.

Das Overwhelmingly Large Telescope (Owl) – der Entwurf eines Giganten

Ein 100-Meter-Teleskop wäre zehnmal größer als jedes bisher gebaute optische Instrument. Eine Studie der Europäischen Südsternwarte zeigt, dass ein solches Gerät für weniger als eine Milliarde Euro gebaut werden könnte, Detektoren und Infrastruktur inklusive.

heutige Teleskope (zum Vergleich)

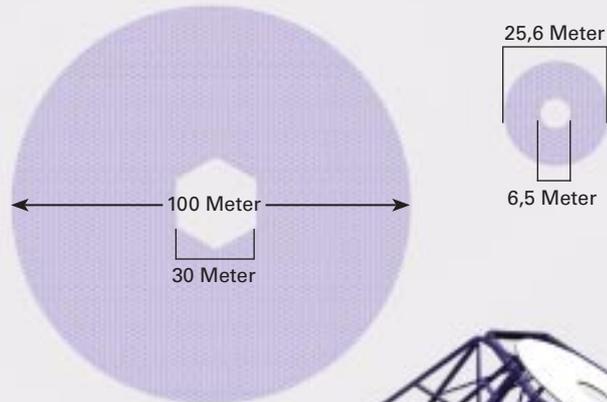


Hauptspiegel

Der das Licht sammelnde Hauptspiegel besteht aus 3048 hexagonalen Segmenten. Um Geld zu sparen, weisen sie alle dieselbe Krümmung auf und bilden zusammen eine sphärische Fläche statt der üblichen paraboloiden oder hyperboloiden Form.
Kosten: 290 Millionen Euro

Sekundärspiegel

Der Sekundärspiegel reflektiert das Licht zum Korrektor; er besteht aus 216 Segmenten. Um die Mechanik zu vereinfachen, ist er nicht gekrümmt, sondern eben.
Kosten: 30 Millionen Euro

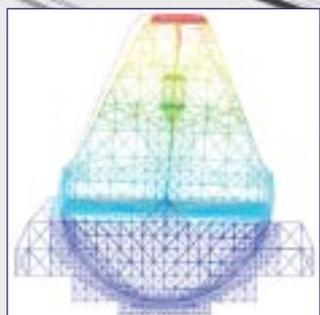


Durchmesser 220 Meter, Höhe 95 Meter

Schutzgebäude

Eine vergrößerte Version der traditionellen rotierenden Kuppeln sprengt die technischen Möglichkeiten. Deshalb arbeitet Owl im Freien. Eine großes Schutzgebäude rollt auf Schienen über das Fernrohr, um es am Tag und bei schlechtem Wetter zu schützen.
Kosten: 70 bis 150 Millionen Euro

Service-Gebäude



Struktur

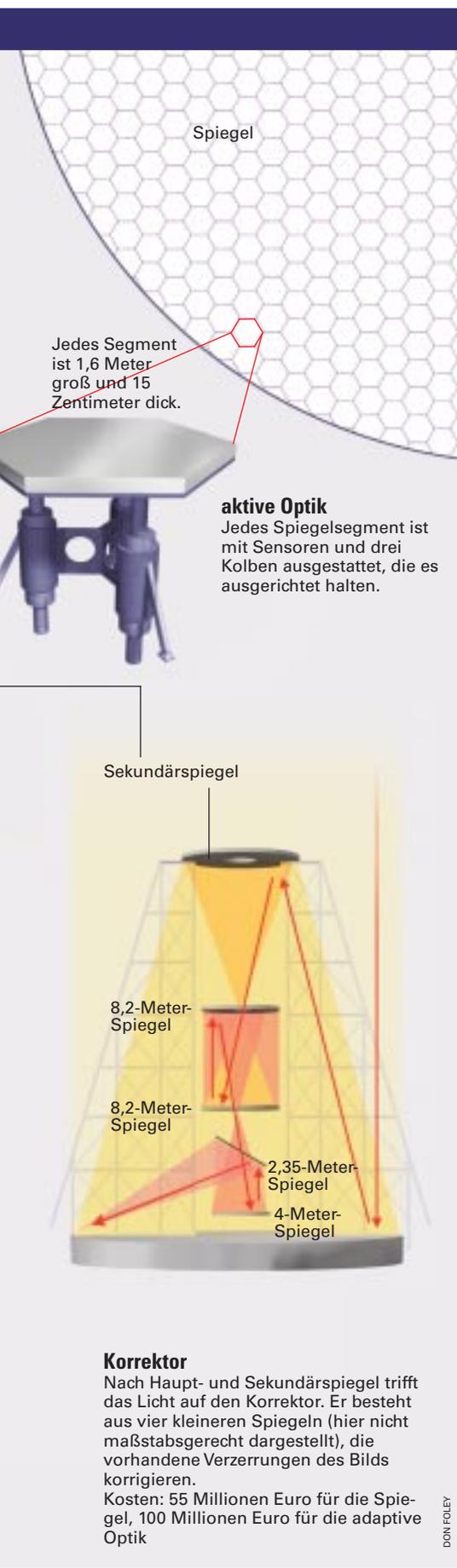
Die Gerüststruktur verbiegt sich symmetrisch, wenn sie zum Horizont geneigt wird. Dadurch bleiben die Spiegel relativ zueinander korrekt ausgerichtet. Die horizontale Verschiebung variiert von 0 (blau) bis 0,6 Millimetern (rot). Obwohl die Struktur den freien Blick zu behindern scheint, blendet sie lediglich drei Prozent des einfallenden Lichts aus.
Kosten: 185 Millionen Euro



Hauptspiegel

Antrieb

Das Teleskop wiegt knapp 15000 Tonnen – und ist damit viel zu schwer für die üblichen Montierungen. Stattdessen könnte es auf 300 Drehgestellen – ähnlich wie bei Eisenbahnwaggons – mit Friktionsantrieben gelagert werden, die in kreisförmigen Schienen laufen.
Kosten: 30 Millionen Euro



▷ Segmenten zusammensetzen. Dieses Prinzip wurde bei den beiden Keck-Teleskopen angewandt, deren Spiegel aus jeweils 36 Sechsecken mit 1,8 Meter Durchmesser bestehen. Die Hexagonalform erlaubt es, diese Segmente praktisch lückenlos zu einer großen hyperboloiden Oberfläche zusammenzufügen. Jedes Segment besitzt dabei ein leicht unterschiedliches Profil, abhängig von seiner Lage relativ zum Zentrum des Gesamtspiegels.

Kompromisse zwischen Schärfe und Empfindlichkeit

Dieses Prinzip lässt sich für beliebig große Teleskope nutzen. Schwieriger ist es jedoch, alle Segmente so genau auszurichten, dass sie nur einen Bruchteil der Wellenlänge des sichtbaren Lichts von der gewünschten Lage abweichen – und das für unterschiedliche Stellungen des Teleskops und bei äußeren Einflüssen wie Windstößen zu gewährleisten. Die Entwürfe für Owl und das TMT sehen wie bei den Keck-Teleskopen hexagonalförmige Segmente vor. Beim GMT ist hingegen geplant, sieben runde 8,4-Meter-Spiegel zu kombinieren. Der erste dieser Spiegel wird derzeit hergestellt.

Eine hohe Empfindlichkeit zum Beobachten lichtschwacher Objekte ist nur eine der beiden Anforderungen an ein Teleskop. Erwünscht ist außerdem ein hohes Auflösungsvermögen, also die Fähigkeit, feine Strukturen astronomischer Objekte zu erkennen. Im Prinzip sollte ein großes Teleskop natürlich beide Anforderungen erfüllen. Je größer es ist, desto weniger beeinträchtigt die Lichtbeugung am Außenrand des Spiegels das Bild.

Bis vor wenigen Jahren war das Auflösungsvermögen jedoch der Schwachpunkt aller irdischen Teleskope, denn selbst an den besten Beobachtungsplätzen verschmiert die Luftunruhe alle Einzelheiten, die kleiner als 0,3 Bogensekunden sind. Betrachtet man etwa den Stern Beteigeuze, der einen Winkeldurchmesser von 0,05 Bogensekunden aufweist, durch das 100 Millionen Dollar teure Fünf-Meter-Teleskop auf dem Mount Palomar, so sieht man lediglich einen flimmernden roten Lichtpunkt, der zwar heller, nicht jedoch klarer zu sehen ist als durch ein 300 Euro teures 20-Zentimeter-Hobbyfernrohr.

Bei Weltraumteleskopen ist es gerade umgekehrt. Sie liefern Aufnahmen mit einer spektakulären Auflösung, sind aber

nicht lichtstark genug, um die schwächsten Himmelsobjekte abzubilden oder gar ihr Licht für eine genaue Analyse in ein Spektrum zu zerlegen. Der Spiegeldurchmesser des Weltraumteleskops Hubble war durch die Größe der Ladebuchts des Spaceshuttles auf 2,4 Meter beschränkt, und selbst der Spiegel seines Nachfolgers, des James-Webb-Weltraumteleskops, wird nur 6,5 Meter groß sein. Um die mit diesen Geräten entdeckten Objekte spektroskopisch nachzubeobachten, bleiben große Teleskope auf der Erde unverzichtbar.

Doch dieser Kompromiss zwischen Empfindlichkeit und Auflösungsvermögen reicht in Zukunft nicht mehr aus. Belichten zukünftige Astronomen mit einem 100-Meter-Teleskop einen Himmelsausschnitt für eine Nacht, dann werden sie auf ihren Bildern Objekte sehen, die tausendmal lichtschwächer sind als alles, was sie bisher gesehen haben. Wo Aufnahmen heutiger Teleskope ein schwarzes Stück Himmel zeigen, wäre dann eine Fülle schwacher Objekte erkennbar. Ohne hohe Auflösung würden deren Bilder verschwimmen und ineinander übergehen.

Ein großes Auflösungsvermögen mit hoher Empfindlichkeit zu kombinieren, ist auch für die Entdeckung erdähnlicher Planeten bei anderen Sternen notwendig. Solche Planeten strahlen weniger als ein Milliardstel so hell wie ihre Zentralsterne. Um sie sichtbar zu machen, müssen die Astronomen das Licht des Sterns mit einem so genannten Koronografen ausblenden. Doch wenn dessen Blende zu groß ist, verdeckt sie auch den Planeten. Verfügen die Forscher über ein hohes Auflösungsvermögen, dann können sie eine kleinere Blende verwenden und näher am Stern nach Planeten suchen.

Ein Teleskop, das in unserer galaktischen Nachbarschaft Planeten auf erdähnlichen Umlaufbahnen nachweisen könnte, muss mindestens 80 Meter groß sein. Schätzungen zufolge könnte ein solches Gerät einen Teil des Weltalls untersuchen, der 400 sonnenähnliche Sterne enthält und, falls diese existieren, etwa 40 erdähnliche Planeten dieser Sterne spektroskopisch untersuchen. Mit einem 30-Meter-Teleskop ließen sich nur ein paar Dutzend Systeme untersuchen, und man müsste dafür jeweils wochenlang belichten.

Doch wie lässt sich eine hohe Auflösung erreichen, wenn doch die Luftunruhe in der Atmosphäre die Beobach-

▷ tungen stört? Hier hilft die adaptive Optik weiter, eine längst erprobte Methode, bei der ein Referenzstern fortwährend überwacht und das gemessene Signal benutzt wird, um den Brennpunkt des Teleskops nachzustellen. Das gelingt durch die gesteuerte Verformung eines der Spiegel im Strahlengang. Bei diesem Spiegel kann es sich um den Sekundärspiegel handeln oder um einen weiteren Hilfsspiegel, der zwischen Sekundärspiegel und Detektor eingefügt wird. Ein System kleiner Kolben (»Aktuatoren«) drückt gegen die Rückseite des Spiegels

und reguliert so die Form seiner Oberfläche. Als Referenzstern kann auch ein »künstlicher Stern« dienen: der Lichtpunkt am Himmel, den ein Laser vom Teleskop aus erzeugt.

Mit einem solchen System kann ein Teleskop nahezu sein beugungsbegrenztes Auflösungsvermögen erreichen, gerade so, als ob es die Erdatmosphäre nicht gäbe. Ein 100-Meter-Teleskop könnte dann noch Einzelheiten sichtbar machen, die am Himmel nur 0,001 Bogensekunden groß sind – und das ist 40-mal besser als das Weltraumteleskop Hubble.

Der Stern Beteigeuze erschiene nicht länger als Lichtpunkt, sondern ließe sich mit Einzelheiten abbilden, wie wir sie bislang nur bei nahen Planeten sehen.

Die adaptive Optik wird zwar heute schon bei vielen Großteleskopen benutzt, doch ihr Einsatz bei noch größeren Geräten ist keineswegs einfach. Bei einem 100-Meter-Teleskop wäre ein System von 100 000 Aktuatoren nötig – heutige Systeme besitzen höchstens 1000. Der Steuerungscomputer muss die Form des Spiegels mehrere hundertmal pro Sekunde aktualisieren. Bislang ist die Prozesstechnik dieser Aufgabe nicht gewachsen.

Die Ingenieure gehen schrittweise vor, um dieses Problem zu lösen. Zuerst bauen sie Systeme, die im Infraroten arbeiten. Dort sind weniger Aktuatoren nötig, da die Luftunruhe längere Wellenlängen weniger beeinflusst. Außerdem versuchen sie, Erkenntnisse aus anderen Bereichen zu nutzen, denn die adaptive Optik wird auch in Medizin, Raumfahrt, Spionagetechnik und Unterhaltungselektronik eingesetzt. Eine viel versprechende neue Entwicklung ist die multi-konjugierte adaptive Optik, die mit Hilfe mehrerer Referenzsterne ein großes Gesichtsfeld korrigieren soll.

Eine höhere Auflösung lässt sich auch mit der Interferometrie erzielen, bei der das Licht von mehreren Teleskopen miteinander kombiniert wird (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2001, S. 42). Ein solches System setzen die Forscher bereits am VLT ein. Dessen vier Teleskope sind bis zu 130 Meter voneinander entfernt. Kombiniert man das von ihnen empfangene Licht, so könnte man theoretisch die Winkelauflösung eines 130-Meter-Teleskops erzielen. Allerdings lässt sich dabei nur ein sehr kleiner Himmelsausschnitt beobachten. Darüber hinaus werden bei diesem Verfahren nur wenige Prozent des empfangenen Lichts genutzt, und nicht rund 50 Prozent wie bei der normalen Beobachtung. Und in jedem Fall ist die Licht sammelnde Fläche natürlich nur so groß wie die Summe der Spiegelflächen der einzelnen Teleskope – im Fall des VLT ist sie wesentlich kleiner als die eines 130-Meter-Riesen. Interferometer gewinnen Auflösungsvermögen auf Kosten der Empfindlichkeit und können neue Großteleskope deshalb keinesfalls ersetzen.

Wie steht es nun aber um die mechanische Stabilität eines Riesenteleskops? Wir wissen, dass sich das Innere eines

Weitere Projekte in Planung

Thirty Meter Telescope (TMT)



TODD MASON, IMASON PRODUCTIONS

Durchmesser: 30 Meter
geschätzte Kosten: 580 Millionen Euro
Entwurf: Segmentierter hyperboloider Hauptspiegel

im Internet: www.tmt.org

Giant Magellan Telescope (GMT)

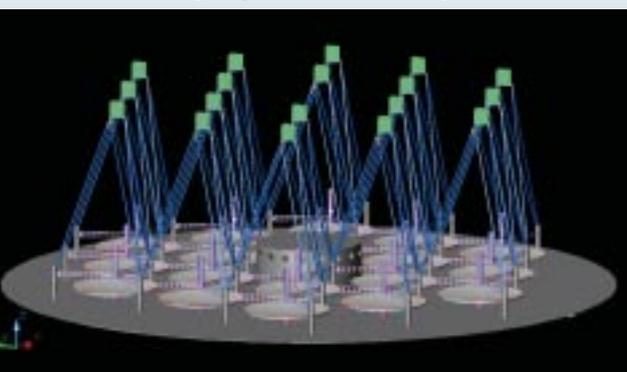


TODD MASON, IMASON PRODUCTIONS UND CARNEGIE OBSERVATORIES

Durchmesser: 21,4 Meter
geschätzte Kosten: 420 Millionen Euro
Entwurf: sieben hyperboloider 8,4-Meter-Spiegel auf einer Montierung

im Internet: gmto.org

Large-Aperture Mirror Array (LAMA)

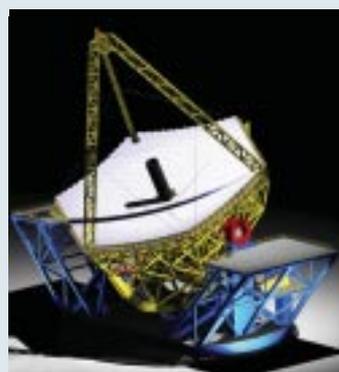


PAUL HICKSON, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA

Durchmesser: 30 Meter
geschätzte Kosten: 42 Millionen Euro
Entwurf: 18 jeweils zehn Meter große paraboloider, rotierende Spiegel aus flüssigem Quecksilber, die ständig nach oben zeigen

im Internet: www.astro.ubc.ca/LMT/lama

EURO50



EURO50 PROJECT, LUND OBSERVATORIUM, SCHWEDEN

Durchmesser: 50 Meter
geschätzte Kosten: 580 Millionen Euro
Entwurf: segmentierter, hyperboloider Hauptspiegel

im Internet: www.astro.lu.se/-torben/euro50

Elefanten wesentlich von dem einer Ameise unterscheiden muss. Das ist nicht zuletzt eine Konsequenz der Tatsache, dass das Gewicht einer Kreatur mit der dritten Potenz seiner Größe wächst, während die Tragkraft des Skeletts nur quadratisch zunimmt. Deshalb braucht ein Elefant im Verhältnis dickere Beine. Was für die großen Landsäugetiere gilt, trifft ganz ähnlich auch für Großteleskope zu, denn die beste Optik nützt nichts, wenn das Teleskop unter seinem eigenen Gewicht zusammenbricht. Zwar benutzen Radioastronomen bereits steuerbare Antennen mit Größen von bis zu 100 Metern, doch die mechanischen Anforderungen an optische Teleskope sind wegen der viel kürzeren Wellenlängen deutlich größer.

Ein Eiffelturm auf Rädern?

Der mechanische Rahmen des Teleskops muss steif sein, damit die Spiegel exakt ausgerichtet bleiben und nicht durch Wind in Schwingungen versetzt werden. Kurze und kompakte Teleskope sind meist stabiler als lange, aber die kurze Bauweise bringt eine stärkere Ablenkung des Lichts mit sich und dadurch wird der optische Aufbau komplizierter. Ingenieure müssen demzufolge mechanische und optische Anforderungen gegeneinander abwägen. Bei Wind vibriert das VLT zwar leicht, aber der Sekundärspiegel gleicht dies 70-mal pro Sekunde durch eine entsprechende Gegenbewegung aus. Auch Owl soll diese Methode nutzen.

Ein anderes Problem ist, dass sich beim Nachführen die Gewichtsverteilung des Teleskops ändert. Das Gerät kann sich verbiegen und dadurch wird der Spiegel dejustiert. Um das so weit wie möglich zu verhindern, besitzen alle großen Teleskope heute eine Skelettstruktur, wie sie in den 1930er Jahren erstmals für das Fünf-Meter-Hale-Teleskop auf dem Mount Palomar entwickelt wurde. Diese hält die Spiegel jeweils in einem offenen, kastenförmigen Gebilde, das aus vier dreieckigen Gerüsten besteht. Gibt die Struktur nach, so verbiegt sich der Rahmen gerade so, dass sich der Spiegel parallel zu seiner ursprünglichen Lage verschiebt. Besteht der Spiegel aus mehreren Elementen, so bewegen sich diese auf gleiche Weise und die Nachfokussierung ist relativ einfach. Unser Entwurf von Owl sieht vor, die Konstruktion aus wenigen Standardkomponenten zusammenzusetzen.

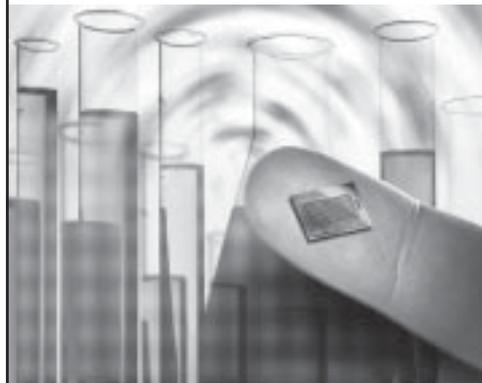
Die Rahmenstruktur von Owl würde ein Gewicht von 10 000 bis 15 000 Tonnen haben, je nach dem verwendeten Spiegelmaterial, und ist damit schwerer als der Eiffelturm, der 10 000 Tonnen auf die Waage bringt. Das erscheint zwar gewaltig, ist aber relativ wenig. Vergrößerte man eines der VLT-Teleskope auf 100 Meter, dann wäre es mit einer halben Million Tonnen viel schwerer! Dennoch ist es eine enorme Herausforderung, 10 000 Tonnen mit der erforderlichen Präzision zu bewegen. Mit Drehgestellen, die wie bei Eisenbahnwaggons

an jedem Rad mit Friktionsantrieben versehen sind, mit dünnen Ölschichten, auf denen die Teleskope schwimmen (wie beim VLT), oder mit der magnetischen Levitation von Teilen der Konstruktion könnte das möglich sein.

Ein Riesenteleskop ist also realisierbar – doch wie teuer wird es sein? In den letzten Jahrzehnten sind die Kosten für große Teleskope mit der 2,6-fachen Potenz des Hauptspiegeldurchmessers gestiegen. Die vier 8,2-Meter-Teleskope des VLT haben jeweils rund 80 Millionen Euro gekostet und demzufolge würde be- ▷

postgradual
Fernstudium

NANOBIOTECHNOLOGIE



- NANOBIOANALYSE
- CHEMISCHE NANOTECHNOLOGIEN
- CHIPTECHNOLOGIEN
(STUDIENINHALTE, AUSZUG)

Berufsbegleitend in einem Jahr
Beginn: Oktober 2006

WEITERE STUDIENGÄNGE IM BEREICH:
MEDIZIN, NATURWISSENSCHAFT, TECHNIK

MEDIZINISCHE PHYSIK (MASTER OF SCIENCE)

KLINISCHES INGENIEURWESEN (ZERTIFIKAT)

www.zfuw.de

Jetzt informieren!

Postfach 3049
D-67653 Kaiserslautern
Telefon: +49 (0) 631/205-4925
Telefax: +49 (0) 631/205-4940
E-Mail: zfuw@zfuw.uni-kl.de



▷ reits ein 20-Meter-Teleskop 800 Millionen Euro verschlingen – mehr Geld werden Politiker den Astronomen kaum bewilligen. Nach dieser Rechnung würde ein 100-Meter-Teleskop sogar 55 Milliarden Euro kosten und jeden realistischen Haushalt sprengen. Solange diese Kostenentwicklung weiter besteht, täten die Astronomen gut daran, viele Kopien eines kleineren Teleskops zu bauen, um so insgesamt die gewünschte Größe zu erreichen; denn dann stiegen die Kosten nur quadratisch mit der effektiven Öffnung.

Kostensenkung durch Massenproduktion

Für 800 Millionen Euro ließen sich zehn 8,2-Meter-Teleskope bauen, welche zusammen die Oberfläche eines 26-Meter-Teleskops aufwiesen. Das bedeutet keineswegs, dass beide Lösungen gleich gut sind. Als gewöhnliche Teleskope benutzt, hätten die zehn Geräte zwar die Empfindlichkeit eines 26-Meter-Fernrohrs, jedoch nur die Auflösung eines 8,2-Meter-Teleskops. Und als Interferometer eingesetzt, könnte es zwar eine höhere Auflösung liefern, dies aber zu Lasten der Empfindlichkeit.

Vieles spricht dafür, dass ein Riesenteleskop günstiger wäre, als es die Kostenentwicklung der letzten Jahrzehnte vermuten lässt, vor allem, weil man einzelne Komponenten massenweise produzieren könnte. Man muss sich dann jedoch für ein optisches System entscheiden, welches eine solche Herstellung erlaubt. Statt eines hyperboloidförmigen Hauptspiegels, bei dem jedes Element individuell gefertigt werden müsste, könnte man ein 100-Meter-Teleskop mit einem sphärischen Spiegel bauen, bei dem alle Segmente identisch sind. Die 3048 Segmente ließen sich wie am Fließband fertigen. In den bereits existierenden Spiegellaboren könnte alle zwei Tage ein Segment hergestellt werden. Allerdings führt ein sphärischer Spiegel zu Bildfehlern, deshalb müsste das Teleskop zusätzlich mit einem Korrekturlinse ausgestattet werden – ähnlich der Korrekturlinse, mit der die Fehlsichtigkeit des Weltraumteleskops Hubble korrigiert wurde. Doch selbst mit diesem Korrektur würde das System noch erheblich billiger.

Auch das Schutzgebäude trägt zu den Kosten einer Sternwarte wesentlich bei. Das Hale-Teleskop besitzt eine Kuppel, die so groß ist wie die des Petersdoms in



Rom. Sie muss so groß sein, weil es eine parallaktische Montierung besitzt, deren eine Achse zu den Himmelspolen zeigt. Das hat den Vorteil, dass man nur eine Achse bewegen muss, um die scheinbare Drehung des Sternhimmels auszugleichen, doch andererseits ist die Montierung sehr sperrig.

Alle modernen Großteleskope haben meist kompaktere azimutale Montierungen, bei denen zwei Achsen gleichzeitig nachgeführt werden müssen, was mit Hilfe von Computern kein Problem ist. Aber auch mit einer azimutalen Montierung benötigt ein 100-Meter-Teleskop noch eine gewaltige und teure Kuppel. Computersimulationen zeigen zudem, dass eine derart große Struktur störende Luftturbulenzen verursacht. Deshalb sieht der Entwurf von Owl lediglich einen verschiebbaren Hangar vor, der das Teleskop tagsüber und bei schlechtem Wetter beherbergt. Um zu beobachten, wird dieser weggeschoben und das Teleskop steht frei. Bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 Metern pro Sekunde (54 Kilometer pro Stunde) kann das Teleskop beobachtet werden, wobei eine leichte Brise sogar willkommen wäre, da sie die Luftunruhe verringert.

Wir schätzen die Gesamtkosten für Owl auf etwa 940 Millionen Euro. Das TMT würde etwa 550 Millionen kosten und das GMT ungefähr 315 Millionen. Obwohl diese Geräte günstiger sind als manche Weltraummissionen, führt an einer internationalen Zusammenarbeit und einer Aufteilung der Kosten auf verschiedene Staaten wohl kein Weg vorbei.

Im November 2005 kam ein internationales Komitee zu dem Schluss, dass Owl zwar realisierbar, aber in technischer und finanzieller Hinsicht riskant sei. So sei noch unsicher, ob die adaptive Optik mit einem künstlichen Stern bei einem derart großen Gerät funktionieren kann und ob die Segmentierung des Spiegels

Probleme aufwirft. Deshalb ändern wir den Entwurf ab, um bis Ende dieses Jahres die Pläne für ein Teleskop mit 30 bis 60 Meter Öffnung vorlegen zu können, mit dessen Bau im Jahr 2010 oder 2011 begonnen werden kann. Die Entscheidung darüber soll nach einer Konferenz fallen, die Ende November in Marseille stattfindet.

Im Verlauf der vergangenen vier Jahrhunderte sind die Fernrohre der Astronomen von der Größe eines Nachttisches über die Größe eines Hauses zur Größe einer Kathedrale angewachsen. Die nächste Generation wird die Größe eines Wolkenkratzers haben. Jetzt können wir Instrumente bauen, mit denen wir vermutlich die ersten Sterne im Kosmos und Planeten um fremde Sonnen sehen werden, darunter vielleicht irgendwann einen Planeten wie unsere Erde. Die Frage ist nicht länger, ob und warum wir neue Riesenteleskope bauen wollen, sondern wann wir es tun und wie groß sie sein werden. ◁



Roberto Gilmozzi arbeitet an der Europäischen Südsternwarte in Garching und leitet dort die Entwurfsstudie für das Riesenteleskop Owl. Von 1999 bis 2005 war er Direktor des VLT-Observatoriums auf dem Cerro Paranal in Chile. Seine wissenschaftlichen Interessen reichen von Novae, Supernovae und ihren Überresten über den kosmischen Röntgenhintergrund bis zur Geschichte der Sternentstehung im Universum.

Status of the European ELT. Von Guy Monnet und Roberto Gilmozzi in: *Eso Messenger* 123, S. 4, 2006

Astrophysical techniques. Von C. R. Kitchin. Taylor & Francis 2003

Exploring the cosmic frontier: Astrophysical techniques for the 21st century. *Eso astrophysics symposia*. Springer-Verlag 2006

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Feuerschlote, die ringförmig um einen aktiven Supervulkan aufbrechen, hüllen angrenzende Gebiete Dutzende von Kilometern weit in glühende Wolken aus Gas und Asche.

JULIA GREEN

The background image is a composite of volcanic scenes. At the top, a dark, stormy sky is filled with heavy, grey ash plumes. A bright, jagged lightning bolt strikes down from the left. Below the sky, a landscape is shown with a winding, glowing red-orange lava flow in the foreground. In the distance, several volcanic peaks are visible, with one emitting a thick plume of ash. The overall atmosphere is one of intense natural power and destruction.

TITEL

Die Urgewalt der

Supervulkane

Mikroskopisch kleine Aschekristalle liefern überraschende neue Erkenntnisse über die schwersten Vulkanausbrüche auf der Erde.

Von Ilya N. Bindeman

Tief unter Kalifornien und Wyoming liegen zwei Vulkane in einer Art Winterschlaf, aus dem sie jederzeit mit unvorstellbarer Gewalt erwachen können. Dann würde die Westhälfte der USA binnen weniger Stunden unter einer mehrere Zentimeter dicken Ascheschicht versinken. In den letzten zwei Millionen Jahren ist dies schon mindestens viermal geschehen. Ähnliche Brandherde schweben unter Indonesien und Neuseeland.

Die Eruption eines Supervulkans entfaltet die gleiche Zerstörungskraft wie der Einschlag eines kleinen Asteroiden, kommt aber zehnmal so häufig vor. Damit gehört sie zu den schlimmsten Naturkatastrophen, die der Menschheit drohen. Abgesehen von der unmittelbaren Verwüstung des Umlands bis in mehrere tausend Kilometer Entfernung durch teils gluthitze Aschemassen setzen Supervulkane Gase frei, die das globale Klima auf Jahre hinaus schwer beeinträchtigen.

Was löst eine Eruption dieser Giganten aus? Lässt sie sich vorhersehen? Mit welcher Art von Zerstörungen ist zu rechnen? Das sind Fragen, die sich Vulkanologen schon seit Längerem stellen. Analysen fast mikroskopischer kleiner Kristalle in Ascheablagerungen alter Eruptionen haben jüngst Teilantworten geliefert.

In den 1950er Jahren fielen einigen Geologen riesige, annähernd kreisförmige Senken auf – manche dreißig bis sechzig Kilometer breit und mehr als tausend Meter tief. Sie erinnerten stark an die kesselförmigen Calderen vieler bekannter Vulkane: Einsturzkrater, die entstehen, wenn sich die Magmakammer unter einem Vulkanschlott bei einem Ausbruch leert und die darüber liegenden Gesteinsschichten einbrechen. Die riesigen Talkessel lagen zudem inmitten einiger der gewaltigsten Ablagerungen von Vulkangesteinen, die von einem ein-

zigen Ausbruch herrühren. All dies machte den Forschern klar, dass sie die Überreste von Vulkanen vor sich hatten, die hundert- oder gar tausendmal größer waren als der berühmte Mount St. Helens im US-Staat Washington. Angesichts der extremen Dimension der Calderen und der Unmengen an Auswurfmaterial mussten die Magmakammern unter den Feuer speienden Giganten einst ähnlich monströs gewesen sein.

Nur an wenigen Stellen unter der Erdoberfläche ist es heiß genug, dass in solchem Ausmaß Gestein schmilzt. Das macht Supervulkane zum Glück zu einer seltenen Erscheinung. Derzeit kennt man nur vier Regionen, wo in den letzten 2 Millionen Jahren bei einer Eruption mindestens 750 Kubikkilometer Gesteinsmaterial ausgeworfen wurden: Yellowstone (Wyoming, USA), Long Valley (Kalifornien, USA), Toba (Sumatra, Indonesien) und Taupo (Neuseeland).

Riesige Magmakammer über heißem Fleck

Mitte der 1970er Jahre zeigten Untersuchungen einstiger Vulkanausbrüche, wie derart riesige Magmakammern entstehen und zu einer Zeitbombe werden können. Unter der Oberfläche des Yellowstone-Nationalparks wandert die nordamerikanische Platte über einen pilzartigen Aufstrom besonders heißen, zähplastischen Gesteins (Spektrum der Wissenschaft 4/1980, S. 90). Auftriebskräfte lassen diesen so genannten Plume (englisch für Helmbusch) vom Rand des flüssigen äußeren Erdkerns durch den 2900 Kilometer dicken Erdmantel empordringen. An der Erdoberfläche erzeugt er schließlich einen Hot Spot (heißen Fleck), indem er wie ein überdimensionaler Bunsenbrenner die nur hauchdünne Erdkruste von unten her aufschmilzt. Das dabei entstandene Magma hat in den letzten 16 Millionen Jahren mehrere katastrophale Vulkanausbrüche gespeist.

Anders liegen die Verhältnisse in der Region Toba. Hier befindet sich eine Subduktionszone, an der eine tektonische Platte unter eine andere abtaucht. Das Mantelgestein über dem absinkenden Krustenblock schmilzt dabei im weiten Umkreis teilweise auf. Auch dadurch können riesige Magmamengen entstehen.

Wie kommt es nun zum Ausbruch? Weil sich immer mehr Gesteinsschmelze in der Magmakammer aufstaut, steigt dort mit der Zeit der Druck. Zwar kann ihm die darüber liegende Kruste mit ihrem enormen Gewicht zunächst noch standhalten. Doch wird sie langsam angehoben und wölbt sich auf. Dabei bildet sich um die Wölbung herum ein Ring aus vertikalen Spannungsrissen, die schließlich von der Erdoberfläche bis zur Magmakammer reichen. Damit nimmt das Verhängnis seinen Lauf. Die Gesteinsschmelze bahnt sich ihren Weg durch die Risse nach oben. Diese erweitern sich zu Austrittsschlotten und vereinigen sich schließlich zu einem durchgehenden ringförmigen Spalt. Sobald das geschieht, hat der gewaltige »Deckel« festen Gesteins innerhalb des Rings keinen Halt mehr. Wie das Dach eines Hauses, dessen Wände zusammenbrechen, sinkt er als Ganzes oder in Einzelteilen in die sich leerende Magmakammer hinab und presst dabei weitere Lava und Gase an den Rändern des Rings heraus (Kasten auf S. 42/43).

So einleuchtend diese allgemeine Beschreibung klingt, bleiben allerdings viele Detailfragen offen. Zum Beispiel muss, wie sich schnell zeigte, eine riesige Magmakammer nicht grundsätzlich einen katastrophalen Vulkanausbruch auslösen. Der Yellowstone-Nationalpark ist ein gutes Beispiel. Zwar befinden sich dort drei der jüngsten von Supervulkanen geschaffenen Calderen der Erde; sie entstanden vor 2,1 Millionen, 1,3 Millionen und 640 000 Jahren fast genau übereinander. Doch in den Zeiträumen dazwischen sind ähnlich große Mengen an Magma langsam und ruhig ausgetreten. Der Grund für dieses relativ friedliche Verhalten war bis vor Kurzem unklar.

Doch inzwischen hat ein detaillierter Blick auf die Zusammensetzung winziger Kristalle im Innern von Lava und Vulkanasche aus dem Yellowstone-Nationalpark ein tieferes Verständnis ermöglicht. Das betrifft vor allem die Entstehung von Magma. Jahrzehntlang hatten Vulkanologen angenommen, dass in der Magmakammer über Jahrmillionen hin-

IN KÜRZE

- ▶ **Jüngste Analysen winziger Kristalle** in Ascheablagerungen von Supervulkanen zeigen das Verhalten dieser Giganten in einem neuen Licht.
- ▶ So lässt sich das Geschehen in ihren riesigen Magmakammern nun besser verstehen, was **genauere Vorhersagen** über die Art künftiger Eruptionen erlaubt.
- ▶ Auch überraschende Rückschlüsse auf die **weltweiten Folgen** eines Supervulkanausbruchs ergeben sich. Demnach dauert die globale Abkühlung vermutlich nicht so lange wie bisher vermutet. Andererseits könnte jedoch ein **riesiges Ozonloch** entstehen.

Groß, größer, am größten

Supervulkane überziehen viel größere Flächen (orange und blau) mit ihrer Asche als die bekannten, normalen Feuerberge (gelb und violett), da sie erheblich mehr Material mit weit größerer Wucht ausschleudern.

Mount St. Helens:
Eruption 1980
< 0,5 Kubikkilometer
Auswurfmaterial

Crater-Lake-Nationalpark:
Eruption des
Mount Mazama
vor 7600 Jahren
50 Kubikkilometer
Auswurfmaterial

Long Valley:
Bishop-Tuff-Eruption
vor 760000 Jahren
750 Kubikkilometer
Auswurfmaterial

Yellowstone-Nationalpark:
Lava-Creek-Tuff-Eruption
vor 640 000 Jahren
1000 Kubikkilometer
Auswurfmaterial

JEN CHRISTIANSEN, NACH: USGS

weg quasi ein unterirdischer See aus flüssigem Gestein existiert, der sich nach jedem Ausbruch schnell wieder mit nachdringender Schmelze aus der Tiefe füllt. Unter diesen Umständen müsste es jedoch viel öfter nach katastrophalen Ausstoß gewaltiger Lavamengen kommen. Aus mechanischen und thermischen Gründen sind riesige Magmakörper in der Kruste nämlich instabil und leeren sich daher binnen Kurzem.

Die alte Vorstellung beruhte weitgehend auf chemischen Analysen von vollständigen Gesteinsbrocken, also faustgroßen Stücken Vulkanschlacke. Diese lieferten jedoch nur Durchschnittswerte für die Zusammensetzung. Daraus ließen sich zwar viele allgemeine Erkenntnisse über die Entstehung von Magma gewinnen. Verlässliche Aussagen über das Alter des ausgeworfenen Materials und die Tiefe, in der sich die Schmelze gebildet hatte, waren jedoch nicht möglich.

Ein Gesteinsbrocken besteht aus Tausenden winziger Kristalle, von denen jeder seine eigene Zusammensetzung und Geschichte hat. Sie einzeln mit hoher Präzision zu analysieren wurde erst durch technische Fortschritte Ende der 1980er Jahre möglich. Auf einmal konnten Mineralogen gleichsam einzelne Kapitel in einem Buch lesen, dessen Inhalt sie zuvor nur aus dem Klappentext kennen. Bald zeigte sich, dass einige Kristalle – und damit auch die Magmen, aus denen sie stammten – viel älter waren als

andere. Und manche hatten sich in großen Tiefen gebildet, andere dagegen dicht unter der Erdoberfläche.

Vulkangestein enthält auch Kristalle des Minerals Zirkon. Sie sind äußerst beständig und überstehen selbst extreme Druck- und Temperaturschwankungen, ohne ihre ursprüngliche Zusammensetzung zu ändern. Deshalb sind sie in den letzten zehn Jahren in den Mittelpunkt des Interesses vieler Geochemiker gerückt. Einige Wissenschaftler wie John W. Valley von der Universität von Wisconsin in Madison haben damit zum Beispiel jüngst die frühe Entwicklung der Erdkruste rekonstruiert (Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 70). Als ich nach meiner Promotion 1998 zu Valleys Team stieß, war das Ziel allerdings ein anderes. Damals

untersuchten wir Zirkone aus dem Yellowstone-Nationalpark, um herauszufinden, woher die Magmen stammten, aus denen sie auskristallisiert waren. Daraus hofften wir Schlüsse auf das zukünftige Verhalten des in der Tiefe schlummernden Brandherds ziehen zu können.

Zunächst bestimmten wir die Mengenverhältnisse verschiedener Formen von Sauerstoff in Zirkonen der jüngsten Supereruption im Yellowstone-Gebiet vor 640 000 Jahren. Damals bildete sich der Lava-Creek-Tuff, eine bis zu 400 Meter mächtige Schicht aus verfestigter Vulkanasche. Außerdem untersuchten wir jüngere Ablagerungen, die von späteren, weniger heftigen Ausbrüchen stammten.

Schon meine ersten Analysen sorgten für eine handfeste Überraschung: Die ▶



▷ Sauerstoff-Signatur der Zirkone stimmte nicht mit derjenigen des tiefen, heißen Erdmantels überein – wie zu erwarten gewesen wäre, wenn entleerte Magmakammern immer wieder von unten aufgefüllt würden. Zirkonkristalle, die sich aus den Elementen in geschmolzenem Mantelgestein bilden, enthalten ungewöhnlich viel von dem schweren Sauerstoff-Isotop der Masse 18, dessen Kern zehn Neutronen aufweist statt der üblichen acht.

Bei unseren Proben war das nicht der Fall. Sie konnten somit nicht aus Mantel magma auskristallisiert sein. Ihr relativ niedriger Gehalt an Sauerstoff-18 bedeutete vielmehr, dass sie aus geschmolzenem Gestein hervorgegangen waren, das sich zuvor nahe der Erdoberfläche befunden und dort Kontakt mit Regenwasser oder Schnee gehabt hatte. Offenbar stammten, so unsere Schlussfolgerung, die Magmamassen der jüngeren Lava-Creek-Katastrophe sowie späterer schwächerer Ausbrüche größtenteils von der Gesteinsdecke ab, die bei einer der älteren Yellowstone-Supereruptionen eingestürzt und dann geschmolzen war.

Diese Vermutung erhärtete sich, als wir feststellten, dass die Alterswerte der Zirkone aus Eruptionen nach dem Lava-

Creek-Ereignis den kompletten, zwei Millionen Jahre umfassenden Zeitraum des Yellowstone-Vulkanismus abdecken. Derart alte Zirkone können in den jüngsten Ascheschichten nur vorkommen, wenn das ursprüngliche Magma, aus dem sie stammen, die gesamte Eruptionsserie gespeist hat. Die Kristalle vom ersten Ereignis gelangten dabei mit der einstürzenden Calderadecke wieder in die Tiefe, wo sie nicht aufschmolzen, sondern einfach bei späteren Ausbrüchen erneut ausgeworfen wurden.

Prognose dank Sauerstoff-Signatur

Dank dieser Entdeckung sollte sich das zukünftige Verhalten des Yellowstone-Supervulkans – und vielleicht auch seiner Gegenstücke anderswo – besser voraussagen lassen als bisher gedacht. Falls es zu einer neuen Serie von kleineren Vorläufer-Eruptionen kommt, die einer verheerenden Explosion gewöhnlich um einige Wochen bis Jahrhunderte vorausgehen, gäbe der Sauerstoff-Fingerabdruck der austretenden Laven und das Alter der enthaltenen Zirkonkristalle Aufschluss über die Art des Magmas in der darunter liegenden Kammer. Bei einem relativ geringen Anteil an Sauer-

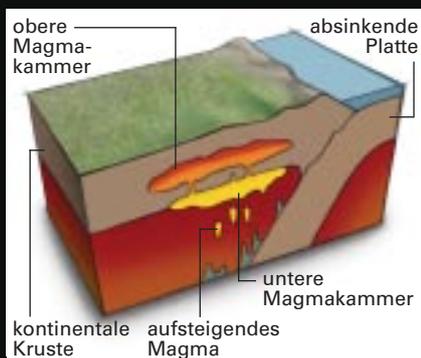
stoff-18 und einem hohen Zirkon-Alter sollte sich die bevorstehende größere Eruption aus Resten des ursprünglichen Magmas speisen, das inzwischen wohl eher ein dicker Kristallbrei ist als eine gasreiche, explosive Flüssigkeit. Hätte die neue Lava aber die Signatur frischen Mantel magmas und enthielte keine alten Zirkone, müsste man schließen, dass eine große Menge jungfräulicher Gesteinsschmelze von unten in die Kammer eingedrungen ist und sie unter Druck setzt. Das spräche für den Beginn eines neuen vulkanischen Zyklus, der viel eher die Gefahr eines katastrophalen, explosiven Ausbruchs birgt.

Winzige Kristalle und ihre Isotopenverhältnisse haben auch überraschende Erkenntnisse über den Verlauf einer Supereruption geliefert. Zu den bestuntersuchten Überresten eines solchen Ausbruchs gehört der Bishop-Tuff, der die so genannten Volcanic Tablelands im Osten Kaliforniens bildet. Diese Dutzende bis Hunderte von Metern mächtige vulkanische Ablagerung bildete sich aus den geschätzten 750 Kubikkilometern Magma, die bei der Entstehung der Caldera des Long-Valley-Supervulkans vor etwa 760 000 Jahren austraten.

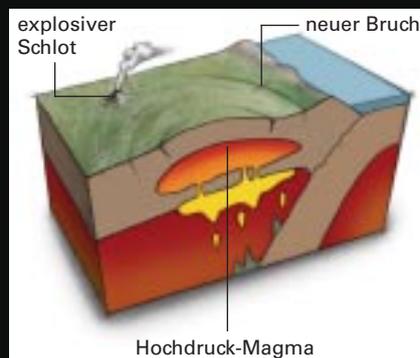
Stadien eines vulkanischen Superzyklus

Supervulkane speisen sich aus riesigen, mit Magmaschmelze gefüllten Kammern. Diese entstehen über Hot Spots, an denen heißes Material aus großen Tiefen im Erdinneren auf-

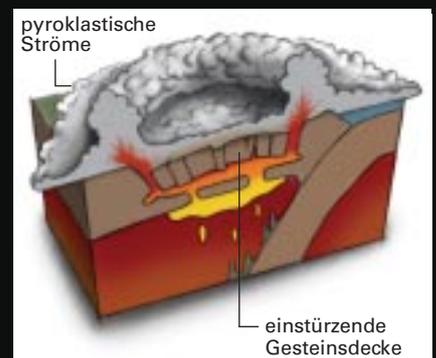
steigt, oder über Subduktionszonen, wo sich eine der großen Gesteinsplatten, aus denen die Erdschale besteht, unter eine andere schiebt. Der Eruptionszyklus von Supervulkanen



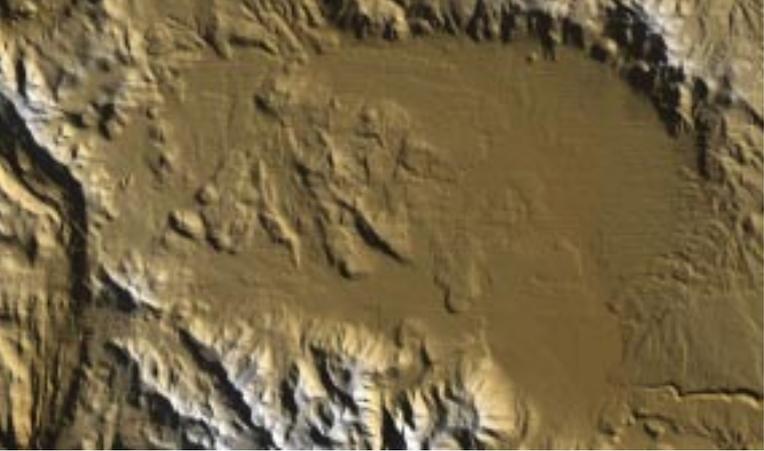
1 Über einer absinkenden tektonischen Platte aus ozeanischer Kruste erweicht und schmilzt das Mantelgestein teilweise. Das so entstandene Magma bahnt sich seinen Weg nach oben zur Basis der kontinentalen Kruste, wo es sich staut. Diese untere Magmakammer wirkt wie ein überdimensionaler Bunsenbrenner, der Teile der kontinentalen Kruste zum Schmelzen bringt und so eine zweite, höher gelegene Magmakammer erzeugt. Ein Teil des Mantel magmas steigt durch schmale, vertikale Röhren in diese obere Kammer auf.



2 Wenn sich die obere Magmakammer ausdehnt, wölbt sich der Erdboden darüber und zerbricht ringförmig an ihrem Rand. Die vorwiegend aus Krustengestein gebildete Schmelze in dieser Kammer enthält viel Kieselsäure und hat eine relativ niedrige Temperatur. Das macht sie zäh und für Gase schlecht durchlässig. Wenn sich ein Pfropfen davon plötzlich durch einen vertikalen Riss einen Weg zur Oberfläche bahnt, entweicht das von unten nachdrängende, unter hohem Druck stehende Magma daher mit explosiver Gewalt, statt langsam auszulaufen.



3 Weitere explosive Schöte an den Brüchen am Rand der Magmakammer bilden und vereinigen sich schließlich zu einem Feuerring. Dadurch verliert die Kammerdecke ihre seitliche Verankerung und sinkt ab. Dabei drückt sie weiteres Magma durch die ringförmigen Brüche nach oben. Beim plötzlichen gewaltsamen Austritt verwandelt sich dieses Magma in pyroklastische Ströme: gluthheiße Lawinen aus Asche, Gas und Gesteinsbrocken, die sich mit hoher Geschwindigkeit ausbreiten und die Landschaft im Umkreis von einigen Dutzend Kilometern verwüsten.



LINKS: USGS; MIT FRDL. GEN. VON J.S. LACKEY, COLLEGE OF WOOSTER;
RECHTS: TODD CULLINGS, NATIONAL PARK SERVICE



Bis in die 1970er Jahre hinein hielten viele Geologen den Bishop-Tuff für das Ergebnis einer Reihe von Eruptionen über Jahrmillionen hinweg. Dass ein einzelner Ausbruch eine derart mächtige Ablagerung schaffen könnte, schien undenkbar. Doch akribische Untersuchungen an winzigen Einschlüssen aus glasartig erstarrtem Magma in kleinen Quarzkristallen bewiesen das Gegenteil.

Wie schnell eine Gesteinsschmelze austritt, hängt vor allem von ihrer Fließfähigkeit und vom Druck ab, der in der Magmakammer herrscht. Dieser lässt sich an der Größe mikroskopisch feiner Gasbläschen in den Einschlüssen ablesen. Entsprechende Messungen haben Alfred T. Anderson von der Universität Chicago und seine Kollegen schon vor

rund 25 Jahren vorgenommen. Auf Grund dieser sowie anderer Laboruntersuchungen und Freilandbeobachtungen aus den 1990er Jahren sind die Geologen inzwischen zu der Überzeugung gelangt, dass der Bishop-Tuff – und wahrscheinlich die meisten analogen Ablagerungen – bei einem einzigen Ausbruch innerhalb von nur zehn bis hundert Stunden ausgestoßen wurde.

Dieser Sinneswandel erforderte auch Retuschen am Bild einer Supervulkaneruption. Sie hat wenig Ähnlichkeit mit dem, was etwa am Kilauea auf Hawaii zu beobachten ist – wo Lava in Fontänen emporschießt, die höchstens einige hundert Meter hoch sind, und dann in rotglühenden Strömen die Bergflanken herabrinnt. Bei einem Ereignis vom Kaliber der Ausbrüche im Long Valley oder in Yellowstone werden stattdessen in einem weiten Ring rund um die Magmakammer explosionsartig schaumartige Gemische aus Gas, Lava und Asche mit Überschallgeschwindigkeit ausgeschleudert und im Sog der von ihnen erhitzten und dadurch wie in einem Kamin aufsteigenden Luft rund fünfzig Kilometer hoch bis in die Stratosphäre katapultiert. Sobald die Decke der Magmakammer einstürzt, verstärkt sich dieses Inferno noch.

Leise rieseln die Ascheflocken

Das aus der Stratosphäre zurückfallende Material bildet rötlich graue Glutwolken – so genannte pyroklastische Ströme –, die rings um die Caldera horizontal Dutzende von Kilometern weit über den Boden schießen. Sie bestehen aus Lava und Ascheteilchen, aufgewirbelt und in der Schwebe gehalten durch glutheiße Gase. Dadurch bewegen sie sich extrem schnell – mit Geschwindigkeiten bis zu 400 Kilometer pro Stunde, wie einige Quellen behaupten. Autos und Kleinflugzeuge hätten auf der Flucht vor ihnen also keine Chance. Da diese Ströme 600 bis 700 Grad Celsius heiß sind, brennen sie alles auf ihrem

▲ **Schlafende Supervulkane wie der im kalifornischen Long Valley (links) erscheinen nicht als deutlich erkennbare Kegel ähnlich dem Mount St. Helens im US-Staat Washington (oben). Ihr Kennzeichen sind vielmehr riesige Talkessel, die als Calderen bezeichnet werden. Sie bildeten sich, als der Erdboden in die Magmakammern einbrach, aus denen sich die jüngsten Supereruptionen speisten.**

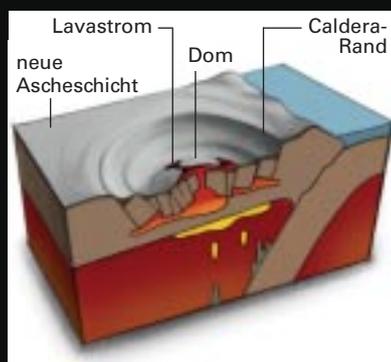
Weg nieder, bevor sie es unter sich begraben.

Aber auch Gebiete jenseits ihrer Reichweite bleiben nicht verschont. Noch einige hundert Kilometer von der Ausbruchsstelle entfernt schneit es tagebis wochenlang gräuliche Ascheflocken. In einem Umkreis von 200 Kilometern um die Caldera dringt kaum noch Sonnenlicht zur Erdoberfläche: Der Himmel ist selbst um die Mittagszeit so dunkel wie sonst während der Dämmerung. Häuser, Menschen und Tiere werden verschüttet und teilweise zerdrückt.

Selbst in 300 Kilometer Entfernung könnte noch ein halber Meter Asche fallen. Mit Regenwasser getränkt, hätte sie ein Gewicht, das Dächer zum Einsturz brächte. Schon eine geringere Aschemenge würde die Stromversorgung unterbrechen und die Telekommunikation lahmlegen. Selbst ein Millimeter – eine Menge, die gut und gerne auf die Hälfte des Erdballs herabrieseln könnte – hätte die Schließung von Flughäfen und einen dramatischen Rückgang der landwirtschaftlichen Produktion zur Folge.

Nur allmählich spült der durch Vulkangase angesäuerte Regen den dicken Ascheteppich fort. Dabei verstopft er, da Asche und Bimsstein aufschwimmen, vermutlich die Wasserwege, sodass die Binnenschifffahrt zum Stillstand kommt. Bei Erdölbohrungen im Golf von Mexiko stießen Explorateure jüngst vor dem Mississippi-Delta auf eine überraschend ▷

zerfällt in vier grundlegende Phasen, die in diesen Grafiken schematisch dargestellt sind.



JEN CHRISTIANSEN

4 Nach dem Ausbruch erstreckt sich eine kraterähnliche Senke, Caldera genannt, über der teilweise entleerten Magmakammer. Mit der Zeit beginnen die eingestürzten Gesteinsschichten durch die Hitze von unten her zu schmelzen. Dadurch entsteht eine kleinere Menge frischen Magmas, das gemeinsam mit anderen Kräften das Zentrum der Caldera zu einem Dom aufwölbt. Dort kann wiederholt in begrenztem Umfang Lava ausfließen, bevor sich genügend Magma angesammelt hat, um eine neue Supereruption zu speisen.



US DEPARTMENT OF ENERGY



ILYAN, BINDEMAN

▷ mächtige Schicht von Auswurfmaterial einer Supervulkaneruption – mehr als 1500 Kilometer von ihrem Ursprung im Yellowstone-Nationalpark entfernt. In dieser Menge kann es sich dort nur am Meeresboden angesammelt haben, indem es den Mississippi hinabtrieb, im Meerwasser verklumpte und zu Boden sank.

Fatal dürften sich auch die riesigen Mengen an vulkanischen Gasen auswirken, die in die oberen Atmosphäreschichten geblasen werden und dort jahrelang verbleiben. Einige Konsequenzen scheinen nach neueren Untersuchungen zwar weniger gravierend zu sein als früher vermutet, andere dafür aber umso schlimmer.

Von den diversen Gasen, die bei einem Vulkanausbruch austreten, ist Schwefeldioxid (SO_2) das übelste. Es verbindet sich mit einem Sauerstoffatom zu Schwefeltrioxid (SO_3), das begierig Feuchtigkeit anzieht und dabei winzige Tröpfchen von Schwefelsäure (H_2SO_4) bildet. Sie schwe-

▲ An einem Hang des Yucca Mountain in Nevada sind zwei ausgedehnte vulkanische Ablagerungen als horizontale Schichten zu erkennen. Sie stammen von Supereruptionen, die sich vor etwa 12,8 und 12,9 Millionen Jahren in der Nähe ereigneten und die Gegend unter glutheißen Aschelawinen begruben.

ben in der Luft und verteilen sich rasch über die gesamte Atmosphäre. Dort streuen sie das Sonnenlicht zurück ins All und tragen so die Hauptschuld an der dramatischen weltweiten Abkühlung, die auf eine Supereruption folgt.

Der Wasserkreislauf aus Verdunstung und Niederschlag benötigt Monate oder gar Jahre, um die Säuretröpfchen in den hohen Luftschichten komplett auszuwaschen. Viele Forscher entwickelten daher apokalyptische Visionen von »vulka-

▲ Diese graue Gesteinswand im Westen Nebraskas entstand aus Asche, die sich bei einer nicht lokalisierten Supereruption vor 28 Millionen Jahren meterhoch auftürmte. Chemische Analysen des Materials lassen darauf schließen, dass solche Explosionen die Ozonschicht in der Stratosphäre schädigen können.

nischen Wintern«, die Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte andauern sollten. Nach Erkenntnissen aus den letzten Jahren scheint das jedoch stark übertrieben.

Die bei großen Vulkanausbrüchen gebildete Schwefelsäure hinterlässt, wenn Niederschläge sie aus der Atmosphäre auswaschen, fast immer auch Spuren in Schnee und Eis. Diese haben sich teilweise bis heute erhalten. So entdeckten Forscher bei der Untersuchung von Eisbohrkernen aus Grönland und der Antarktis

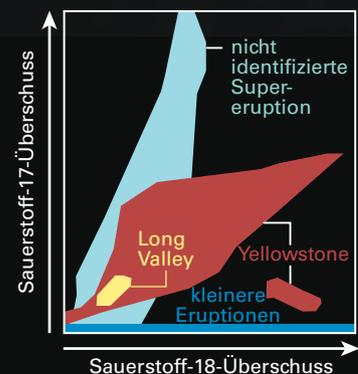
Ozonabbau durch Vulkangase

Schädliche Gase, die der Vulkan Pinatubo auf den Philippinen 1991 ausspie, erschienen auf Satellitenbildern der oberen Atmosphäre als farbige Wolken (Hintergrund). Solche Gase – primär Schwefeldioxid – würden von einem Supervulkan in noch viel größeren Mengen freigesetzt und erst nach Jahren aus der Atmosphäre ausgewaschen, indem sie mit Sauerstoff und Wasser Schwefelsäure bilden, die mit dem Regen niedergeht. Am Boden kann die Säure dann mit Vulkanasche zu Sulfaten reagieren.

Sulfatproben aus vier Supervulkanablagerungen legen nahe, dass das Schwefeldioxid die irdische Ozonschicht angreift. Sie enthalten einen ungewöhnlich hohen Anteil an dem sehr seltenen Sauerstoffisotop der Masse 17 (die farbigen



Flächen im Diagramm rechts umreißen die Bereiche, in welche die Messwerte fallen). Eine solche Anreicherung kann nur durch die Reaktion der schwefelhaltigen vulkanischen Gase mit Ozon in der oberen Atmosphäre zu Stande gekommen sein. Sulfate aus Schwefelsäure, die am Erdboden entstanden ist, weisen keine derartige Anomalie auf – was auch für die Ascheablagerungen der meisten kleineren Eruptionen gilt (blauer Balken).



ATMOSPHERE OBERN NASA, JSC
DIAGRAMM LINKS: ILYAN, BINDEMAN

► **Skelette von urtümlichen Nashörnern, die unter der Asche eines katastrophalen Vulkanausbruchs in Idaho vor 12 Millionen Jahren begraben wurden, liegen heute in der Fossilagerstätte Ashfall Fossil Beds im Nordosten Nebraskas zu Tage. Die meisten Tiere verendeten wohl langsam, als die fallende feine Asche ihre Lungen verstopfte oder Bestandteile im vulkanischen Auswurfmaterial ihr Trinkwasser vergifteten.**



RICK OTTO, UNIVERSITY OF NEBRASKA STATE MUSEUM

vor zehn Jahren einen abrupten Anstieg der Schwefelsäurekonzentration, der sich der Supereruption von Toba vor 74 000 Jahren zuschreiben ließ. Damals traten 2800 Kubikkilometer Lava und Asche aus. Kurzfristig sank die Durchschnittstemperatur auf der Erde um fünf bis fünfzehn Grad Grad Celsius. Die Konsequenzen waren ohne Zweifel dramatisch, doch dauerte die Abkühlung nicht so lange wie früher angenommen. Nach nur sechs Jahren enthielt das Eis bereits keine Schwefelsäure mehr. Aus der Atmosphäre war sie, wie einige Forscher meinen, wohl sogar noch schneller verschwunden.

Ausdünnung des Ozonschildes

Vulkanische Winter halten demnach längst nicht so lange an wie erwartet. Das ist die gute Nachricht. Die schlechte lautet, dass für relativ lange Zeit ein riesiges Ozonloch entstehen kann. Das Sauerstoffatom für die Umwandlung von SO_2 in SO_3 muss von irgendeiner Verbindung stammen, die bereits in der Atmosphäre vorhanden ist. Um welche es sich in erster Linie handelt, darüber streiten die Experten noch immer. Als ich mich 2003 dem Team von John M. Eiler am California Institute of Technology in Pasadena anschloss, suchten wir gemeinsam in meinen Ascheproben aus den prähistorischen Eruptionen von Yellowstone und Long Valley nach der Lösung des Rätsels.

Von Anfang an richtete sich unser Verdacht auf Ozon, weil es gegenüber normalem Luftsauerstoff ein überzähliges, drittes Sauerstoffatom enthält, das es geradezu begierig abgibt. Dieses Gas weist eine ungewöhnliche Isotopenanomalie auf: Auf Grund quantenmechanischer Effekte bei seiner Bildung in Gegenwart von Sonnenstrahlung ist darin Sauerstoff-17 besonders stark angereichert. Weil bei dieser Anreicherung – anders also sonst üblich – die etwas grö-

ßere Masse des Teilchens keine Rolle spielt, spricht man von einer massenunabhängigen Sauerstoffisotopen-Signatur.

Ozon findet sich in besonders hoher Konzentration in der Stratosphäre, wo es, wie heute weithin bekannt, die Erdoberfläche vor der gefährlichen ultravioletten Sonnenstrahlung abschirmt. Wenn es nun mit SO_2 reagiert, überträgt es seine spezielle Sauerstoffisotopen-Signatur auf das dabei gebildete SO_3 und die daraus entstehende Schwefelsäure. Im Jahr 2003 entdeckten Geochemiker an der Universität von Kalifornien in San Diego den ersten Hinweis darauf, dass diese Anomalie auch im resultierenden sauren Regen auftritt – sowie schließlich in den Sulfatverbindungen, die sich bilden, wenn die ausgewaschene Schwefelsäure am Erdboden mit dort abgelagerter Asche reagiert.

Tatsächlich fanden Eiler und ich im Sulfat aus Ascheproben von den Supervulkanausbrüchen in Yellowstone und im Long Valley einen Überschuss an Sauerstoff-17. Dies und andere chemische Muster legten die Vermutung nahe, dass damals reichlich Ozon aus der Stratosphäre verschwand, weil es mit Gasen reagierte, die bei diesen gigantischen Eruptionen ausgestoßen wurden.

Andere Forscher fanden in den schon erwähnten sauren Schichten im Eis der Antarktis ähnliche Anomalien. Demnach dürfte auch beim Toba-Ausbruch die stratosphärische Ozonschicht erheblich gelitten haben. Es sieht allmählich so aus, als ob die Emissionen von Supervulkanen Ozonlöcher hervorrufen, die länger bestehen bleiben als der parallel dazu ausgelöste Temperatursturz. Die Folgen wären fatal: Gefährliche ultraviolette Sonnenstrahlung würde in höherer Intensität die Erdoberfläche erreichen und genetische Schäden bei den Lebewesen verursachen.

Ausmaß und Dauer des vermuteten Ozonschwunds sind noch umstritten.

Satellitenmessungen zufolge ist die Ozonschicht nach dem Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen im Juni 1991 um drei bis acht Prozent geschrumpft. Doch was würde nach einer hundertmal stärkeren Eruption passieren? Mit simpler Arithmetik ist die Antwort leider nicht zu finden, weil die Details der Ozonchemie in der Atmosphäre extrem komplex und noch nicht vollständig geklärt sind.

Verfahren zur Untersuchung und Überwachung von Vulkanen jeder Größenordnung gibt es bereits, und ihre Entwicklung macht rasche Fortschritte. Doch wie viel wir auch hinzulernen, eine Eruption können wir nicht verhindern. Eines ist immerhin beruhigend: Inzwischen wissen wir genug über die möglichen Ausbruchsregionen und die Eruptionsmechanismen, um mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit sagen zu können, dass es in naher Zukunft zu keiner Supervulkankatastrophe kommen wird. ◁



Ilya N. Bindeman ist Professor für Geologie an der Universität von Oregon in Eugene, wo er ein geochemisches Labor eingerichtet hat. In Moskau geboren, untersuchte er zunächst Vulkane auf der sibirischen Halbinsel Kamtschatka, bevor er 1998 an der Universität Chicago promovierte.

Rare sulfur and triple oxygen isotope geochemistry of volcanogenic sulfate aerosols. Von I. N. Bindeman et al. in: Earth and Planetary Letters, im Druck

Sulfate oxygen-17 anomaly in an oligocene ash bed in Mid-North America: was it the dry fogs? Von Bao Huiming et al. in: Geophysical Research Letters, Bd. 30, S. 1483 (2003)

Low- $\delta^{18}\text{O}$ rhyolites from Yellowstone: magmatic evolution based on analyses of zircons and individual phenocrysts. Von I. N. Bindeman und J. W. Valley in: Journal of Petrology, Bd. 42, S. 1491 (2001)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz »Spektrum der Wissenschaft« oder »Sterne und Weltraum« kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.

www.wissenschaft-schulen.de

Speziell für diesen Artikel ist eine Lehrerhandreichung für eine Unterrichtseinheit »Parkinson, Klassenstufe 9/10« online abrufbar.

Parkinson:

Was Neuronen schwinden lässt

Neue Erkenntnisse auf Gen- und Zellebene wecken die Hoffnung auf bessere Therapien für diese immer häufigere Krankheit.

Von Andres M. Lozano
und Suneil K. Kalra

Als »Schüttellähmung« beschrieb der britische Arzt und Paläontologe James Parkinson sie erstmals 1817. Inzwischen gehört die später nach ihm benannte Krankheit zu den häufigsten neurologischen Störungen: Weltweit leiden nach Angaben der Vereinten Nationen mindestens vier Millionen Menschen daran, allein in Nordamerika schätzungsweise bis zu einer Million, wobei dort jedes Jahr rund 50 000 Fälle neu diagnostiziert werden. In Deutschland sind etwa 250 000 Personen erkrankt.

Mit steigender Lebenserwartung werden sich die Zahlen global bis 2040 voraussichtlich verdoppeln. Schon jetzt sind Parkinson und andere neurodegenerative Leiden wie Alzheimer und amyotrophe Lateralsklerose auf dem besten Weg, Krebs als Todesursache Nummer 1 abzulösen. Die Schüttellähmung trifft aber nicht bloß Ältere: 50 Prozent erkranken vor dem 60. Lebensjahr, manche davon

sogar schon vor dem 40., wie sich durch bessere Diagnostik gezeigt hat.

Zwar gibt es Therapieverfahren – vor allem Medikamente und »Hirnschrittmacher« –, doch lindern sie nur die Symptome und zielen nicht auf die Ursachen (siehe Kasten auf S. 52/53). Kein Mittel kann das Fortschreiten der pathogenen Prozesse bisher verlangsamen, geschweige denn stoppen oder gar einem Ausbruch vorbeugen. In den letzten Jahren haben jedoch einige viel versprechende Entwicklungen eingesetzt, insbesondere dank Einblicken in die genetischen Hintergründe dieser Krankheit und in die damit verbundenen fehlerhaft arbeitenden Proteine im Gehirn. Dies gibt Anlass zu Optimismus, hier auf ganz neue Weise therapeutisch ansetzen zu können.

Der alte, eigentlich irreführende Name Schüttellähmung – denn nichts ist gelähmt – spielt auf die typischen Bewegungsstörungen von Parkinson-Kranken an, vielen bekannt durch Fernsehbilder prominenter Patienten wie Muhammad Ali oder Papst Johannes Paul II. Hände, Arme und andere Körperteile

zittern (aber auch das nicht zwangsläufig), die Muskulatur der Glieder versteift, die Bewegung verlangsamt sich, Gleichgewicht und Koordination sind beeinträchtigt. Teils haben die Patienten auch Gangstörungen sowie Probleme mit dem Sprechen, Schlafen, Wasserlassen und ihrer sexuellen Leistungsfähigkeit. Depressionen und kognitive Beeinträchtigungen können ebenfalls auftreten.

All diese Symptome beruhen darauf, dass Nervenzellen absterben. Betroffen sind zahlreiche Neuronen überall im Gehirn, besonders stark aber jene des Schwarzen Kerns (Substantia nigra), die Dopamin als chemischen Signalüberträger produzieren. Diese Dopamin-Neuronen sind Schlüsselkomponenten der Basalganglien: komplexer Schaltkreise tief im Inneren des Gehirns, die mit der Feinabstimmung und Koordination von Bewegungen zu tun haben (siehe Kasten auf S. 48).

Zunächst kann das Gehirn den beginnenden Verlust noch funktionell ausgleichen, obwohl die absterbenden Zellen nicht ersetzt werden. Das gelingt jedoch nicht mehr, wenn erst einmal mindestens die Hälfte dieser hoch spezialisierten Zellen untergegangen ist. Die motorischen Kontrollinstanzen – im Thalamus (einer zentralen Schaltstelle im Zwischenhirn), in den Basalganglien und in der Großhirnrinde – funktionieren dann nicht mehr als ein zusammengehörendes, koordiniertes Ganzes. Es kommt zu ganz ähnlichen Folgen wie auf einem Großflughafen, auf dem die Flugsicherung ausfällt: weithin Verspätungen, Fehlstarts, Flugstreichungen und letztlich Chaos.

Eine Obduktion nach dem Tod offenbart in vielen Fällen Proteinklumpen

IN KÜRZE

- ▶ Die Parkinson-Krankheit ist eine der häufigsten **neurologischen Störungen des Gehirns**, bei denen Nervenzellen untergehen. Der Schwund lässt sich bisher nicht verlangsamen, stoppen oder gar verhüten. Standardbehandlungen lindern nur die Symptome.
- ▶ Erkenntnisse über Proteinefehlfunktionen und **genetische Grundlagen** der Krankheit haben der Forschung aber neue Richtungen gewiesen, die einen gewissen Optimismus rechtfertigen, was die **Entwicklung neuer Therapieverfahren** anbelangt.
- ▶ **Störungen bei Faltung und Beseitigung von Proteinen** erscheinen nun als zentrales Element der Krankheit.



KIRSTEN WAGENBRENNER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

in den Dopamin-Neuronen des Schwarzen Kerns. Sie werden als Lewy-Körperchen bezeichnet, nach dem deutschen Pathologen Friedrich Lewy (einem Mitarbeiter von Alois Alzheimer), der sie 1912 erstmals beobachtete. Ähnliche Aggregate kommen auch bei der Alzheimer- und Huntington-Krankheit vor. Und wie bei diesen beiden neurodegenerativen Leiden tobt ein hitziger Expertenstreit darüber, ob die Proteinansammlungen selbst die Schäden anrichten oder ob sie Schutzfunktion haben und dazu dienen, für die Neuronen gefährlich gewordene Moleküle aus dem Verkehr zu ziehen. Die meisten Spezialisten, gleich welchen Lagers, sind sich aber darin einig, dass ein Schlüssel zum Verständnis der Parkinson-Krankheit im Verständnis eben dieser Anhäufungen liegt.

Anstandslos in den Abfall

Inzwischen zeichnet sich ab, welche zentrale Rolle hierbei zwei Zellprozesse spielen: Proteinfaltung und Proteinbeseitigung (siehe Kasten S. 50/51). Die Zellen fertigen ihre Eiweißstoffe gemäß den Bauanweisungen ihrer Gene. Schon während die Bausteine, die Aminosäuren, zu langen Ketten verknüpft werden, stehen molekulare »Anstandsdamen« parat: Nach

dem Französischen als Chaperone bezeichnet, helfen sie der Kette, sich in die richtige dreidimensionale Form zu falten. Auch wenn Proteinmoleküle wieder außer Fassung geraten, helfen sie ihnen, ihre funktionsfähige Gestalt zurückzugewinnen.

Versagt das Chaperon-System aus irgendeinem Grund, werden Eiweißstoffe, die weshalb auch immer falsch gefaltet sind, zu einem Fall für eine Art Abfallbeseitigung analog dem grünen Punkt. Ein kleines Protein namens Ubiquitin wird in hoher Stückzahl an die missrateten Moleküle angeklippt, bis sie mit unterschiedlich langen Ubiquitinketten regelrecht behängt sind. Das bedeutet das Aus und ruft das so genannte Proteasom der Nervenzelle auf den Plan: Dieses Abfallbeseitigungssystem zerlegt solche Eiweißstoffe dann in ihre Aminosäurebausteine, die wiederverwertet werden können. Für ihre Arbeiten zur Aufklärung der Proteasomenfunktion erhielten Aaron Ciechanover und Avram Hershko vom Technion-Israel-Institut für Technologie in Haifa und Irwin Rose von der Universität von Kalifornien in Irvine 2004 den Chemie-Nobelpreis (SdW 12/2004, S. 14).

In den letzten paar Jahren sind viele Fachleute zur Ansicht gelangt, dass eine

▲ Zittern ist nur eines der typischen Symptome der Parkinson-Krankheit, die global schätzungsweise bereits vier Millionen Menschen betrifft.

Fehlfunktion der Chaperon- und Ubiquitin-Proteasom-Systeme die Ursache des Morbus Parkinson ist. Nach ihren Überlegungen könnte die Krankheit ungefähr folgendermaßen entstehen. Irgendeine Schädigung der Neuronen im Schwarzen Kern löst in diesen eine Kaskade von Stressreaktionen aus (siehe »Freie Radikale und die Parkinson-Krankheit«, SdW 3/1997, S. 52). In deren Gefolge sammelt sich eine große Zahl falsch gefalteter Proteinmoleküle an. Sie ballen sich zusammen, was anfangs möglicherweise einen Schutz darstellt – da die lokal zusammengedrängten fehlerhaften Moleküle anderswo in der Zelle keinen Schaden mehr anrichten können.

Anschließend machen sich Chaperone daran, die Proteine wieder richtig zu falten. Wo das misslingt, schreitet das Abfallbeseitigungssystem ein. Übersteigt die Entstehung missratener Eiweißstoffe aber die Verarbeitungskapazitäten der Zelle, kommt es zu Problemen: Das Ubiquitin- ▷

▷ Proteasom-System gerät ins Stocken, Chaperone werden Mangelware und neurotoxische Proteine sammeln sich an. Am Ende steht der Tod der Nervenzelle.

Nach Ansicht der Befürworter dieser Hypothese könnte sie auch die beiden Grundformen der Parkinson-Krankheit erklären. Schätzungsweise rund 95 Prozent aller Patienten leiden an der »sporadischen Form« – dem Ergebnis eines komplizierten Wechselspiels zwischen genetischer Disposition und Umwelt. Ist ein anfälliger Mensch bestimmten Umweltfaktoren ausgesetzt, etwa Pestiziden oder anderen Chemikalien (siehe Kasten rechts), so leiden die Neuronen seines Schwarzen Kerns unter verstärktem Stress und häufen in ihrem Inneren mehr falsch gefaltete Proteine an als bei

Nichtanfälligen. In den restlichen Fällen – rund fünf Prozent – wird die Parkinson-Krankheit offensichtlich fast ausschließlich von genetischen Faktoren verursacht. Während der letzten zehn Jahre offenbarte sich ein Zusammenhang zwischen Mutationen auf der einen Seite und der Ansammlung missgestalteter Proteine oder dem Versagen der zelleigenen Schutzmaschinerie auf der anderen.

Eingeleitet wurde diese aufregende Entwicklung des Forschungsfelds 1997. Damals entdeckten Mihael H. Polymeropoulos und seine Kollegen von den US-amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) eine Mutation im Gen für ein Protein namens Alpha-Synuclein, und zwar bei italienischen und griechischen Familien mit ei-

ner Form der Parkinson-Krankheit, die dominant vererbt wird. Schon ein Exemplar des veränderten Gens (vom Vater oder von der Mutter) kann also die Erkrankung auslösen. Einschlägige Mutationen in diesem Gen, das auf Chromosom 4 liegt, sind zwar äußerst selten: Sie kommen bei weit weniger als einem Prozent aller Parkinson-Patienten vor. Doch der erkannte Zusammenhang zwischen dem zugehörigen Protein und Parkinson entfachte eine Welle neuer Forschungen.

Aufschlussreiche Gendefekte

Zu diesem Schub kam es unter anderem deshalb, weil sich alsbald herausstellte, dass Alpha-Synuclein, ob nun normal oder verändert, ein Bestandteil der Proteinklumpen in den Zellen ist. Von einer genaueren Untersuchung darüber, wie die Mutation zur Erkrankung führt, versprach man sich auch Hinweise auf die Hintergründe der viel häufigeren sporadischen Form: wie also dort letztlich die Lewy-Körper in den Dopamin-Zellen der Schwarzen Substanz entstehen.

Alpha-Synuclein ist ein sehr kleines Protein aus nur 144 Aminosäuren, das vermutlich an der Signalübertragung zwischen den Neuronen beteiligt ist. Mehrere verschiedene Mutationen in seinem Gen sind inzwischen bekannt; alle verändern die Information nur geringfügig, zwei davon haben jeweils nur den Austausch einer einzigen Aminosäure zur Folge. Wie man aus Untersuchungen an Tauflieden, Fadenwürmern und Mäusen weiß, lässt mutiertes Alpha-Synuclein, im Übermaß erzeugt, die Dopamin-Neuronen degenerieren. Motorische Störungen sind die Folge.

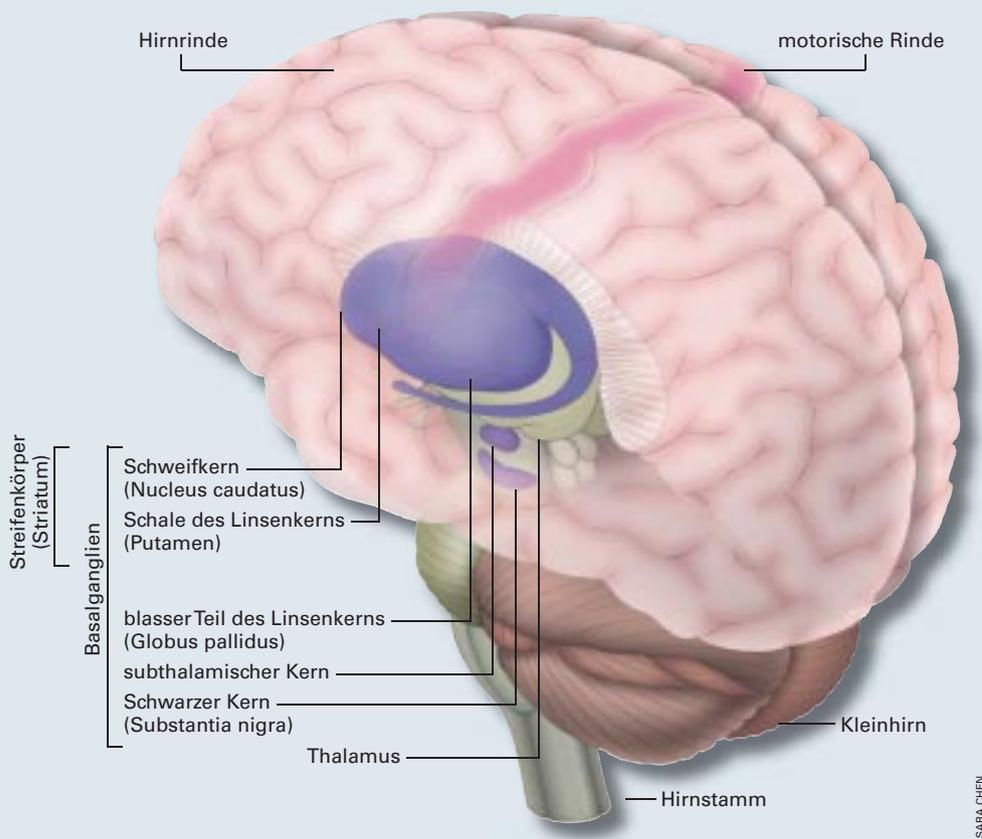
Mutiertes Alpha-Synuclein wird nicht richtig gefaltet, sammelt sich in den Lewy-Körpern an und hemmt auch noch das Ubiquitin-Proteasom-System, widersetzt sich also dem Abbau. Das ergaben weitere Studien. In jüngerer Zeit stellte sich schließlich heraus, dass auch überzählige Kopien des normalen Gens für Alpha-Synuclein – und damit entsprechende Übermengen des intakten Proteins – die Krankheit auslösen können.

Schon ein Jahr nach der Entdeckung des mutierten Gens konnten Yoshikuni Mizuno von der Juntendo-Universität und Nobuyoshi Shimizu von der Keio-Universität, beide in Tokio, ein zweites relevantes Gen nachweisen. Es trägt die Bauanweisung für ein Parkin getauftes Protein und ist bei einer anderen famili-

Von Parkinson betroffene Gehirnareale

Bei der Schüttellähmung sterben vor allem Dopamin produzierende Nervenzellen im Schwarzen Kern ab, fachlich Substantia nigra genannt. Dieser dunkel gefärbte Bereich in jeder Hirnhälfte reguliert Willkürbewegungen und beeinflusst auch die Stimmung. Anfangs kann das übrige Gehirn den Verlust ausgleichen – bis etwa 50 bis 80 Prozent der Zellen im

Schwarzen Kern zerstört sind. Dann leidet das Zusammenspiel mit anderen Gehirnteilen, die mit der motorischen Steuerung zu tun haben, darunter die übrigen Basalganglien (zu denen der Schwarze Kern gehört), der Thalamus im Zwischenhirn sowie die Großhirnrinde. Bewegungen werden unkontrollierbar und ungenau.



Schädliche Umwelteinflüsse

Für die jahrzehntealte Annahme, irgendwelche Faktoren aus der Umwelt könnten die Parkinson-Krankheit verursachen, fand sich erstmals in den 1980er Jahren ein Beleg: Damals untersuchte J. William Langston vom Parkinson-Institut im kalifornischen Sunnyvale eine Gruppe von Drogensüchtigen, die wenige Tage nach dem Konsum des synthetischen Heroins »China White« parkinsonartige Symptome entwickelt hatten. Wie sich herausstellte, enthielt die Rauschgiftcharge eine Verunreinigung namens MPTP (Methyl-phenyl-tetrahydropyridin), die Neuronen im Schwarzen Kern abzutöten vermochte. Mit einer ge-



CORBIS, ANNIE GRIFFITHS BELT

Manche Pestizide, darunter auch ein Mittel, das im biologischen Landbau außerhalb Deutschlands verwendet wird, rufen bei Tieren parkinsonartige Störungen hervor.

eigneten Therapie erlangten einige Betroffene wieder teilweise die Kontrolle über ihre Bewegungen; die meisten blieben jedoch wie erstarrt.

Von da an begann die Suche nach anderen Verbindungen mit ähnlicher Wirkung. Epidemiologische Studien und Tierversuche erbrachten bisher einen Zusammenhang zwischen einigen Parkinsonfällen und einer hohen Exposition gegenüber Pestiziden sowie Herbiziden und Fungiziden, darunter Paraquat und Maneb. Darüber hinaus wies J. Timothy Greenamyre von der Universität Pittsburg (Pennsylvania) an Tieren nach, dass das Pestizid Rotenon, das aus pflanzlichen Quellen gewonnen und außerhalb Deutschlands häufig im biologischen Landbau eingesetzt wird, problematische Effekte haben kann: Es veranlasst ein Verklumpen von Proteinen, tötet Dopamin-Neuronen, hemmt die Mitochondrien (die Kraftwerke der Zellen) und verursacht motorische Störungen.

Manche Substanzen dürften umgekehrt vor Parkinson schützen. Rauchen und Kaffeekonsum wird inzwischen eine gewisse Schutzwirkung zugesprochen – aber beim Rauchen wiegen die Gefahren natürlich bei Weitem diesen einen möglichen Nutzen auf.

ANZEIGE

ären Form der Parkinson-Krankheit mutiert. Am häufigsten kommt diese Mutation bei Personen vor, bei denen die Krankheit schon vor dem 40. Lebensjahr diagnostiziert wird; je jünger die Betroffenen beim Ausbruch, desto öfter sind Veränderungen im Parkin-Gen auf Chromosom 6 die Ursache. Unvermeidlich entwickelt sich die Krankheit diesmal nur, wenn jemand von beiden Eltern ein defektes Gen geerbt hat (die Mutation ist also rezessiv). Doch auch Personen mit nur einer veränderten Kopie tragen ein erhöhtes Risiko. Offenbar kommen Mutationen im Gen für Parkin insgesamt häufiger vor als solche in dem für Alpha-Synuclein.

Das Parkin-Protein enthält mehrere Abschnitte oder »Domänen«, die in vielen Eiweißmolekülen vorkommen. Besonders interessant sind zwei so genannte RING-Domänen; denn Moleküle, die sie enthalten, wirken am Proteinabbau mit. Mittlerweile lassen neue Befunde

darauf schließen, dass die Neuronen bei dieser Form der Parkinson-Krankheit unter anderem deshalb absterben, weil die Bestückung mit Ubiquitin versagt. Parkin sorgt für das Anheften an falsch gefaltete Proteine – fehlt es, werden diese nicht mehr markiert und beseitigt. Wie wir kürzlich nachwies, kann auch ein Protein namens BAG5, das in Lewy-Körpern vorkommt, sich an Parkin heften, was dessen Funktionieren beeinträchtigt und den Tod der Dopamin produzierenden Neuronen verursacht.

Interessanterweise haben manche Patienten mit Parkin-Mutationen keine Lewy-Körper in den Neuronen ihres Schwarzen Kerns. Dies deutet darauf hin, ▶ dass einerseits Proteine womöglich keine Aggregate bilden, wenn die Ubiquitin-Bestückung nicht funktioniert ▶ und dass andererseits schädliche Proteine in der Zelle Unheil anrichten, wenn sie nicht in Lewy-Körpern »eingepfercht« werden. ▷

▷ Da Patienten mit Parkin-Mutationen bereits in jungen Jahren erkranken, fehlt ihnen somit wahrscheinlich ein gewisser anfänglicher Schutz, den das »Wegsperr« neurotoxischer Proteine in Form der Klumpen ansonsten bietet.

Es folgten mehrere Entdeckungen, die auf weitere genetisch bedingte Störungen der Zellmaschinerie hinweisen. So identifizierten 2002 Vincenzo Bonifati und seine Kollegen vom Erasmus-Medizinzentrum in Rotterdam auf Chromosom 1 eine Mutation in einem Gen für das Chaperon DJ-1. Gefunden wurde sie sowohl in niederländischen als auch in italienischen Familien und verursacht wie die Veränderung im Parkin-Gen eine rezessive Form der Erkrankung. Verschiedene Arbeitsgruppen entdeckten bei Patienten mit familiärer Parkinson-Krankheit weitere erbliche Veränderungen, zum Beispiel:

- ▶ im Gen für das Enzym UCH-L1 (es macht Ubiquitin wieder verfügbar),
- ▶ im Gen für das PINK-1-Protein (der Defekt führt im Schwarzen Kern wohl zu Stoffwechselversagen mit nachfolgendem Zelltod)
- ▶ sowie im Gen für das Stoffwechsellenzym LRRK2, auch Dardarin genannt (im Baskenland, aus dem diese Patienten stammten, bedeutet der Begriff »Zitern«, fachlich Tremor genannt).

Faltungshelfer aktivieren

Was infolge der Mutationen im Einzelnen alles schief läuft, ist zwar noch kaum geklärt. An den entdeckten Vorgängen sind aber Moleküle beteiligt, deren Aktivität sich mit geeigneten Wirkstoffen möglicherweise so verändern oder nachahmen lässt, dass weniger Zellen untergehen. Die Erkenntnisse könnten daher zu Therapieverfahren führen, die nicht nur die Symptome lindern, sondern die Degeneration der Nervenzellen und damit auch das Fortschreiten der Krankheit eindämmen.

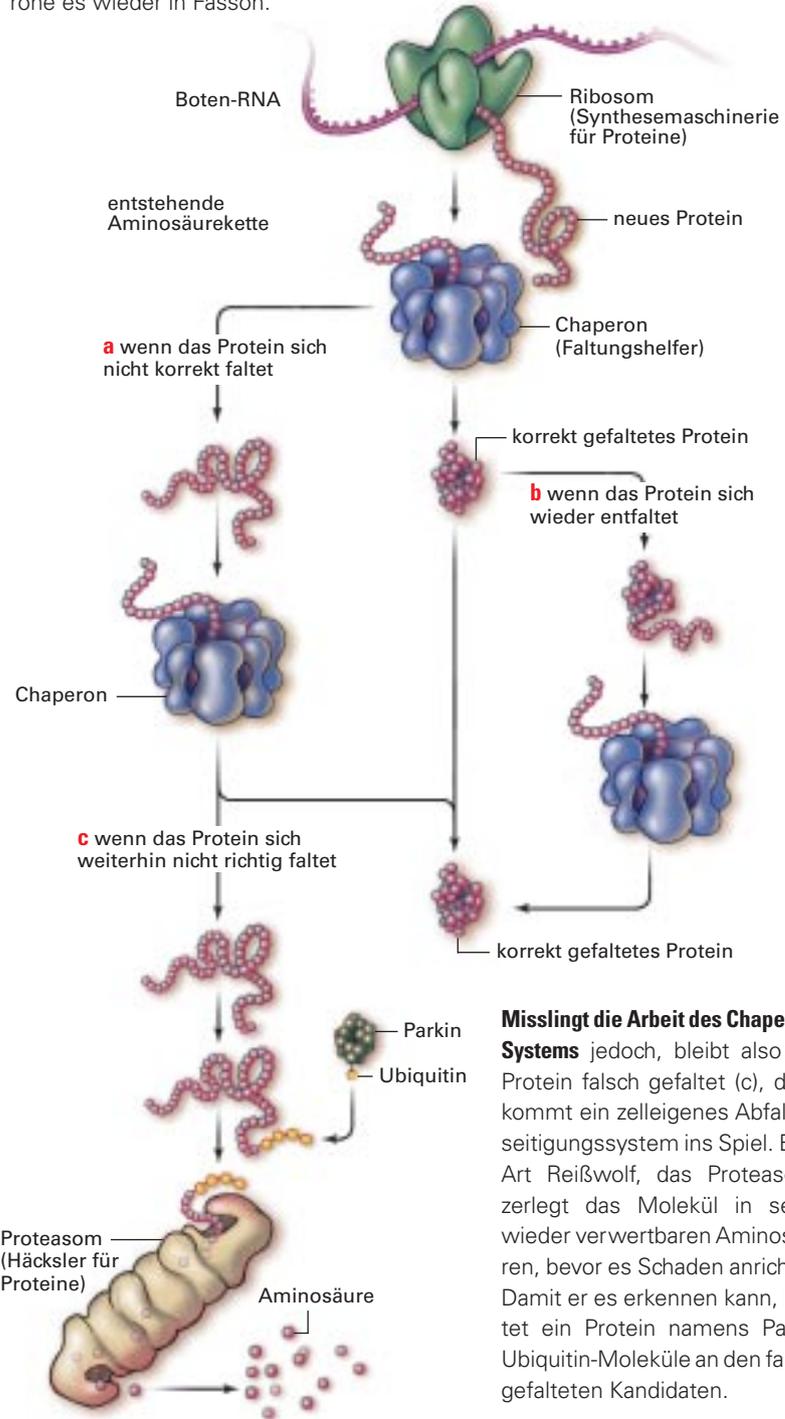
Dieser Ansatz hat bereits zwei viel versprechende Ergebnisse erbracht. So gelang es im Tierexperiment, die Menge an Chaperonen im Schwarzen Kern zu steigern und die Zellen damit vor den Verfallsreaktionen zu schützen, die von mutiertem Alpha-Synuclein ausgelöst werden. Und bei veränderten Taufliegen, die als Modellorganismus für Parkinson dienen, boten Wirkstoffe, welche die Aktivität der Chaperone anregen, Schutz vor neurotoxischen Einflüssen. Vielleicht

Proteine und Parkinson

Ein typisches Kennzeichen von Morbus Parkinson sind so genannte Lewy-Körper, Ansammlungen fehlgefalteter Proteine in Nervenzellen. Ob die Aggregate eine Schutzfunktion besitzen (weil sie gefährlich gewordene Eiweißstoffe aus dem

Proteinfaltung in normalen Zellen

In gesunden Zellen sorgen besondere Eiweißkomplexe, die Chaperone, für die korrekte Faltung von Proteinmolekülen (oben). Wenn ein erzeugtes Protein – eine lange Kette aus Aminosäuren – sich nicht richtig faltet (a) oder später auf Grund irgendwelcher belastender Einflüsse die falsche Form annimmt (b), bringen Chaperone es wieder in Fassung.

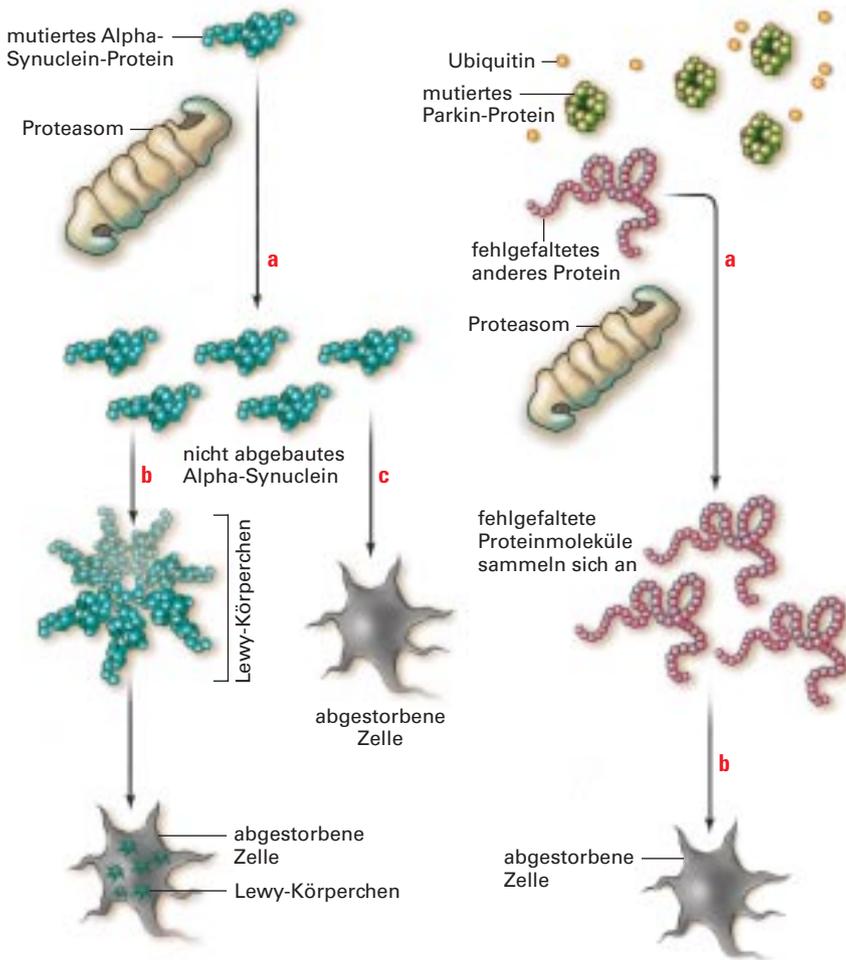


Misslingt die Arbeit des Chaperon-Systems jedoch, bleibt also ein Protein falsch gefaltet (c), dann kommt ein zelleigenes Abfallbeseitigungssystem ins Spiel. Eine Art Reißwolf, das Proteasom, zerlegt das Molekül in seine wieder verwertbaren Aminosäuren, bevor es Schaden anrichtet. Damit er es erkennen kann, heftet ein Protein namens Parkin Ubiquitin-Moleküle an den falsch gefalteten Kandidaten.

Verkehr ziehen) oder selbst letztlich den Tod der Nervenzellen herbeiführen, ist noch offen. Jedenfalls hat die Krankheit, so viel ist klar, mit fehlerhaften Proteinen zu tun.

Was bei Parkinson schief läuft

Aus nicht völlig geklärten Gründen versagt bei Parkinson-Patienten das Chaperon-Proteasom-System. Wenn die Chaperone nicht schnell genug arbeiten oder das Proteasom-System falsch gefaltete Proteine nicht schnell genug abbaut, sammeln diese sich in den Zellen an; das kann zu Schäden und letztlich zum Tod der betroffenen Neuronen führen. Neuere genetische Befunde legen nahe, dass Mutationen in zumindest zwei Proteinen – Alpha-Synuclein (links) und Parkin (rechts) – zu Problemen im Chaperon-Proteasom-System beitragen.



Eine sehr seltene Mutation im Gen für Alpha-Synuclein verursacht Parkinson, weil sie eine Form des Proteins entstehen lässt, die gegen den Abbau durch Proteasomen resistent ist (a). Gruppieren sich mutierte Alpha-Synuclein-Moleküle zu Lewy-Körpern (b), richten sie anscheinend anfangs weniger Schaden an, als wenn sie frei in den Nervenzellen herumtreiben, was deren raschen Untergang herbeiführt (c). Dies deutet darauf hin, dass Lewy-Körper manchmal eine Schutzfunktion haben dürften.

Mutiertes Parkin kann kein Ubiquitin an falsch gefaltete Proteine anheften (a). Deshalb baut das Proteasom sie nicht mehr ab, was letztlich zum Tod der Zelle führt (b). Mutiertes Parkin lässt keine Lewy-Körper entstehen.

lassen sich einmal Arzneistoffe nach Art der Faltungshelfer entwickeln, die bei Menschen die Degeneration der Nervenzellen hemmen. Auch eine Gentherapie könnte theoretisch für die Produktion der notwendigen Chaperone sorgen. Forscher haben außerdem festgestellt, dass ein Mehr an normalem Parkin-Protein die Nervenzellen vor einer Degeneration infolge schädlicher, falsch gefalteter Eiweißstoffe schützt. Viel Forschung ist allerdings noch nötig, um zu beurteilen, ob sich solche Maßnahmen erfolgreich beim Menschen anwenden lassen.

Die Wissenschaft verfolgt weitere Wege. So wurden versuchsweise neurotrophe Faktoren – Substanzen, die Wachstum und Differenzierung von Neuronen anregen – in das Gehirn eingeschleust. Sie versprechen mehr als nur die Symptome zu lindern: Möglicherweise schützen sie die Neuronen auch oder führen sogar zur Erholung bereits geschädigter Zellen.

Zwiespältige Ergebnisse

Eine Untersuchungsreihe an Tieren deutete beispielsweise darauf hin, dass das namensgebende Mitglied einer Proteinfamilie – der von der Gliazelllinie abgeleitete neurotrophe Faktor, englisches Kürzel GDNF – geschädigten Dopamin-Neuronen zu überleben hilft und parkinsonartige Symptome stark vermindern kann. Steve Gill und seine Kollegen am Frenchay-Hospital im englischen Bristol verabreichten GDNF daher in einer Pilotstudie an Patienten. Chirurgisch wurde ein Katheter in den rechten und/oder den linken Streifenkörper eingeführt, wo viele Nervenfasern der Neuronen des Schwarzen Kerns enden, die Dopamin ausschütten. Innerhalb der Basalganglien ist er die wichtigste Adresse. Eine im Bauchbereich eingepflanzte Pumpe beförderte ständig winzige Mengen GDNF über die Katheter ins Gehirn. Der Vorrat in der Pumpe reichte mindestens einen Monat und konnte während eines kurzen Arztbesuchs wieder aufgefüllt werden – über eine Injektion durch die Haut.

Die anfänglichen Resultate an wenigen Patienten deuteten auf eine Besserung der Symptome hin. Zudem zeigten bildgebende Verfahren wie die Positronen-Emissions-Tomografie (PET), dass eine mit Fluor-18 markierte Vorstufe von Dopamin wieder etwas stärker in Streifenkörper und Schwarzen Kern aufgenommen wurde. Dagegen lieferte eine

▷ größere, neuere Studie mit GDNF keine überzeugenden Ergebnisse: Hier ging es Patienten danach nicht besser als Scheinbehandelten, denen man bloß Salzlösung verabreicht hatte.

Dennoch halten viele Vertreter unseres Fachgebiets diesen Ansatz für weiter verfolgungswürdig. (Bei einem 2005 verstorbenen Patienten der Bristol-Studie waren neue Nervenfasern gewachsen.) In der Medizin sind Misserfolge bei den ersten Schritten zu neuen Therapien nichts Ungewöhnliches. Die Dopaminvorstufe Levodopa beispielsweise schien am Anfang nur Nebenwirkungen zu haben und keinen Nutzen zu bringen, wurde aber zu einer der wichtigsten Stützen bei der Behandlung von Parkinson.

Andere Wissenschaftler versuchen auf gentherapeutischem Weg, die kritischen Stellen im Gehirn mit GDNF zu versorgen; dahinter steht die Hoffnung, dass das eingeschleuste Gen langfristig den neurotrophen Wirkstoff liefert. Jeffrey H. Kordower vom Rush Presbyterian-St. Luke's Medical Center in Chicago sowie Patrick Aebischer vom Institut für Neurowissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule im schweize-

rischen Lausanne stellten mit ihren Kollegen ein gentechnisch verändertes Lentivirus her, das ein GDNF-Gen trug. Sie schleusten es vier Affen unter anderem in den Streifenkörper ein, wo Zellen auch Dopamin produzieren können. Eine Woche zuvor hatten sie künstlich eine Art Parkinson-Krankheit ausgelöst: durch Injektion von Methyl-phenyl-tetrahydropyridin (MPTP), das für die Dopamin-Neuronen des Schwarzen Kerns toxisch ist und zu Dopamin-Mangel im Streifenkörper führt. Das beeindruckende Ergebnis: Die motorischen Störungen verminderten sich drastisch, und bis zum Ende der mehrmonatigen Versuchszeit veranlasste das eingeschleuste Gen die Zellen zur Herstellung des Proteins.

Ausgehend von diesen Befunden arbeiteten Wissenschaftler des Unternehmens Ceregene in San Diego mit einer anderen Genfahre und verabreichten so das Protein Neurturin, das ebenfalls zur GDNF-Familie gehört. Studien der Phase I mit einem Gen, das dem für Neurturin ähnelt, sind 2005 an menschlichen Patienten angelaufen.

An weiteren Therapiemöglichkeiten wird geforscht. In Zusammenarbeit mit

der Firma Avigen bei San Francisco konnte Krys Bankiewicz an Tieren nachweisen, dass die Dopaminproduktion im Streifenkörper steigt, wenn dort das Gen für das Enzym Dopa-Decarboxylase eingebracht wird. Bei Ratten und Affen ließen sich auf diese Weise parkinsonartige Symptome lindern. Die Erprobung am Menschen hat begonnen. Dank der zusätzlichen Enzymmengen soll mehr von dem Medikament Levodopa in Dopamin umgewandelt werden.

Nützt eine Zelltransplantation wirklich?

Einen anderen Weg beschreitet Michael Kaplitt mit seinem Team an der Cornell-Universität in Ithaca (New York): Die Forscher drosseln mit gentherapeutischen Methoden einige der Hirnregionen, die überaktiv werden, wenn Fasern vom Schwarzen Kern zu wenig Dopamin ausschütten. Zu diesen Bereichen gehört auch der subthalamische Kern der Basalganglien. Warum wird er überaktiv? Infolge des Dopaminmangels werden direkt ihn zügelnde Nervenzellen gehemmt, so dass seine Neuronen, die den erregenden Neurotransmitter Glutamat verwenden,

Parkinson-Therapie heute

Medikamente und Tiefenhirnstimulation – die beiden Hauptstützen der Parkinson-Therapie – können zwar Symptome erheblich bessern, haben aber auch ihre Nachteile. Daher hoffen Patienten und Wissenschaftler auf neue Methoden.

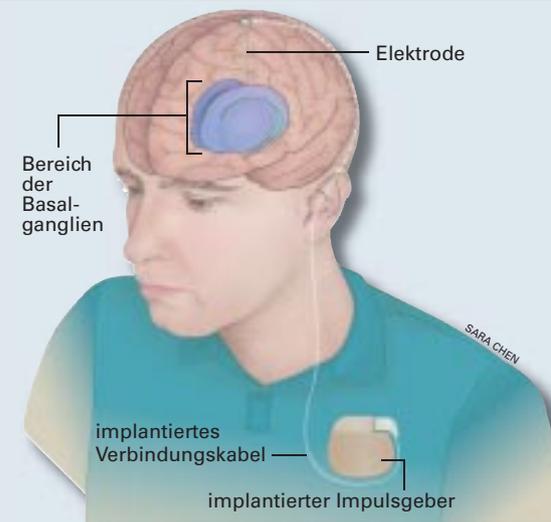
Medikamente

Die Basistherapie erfolgt mit Arzneistoffen, die auf den Nervensignalüberträger Dopamin zielen: entweder ihn nachahmen, mehr davon entstehen lassen (dies gilt zum Beispiel für den Wirkstoff Levodopa) oder seinen Abbau hemmen. Weitere Mittel greifen in einige der anderen neuronalen Systeme ein, die bei der Parkinson-Krankheit beeinträchtigt sind und die beispielsweise mit Acetylcholin und Glutamat als Neurotransmitter arbeiten. Viele der Medikamente helfen im Frühstadium der Erkrankung, werden bei Dauergebrauch aber oft problematisch. Die wichtigste unangenehme Nebenwirkung bei langfristiger Einnahme sind Schwankungen zwischen Phasen mit guter motorischer Funktion und solchen mit Bewegungsblockade (»Einfrieren«), Zittern und Steifigkeit. Außerdem können manche Medikamente so genannte Dyskinesien

verursachen: unwillkürliche, windende und drehende Bewegungen; diese kommen vor allem bei jüngeren Patienten häufiger vor und stellen eine starke Beeinträchtigung dar.

Tiefenstimulation des Gehirns

Vor rund hundert Jahren entdeckten Mediziner, dass sich das für Parkinson typische Zittern mildern ließ, wenn eine geringe Zahl von Zellen in den motorischen Leitungsbahnen des Gehirns zerstört wurde. Die Prozedur verursachte zwar häufig eine Muskelschwäche, aber das war den Patienten immer noch lieber als das Zittern. Als Chirurgen dann 1938 gezielt Basalganglien von Parkinson-Patienten schädigten, beobachteten sie eine noch deutlichere Besserung. Wie es schien, konnte das übrige Gehirn normal funktionieren, wenn man die Zellen zerstörte, die sich falsch verhielten, also zu viele



oder zu wenige Impulse abgaben. Aber absichtlich Schäden anzurichten stellte natürlich keine Ideallösung dar. Waren sie nicht genau platziert oder betrafen beide Hirnhälften, konnte es zu schweren Beeinträchtigungen wie Sprachstörungen oder kognitiven Defekten kommen.

In den 1970er Jahren entdeckten Wissenschaftler, dass sich mit einer hochfre-

ihre Zielstrukturen überaktivieren, was letztlich zu Bewegungsstörungen führt.

In einem ersten klinischen Versuch erhielten zwölf Patienten das Gen für die Glutaminsäure-Decarboxylase – das Enzym wandelt Glutamat beziehungsweise Glutaminsäure in den hemmenden Neurotransmitter Gamma-Aminobuttersäure (GABA) um. Die Arbeitsgruppe hofft, dass das freigesetzte GABA die überstimulierten Zellen besänftigt und damit auch die für Parkinson typischen Bewegungsstörungen vermindert. Durch ein münzgroßes Loch im Schädel wurde von oben eine haarfeine Kanüle in den subthalamischen Kern einer Hirnhälfte eingeführt und darüber ein gentechnisch verändertes Virus verabreicht, das Kopien des Gens in die Neuronen einschleust. Die im September 2005 von Neurologix verkündeten Zwischenergebnisse waren ermutigend. Kaplitt ist Mitbegründer dieser Firma.

Die vielleicht umstrittenste potenzielle Therapiemethode ist die Transplantation von Zellen, die Nachschub für die untergegangenen Neuronen liefern sollen. Verpflanzte embryonale oder adulte Stammzellen – so die Vorstellung –

könnte man veranlassen, sich in Dopamin produzierende Neuronen zu verwandeln. Da embryonale Stammzellen von wenigen Tagen alten Embryonen stammen, die bei einer Reagenzglas-Befruchtung entstehen, ist ihr Einsatz ethisch höchst umstritten. Weniger heikel in dieser Hinsicht sind adulte Stammzellen: Sie werden aus dem Gewebe Erwachsener gewonnen, sind aber nach Ansicht mancher Fachleute schwieriger zu handhaben.

Wenn man auch mittlerweile eine Menge darüber weiß, welche molekularen Signale und anderen Dinge undifferenzierte Zellen zur Dopaminproduktion benötigen, so ist bis heute nicht geklärt, ob eine Transplantation tatsächlich den erhofften Nutzen bringt. Bestimmte Zellen aus abgetriebenen Feten, also aus einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, wurden Patienten bereits eingepflanzt: Diese Studien zeigten, dass mehrere hunderttausend transplantierte Zellen im Gehirn überlebten und Dopamin produzierten – im Hinblick auf funktionelle Verbesserungen waren die Erfolge jedoch bestenfalls bescheiden und uneinheitlich. Zudem traten schwere Nebenwirkungen auf, unter anderem unkontrollierte, win-

dende und drehende Bewegungen. Derzeit versuchen Wissenschaftler herauszufinden, warum die Transplantation nicht besser hilft und warum es zu den Nebenwirkungen kommt, aber vorerst wird das Verfahren in den USA nicht mehr an Menschen erprobt.

Auch die Strategie, die hinter der tiefen Hirnstimulation mit elektrischen Impulsen steckt, gilt es weiter zu erforschen und zu verfeinern (siehe Kasten unten). Vor einiger Zeit berichteten Stéphane Palfi und seine Kollegen vom CEA Frédéric Joliot Hospital Service im französischen Orsay, eine sanfte elektrische Stimulation der Hirnoberfläche könne bei Pavianen, die an künstlich ausgelöstem Parkinson leiden, die Symptome lindern. Klinische Studien in Frankreich und anderen Ländern sollen abklären, ob ein derartiges Vorgehen beim Menschen eine ähnliche Wirkung hat.

Alles in allem ermutigen die Erkenntnisse der letzten Jahre zu neuen Hoffnungen auf eine Therapie, die in Verbindung mit den bereits verfügbaren Behandlungsmethoden den Verlauf aufhalten und die bedrückende Krankheit besser unter Kontrolle bringen kann. <

quenten elektrischen Stimulation bestimmter Hirnteile ganz ähnliche Effekte erreichen ließen wie mit einer Schädigung, jedoch ohne deren Nebenwirkungen. Verschiedene Spielarten dieser so genannten Tiefenhirnstimulation dienen heute zur Behandlung einiger neurologischer Störungen (siehe Spektrum-Spezial 3/2004: Das verbesserte Gehirn, S. 38). Bei Parkinson-Patienten implantiert ein Hirnchirurg Elektroden vornehmlich in den subthalamischen Kern oder in den blassen Teil des Linsenkerns (Globus pallidus) der Basalganglien. Ein Schrittmacher, eingepflanzt im Brustbereich, entsendet über ein ebenfalls implantiertes Kabel hochfrequente Signale: in einem typischen Beispiel pro Sekunde immerhin 185 schwache elektrische Impulse von je drei Volt Spannung und 90 millionstel Sekunden Dauer. Nach etwa fünf Jahren muss der Impulsgeber mit Batterie ausgewechselt werden.

Zittern und Steifigkeit lassen sich damit drastisch vermindern, so berichten die Pioniere des Verfahrens Alim Louis

Benabid und Pierre Pollak von der Universität Grenoble in Frankreich. Seit ungefähr zehn Jahren hat sich das Verfahren durchgesetzt, mit inzwischen mindestens 30 000 operierten Patienten. Oft können Medikamente in ihrer Dosis verringert, teils sogar abgesetzt werden. Die tiefe Hirnstimulation kann aber weder das Fortschreiten der Krankheit verhindern noch die möglicherweise vorhandenen Beeinträchtigungen bei Kognition, Sprache und Gleichgewicht mildern.

Trotz aller Erfolge bleiben hier noch viele Fragen offen. Zum einen ist zu klären, welcher Bereich im Gehirn sich am besten eignet. Zum anderen sind die Befunde widersprüchlich, wie nun genau die künstlichen Impulse zu einer Besserung führen. So glaubte man früher beispielsweise, die Tiefenstimulation wirke wie eine chirurgische Schädigung, also durch Inaktivierung von Zellen. In jüngerer Zeit hat sich jedoch herausgestellt, dass Zellen anscheinend dazu angeregt werden, schneller selbst »zu feuern«.



Andres M. Lozano und Suneil



K. Kalia (unten) untersuchen seit mehreren Jahren gemeinsam verschiedene Aspekte der Parkinson-Krankheit. Lozano, gebürtiger Spanier, promovierte an der kanadischen Universität Ottawa in Medizin. Heute ist er Professor und Inhaber des R.-R.-Tasker-Lehrstuhls für stereotaktische und funktionelle Neurochirurgie am Western Hospital und an der Universität Toronto. Neben den Ursachen der Parkinson-Krankheit interessiert ihn die Entwicklung neuer chirurgischer Therapieverfahren. Kalia hat 2004 bei Lozano promoviert und erforscht vor allem die Rolle der Chaperone bei dieser Erkrankung.

Parkinson-Therapeutika. Von H. Stark und Manfred Schubert-Zsilavecz (Hg.). Pharmazie in unserer Zeit, Heft 3, 2006

Zittern ohne Ende? Von K. Schmitt und W. Oertel in: Gehirn & Geist 9/2005, S. 20

BAG5 inhibits Parkin and enhances dopaminergic neuron degeneration. Von S.K. Kalia et al. in: Neuron. Bd. 44, Nr. 6, Dez. 2004, S. 931

Neurodegenerative diseases: a decade of discoveries paves the way for therapeutic breakthroughs. Von M. S. Forman et al. in: Nature Medicine, Bd. 10, S. 1055, Juli 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

DEODORANT

Sommer, Sonne, Schweißgeruch?

Deos und Antitranspirants bekämpfen den Körpermief an mehreren Fronten.

Von Stefanie Reinberger

Von der Stirne heiß, rinnen muss der Schweiß«, so reimte einst Schiller in seinem Lied von der Glocke. Dass mit dem Schwitzen oft üble Körpergerüche verbunden sind, verschwieg der Dichter.

Schweiß dient der Klimatisierung, denn jeder Liter Wasser, der auf der Haut verdunstet, entzieht dem Körper 585 Kilokalorien in Form von Wärme. Um unsere Kerntemperatur von 37 Grad Celsius aufrechtzuerhalten, dünnen wir schon im »Normalbetrieb« täglich einen bis zwei Liter Flüssigkeit aus. Bei Anstrengungen werden es deutlich mehr. So setzt ein Läufer im Durchschnitt eine Kilokalorie pro Kilogramm Körpergewicht und gelaufenem Kilometer um, doch 75 Prozent dieser Energie dienen nicht der Muskelarbeit, sondern gehen als Wärme verloren. Weil aber 0,83 Kilokalorien ein Kilogramm Körpergewicht um ein Grad Celsius aufheizen, würde ein Zehn-Kilometer-Lauf ohne Kühlmechanismen tödlich enden: Die Körpertemperatur eines 70 Kilogramm schweren Läufers stiege auf 46 Grad Celsius. Das Verdampfen von etwa einem bis eineinhalb Liter Wasser reicht ihm zur Kühlung aus. Da Schweiß, der uns in Perlen auf der Stirne steht, nutzlos abtropft, produziert der Läufer allerdings deutlich mehr.

Etwa 2,5 Millionen »ekkrine« beziehungsweise im Deutschen kleine Schweißdrüsen geben diese Kühlflüssigkeit ab. Sie sind über den ganzen Körper verteilt, konzentrieren sich aber an Fußsohlen, Handinnenflächen und Achselhöhlen – bis zu 400 davon liegen dort auf einem Quadratzentimeter. Im Vergleich dazu sind im Nacken gerade einmal rund 55 zu finden. »Apokrine« oder große Schweißdrüsen haben eine ganz andere Funktion: Sie sondern Duftstoffe ab, die für den individuellen Körpergeruch sorgen und in grauer Vorzeit eine Rolle bei der Partnerwahl spielten.

Schweiß selbst riecht nicht. Er besteht zu 99 Prozent aus Wasser. Weitere wichtige Bestandteile sind Natriumchlorid – also Kochsalz, was den salzigen Geschmack erklärt – und andere anorganische Salze sowie Harnstoff, Ammoniak und Eiweiße, aber auch Milchsäure, die bei großer Anstrengung in den Muskeln gebildet wird. Grund für die vielfältigen Substanzen im Schweiß: Neben dem Kühleffekt unterstützt das Schwitzen als weitere Funktion auch die Nieren bei ihrer Arbeit, den Organismus von Gift- und Abfallstoffen zu befreien.

Der üble Geruch ist das Werk von Bakterien auf der Haut, die all diese Substanzen ebenso wie Talg und abgestorbene Hautschüppchen umsetzen. Dabei entstehen unter anderem kurzkettige Fettsäuren wie Buttersäure, die für den typischen Schweißgestank sorgen. Das erklärt auch, warum gerade Achselhöhlen, ausgeprägte Bauchfalten und Füße meist besonders muffeln: In ihrer feucht-warmen Umgebung gedeihen Bakterien prächtig. Das Rasieren der Achselhaare, in denen sich die Übeltäter mit Vorliebe einnisten und vermehren, ist daher schon eine gute Gegenmaßnahme, und wer im Beruf stundenlang Schuhe tragen muss, sollte in der Freizeit Luft an seine Füße lassen.

Die Kosmetikindustrie rückt dem Mief mit Deodorants zu Leibe. Und die Verbraucher greifen willig zu: Rund 531 Millionen Euro gaben allein die Deutschen im letzten Jahr dafür aus, wie die Information Resources GmbH in Nürnberg herausfand.

Die Wirkstrategien von Deodorants sind vielfältig und in den meisten Produkten werden gleich mehrere kombiniert. Die einfachste und älteste Variante, das Parfüm, versucht, den Gestank lediglich zu überdecken. Die nächstbessere Methode: Da die meisten der Stoffwechselprodukte chemisch gesehen sauer sind, lassen sie sich mit einfachen Basen wie Natrium- oder Kaliumkarbonat neutralisieren. Auch Metallsalze wie Zinkoxide können diese Funktion übernehmen. Verfahren Nr. 3: Silikone und einige Zinksalze binden Geruchsmoleküle.

WUSSTEN SIE SCHON?

- ▶ **1888 kam in den USA das erste Deodorant** auf den Markt. Es bestand aus einer wachsartigen Creme, die als Wirkstoff Zinkoxid enthielt. Inspiriert vom Kugelschreiber stand 1952 der erste Deoroller zur Verfügung. Ebenfalls seit den 1950er Jahren gibt es Deosprays.
- ▶ **Übermäßige Schweißausbrüche**, medizinisch Hyperhidrose genannt, beeinträchtigen die Lebensqualität stark. Zur Therapie kann ein Teil der Schweißdrüsen operativ entfernt werden. Weil der Sympathikus, das vegetative Nervensystem, ebenfalls seinen Teil zum Schwitzen beiträgt, ist es auch denkbar, die Reizweiterleitung durch Injektion von Botulinus-Toxin lahm zu legen oder die Nervenfasern des so genannten Grenzstrangs zu durchtrennen. Diese Eingriffe

sind nicht ohne Risiko und dürfen nur bei Hyperhidrose-Patienten durchgeführt werden.

- ▶ **Männer riechen anders.** Das liegt nicht nur an den Abbauprodukten des Testosterons in ihrem Schweiß. Auch die Hautflora weist geschlechtsspezifische Unterschiede auf: So sorgen Bakterien aus der Gruppe der Diptheroiden bei Männern für einen stechend-beißenden Geruch, während Mikrokokken Frauen eher säuerlich riechen lassen.

- ▶ **Deokristalle bestehen aus Ammonium-Alaun**, einem Ammoniumaluminiumsulfat. Das Mittel, das auch zur Blutstillung bei der Rasur verwendet wird, verengt die Schweißdrüsen, lässt das Hautmilieu saurer werden und hemmt damit die Vermehrung geruchsbildender Bakterien.

ILLUSTRATION: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; REDAKTION: WERBUNG; MIT FOTOL. GEN. VON UNILEVER

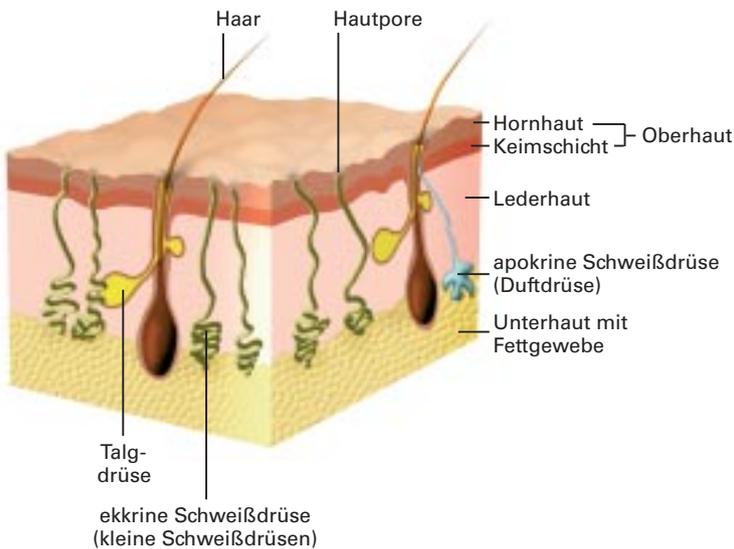
▶ In den 1950er Jahren wurden die ersten Deodorants als Toiletten- und Badeseifen beworben – hier eine Anzeige aus der Zeit von Rock 'n' Roll und Nierentisch.

Eine bessere Strategie ist freilich, das Übel an der Wurzel zu packen. Deshalb enthalten die meisten Deos Alkohol, genauer gesagt Ethanol oder Isopropanol, der Bakterien abtötet. Auch Propylenglycol sowie eine ganze Reihe weiterer antibakterieller Substanzen kommen zum Einsatz. Nachteil: Diese Desinfektion beseitigt zudem Mikroorganismen, die zum Schutz der Haut beitragen. Wirkungsvoll sind überdies Enzymhemmer wie Triethylzitat. Es verändert das chemische Milieu der Haut und verschiebt den pH-Wert in den sauren Bereich. Das begrenzt den Bakterienstoffwechsel und ihre Vermehrung, beeinträchtigt die übrige Hautflora aber ebenso.

Nicht mit Deodorants zu verwechseln sind Antitranspirante, die den Schweißfluss stoppen sollen. Der klassische Wirkstoff Aluminiumchlorohydrat bildet zusammen mit Mehrfachzucker-Verbindungen auf der Haut einen Pfropf, der die Ausgänge der Drüsen vorübergehend blockiert. Außerdem töten Aluminiumsalze Bakterien ab und können Körpergerüche neutralisieren. Sie werden deshalb oft mit Wirkstoffen aus Deodorants kombiniert.

Doch egal zu welcher Strategie man greift, die Miefstopper setzen eine gründliche Körperhygiene voraus – hat die Geruchsbildung erst eingesetzt, ist auch der beste Wirkstoff machtlos. ◀

Die promovierte Biologin **Stefanie Reinberger** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



▶ Die so genannten ekkrinen Drüsen (oder auch kleine Schweißdrüsen) produzieren Schweiß vor allem zur Wärmeregulierung des Körpers. Bakterien verdauen die Inhaltsstoffe und verursachen dabei den typischen »Schweißgeruch«. Apokrine Drüsen sondern dagegen Duftstoffe ab.



Teilchenbeschleunigung mit Plasmawellen

In einer neuartigen Teilchenschleuder werden Partikel fast mit Lichtgeschwindigkeit durch ionisiertes Gas gejagt. Solche Plasmageräte sind kompakt, kostengünstig und versprechen vielerlei Anwendungen.

Von Chandrashekar Joshi

Physiker verwenden Teilchenbeschleuniger, um grundlegende Fragen nach dem Wesen des Universums zu beantworten. Gigantische Maschinen beschleunigen geladene Teilchen fast auf Lichtgeschwindigkeit, bringen sie zur Kollision und erzeugen dadurch auf kleinstem Raum Bedingungen wie einst beim Urknall, als aus einem singulären Energieblitz unser Universum entstand. Durch Analyse der Kollisionstrümmer möchten die Physiker begreifen, wie die unterschiedlichen Elementarteilchen und Naturkräfte zusammenhängen – letztlich in der Hoffnung, sie alle durch eine vereinheitlichte

Theorie beschreiben zu können. Leider brauchen die Forscher, je mehr sie sich diesem Ziel nähern, immer leistungsfähigere und teurere Maschinen.

Derzeit entsteht beim Cern, dem europäischen Labor für Teilchenphysik an der französisch-schweizerischen Grenze, der Large Hadron Collider (LHC), mit einem Bahndurchmesser von 8,6 Kilometern der stärkste Beschleuniger überhaupt. Er soll ab 2007 zwei Protonenstrahlen mit je 7 TeV (Tera-, das heißt Billionen Elektronenvolt) gegeneinander führen und unter anderem das hypothetische Higgs-Teilchen nachweisen, das der Materie ihre Masse verleiht (siehe »Das Geheimnis der Masse« von Gordon Kane, Spektrum der Wissen-

schaft 2/2006, S. 36). Andere Maschinen untersuchen bereits, warum das Universum mehr Materie als Antimaterie enthält, und erlauben Einblick in einen urtümlichen Zustand der Materie, das so genannte Quark-Gluon-Plasma. All diese Teilchenfabriken nutzen eine Jahrzehnte alte Großtechnik, bei der Mikrowellen die Teilchen beschleunigen.

In den vergangenen 75 Jahren haben solche Geräte wichtige Erkenntnisse über die fundamentalen Teilchen und über die Eigenschaften der Kernmaterie geliefert. Durch wissenschaftlich-technische Fortschritte der Beschleunigerphysik gelang es, die Teilchenenergien alle zehn Jahre um den Faktor zehn zu steigern. Aber wie lange kann das so weitergehen? Die auf Mikrowellen beruhenden Maschinen nähern sich den Grenzen des technisch und wirtschaftlich Machbaren. 1993 stoppte der amerikanische Kongress den Bau des 8 Milliarden Dollar teuren Superconducting Super Collider, der mit seinem Durchmesser von 28 Kilometern auf die doppelte Energie des LHC angelegt war. Viele Teilchenphysiker setzen ihre Hoffnung nun auf einen 30 Kilometer langen Linearbeschleuniger als Nachfolger des LHC – aber niemand vermag vorherzusagen, ob es dem geplanten Multimilliarden-Dollar-Projekt besser ergehen wird als dem Super Collider.

IN KÜRZE

- ▶ **Mikrowellen-Beschleuniger** bringen seit Jahrzehnten Teilchenstrahlen fast auf Lichtgeschwindigkeit. Der Large Hadron Collider mit seinem Durchmesser von 8,6 Kilometern markiert eine technische und wirtschaftliche Grenze dieser Methode.
- ▶ **Ein neuer Beschleunigertyp** verleiht Elektronen oder Positronen Energie, indem sie auf einer Welle reiten, die fast mit Lichtgeschwindigkeit ein ionisiertes Gas durchquert. Das Funktionsprinzip solcher Plasma-Beschleuniger wurde bisher nur in kleinen Laborexperimenten demonstriert, könnte aber bald den Hochenergiephysikern kompakte und kostengünstige Geräte bescheren.
- ▶ **Tischgeräte**, die mittels Plasma-Beschleunigung niedrigere Partikelenergien erzeugen, eignen sich für eine Vielfalt von Anwendungen, etwa in den Materialwissenschaften, der Strukturbiochemie oder der Nuklearmedizin.

Da kommt eine neuartige Beschleunigertechnik vielleicht gerade im rechten Moment; sie nutzt ein Plasma – den vierten Aggregatzustand der Materie neben fest, flüssig und gasförmig – und ermöglicht im Prinzip Hochenergiebeschleuniger für Partikelenergien von 100 GeV (Giga-, Milliarden Elektronenvolt) und mehr. Durch die Plasmatechnik würden solche Apparate deutlich kleiner und billiger.

Doch gewaltige Beschleuniger für die Hochenergiephysik sind nicht alles. Daneben werden vielfach kleinere Maschinen gebraucht – für Materialwissenschaft, Strukturbioogie, Nuklearmedizin, Fusionsforschung und Sterilisation von Nahrungsmitteln, für die Umwandlung nuklearen Abfalls oder für die Behandlung bestimmter Krebsformen. Diese kleineren Geräte erzeugen Elektronen- oder Protonenstrahlen mit relativ niedriger Energie – zwischen 0,1 und 1 GeV –, beanspruchen derzeit aber immer noch viel Laborplatz. Extrem kompakte Plasma-Beschleuniger, die buchstäblich auf einen Labortisch passen, könnten durchaus Elektronenstrahlen in diesem Energiebereich liefern.

Grenzen der bisherigen Beschleunigertypen

Bevor ich die neue Technik näher beschreibe, möchte ich ein bisschen Beschleunigerphysik rekapitulieren. Die Teilchenschleudern lassen sich in wenige Grundtypen einteilen. Erstens beschleunigen sie entweder leichtere Teilchen – Elektronen und Positronen – oder schwerere wie Protonen und Antiprotonen. Zweitens können sie die Teilchen entweder geradlinig in einem einzigen Durchlauf beschleunigen oder durch zahlreiche Umläufe in einem geschlossenen Ring. Der LHC beispielsweise ist ein Ringbeschleuniger, der zwei Protonenstrahlen zur Kollision bringt. Als Nachfolger des LHC schwebt den Phy- ▷

▶ Teilchenbeschleuniger, die auf einem Tisch Platz finden, können Elektronenstrahlen mit Energien von 100 bis 200 Millionen Elektronenvolt erzeugen. Das Prinzip solcher Plasmageräte beruht auf winzigen Ladungsbläschen, die sich wellenförmig in ionisiertem Gas ausbreiten.



▷ sikern ein linearer Elektron-Positron-Collider vor, dessen Energie am Kollisionspunkt zunächst rund ein halbes TeV betragen soll. Bei solchen Energien müssen Elektronen und Positronen geradlinig beschleunigt werden; eine kreisförmige Bahn hätte extremen Energieverlust in Form so genannter Synchrotronstrahlung zur Folge. Für die Linearbeschleunigung von Elektronen und Positronen sind Plasma-Beschleuniger genau das Richtige.

Ein herkömmlicher Linear-Collider beschleunigt seine Teilchen durch ein elektrisches Feld, das sich synchron mit den Teilchen bewegt; erzeugt wird es durch energiereiche Mikrowellenstrahlung in einer so genannten Runzelröhre, einem Metallrohr mit periodisch angeordneten Irisblenden. Die Verwendung von Metall begrenzt die Stärke des beschleunigenden Feldes. Bei einer Feldstärke von 20 bis 50 MeV (Mega-, Millionen Elektronenvolt) pro Meter bricht das elektrische Feld zusammen: Zwischen den Wänden des metallischen Hohlraums springen Funken über, es kommt zu Entladungen. Da das elektrische Feld schwächer sein muss als die

Durchbruchfeldstärke, wird ein längerer Beschleunigungsweg nötig, um die gewünschte Energie zu erreichen. Zum Beispiel würde ein TeV-Strahl einen 30 Kilometer langen Beschleuniger erfordern. Könnten wir Teilchen viel rascher beschleunigen, als die elektrische Durchbruchsgrenze zulässt, wäre die Maschine entsprechend kompakter. Hier kommt das Plasma ins Spiel.

Rasend schnelle Ladungswellen

Beim Plasma-Beschleuniger übernimmt ionisiertes Gas – Plasma – die Rolle der beschleunigenden Struktur. Die elektrische Entladung ist nicht nur kein Problem, sondern Konstruktionsprinzip, denn das Gas wird von vornherein ionisiert. Als Energiequelle dient nicht Mikrowellenstrahlung, sondern entweder ein Laser oder ein Strahl geladener Teilchen.

Auf den ersten Blick scheinen sich Laser- oder Teilchenstrahlen kaum für die Beschleunigung zu eignen. Sie enthalten zwar sehr starke elektrische Felder, doch die liegen größtenteils quer zur Strahlachse. Um beschleunigend zu wirken,

muss das elektrische Feld longitudinal sein, das heißt in die Bewegungsrichtung des Teilchens zeigen. Zum Glück kann die Wechselwirkung des Laser- oder Teilchenstrahls mit dem Plasma ein longitudinales elektrisches Feld erzeugen.

Das funktioniert so: Ein Plasma ist insgesamt gesehen elektrisch neutral, es enthält ebenso viele negativ geladene Elektronen wie positiv geladene Ionen. Ein intensiver Laser- oder Teilchenpuls bewirkt im Plasma jedoch eine Störung. Er treibt die leichteren Elektronen von den schwereren positiven Ionen weg, wodurch Gebiete mit positivem und negativem Ladungsüberschuss entstehen (siehe Kasten unten). Die Störung bildet eine Welle, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit durch das Plasma fortpflanzt. Zwischen positiv und negativ geladener Region spannt sich ein starkes elektrisches Feld auf, das jedes geladene Teilchen beschleunigt, das unter seinen Einfluss gerät.

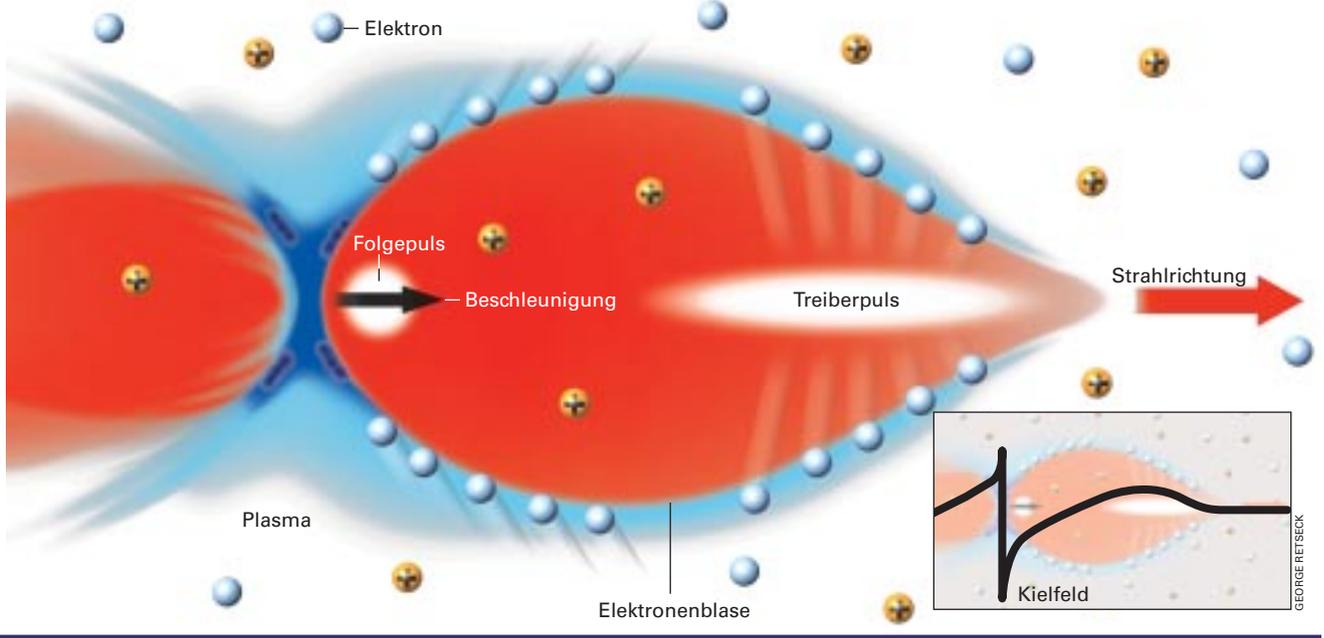
Solche Felder können enorm stark werden. Ein Plasma, das 10^{18} Elektronen pro Kubikzentimeter enthält – eine keineswegs ungewöhnliche Zahl –, vermag

Wie eine Elektronenblase als Teilchenbeschleuniger wirkt

Bei der Kielfeld-Beschleunigung entsteht die vorwärtstreibende Kraft durch eine Störung der Ladungsverteilung, das so genannte Kielfeld (*wakefield*). Der voraus-eilende Treiberpuls – ein kurzer Laser- oder Elektronenpuls – treibt die Elektronen (blau) im ionisierten Gas zunächst nach au-

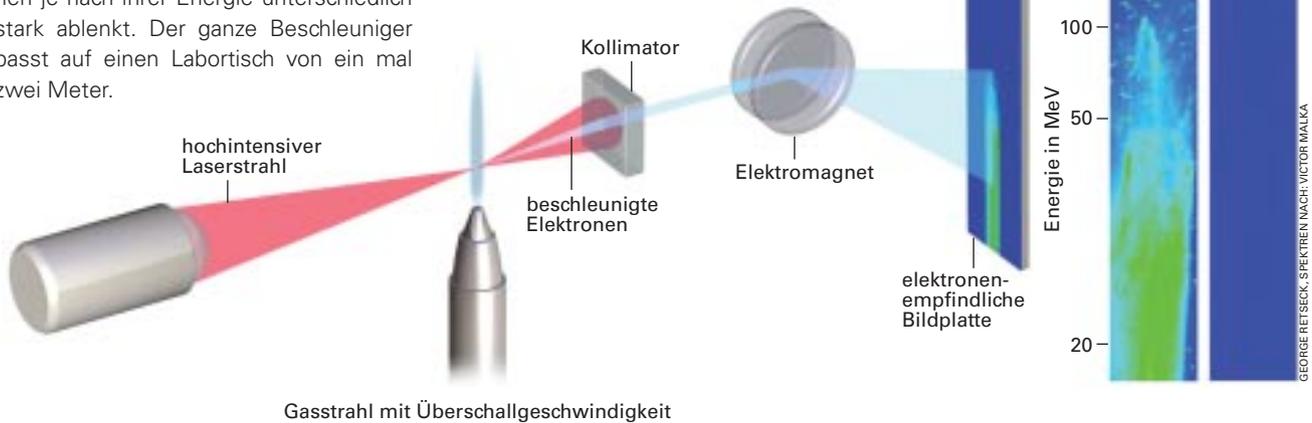
ßen und hinterlässt eine Region mit positivem Ladungsüberschuss (rot). Die positive Ladung zieht die negativ geladenen Elektronen hinter dem Treiberpuls wieder zurück und bildet eine geschlossene Elektronenblase um das positive Gebiet. Längs der Strahlachse ähnelt das elektrische Feld

einer sehr steilen, fast schon brechenden Meereswelle (kleines Bild). Dieses »Kielfeld« – es folgt dem Treiberpuls quasi in dessen Kielwasser – bewirkt, dass ein nachfolgender Elektronenpuls am hinteren Ende der Blase eingefangen wird und eine sehr hohe Beschleunigung erfährt.



Der Laser-Kiefeld-Beschleuniger

Ein Beschleuniger im Labortischformat besteht aus einem hochintensiven Laserstrahl, der auf einen überschallschnellen Helium-Gasstrahl fokussiert wird (links). Ein Laserpuls erzeugt im Gasstrahl ein Plasma, und das Kiefeld beschleunigt einige der freigesetzten Elektronen. Der resultierende Elektronenpuls wird von einem Kollimator gebündelt und durch ein Magnetfeld geführt, welches die Elektronen je nach ihrer Energie unterschiedlich stark ablenkt. Der ganze Beschleuniger passt auf einen Labortisch von ein mal zwei Meter.



Gasstrahl mit Überschallgeschwindigkeit

eine Welle mit Spitzenwerten bis zu 100 GeV pro Meter zu erzeugen. Das ist mehr als tausendmal so intensiv wie der Feldgradient in einem herkömmlichen Mikrowellen-Beschleuniger. Die Sache hat freilich einen Haken: Eine Plasmawelle ist nur etwa 30 Mikrometer (tausendstel Millimeter) lang – gegenüber typischen Mikrowellen mit Wellenlängen von 10 Zentimetern. Es ist äußerst schwierig, ein Elektronenpaket präzise in eine mikroskopisch kleine Welle zu platzieren.

Den Vorschlag, Plasmen zur Beschleunigung von Teilchen zu verwenden, machte schon 1979 der inzwischen verstorbene Physiker John M. Dawson von der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA). Danach verging mehr als ein Jahrzehnt bis zum experimentellen Nachweis, dass Elektronen tatsächlich auf Plasmawellen »surfen« und dadurch Energie gewinnen können. Zu dem Zweck mussten drei verschiedene Technologien – Plasmen, Beschleuniger und Laser – aufeinander abgestimmt werden. Überzeugend gelang das erst 1993 meiner Arbeitsgruppe an der UCLA. Seitdem ist der Fortschritt auf diesem Gebiet nicht mehr aufzuhalten. Insbesondere zwei Technologien liefern

Die Elektronenstrahlen, die der erste Tischbeschleuniger am Laboratorium für Angewandte Optik der École Polytechnique bei Paris produzierte, illustrieren einen wichtigen Erfolg (Aufnahmen rechts). Obwohl manche Elektronen bis auf 100 MeV beschleunigt wurden, reichte die Energieverteilung der Elektronen bis zu 0 MeV hinunter (a). Zudem streute der Strahl über einen Winkel von fast einem Grad.

Hingegen zeigen die Resultate der kürzlich entdeckten Blasenmethode einen viel stärker gebündelten und energetisch einheitlichen Strahl mit rund 180 MeV (b). Ein solcher Strahl ist für Anwendungen viel nützlicher.

spektakuläre Ergebnisse: der Laser-Kiefeld-Beschleuniger und der Plasma-Kiefeld-Beschleuniger. Ersterer stellt handliche Laborgeräte für niedrige Energien in Aussicht, Letzterer könnte einen Collider für die Hochenergiephysik ergeben.

Ultrakurze Lichtpulse

Plasma-Beschleuniger im Labortischformat sind erst durch intensive und kompakte Laser möglich geworden. Titan-Saphir-Laser erzeugen ultrakurze Lichtpulse mit 10 Terawatt (Billionen Watt) Spitzenleistung und passen inzwischen auf einen großen Labortisch (siehe »Extrem intensive Laserblitze« von Gérard A. Mourou und Donald Umstadter, Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 70).

In einem lasergetriebenen Plasma-Beschleuniger wird ein ultrakurzer Laserpuls auf einen Heliumstrahl von wenigen Millimetern Länge fokussiert. Der Puls setzt sofort die Elektronen im Gas frei und erzeugt ein Plasma. Der enorme Strahlungsdruck des Laserpulses treibt die Elektronen in alle Richtungen davon und lässt die viel schwereren Ionen zurück. Allzu weit können die Elektronen jedoch nicht kommen, denn die Ionen ziehen sie wieder zurück. Wenn die Elektronen die Bahnachse des Laserpulses er-

reichen, schießen sie darüber hinaus und flitzen wiederum auswärts, wodurch eine wellenähnliche Schwingung entsteht. Diese Oszillation heißt Kiefeld – fachsprachlich Wakefeld –, da sie quasi im Kielwasser (englisch *wake*) des Laserpulses durch das Plasma wandert.

Die Elektronen bilden dabei eine blasenähnliche Struktur mit einem Durchmesser von rund zehn Mikrometern. An der Spitze dieser winzigen Blase zieht der Laserpuls voran, der das Plasma erzeugt, und im Innern der Blase folgen die Ionen des Plasmas. Das elektrische Feld am Ort der Blase ähnelt einer Meereswelle, ist jedoch weitaus steiler. Obwohl auch andere Strukturen möglich sind, scheint das Erzeugen solcher Blasen die zuverlässigste Methode für die Beschleunigung von Elektronen zu sein.

Wenn nun eine Elektronenkanone von außen ein Elektron in eine Plasmaregion mit Elektronenüberschuss injiziert, erfährt das zusätzliche Teilchen ein elektrisches Feld, das es zu den positiven Ladungen innerhalb der Blase zieht. Da die Welle sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, muss das Elektron fast mit dieser Geschwindigkeit injiziert werden, damit es von der Welle erfasst und beschleunigt werden kann. Doch gemäß der Relativi- ▷

▷ tätstheorie erhöht jede weitere Steigerung der Elektronenenergie überwiegend die Teilchenmasse und nicht die Geschwindigkeit. Das Elektron eilt darum der Plasmawelle kaum voran, sondern reitet auf ihr und gewinnt immer mehr Energie. Auch aus dem Plasma werden einige Elektronen eingefangen und auf diese Weise beschleunigt – wie die Gischt auf der Krone einer Meereswelle.

Im Jahr 2002 zeigten Victor Malka und seine Arbeitsgruppe am Laboratorium für angewandte Optik der École Polytechnique bei Paris, dass ein lasergetriebenes Kiefeld einen stark gebündelten Strahl von 10^8 Elektronen zu erzeugen vermag. Leider verteilte sich die Energie der beschleunigten Elektronen über einen weiten Bereich – von 1 bis 200 MeV. Die meisten Anwendungen erfordern hingegen einen Strahl, in dem alle Elektronen dieselbe Energie haben.

Die breite Energieverteilung entstand, weil die Elektronen von der Kiefeldwelle an unterschiedlichen Orten und zu verschiedenen Zeiten eingefangen wurden. Bei herkömmlichen Beschleunigern werden die Teilchen an einem bestimmten Ort genau dann injiziert, wenn das elektrische Feld dort möglichst hohe Werte erreicht. Im Fall des Laser-Kiefelds hielten die Forscher eine präzise Injektion für unmöglich, weil die beschleunigende Struktur so winzig und kurzlebig ist.

Elektronengruppen, die sich selbst einfangen

Ein glücklicher Zufall brachte die Rettung. Im Jahr 2004 stießen drei konkurrierende Teams aus den USA, Frankreich und Großbritannien gleichzeitig auf ein neues physikalisches Phänomen, bei dem Elektronen sich selbst einfangen und als Gruppe dieselbe Energie erreichen. Alle drei Teams verwendeten einen besonders starken Laser mit mehr als zehn Terawatt Leistung. Wenn ein derart leistungsstarker Laserpuls durch das Plasma jagt, wird er kürzer und enger und erzeugt eine große Elektronenblase, die weitere Elektronen aus dem Plasma einfängt. Diese selbstgefangenen Elektronen sind so zahlreich, dass sie der Kielwelle reichlich Energie entziehen und dadurch weiteren Einfang verhindern. Die Elektronen mit der höchsten Energie beginnen dem Kiefeld davonzulaufen. Auf diese Weise verlieren vorne die höherenergetischen Elektronen bereits Energie, wäh-

rend hinten die niederenergetischen Nachzügler noch beschleunigt werden.

So entsteht ein Elektronenstrahl mit schmaler Energieverteilung. In Malkas neuem Experiment nahm die Breite des Energiespektrums von hundert auf zehn Prozent ab, obwohl der Strahl bis zu 10^9 Elektronen enthielt. Auch die Winkelstreuung war viel enger als in früheren Experimenten und entsprach den besten Strahlen herkömmlicher Mikrowellen-Linearbeschleuniger. Der erzeugte Elektronenstrahl – eigentlich ein Puls – hatte eine Länge von nur zehn Femtosekunden (10^{-14} Sekunden). Kein anderer Beschleuniger vermag derart kurze Pulse zu erzeugen; sie bieten sich damit als Strahlungsquelle für die zeitliche Auflösung ultraschneller chemischer und biologischer Prozesse an. Der Elektronenpuls könnte auf eine dünne Metallfolie gelenkt werden, um einen entsprechend kurzen Röntgenstrahlpuls zu erzeugen. Ich rechne damit, dass solche Röntgenquellen schon in ein bis zwei Jahren anwendungsreif werden.

Wie könnte man die Energie des Elektronenstrahls weiter steigern, um einen Kiefeld-Beschleuniger im GeV-Bereich zu bauen? Man braucht eine Plasmawelle, die über eine Distanz von etwa einem Zentimeter bestehen bleibt, nicht nur einige Millimeter weit. Der Laserstrahl, der die Welle anregt, muss im Plasma länger seine Intensität behalten, indem man ihn durch eine so genannte Plasmafaser führt. Ein besonders Erfolg versprechender Ansatz wird am Lawrence Berkeley National Laboratory verfolgt: die vorgeformte Plasmafaser. Bei dieser Methode werden die Elektronen längs der Achse des Plasmas durch vorlaufende Pulse ausgedünnt. Infolgedessen hat der Plasmakanal entlang seiner Achse eine höhere Brechzahl als an seinen Rändern und führt den Laserstrahl wie ein Lichtleiterkabel. Die Experimente in Berkeley haben bereits gezeigt, dass solche Kanäle Elektronenstrahlen scharf definierter Energie erzeugen. Weitere Fortschritte in dieser Richtung werden wahrscheinlich schon sehr bald den ersten kompakten Plasma-Beschleuniger im GeV-Bereich ergeben.

Wie aber lassen sich diese zentimetergroßen lasergetriebenen Plasma-Beschleuniger so erweitern, dass sie die für Elementarteilchenphysiker interessanten TeV-Energien erreichen? Eine Möglichkeit wäre, Hunderte von kompakten La-

ser-Plasma-Modulen, die jeweils einige GeV Energiegewinn bringen, aneinanderzureihen. Nach diesem Stufenprinzip (englisch *staging*) werden bereits die Mikrowellen-Beschleuniger kombiniert, um zu hohen Energien zu gelangen. Doch bei Plasma-Beschleunigern schafft dieser Stufenaufbau enorme Probleme.

Unterwegs zu höchsten Energien

Stattdessen wird gegenwärtig der so genannte Plasma-Nachbrenner favorisiert, bei dem ein einzelner Plasma-Kiefeld-Beschleuniger die Energie eines herkömmlichen Beschleunigers verdoppelt. Bei dieser Methode bringt zunächst ein normaler Beschleuniger zwei Elektronen- oder Positronenpulse auf mehrere Hundert GeV. Der erste Puls – der so genannte Treiberpuls – enthält dreimal so viele Teilchen wie der zweite, nachfolgende Puls. Treiber- und Folgepuls sind in der Regel nur je 100 Femtosekunden lang und durch 100 Femtosekunden getrennt. Wie beim Laser-Kiefeld-Beschleuniger

Der Plasma-Nachbrenner

Die Plasma-Kiefeld-Beschleunigung

wurde kürzlich am Stanford Linear-Collider (SLC) demonstriert. Dabei gewann ein Elektronenstrahl auf einer Strecke von nur 10 Zentimetern eine zusätzliche Energie von 4 GeV. Für denselben Effekt müsste ein herkömmlicher Mikrowellen-Beschleuniger 200 Meter lang sein.

Bei dem Experiment wurden in einem Ofen Lithium-Pellets verdampft. Ein intensiver Elektronenpuls (rot) ionisierte den Dampf und erzeugte ein Plasma. Der Puls trieb die Plasma-Elektronen auswärts; sie bildeten hinter dem Puls eine Störungswelle – ein Kiefeld. Elektronen, die von diesem Kiefeld erfasst wurden, erfuhren eine kräftige Beschleunigung (orangefarbene Pfeile).

Ohne Lithium-Zufuhr (a) lag die Energie des SLC-Strahls bei 30 GeV. Nachdem der Strahl das Lithium-Plasma durchquert hatte (b), verloren die meisten Strahlpartikel Energie (roter Ausläufer nach unten), die für das Erzeugen des Kiefelds verbraucht wurde. Das Kiefeld beschleunigte einige Elektronen, die sich zufällig am Ende des Pulses aufhielten, auf höhere Energie (blauer Ausläufer nach oben).

schleuniger produziert der in das Plasma fokussierte Treiberpuls eine Kielfeld-Blase – vorausgesetzt, die Dichte des Strahls ist größer als die des Plasmas. Der Prozess ist derselbe wie bei lasergetriebenen Kielfeldern, nur dass jetzt die treibende Kraft vom elektrischen Feld des Teilchenpulses ausgeht statt vom Strahlendruck eines Laserpulses. Die Elektronenblase umschließt den Folgepuls, der von der longitudinalen Komponente des resultierenden elektrischen Feldes rapide beschleunigt wird.

Physiker, die an innovativen Beschleunigungstechniken arbeiten, setzen große Hoffnungen in den Plasma-Kielfeld-Beschleuniger – vor allem, seit ein Team von Wissenschaftlern der UCLA, der University of Southern California und des Stanford Linear Accelerator Center (Slac) mit Hilfe der Strahlen des Stanford Linear Colliders drei entscheidende Fortschritte erzielt hat.

Erstens gelang es diesen Forschern, die Beschränkung auf wenige Millimeter

Strahllänge zu überwinden: Sie bauten einen meterlangen Plasma-Beschleuniger für Elektronen und Positronen. Es erforderte großes Geschick, die Treiberstrahlen über eine solche Länge stabil zu halten. Zweitens demonstrierten sie auf einer Strecke von nur 10 Zentimetern einen Energiegewinn von mehr als 4 GeV für Elektronen. Dieser Gewinn war nicht durch physikalische Grenzen limitiert, sondern nur durch technische Gründe – das heißt, er lässt sich durch bloßes Verlängern der Plasmastrecke steigern.

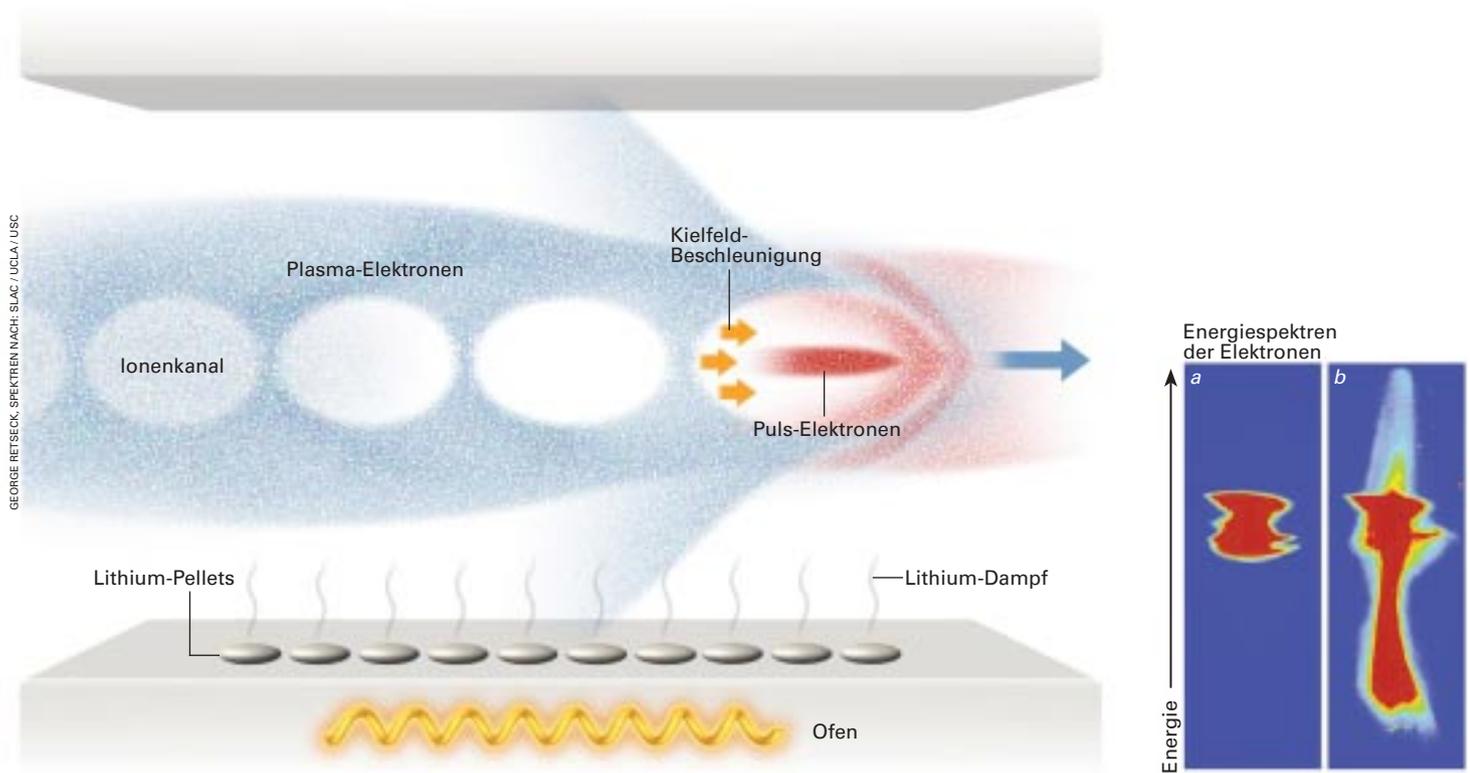
Hochkonzentrierte Teilchenstrahlen

Drittens zeigten sie, dass das Plasma einen bereits fokussierten Elektronen- oder Positronenstrahl noch mindestens um das Doppelte zu konzentrieren vermag. Das ist vor allem für einen Collider, in dem die beschleunigten Teilchen auf einen sehr kleinen Fleck fokussiert werden müssen, eine wichtige Verbesserung. Je konzentrierter die Strahlen, desto mehr Teilchenkollisionen gibt es – und für ei-

nen Collider ist die Kollisionsrate ein ebenso entscheidender Parameter wie die Gesamtenergie.

Doch bevor die Plasmamethode bis zu höchsten Energien vorangetrieben werden kann, muss sie zunächst mit einem bereits verfügbaren Beschleuniger als erster Stufe erprobt werden. Zum Beispiel könnte man am Stanford Linear Collider zu beiden Seiten des Kollisionspunkts je eine Plasma-Kielfeld-Stufe installieren. Das würde die Energie der Strahlen von derzeit 50 auf 100 GeV erhöhen. Jeder Plasma-Nachbrenner wäre rund 10 Meter lang. Zwar ist ein solches Projekt noch nicht bewilligt, doch das Slac hat bei der US-Energiebehörde den Bau eines Hochenergiestrahlföhrens namens Saber beantragt, um dem Ziel näher zu kommen.

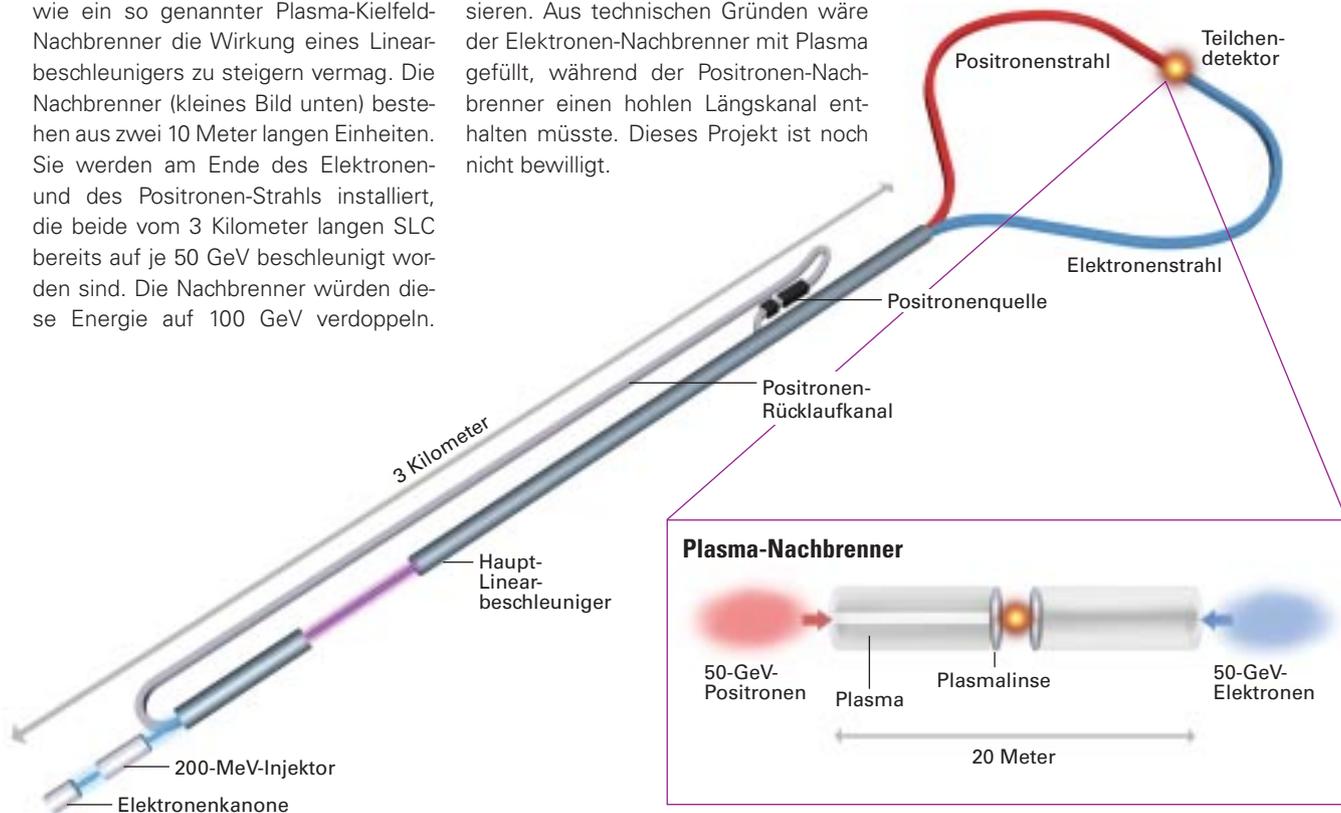
Bislang habe ich diese Plasma-Geräte lediglich als Elektronenschleudern beschrieben. Für positiv geladene Teilchen – etwa Positronen – muss die Richtung des elektrischen Feldes umgekehrt wer- ▷



Leistungssteigerung eines herkömmlichen Linearbeschleunigers

Ein geplantes Experiment am Stanford Linear-Collider (SLC) soll demonstrieren, wie ein so genannter Plasma-Kiefeld-Nachbrenner die Wirkung eines Linearbeschleunigers zu steigern vermag. Die Nachbrenner (kleines Bild unten) bestehen aus zwei 10 Meter langen Einheiten. Sie werden am Ende des Elektronen- und des Positronen-Strahls installiert, die beide vom 3 Kilometer langen SLC bereits auf je 50 GeV beschleunigt worden sind. Die Nachbrenner würden diese Energie auf 100 GeV verdoppeln.

Plasmalinsen sollen die Strahlen dann auf einen kleinen Kollisionspunkt fokussieren. Aus technischen Gründen wäre der Elektronen-Nachbrenner mit Plasma gefüllt, während der Positronen-Nachbrenner einen hohlen Längskanal enthalten müsste. Dieses Projekt ist noch nicht bewilligt.



GEORGE RETSECK

▷ den. Am einfachsten gelingt das mit einem Positronen-Treiberpuls. Dessen positive Ladung zieht die Elektronen des Plasmas nach innen, und wie im früheren Fall schießen sie über die Mittelachse hinaus und bilden eine Blase. Gegenüber der oben beschriebenen Konfiguration mit Elektronenpulsen weist das elektrische Feld jetzt in die entgegengesetzte Richtung, wie es zur Beschleunigung eines Folgepulses von Positronen erforderlich ist.

Außerdem können auf diese Weise auch schwerere Teilchen wie Protonen beschleunigt werden. Allerdings müssen sich die injizierten Teilchen bereits fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, damit sie nicht hinter der Plasmawelle zurückbleiben.

Auf dem Weg zum Plasma-Beschleuniger wurden zwar viele physikalische Grundprobleme inzwischen gelöst, doch vor dem Bau einer brauchbaren Anlage türmen sich noch große Hindernisse.

Wichtige Parameter müssen verbessert werden: die Strahlqualität, der Wirkungsgrad – der Anteil der auf die beschleunigten Teilchen übertragenen Treiberpulsenergie – und die Ausrichtungstoleranz, denn die Strahlen müssen am Kollisionspunkt auf Nanometer genau zusammentreffen. Schließlich ist auch die Wiederholrate der Maschine – die Anzahl der pro Sekunde beschleunigten Pulse – von Bedeutung.

Es dauerte 75 Jahre, bis herkömmliche Beschleuniger bei Elektron-Positron-Kollisionen Energien von 200 GeV erreichten. Die Entwicklung der Plasma-Beschleuniger schreitet viel schneller voran. In ein bis zwei Jahrzehnten, so hoffen die Forscher, werden die neuen Beschleuniger die Mikrowellensysteme in der Hochenergiephysik ablösen. Noch viel früher wird die Laser-Kiefeld-Technik vielfältige Anwendungen für Tischbeschleuniger im GeV-Bereich erschließen. ◁



Chandrashekhar Joshi ist Professor für Elektrotechnik an der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA) sowie Direktor des Center for High Frequency Electronics und der Neptune Advanced Accelerator Research Facility an der UCLA.

Als Pionier innovativer Beschleunigungskonzepte hat Joshi sich mit seinen Beiträgen zur nichtlinearen Optik der Plasmen und intensiven Laser-Materie-Wechselwirkung einen Namen gemacht.

Plasma-Teilchenbeschleuniger. Von John M. Dawson in: Spektrum der Wissenschaft 5/1989, S. 88

Accelerator physics: Electrons hang ten on laser wake. Von Thomas Katsouleas in: Nature, Bd. 431, S. 515, 2004, sowie drei weitere Forschungsberichte in derselben Ausgabe

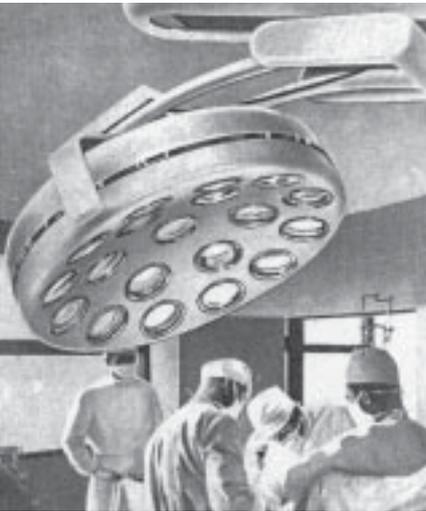
Plasma accelerators at the energy frontier and on tabletops. Von Chandrashekhar Joshi und Thomas Katsouleas in: Physics Today, Bd. 56, S. 47, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Cooler OP

»Während des 73. Deutschen Chirurgen-Kongresses in München fand eine neue Operationsleuchte das besondere In-



teresse der Kongreßteilnehmer. Die Forderungen der modernen Chirurgie nach blend- und schattenfreiem Licht ohne besondere Wärmeentwicklung und ohne Störung der Asepsis waren bisher noch nicht vollkommen erfüllt worden ... Die Scheinwerfer dieser neuen Operationslampe sind mit Plexiglasfiltern versehen, die keine Wärmestrahlen durchlassen. Sie leuchten ein tageslichtähnliches Feld von 40 cm Durchmesser aus ... Die schöne neue Lampe demonstriert, daß die Fortentwicklung der modernen Chirurgie und ihre Nutzbarmachung für die Kranken heute nicht nur ein technisches, sondern darüber hinaus ein finanzielles Problem sind.« *Die Umschau*, 56. Jg., Heft 16, S. 504, August 1956

◀ Die neue Leuchte hat außer einem Mittelscheinwerfer einen inneren und einen äußeren Scheinwerfer mit insgesamt 18 Lampen.

Die natürliche Milchpumpe

»Es ist bekannt, daß für die Milchdrüsenfunktion der Saugreiz ausschlaggebend ist. Neuere Untersuchungen machen es wahrscheinlich, daß dieser Reiz auf zwei Wegen wirksam wird, nämlich über die beiden Hauptteile der Hypophyse. Der hintere Abschnitt der Hypophyse wird durch das Saugen zur Abgabe von Oxytocin ins Blut angeregt. Dieses Hormon ... wirkt auf die Muskelfasern der Milchgänge, so daß die Brustdrüse wie ein Schwamm von innen heraus ausgedrückt wird. Außerdem aber bewirkt der Saugreiz eine verstärkte Aktion des Hypophysen-Vorderlappens in Gestalt einer Ausschüttung von Prolactin. Dieses Hormon wiederum regt die Milchbildung im Drüsengewebe der Brust an.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 9. Jg., Heft 8, S. 321, August 1956

Der Dreh des Pluto

»Der Planet Pluto ist in Fernrohren gerade noch als Scheibchen zu erkennen. Es ist daher nicht möglich, aus Einzelheiten an der Oberfläche oder mit spektroskopischen Mitteln seine Rotationsperiode festzustellen. Jetzt scheint dies auf andere Weise gelungen zu sein. Über längere Zeit haben Forscher die Helligkeit des Planeten photoelektrisch gemessen. Innerhalb einer Nacht konnten sie keine Änderung der Helligkeit feststellen, jedoch ergaben sich merkliche Unterschiede von Nacht zu Nacht. Die Analyse ergab eine periodische Helligkeitsänderung von 0,1 Größenklassen und einer Periode von 6 Tagen, 9 Stunden und 21,5 Minuten. Diese Helligkeitsschwankung spiegelt sehr wahrscheinlich die Rotation des Pluto wider.« *Die Umschau*, 56. Jg., Heft 15, S. 473, August 1956

Mutterinstinkt bei Spinnen

»Welche seltsamen Formen der Mutterinstinkt bei den Spinnen annimmt, darüber hat ein französischer Forscher Versuche mit einer Abart der Feldspinnen angestellt ... Er wollte feststellen, ob die Spinnen zu ihrer Brut eine Art von persönlichem Verhältnis haben; deshalb entfernte er die Muttertiere ... Würde nun ein Tier in ein fremdes Nest gesetzt, so adoptierte es gewissermaßen die fremde Brut, doch war sein Verhältnis zu derselben kein sonderlich inniges. Denn wurde die alte Mutter in ihr richtiges Nest zurückgesetzt, so schritt sie sofort zum Angriff gegen die Adoptivmutter. Diese aber ließ es niemals zu einem Kampf kommen, sondern machte sich schleunigst aus dem Staube.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung*, Nr. 194, S. 358, August 1906

Tuberkulose durch Lesen?

»Über die hygienische Unschädlichmachung viel benutzter Bücher hat die Berliner städtische Bibliothekverwaltung Untersuchungen angestellt. Mit Auslaugungen aus arg beschmutzten Büchern, die auch Tuberkelbazillen enthielten, wurden Versuche an Meerschweinchen gemacht. Bei zwei Jahre hindurch benutzten Büchern reagierten die Versuchstiere überhaupt nicht. Bei besonders beschmutzten, drei bis sechs Jahre im Gebrauch gewesenen Büchern wurden lebende Tuberkelbazillen angetroffen und gingen bei Impfversuchen einige Tiere ein, nicht aber bei Schmutzeinspritzungen. Versuche mit Sterilisierung durch Formalindämpfe haben die Bazillen nicht abgetötet. Wohl aber litten die Bücher, insbesondere die Deckel, sehr.
Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 190, S. 327, August 1906

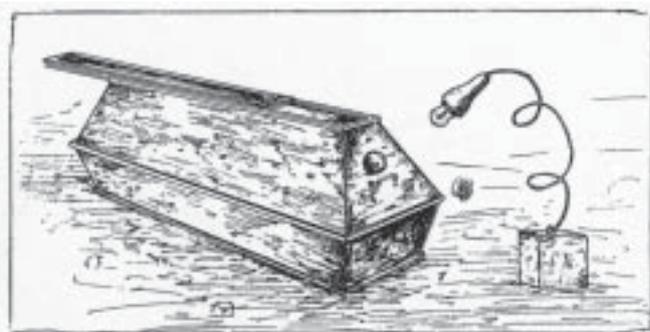
Hygienische Totenbeschau

»Auf dem Gebiete des Beerdigungswesens ist eine zweckdienliche Neuheit in Deutschland und in vielen Kulturstaaten zum Patent angemeldet worden. Sie betrifft einen Sarg mit Beleuchtungsvorrichtung, durch welchen es möglich ist, den Toten zu beschauen, ohne dass der Sarg geöffnet ist. Namentlich bei ansteckenden Krankheiten ist dies in gesundheitlicher Beziehung von gros-



sem Vorteil. Die Konstruktion ist eine sehr sinnreiche und einfache. Die für die Beleuchtung nötige elektrische Batterie wird dem Sargbesteller, solange der Tote im Hause liegt, leihweise überlassen, so dass hierdurch keine Mehrkosten entstehen.« *Deutsche Export-Revue*, 6. Jg., Nr. 10, S. 372

▼ Durch die Glasscheibe im Sargdeckel kann der Tote betrachtet werden.



Die vermeidbare Katastrophe?

Viele zivile Forschungsreaktoren enthalten hoch angereichertes Uran, das Terroristen zum Bau von Nuklearwaffen nutzen könnten. Zwei Kernphysiker berichten, welche Maßnahmen derzeit ergriffen werden, um das Problem in den Griff zu bekommen.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen,  siehe: www.spektrum.de/audio

Von Alexander Glaser
und Frank N. von Hippel

Die Atombombe, die am Ende des Zweiten Weltkriegs Hiroshima verwüstete, enthielt rund 60 Kilogramm spaltbares Uran – weit weniger, als heute in zahlreichen Forschungsreaktoren weltweit lagert. Dieser Umstand wird international mit wachsender Sorge betrachtet, da es vergleichsweise einfach ist, aus solchem Material eine zwar primitive, aber effektive Kernwaffe zu konstruieren. Als »Little Boy«, wie die Amerikaner die Hiroshima-Bombe nannten, über der japanischen Hafenstadt explodierte, wurde ein unterkritischer Teil der Uranladung mit einer simplen Technik – wie mit einem Kanonenrohr – auf den anderen Teil geschossen. Dabei vereinigten sich die beiden Uran-235-Teilladungen zu einer überkritischen Masse – und explodierten mit einer Sprengkraft von 15 Kilotonnen TNT. Einige Tage später zerstörte eine zweite Bombe die Stadt Nagasaki: Statt Uran enthielt diese Plutonium und benötigte zur Zündung einen sehr viel komplizierteren Mechanismus.

Obwohl seitdem insgesamt mehr als hunderttausend Atombomben gebaut wurden – und in den folgenden

60 Jahren mehrmals auch kurz vor dem Einsatz standen –, hat es bis heute keine vergleichbaren nuklearen Zerstörungen mehr gegeben. Inzwischen hat sich jedoch eine neue Bedrohung entwickelt: Weltweit operierende Terrororganisationen wie El Kaida könnten sich hoch angereichertes Uran (*highly enriched uranium*, HEU) beschaffen, in dem der Gehalt an bombenfähigem Uran-235 auf über 20 Gewichtsprozent konzentriert wurde. Damit könnten sie eine rudimentäre Nuklearwaffe nach dem Kanonenrohrprinzip bauen und gegen eine Stadt richten.

Das technische Know-how zum Bau einer Atombombe nach diesem Prinzip ist so einfach, dass die Physiker, die »Little Boy« im Rahmen des Manhattan-Projekts konstruiert hatten, die Bombe vor dem Abwurf (im Gegensatz zur Plutoniumbombe) nicht einmal testeten. Sie waren sich sicher, dass dieses Konzept wie geplant funktionieren würde. Experten sind sich daher einig, dass auch eine Terrororganisation, die über genügend finanzielle Mittel verfügt, eine funktionsfähige Atombombe bauen könnte.

Zwar ist die Herstellung von HEU aufwändig und kostspielig, sodass nichtstaatliche Gruppen dazu nicht in der Lage wären. Doch könnte der Bombenstoff gestohlen werden oder

auf dem Schwarzmarkt erhältlich sein: Auf der Erde existieren rund 1800 Tonnen des Materials. Produziert wurde es während des Kalten Kriegs hauptsächlich von den USA und der früheren Sowjetunion.

HEU findet heute sowohl im zivilen als auch im militärischen Bereich Verwendung. Wir wollen uns hier auf zivile HEU-Bestände konzentrieren, die fast ausschließlich für ihren Einsatz in Forschungsreaktoren bereitgehalten werden. (Uran als Brennstoff für die Stromerzeugung in Atomkraftwerken ist typischerweise nur leicht angereichert: Sein Uran-235-Gehalt liegt bei lediglich drei bis fünf Gewichtsprozent.)

Schlecht geschützte Reaktoren

Über 50 Tonnen HEU werden derzeit im zivilen Bereich gelagert oder genutzt. Sie decken den Brennstoffbedarf von etwa 140 Forschungsreaktoren, die wissenschaftlichen oder industriellen Aufgaben dienen. Auch radioaktive Isotope für medizinische Anwendungen werden damit produziert. Die meisten dieser Anlagen stehen in städtischen Gebieten und werden von Überwachungssystemen oder Wachpersonal oft nur unzureichend geschützt. Besonders Besorgnis erregend sind die Forschungsreaktoren in Russland. Dort werden rund ein Drittel der



Tiefblau leuchtet die Tscherenkow-Strahlung im Kühlwasser eines Forschungsreaktors. In vielen Fällen sind die Sicherheitsvorkehrungen für zivile Einrichtungen zum Schutz ihrer Uran-235-Bestände ungenügend. Die Umrüstung solcher Anlagen auf Brennstoffe, die für Kernwaffen untauglich sind, packt die Gefahr des Nuklearterrorismus an der Wurzel, denn nur so lassen sich vorhandene zivile Bestände des Bombenmaterials effektiv abbauen.

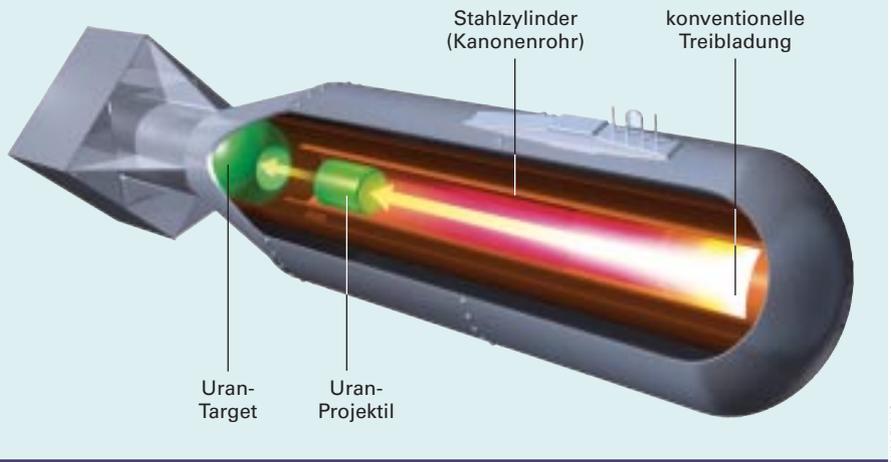
weltweit existierenden HEU-Reaktoren betrieben, die jedoch mehr als die Hälfte des gesamten zivilen hoch angereicherten Materials enthalten.

Die Sicherung dieser Anlagen hat hohe Priorität (siehe Kasten auf S. 74). Um die Möglichkeit des Nuklearterrorismus langfristig zu minimieren oder nahezu auszuschließen, ist es allerdings am wirksamsten, die Verwendung von HEU so weit wie möglich aufzugeben und die vorhandenen Bestände zu entsorgen. Das dabei zurückgewonnene HEU lässt sich mit Uran-238 strecken – dem häufigsten Uranisotop, das selbst keine Kettenreaktion aufrechterhalten kann. Auf diese Weise entsteht niedrig angereichertes Uran (*low-enriched uranium*, LEU). Bei einem Uran-235-Gehalt von unter 20 Prozent ist es für Atomwaffen nicht einsetzbar.

Dass sich auf der Welt so große Menge zivilen HEUs anhäufen konnte, geht vor allem auf die »Atoms for Peace«-Ära der 1950er und 1960er Jahre zurück. Damals errichteten die beiden Supermächte Hunderte von Forschungsreaktoren für ihre jeweiligen zivilen und militärischen Nuklearprogramme. Zugleich belieferten sie rund 50 weitere Länder mit solchen Reaktoren, um deren politische Gunst zu gewinnen und ihre Reaktortechno- ▶

Bauplan für eine Atombombe

Weniger als 100 Kilogramm an hoch angereichertem Uran reichen aus, um eine Atombombe zu bauen, die nach dem gleichen Prinzip (unten) funktioniert wie die Bombe »LITTLE BOY«, die 1945 Hiroshima zerstörte. Die Bombenbauer müssten dazu einen Teil des Urans zu einem Projektil formen, das in einen kanonenrohrähnlichen Stahlzylinder passt, und dieses vor einer konventionellen Treibladung (im Wesentlichen: Schießpulver) platzieren, die sich an einem Ende des Zylinders befindet. Das restliche Uran wird am anderen Ende des Zylinders positioniert. Bei der Zündung der Treibladung wird das Uran-Projektil auf die zweite Uranmasse geschossen. Dadurch wird die kombinierte Anordnung überkritisch – und die Atombombe explodiert.



▷ logien im Ausland zu etablieren. Als später der Bedarf an langlebigerem Nuklearbrennstoff wuchs, wurden existierende Exportbeschränkungen gelockert. Als Folge wurden die meisten Forschungsreaktoren für den Betrieb mit waffenfähigem HEU ausgelegt, welches die beiden Supermächte für ihre Kernwaffenprogramme in gewaltigen Mengen produzierten. Dieses hoch angereicherte Material enthält rund 90 Prozent Uran-235. Mitte 2006 lagerten in Nichtkernwaffenstaaten immer noch über zehn

Tonnen waffenfähiges HEU – genug für 150 bis 200 Bomben nach dem Kanonenrohrprinzip.

Erst in den 1970er Jahren unternahm die US-Regierung erste Schritte, um zu verhindern, dass aus dem Brennstoff, der in den zwei Jahrzehnten davor für Forschungsreaktoren exportiert worden war, Atomwaffen hergestellt werden. Besonders bedeutsam ist das 1978 ins Leben gerufene Programm »Reduced Enrichment for Research and Test Reactors« (RERTR), das die Umstellung von

Reaktoren auf den Betrieb mit niedrig angereichertem Brennstoff vorsieht. Bis Mitte 2006 wurden so 43 Reaktoren umgerüstet. Insgesamt hatten diese Anlagen davor von den USA jährlich rund 300 Kilogramm frisches waffenfähiges HEU erhalten.

Problemreaktor in München

In Deutschland, das sich vor allem in den 1980er Jahren am RERTR-Programm beteiligte, wurden in der Vergangenheit zwei Reaktoren auf niedrig angereichertem Brennstoff umgestellt: der FRG-1 1991 in Geesthacht bei Hamburg sowie der BER-II 2000 in Berlin. Im Mai 2006 ging in Jülich ein weiterer HEU-Reaktor vom Netz. Damit steht in Deutschland nur noch ein einziger Reaktor, der heute HEU als Brennstoff nutzt: der FRM-II, der erst im März 2004 – nach zum Teil heftigen Debatten – an der TU München in Garching in Betrieb gegangen ist. Schon er allein wird die globalen Bemühungen zum Abbau der HEU-Bestände deutlich erschweren. Denn der Münchener Reaktor wird in den kommenden 40 Jahren mehr als 1,6 Tonnen HEU benötigen, sollte er vorher nicht auf LEU umgestellt werden.

Abgesehen von dieser Ausnahme wird derzeit weltweit die Umrüstung von 42 Reaktoren vorbereitet. Leider können etwa zehn Hochflussreaktoren erst dann auf LEU umgerüstet werden, wenn die Entwicklung neuer Brennstoffe niedriger Anreicherung mit höherem Leistungspotenzial abgeschlossen ist. Diese Reaktoren, die allein zurzeit jährlich 400 Kilogramm HEU benötigen, haben typischerweise hochkompakte Reaktorkerne, um den für Streuexperimente oder Materialtests verfügbaren Neutronenfluss zu maximieren. Heutige LEU-Brennelemente können in solchen Reaktoren, die ursprünglich für HEU konzipiert wurden, die nukleare Kettenreaktion nicht ausreichend lang aufrechterhalten.

Um möglichst wenig Änderungen am Reaktordesign vornehmen zu müssen, versuchen die Forscher des RERTR-Programms hochdichte LEU-Brennstoffe herzustellen, sodass die äußeren Abmessungen der Brennelemente unverändert bleiben. Das stellt eine große ingenieurtechnische und materialwissenschaftliche Herausforderung dar: In niedrig angereichertem Brennstoff sind Uran-235 und Uran-238 im Verhältnis 1 : 4 gemischt. Daher muss der Uran-

IN KÜRZE

- ▶ **Mit weniger als 100 Kilogramm** hoch angereichertem Uran (HEU) könnten Terroristen eine einfache, aber wirksame Atombombe bauen. HEU ist zudem für Länder attraktiv, die verdeckte Kernwaffenprogramme betreiben und auf Kernwaffentests verzichten wollen.
- ▶ **Große Mengen an HEU** werden weltweit in nuklearen Forschungsanlagen aufbewahrt, oft – und insbesondere in Russland – nur unzureichend gesichert.
- ▶ International werden **verschiedene Initiativen** verfolgt, welche die Gefahren senken sollen, die mit hoch angereichertem Uran verbunden sind. Dazu gehören Programme zur Erhöhung der Sicherheit von Forschungsanlagen mit HEU-Beständen, Programme zur Umrüstung von HEU-Reaktoren auf den Betrieb mit nichtwaffentauglichem, niedrig angereichertem Uran (LEU) sowie Initiativen zum globalen Abbau vorhandener HEU-Bestände.
- ▶ **Mit relativ geringen finanziellen Mitteln** und internationaler Kooperation könnte das Problem in wenigen Jahren beherrschbar sein.

gehalt in diesen gegenüber den alten HEU-Brennelementen ungefähr um das Fünffache erhöht werden – ohne dabei das Volumen zu vergrößern. Nach mehrjähriger Entwicklungsarbeit steht nun eine neue Generation hochdichter LEU-Brennstäbe kurz vor der abschließenden Testphase.

In den 1990er Jahren begannen die USA mit Russland zu kooperieren, um die dortigen Bestände an hoch angereicherterem Uran zu sichern und nach und nach abzubauen. Anstoß gaben Diebstähle von »frischem« (unbestrahltem) HEU in Russland und anderen Ländern der früheren Sowjetunion. Niemand außerhalb Russlands – und möglicherweise auch niemand in Russland selbst – weiß heute, wie viel Material in dieser Zeit tatsächlich abhanden kam.

Um die Bestände an zivilem HEU in Russland weiter zu reduzieren, riefen die USA 1999 das Programm »Material Consolidation and Conversion« ins Leben. Es sieht vor, ungenutztes russisches HEU – etwa 17 Tonnen – aus zivilen Anlagen aufzukaufen und es dann mit Uran-238 zu strecken. Bis Ende 2005 waren etwa sieben Tonnen hoch angereichertes Uran auf einen Uran-235-Gehalt von 20 Prozent gestreckt worden.

Selbstschützende Brennelemente

Eine weitere Initiative widmet sich dem abgebrannten HEU-Brennstoff. Beim Entladen von Brennelementen aus Forschungsreaktoren ist typischerweise erst die Hälfte des enthaltenen Uran-235 verbraucht. Doch auch in diesem abgebrannten Material beträgt sein Anteil immer noch rund 80 Prozent, was gerade dem Anreicherungsgrad entspricht, wie er auch in der Hiroshima-Bombe verwendet wurde. In den ersten Jahren nach dem Entladen ist der Kernbrennstoff auf »natürliche« Weise vor Diebstahl geschützt: Er strahlt dann noch so stark, dass jeder direkte Umgang damit innerhalb weniger Stunden zum Tod führen würde.

Mitarbeiter in Nuklearanlagen handhaben diese Stoffe nur ferngesteuert und mit aufwändigen Strahlenschutzmaßnahmen. Mit der Zeit klingt die Gefahr jedoch ab. Ein Beispiel: Nach 25 Jahren würde es etwa fünf Stunden dauern, bis eine Person ohne Schutzvorkehrungen in einem Meter Abstand von einem typischen, fünf Kilogramm schweren Brennelement mit 50-prozentiger Wahr-

scheinlichkeit eine tödliche Strahlendosis erhält. Unterhalb einer solchen Strahlenbelastung wird der Brennstoff nach Auffassung der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) nicht mehr als »selbstschützend« betrachtet.

Abgebrannte HEU-Brennelemente verlieren mit den Jahren also immer

mehr ihre selbstschützenden Eigenschaften – und ein großer Teil dieser Hinterlassenschaft wird bereits mehr als 40 Jahre gelagert. Um die damit verbundenen Gefahren in den Griff zu bekommen, bieten die USA seit 1996 denjenigen Ländern, die in der Vergangenheit amerikanischen hoch angereicherten

Wie Nuklearterroristen vorgehen würden

Um eine Nuklearwaffe herzustellen, müsste eine nichtstaatliche Gruppe zunächst an einen Vorrat mit hoch angereicherterem Uran (HEU) gelangen – entweder durch Kauf oder Diebstahl. Natürliches Uran besteht hauptsächlich aus dem Isotop Uran-238, das bei Absorption eines Neutrons keine nukleare Kettenreaktion aufrechterhalten kann. Es enthält nur sehr geringe Mengen (0,7 Prozent) des zu Kettenreaktionen fähigen Isotops Uran-235. Die Isotope unterscheiden sich in ihrem Gewicht um etwa ein Prozent. Diese Differenz kann genutzt werden, um beide voneinander zu trennen und so die Konzentration von Uran-235 zu erhöhen – ein Vorgang, der Urananreicherung genannt wird. Nichtstaatliche Gruppen sind nicht in der Lage, dies in Eigenregie durchzuführen, da die hierzu verwendeten Technologien und Prozesse zu komplex, Zeit raubend und kostspielig sind.

In einer HEU-Anordnung, die gerade eben kritisch ist, löst im Mittel genau eines der zwei bis drei Neutronen, die ein Uran-235-Kern bei dessen Spaltung freisetzt, eine weitere Spaltung aus. Die Mehrzahl der übrigen Neutronen entweicht aus der Anordnung in die Umgebung. Um eine funktionsfähige Atombombe nach dem Kanonenrohrprinzip zu konstruieren, benötigen Bombenbauer rund das Doppelte einer kritischen Masse an hoch angereicherterem Uran, sodass die Spaltung eines U-235-Kerns jeweils mehr als eine weitere Spaltung auslöst. Auf diese Weise entsteht eine exponentiell wachsende Kettenreaktion. Sie führt – wie bei der Hiroshima-Bombe – zur Explosion,

bei der die Gesamtenergie innerhalb einer millionstel Sekunde freigesetzt wird. Weniger als die kritische Masse wird zum Bau einer Implosionsbombe vom Nagasaki-Typ benötigt. Bei diesem Konstruktionsprinzip wird eine Kugel (oder -hohlkugel) aus hoch angereicherterem Uran oder Plutonium zur Überkritikalität geführt, indem sie durch speziell geformte Sprengladungen (so genannte Sprenglinsen) komprimiert wird. Diese Implosion reduziert die Abstände zwischen den Atomkernen, durch die Neutronen sonst entkommen würden, ohne weitere Kernspaltungen auszulösen.

Waffenfähiges Uran enthält über 90 Prozent spaltbares Uran-235. Waffenexperten haben die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) jedoch bereits in den 1950er Jahren darauf aufmerksam gemacht, dass jede beliebige HEU-Zusammensetzung – also Uran mit einem Uran-235-Gehalt von über 20 Prozent – als »direkt verwendbares« Material (*direct use nuclear material*) betrachtet werden muss, also in Atomwaffen verwendbar ist. Bei einem Uran-235-Gehalt von unter 20 Prozent wird die kritische Masse zu groß, um für eine Waffe tatsächlich tauglich zu sein: Die kritische Masse von Uran mit 93 Prozent Uran-235-Gehalt und umgeben von einem fünf Zentimeter dicken Neutronen-Reflektor aus Beryllium beträgt etwa 22 Kilogramm. Das entspricht einer Kugel von 13 Zentimeter Durchmesser. Bei nur 20-prozentigem Uran-235-Gehalt erhöht sich die entsprechende kritische Masse auf über 400 Kilogramm.

DEPARTMENT OF ENERGY

▶ Handliche Scheiben mit waffenfähigem Uran werden in den »kritischen Anordnungen« Russlands zu Zehntausenden verwendet – eine Einladung für Diebe.



▷ Brennstoff erhalten hatten, die Möglichkeit, zwei gebräuchliche Arten von abgebrannten Brennelementen in die USA zurückzugeben. Sechs Jahre später starteten die USA gemeinsam mit Russland und der IAEA eine Initiative, frisches und abgebranntes HEU auch nach Russland zurückzuschicken. Die bisherige Umsetzung ist jedoch mäßig. Bis Oktober 2005 war erst Brennstoff mit einem ursprünglichen Gehalt von weniger als einer Tonne HEU in die USA zurückgeführt – rund 10 Tonnen liegen weiterhin im Ausland. Etwa 100 Kilogramm unbestrahltes hoch angereichertes Uran wurden nach Russland zurückgeschickt – etwa zwei Tonnen dieses Materials lagern immer noch in Forschungsreaktoren russischen Typs im Ausland.

Nach den Terroranschlägen vom 11. September 2001 wurde vor allem in den USA gefordert, die Sicherung und den Abbau der weltweit existierenden zivilen HEU-Bestände ernsthafter in Angriff zu nehmen. In der Folge rief das DOE (Department of Energy) im Jahr 2004 die »Global Threat Reduction Initiative« ins Leben (GTRI, die Initiative zur Reduzierung globaler Bedrohungen). Ziel dieser Initiative ist, die oben genannten Programme zu beschleunigen und auf neue Bereiche zu erweitern. So soll unbestrahlter HEU-Brennstoff aus russischer Fertigung bis Ende 2006 und bestrahlter Brennstoff bis 2010 zurückgeholt werden. Der gesamte abgebrannte HEU-Brennstoff aus US-amerikanischer Fertigung soll bis spätestens 2014 in die Vereinigten Staaten zurückgeführt werden. Ebenso sieht der Plan vor, alle amerikanischen Forschungsreaktoren bis 2014 auf LEU-Brennstoff umzustellen.

In einigen Bereichen wurden also die Bemühungen verstärkt, die Verwendung von HEU weiter einzuschränken und das Material zu entsorgen. Doch selbst eine Anhebung des Budgets um 25 Prozent im Jahr 2005 auf etwa 70 Millionen Dollar lässt das Programm winzig erscheinen im Vergleich zu anderen US-amerikanischen Multi-Milliarden-Dollar-Initiativen wie etwa dem Aufbau des Raketenabwehrsystems. Paradoxerweise tragen gerade die niedrigen Kosten des Programms zur HEU-Beseitigung mit dazu bei, dass es in dieser US-Regierung keine hochrangigen Fürsprecher gibt.

In Russland ist die Situation noch bedenklicher. Die dortige Regierung scheint sich wenig Sorgen um die Sicher-

heit von zivilen Beständen waffenfähiger Materialien zu machen und konnte sich bislang noch nicht dazu durchringen, russische Forschungsreaktoren auf LEU-Brennstoff umzustellen.

Die derzeit vielversprechendsten Projekte zur Sicherung und Entsorgung von HEU innerhalb Russlands verfolgen daher einen »bottom-up«-Ansatz: Die Projektleiter verhandeln auf lokaler Ebene direkt mit einzelnen Kernforschungszentren. Danach obliegt es den Instituten, die notwendigen Genehmigungen einzuholen. Dieser Ansatz funktioniert, weil bereits ein für die russische Regierung bedeutungsloses Ein-Millionen-Dollar-Projekt einem finanzschwachen Institut dennoch hochwillkommen sein kann – sodass zurzeit mehrere Projekte laufen, die so in die Wege geleitet wurden.

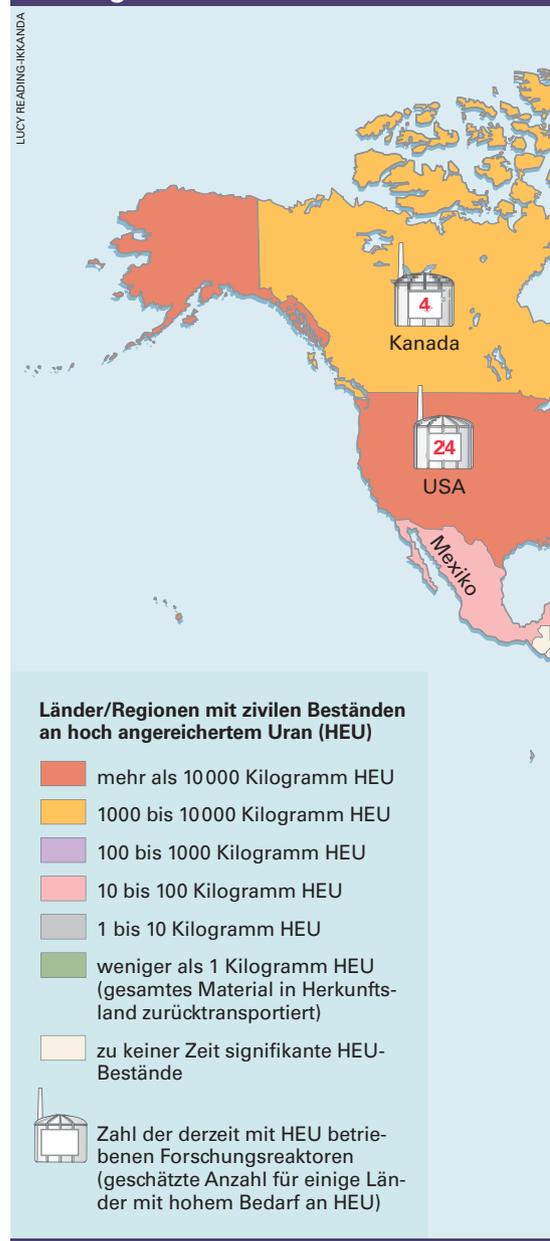
Uran ungesichert im Wandschrank

Aktuelle Aktionen zur Umrüstung von Reaktoren und zur Rückholung von abgebrannten HEU-Brennstoffen widmen sich jedoch nur solchen Forschungsreaktoren, die regelmäßig neuen Brennstoff benötigen. So bleiben zwei Arten von Forschungsreaktoren bislang unberücksichtigt: so genannte kritische Anordnungen sowie gepulste Reaktoren. Diese Reaktortypen können jedoch außergewöhnlich große Mengen des gefährlichen Spaltmaterials enthalten.

Eine kritische Anordnung ist der Versuchsaufbau eines Reaktors, mit dem getestet wird, ob das Design tatsächlich wie erwünscht eine nukleare Kettenreaktion aufrechterhalten – und somit »kritisch« werden – kann. Da solche Anordnungen häufig nur für eine Leistung von rund hundert Watt ausgelegt sind, benötigen sie keine Kühlsysteme. Kerntechniker können sie vergleichsweise einfach aus Brennstoff und anderen Materialien aufbauen. Einer von uns (von Hippel) sah 1994 das erste Mal so eine Anordnung, als er als Mitarbeiter des Weißen Hauses, begleitet von einer Gruppe amerikanischer Experten, das Kurtschatow-Institut besuchte, ein Forschungszentrum für Atomenergie in Moskau.

In einem unbewachten Gebäude wurde ihnen dort 70 Kilogramm fast reines, waffenfähiges Uran in Scheibenform gezeigt, aufbewahrt in einer Art Spind. Dieses Uran-235 sollte für die kritische Anordnung eines Weltraumreaktors verwendet werden. Der Besuch

Wo gefährliche Bestände



veranlasste die USA erstmals, Geldmittel zur Verfügung zu stellen, um die Sicherheitsvorkehrungen in einem russischen Kernforschungszentrum zu erhöhen. Erst vor Kurzem vereinbarten das Kurtschatow-Institut und das DOE ein Gemeinschaftsprojekt, das vorsieht, die zahlreichen kritischen Anordnungen des Instituts stillzulegen und den dabei anfallenden HEU-Brennstoff zu entsorgen.

Eine ähnliche Anlage steht am Institut für Physik und Kraftwerk-Ingenieurwesen (IPPE) in Obninsk bei Moskau. Sie enthält vermutlich das weltweit größte zivile HEU-Inventar: 8,7 Tonnen, gepresst zu Zehntausenden flacher Brennstoffscheiben von gut fünf Zentimeter



Gegenwärtig sind weltweit rund 140 zivile Kernforschungsanlagen in Betrieb. Sie enthalten insgesamt etwa 50 Tonnen hoch angereichertes Uran. Die Möglichkeit, dass solches Material gestohlen werden könnte, wird international mit großer Besorgnis betrachtet, da viele dieser Anlagen nur über unzureichende Sicherheitssysteme verfügen.



Durchmesser (siehe Bild S. 71). Techniker stapeln diese Scheiben, zwischen die auch andere Scheiben mit abgereichertem Uran gelegt werden, um so unterschiedliche Anreicherungsgrade des Brennstoffs und schließlich einen ganzen Reaktor zu simulieren. Da die Scheiben selbst nur schwach strahlen, können Techniker direkt damit umgehen.

Albtraum für die Sicherheitstechnik

Kontrollen, die sicherstellen würden, dass keiner von ihnen mit einer dieser Scheiben das Institut verlässt, sind ein sicherheitstechnischer Albtraum. Tatsächlich konnten wir den IPPE-Direktor aber davon überzeugen, dass das Labor

gar kein kein waffentaugliches Uran benötigt.

Eine zweite unterschätzte potenzielle Bezugsquelle für hoch angereichertes Brennstoffe stellen gepulste Reaktoren dar, die für extrem kurze Zeiträume von nur wenigen Millisekunden mit sehr hoher Leistung betrieben werden. Waffenslabors testen mit solchen Reaktoren, wie Materialien und Instrumente auf intensiven, kurzzeitigen Beschuss von Neutronen reagieren. Solche starken Neutronenemissionen treten bei Atombombenexplosionen auf. Gepulste Reaktoren stellen ein ähnliches Sicherheitsproblem dar wie kritische Anordnungen, da ihr Brennstoff ebenfalls nur schwach radio-

aktiv ist. Ein gepulster Reaktor des russischen Forschungsinstituts für Experimentalphysik (VNIIEF) – Russlands wichtigste Waffenschmiede, rund 400 Kilometer östlich von Moskau – enthält 800 Kilogramm HEU, genug für 15 Hiroshima-Bomben. Als einer von uns (von ▶

Wie der Diebstahl von Nuklearmaterialien verhindert werden kann



◀ Viele russische Kernforschungszentren sind nicht ausreichend gegen Einbrüche geschützt, die Zäune verrottet (ganz links). Inzwischen gibt es Schutzzonen (links).

Von Leslie G. Fishbone

Solange die Nutzung von hoch angereichertem Uran (HEU) als Brennstoff in zivilen Forschungsreaktoren noch nicht vollständig eingestellt ist, muss die Sicherheit von Anlagen, die HEU nutzen oder lagern, erhöht werden. Diese Maßnahmen sollen Terroristengruppen daran hindern, das Material für den Bau von Bomben zu stehlen. Einen solchen Ansatz verfolgen amerikanische und russische Experten gemeinsam in russischen Forschungszentren. Er demonstriert beispielhaft mögliche Maßnahmen – und zugleich die Probleme, die bei derartigen Programmen auftreten.

Dass zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind, zeigte sich 1992, als ein Ingenieur einer Atomanlage bei Moskau insgesamt 1,5 Kilogramm HEU entwendete – in kleinen »Portionen«, verteilt über mehrere Monate. Die Leiter der Brennelementfabrik bemerkten den Verlust zwar rechtzeitig, bevor das Material weiterverkauft werden konnte. Der Diebstahl hätte aber noch bedrohlicher sein können. Nach Schätzungen der Internationalen Atomenergiekommission IAEA reichen 25 Kilogramm aus, um eine Atombombe nach dem Implosionsprinzip zu bauen.

Dieser und einige andere Vorfälle offenbarten die niedrigen Sicherheitsstandards beim Umgang mit Kernwaffenmaterialien in Russland. Als die Sowjetunion 1991 zusammenbrach, waren ihre Nuklearanlagen vermehrt der Gefahr von Übergriffen ausgesetzt, mit oder ohne Wissen und Unterstützung von Insidern (also Mitarbeitern der Anlagen). Monatelang erhielten Wissenschaftler, Ingenieure und Wachpersonal kein Gehalt, das Management des gesamten Systems löste sich auf. Das ließ Befürchtungen aufkommen, Nuklearmaterial könne entwendet werden. Russland, die USA und andere Länder erkannten die

Gefahren, die das ungesicherte Material barg, und starteten gemeinsam Programme, um diesen Risiken entgegenzuwirken.

Das 1993 initiierte Programm für Materialschutz und -erfassung (Material Protection Control and Accounting, MPC&A) ist eines davon. Es sieht vor allem die Zusammenarbeit der Kernforschungszentren der amerikanischen Energiebehörde mit denen der Russischen Föderation vor. Anlagen, deren Sicherheit erhöht werden soll, finden sich in den Forschungszentren selbst, in Brennelementfabriken, in Forschungs- und Produktionsstätten für militärisches Nuklearmaterial sowie in Nuklearwaffenlagern.

US-Teams beraten und unterstützen dabei die russischen Experten. Die Maßnahmen werden von der russischen Seite jedoch selbst durchgeführt; sie umfassen den Bau neuer Anlagen, den Kauf von Ausrüstungen und die Änderung von Prozessabläufen. Amerikaner und Russen arbeiten auch gemeinsam an Standards zur Ausbildung von Personal und zur Bestandserfassung von nuklearen Materialien.

In einigen Fällen werden schnelle Ad-hoc-Maßnahmen getroffen, bis umfassendere Lösungen möglich sind. So könnten die Betreiber etwa eine einfache Tür zunächst durch eine gepanzerte ersetzen. Später würde dann ein internes Videoüberwachungssystem zur Erfassung und Kontrolle potenzieller Bedrohungen eingesetzt werden. Bei der Materialkontrolle sollte es sofort zur Regel werden, dass beim Umgang mit Nuklearmaterial stets zwei Leute gleichzeitig, »im Tandem«, arbeiten. Später könnten Techniker eine automatische Zugangskontrolle installieren, die spezielle Identifikationskarten prüft, Passwörter abfragt und Personen biometrisch erfasst. Bei der Bestandskontrolle bestünde eine schnelle Lösung darin, handschriftliche Listen der Container mit Nuklearmaterial

zu führen und diese mit Siegeln vor unbefugtem Zugriff zu schützen. Aufwändiger wäre die Einführung computerisierter Mess-Stationen, die aus den Containern dringende Gammastrahlung messen und so indirekt die Mengen und den Anreicherungsgrad des darin enthaltenen Nuklearmaterials ermitteln – und gegebenenfalls Alarm schlagen.

Die über 12-jährige russisch-amerikanische Zusammenarbeit im Rahmen dieses Programms hat deutliche Fortschritte gebracht: In 41 von 51 Nuklearanlagen in Russland und den anderen Staaten der ehemaligen Sowjetunion wurden die Sicherheitsmaßnahmen erhöht – unter anderem in militärischen Anlagen, in zivilen Anlagen sowie in Brennstofflagern für nuklearbetriebene Schiffe. In acht der zehn verbleibenden Anlagen gehen die Arbeiten zurzeit weiter voran. In den beiden übrigen, militärisch hochsensiblen, Anlagen wurde bislang noch nichts unternommen. Im Rahmen des MPC&A-Programms gibt es jedoch bereits Maßnahmen zur Verstärkung der Schutzmaßnahmen in Lagern von Atomsprenköpfen und strategischen Atomraketen der früheren Sowjetunion.

Die Aufrechterhaltung der Bemühungen ist die größte Herausforderung für die Zukunft. In den nächsten Jahren wird die US-Unterstützung für das Programm vermutlich reduziert, und die russische Seite muss Probleme und Kosten allein schultern. Die russische Regierung verfolgt zwar eigene MPC&A-Aktivitäten, doch wenn das Gemeinschaftsprogramm endet, würden neu installierte Ausrüstungen und etablierte Verfahrensweisen in vielen Anlagen wohl schnell vernachlässigt. Die Folgen eines Fehlers bei der Überwachung des Nuklearmaterials könnten jedoch schlicht katastrophal sein.

Leslie G. Fishbone arbeitet in der Abteilung für die Nichtverbreitung von Atomwaffen und Nationale Sicherheit des Brookhaven National Laboratory und wirkt seit Jahren am MPC&A-Programm mit.

▷ Hippel) im Jahr 2002 dort einen Vortrag über die Gefahren von hoch angereichertem Uran hielt, regten die Forscher des Instituts eine Machbarkeitsstudie an, die klären soll, ob sich dieser Reaktor von HEU- auf LEU-Brennstoff umstellen lässt. Dieses Projekt befindet sich leider immer noch in einer frühen Vorbereitungsphase.

Simulation statt HEU-Reaktoren

Global existieren über 70 kritische Anordnungen und gepulste Reaktoren, die mit HEU betrieben werden – mehr als die Hälfte davon in Russland. Nur noch wenige Anlagen dienen der aktuellen Forschung. Die meisten wurden in den 1960er und 1970er Jahren in Betrieb genommen und sind heute technisch veraltet. Viele ihrer Aufgaben könnten von Simulationsprogrammen übernommen werden, die zum Teil auf PCs laufen und nukleare Kettenreaktionen in detaillierten dreidimensionalen Reaktormodellen berechnen. Kerntechniker sind in der Lage, die Plausibilität solcher Modellrechnungen zu überprüfen, indem sie diese mit den Resultaten früherer Reaktorexperimente vergleichen. Die wenigen gepulsten Reaktoren, die tatsächlich noch benötigt werden, ließen sich auf niedrig angereicherten Brennstoff umstellen.

Nach Schätzung eines IAEA-Experten könnten weltweit daher über 85 Prozent der älteren Forschungsreaktoren stillgelegt werden. Gemäß dieser Analyse würden regionale Neutronenquellen auf dem neuesten technischen Stand bessere Dienste leisten. Solche Stilllegungen wären auch für die Nutzergemeinde attraktiv, wenn gleichzeitig einige der verbleibenden Forschungsreaktorzentren ausgebaut würden. Hierzu könnten sich die EU und Japan für die Umsetzung eines solchen Programms mit den USA zusammenschließen. In der Tat könnten Schließungen diejenigen Institute auch finanziell stärken, die über Reaktoren mit großen Beständen an nur leicht bestrahltem HEU verfügen: Zu sicherem LEU umgearbeitet ließe sich dieses Inventar als Brennstoff für Atomkraftwerke nutzen, was pro Tonne HEU rund 20 Millionen Dollar einbrächte.

Die Bemühungen, HEU-Reaktoren umzurüsten, ziehen sich schon über nahezu 30 Jahre hin. Dass hoch angereichertes Uran bis heute als Brennstoff verwendet wird, hat kaum technische Gründe. Ursache ist vielmehr mangel-

des politisches Interesse. In Einzelfällen hat auch der Widerstand von Reaktorbetreibern, die ein erneutes Genehmigungsverfahren oder die Stilllegung ihrer Anlagen befürchten, zu Verzögerungen geführt.

Trotz der aktuellen internationalen Besorgnis um den Nuklearterrorismus kommt das Programm zur Entsorgung von hoch angereichertem Uran in den meisten Teilbereichen viel zu langsam voran. Die betroffenen Länder müssen ihre finanzielle Unterstützung aufstocken, um die Umrüstung von Reaktoren zu beschleunigen und um zu sicherzustellen, dass die Entwicklung geeigneter LEU-Ersatzbrennstoffe so schnell wie möglich abgeschlossen wird. Weiterhin sollte das Programm auf alle Anlagen erweitert werden, die mit HEU arbeiten. Hierzu gehören vor allem kritische Anordnungen und gepulste Reaktoren.

Wenn die USA und ihre Verbündeten die Herausforderungen des Nuklearterrorismus ernst nehmen, könnte das zivil genutzte hoch angereicherte Uran in den nächsten fünf bis acht Jahren aus der Welt geschafft werden. Weitere Verzögerungen bei der Umsetzung dieser dringenden Aufgabe würden potenziellen Nuklearterroristen nur neue Chancen eröffnen. ◁



Alexander Glaser (links) und **Frank N. von Hippel** arbeiten am Programm für Wissen-

schaft und globale Sicherheit (PSGS, Program on Science and Global Security) an der Universität Princeton. Glaser promovierte im Jahr 2005 an der Technischen Universität Darmstadt. Der theoretische Kernphysiker von Hippel ist Kodirektor von PSGS und Professor für internationale Angelegenheiten sowie einer der Leiter der internationalen Expertenkommission für spaltbare Materialien (International Panel on Fissile Materials).

Terrorismus und Massenvernichtungswaffen: Eine neue Symbiose? Von G. Neuneck in: Die weltweite Gefahr. Terrorismus als internationale Herausforderung. Von H. Frank und K. Hirschmann (Hg.). Berlin-Verlag 2002, S. 169

Securing the bomb 2005: The new global imperatives. Von Matthew Bunn und Anthony Wier. Harvard University, Mai 2005

The four faces of nuclear terrorism. Von C. D. Ferguson und W. C. Potter. Routledge 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

» Dipl.-Ing. Runal Meyer VDI

Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

» DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor

Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

» Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente

www.kernmechanik.de

» Quantenphysik 17.-19.11.06

Seminar für physikalisch und philosophisch Interessierte, geistige Anregung und körperliche Erholung in schönem Ambiente
www.fem-institut.de

» Zahn-Implantate preiswert

Sparen Sie bis zu € 2000 für ein Titanimplantat plus Zirkonoxid-Krone
www.dentaprime.info

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

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de



Weltmeisterschaft im Roboterfußball

Parallel zum echten Turnier versuchten beim Robocup 2006 künstliche Spieler verschiedener Bautypen, den orangefarbenen Ball ins Netz zu bringen.

Von Christoph Pöppe

Er hat die Größe eines Schoßhündchens, seine rundlichen Formen entsprechen dem, was der Verhaltensforscher »Kindchenschema« nennt, und wenn er auf Knien und Unterarmen übers Feld tapst, wackelt der ganze Körper wie bei einem halbjährigen Kind: Der vierbeinige Roboter »Aibo« von Sony ist ohne jeden Zweifel niedlich.

Zu allem Überfluss kann er auch noch Fußball spielen, wenngleich sein Körperbau nicht wirklich darauf ausgelegt ist. Manchmal lässt er den zwischen Brust und Vorderpfoten eingeklemmten Ball durch eine geschickte Brustbewegung nach vorn springen. Der entsprechende Abschuss nach hinten ist ebenfalls schon beobachtet worden (und sieht ziemlich komisch aus). Im Prinzip kann das künstliche Dackelchen den Ball auch köpfen, denn er hat ein Gelenk zum Nicken und eins zum Kopfschütteln. Aber das hält der spiegelnd glänzende Kopf mit der eingebauten Kamera und den Distanzsensoren nicht lange aus. Wenn der Hund sein Haupt wiegt, was je nach Programmierung weise meditierend oder zwanghaft neurotisch aussehen kann, ist es weder Wahnsinn noch Nachdenklichkeit. Vielmehr verschafft sich der Roboter so einen Überblick über seine Umgebung und kompensiert damit das ziemlich enge Gesichtsfeld seiner Kamera.

Bei der Roboterfußball-Weltmeisterschaft, die im Juni dieses Jahres in den

Hallen der Messe Bremen stattfand, sind die Hundchen in der »Liga der Vierbeinigen« als Hardware vorgeschrieben. Der edle Wettstreit beschränkt sich damit ausschließlich auf die Programmierung. Zur Halbzeit eines Fußballspiels werden nicht nur die Seiten gewechselt, sondern auch die Spieler.

Im Lauf mehrerer Jahre hat sich die putzige Krabbelgangart gegenüber dem eigentlich vorgesehenen, aber schwerer zu beherrschenden Laufen auf den Füßen durchgesetzt. Im Notfall streckt der Torwart routiniert alle vier zugleich von sich. Manche Programmierer lassen ihre Tierchen sogar mit dem Schwanz wedeln; diese Möglichkeit hat Sony – wozu auch immer – in die Vierbeiner eingebaut. Dagegen gibt es bislang nur wenig Abstimmung unter den Spielern. In ihrem Bestreben, dem Ball nachzulaufen, behindern sich die Angehörigen einer Mannschaft häufig gegenseitig.

Glänzender Sieger des diesjährigen Turniers sind die NUBots der Universität Newcastle (Australien). Ihr schlechtes-

tes Ergebnis war 7:3 im Endspiel gegen ihre Landsleute von rUNSWift aus Sydney. Im Übrigen haben beide australischen Teams ihre sämtlichen Gegner mit Ergebnissen wie 8:1 oder 10:0 niedergemacht (ab einer Tordifferenz von 10 wird nicht weitergezählt). Damit hat Teamchef Stephan K. Chalup, der in Heidelberg Mathematik studiert hat, seine Gruppe in langjähriger Arbeit vom dritten Platz (2002 bis 2004) über den zweiten (2005 in Osaka) aufs Siegerpodest geführt.

Aber das Ende der Vierbeinerliga naht. Da Sony die Produktion eingestellt hat, sterben die Hundchen allmählich aus – wer viel Kopfschuss übt, stirbt etwas schneller. Bereits in wenigen Jahren werden nicht mehr ausreichend Vierbeiner zum Spielen, geschweige denn zum Trainieren zur Verfügung stehen.

Eine Halle weiter, in der Liga der Kleinroboter, geht es deutlich schneller zu. Als »small size robot« gilt alles, was den Durchmesser 18 Zentimeter und die Höhe 15 Zentimeter nicht überschreitet.



wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.

www.wissenschaft-schulen.de



STEPHAN K. CHALUP, UNIVERSITÄT NEWCASTLE, AUSTRALIEN

▶ In der Vierbeinerliga spielen beide Parteien mit derselben Hardware.



BEIDE FOTOS: CHRISTOPH POPPE

Da praktisch alle Teilnehmer diese sehr knappe Volumenvorgabe ausschöpfen, gleichen die Kleinroboter wandelnden Blechdosen. Tangential zum Rand der Bodenfläche sind drei oder vier Räder fest montiert; deren Motoren sind unabhängig voneinander ansteuerbar, was den Roboter erstaunlich schnell und wendig macht. Alle Räder sind auf ihrem Umfang mit metallischen Querringen ausgestattet; auf ihnen rollt das Rad ab, das jeweils quer zur Laufrichtung steht.

Rasende Blechdosen

Wer seinen Roboter mit eigener Sehfähigkeit ausstatten will, darf siebeneinhalb Zentimeter an Höhe zugeben; aber diese Möglichkeit wird kaum genutzt. Üblicherweise beziehen die Spieler die Informationen über die Positionen des Balls und der Spieler (einschließlich der eigenen) über Funk von einem Rechner am Spielfeldrand, der seinerseits das »Auge Gottes« zur Verfügung hat, das heißt das Bild einer über dem Spielfeld aufgehängten Kamera verarbeitet. Dadurch sind die Positionsangaben weit präziser als in den anderen Ligen, und die Spieler befolgen prompt die – ebenfalls per Funk übermittelten – Ansagen des Schiedsrichters. Es kommt im Gegensatz zu anderen Ligen nicht vor, dass ein Roboter einen Freistoß schlicht nicht ausführt oder ihm zuvor ein gegnerischer Spieler in die Quere kommt. Trotzdem gerät das Spiel häufig ins Stocken, weil der Ball zwischen mehreren Spielern eingekeilt ist (»ball stuck«) und vom Schiedsrichter an eine neue Stelle gelegt werden muss.

Von der Möglichkeit, wie im echten Fußball einem Mannschaftskameraden

den Ball zuzuspielen, machen die Programmierer dennoch kaum Gebrauch; zu unpräzise ist die Balltretmechanik. Immerhin können die Roboter den Ball in hohem Bogen in die Luft schießen – unhaltbar für einen Torwart, der sich nicht in die Höhe recken kann. Deswegen wurde eigens die Regel eingeführt, dass ein Ball nicht ins Tor springen darf, sondern bodennah hineintreffen muss.

Die größte Aufmerksamkeit gilt der Liga der »mittelgroßen« Roboter. Hier ist das Spielfeld bereits 12 mal 8 Meter groß, der Ball hat fast Standardgröße, die Spieler sind 40 bis 80 Zentimeter hoch, bis zu 40 Kilogramm schwer und dürfen auf dem Spielfeld ein Quadrat von bis zu 50 Zentimeter Seitenlänge bedecken. Das lässt Platz für reichlich Hardware zum Herumfahren, Schießen und vor allem Sehen. Das Auge Gottes gibt es hier nicht mehr; stattdessen verschafft sich jeder Spieler mittels aufwärts gerichteter Kamera und konisch geformtem Spiegel einen Rundumblick über seine ganze Umgebung. Nach wie vor dürfen sich die Spieler mit einem Mannschaftscomputer am Spielfeldrand über ihre Wahrnehmungen verständigen und so ihr eigenes, ziemlich schwaches Bild ihrer Umwelt aufbessern.

Die »FU-Fighters« von der Freien Universität Berlin nehmen seit 1999 am Robocup teil und können mit einer eindrucksvollen Erfolgsbilanz aufwarten, darunter im letzten Jahr in Osaka einem Weltmeistertitel in der Blechdosenklasse und einem zweiten Platz bei den Mittelgroßen. Aber Teamchef Raúl Rojas, Professor für Künstliche Intelligenz und Lesern dieser Zeitschrift als Autor eines Artikels über Konrad Zuses Rechen-

▲ Rechts: Das Land, aus dem die meisten ausländischen Teams kommen, ist der Iran. Links: Innovative Balltretmechanismen, die von Mistgabeln oder Straßenkehrmaschinen inspiriert scheinen, halfen nicht: Die Roboter der drei vierzehnjährigen Spanierinnen wurden von der fernöstlichen Konkurrenz vernichtend geschlagen.

maschinen bekannt (5/1997, S. 54), ist nicht glücklich über das Abschneiden seiner Mannschaft. Da haben die Berliner für dieses Mal besonders leichte und wendige Roboter konstruiert. Und der bittere Lohn für diese Mühe? In den – häufigen – Kollisionen mit anderen Spielern wurden die Leichtgewichte so lädiert, dass sie nur noch mit Mühe bis zum Ende des Spiels durchhielten.

Der Bericht vom ersten Spieltag klingt noch gedämpft optimistisch: »Das zweite Spiel war eine klassische FU-Fighters-Darbietung. Direkt nach dem Anpfiff verloren wir den Torwart. Er fuhr gegen die Torwand und blieb dort bis zum Ende des Spiels, die ganze Zeit über mit aktivem Antrieb. Alles, was er zu Stande brachte, war ein Loch im Teppich. Zum Glück funktionierten die anderen Spieler tadellos, und wir konnten in der Offensive so viel Druck machen, dass das Spiel nur auf der Hälfte der Stuttgarter stattfand. Durch gut platzierte Hochschüsse erzielten wir sechs Tore; eins davon war allerdings unser eigenes ...«

In der Endausscheidung verlor die Mannschaft gegen dieselben Stuttgarter mit 5:7, vor allem weil sie mechanisch ▷

Rechts: Zweibeiniger Roboter von den »Darmstadt Dribblers«; unten: Beim Versuch, den Ball zu treten, bricht der Torschütze zusammen.



BEIDE FOTOS: CHRISTOPH PÖPPE



▷ schwer angeschlagen war. »Mit beschädigten Motoren und Rahmen konnten sich unsere zarten Roboter nur noch mühsam und mit letzter Kraft im Feld bewegen.« Zeitweise war überhaupt nur ein einziger Berliner Spieler auf dem Feld. Da reichte es in der Gesamtwertung nur für einen vierten Platz.

Zum Roboterfußball gehört, wie bei jedem Sport, nicht nur gutes Konstruieren und Programmieren. Am Ende entscheiden über Sieg und Niederlage Dinge wie die Betreuung während der Kampftage, die physische Kondition der Betreuer – die zum Reparieren meistens die Nächte durchmachen müssen – und die finanziellen Reserven: Wer ausreichend Ersatzspieler baut und mitbringt, kann auch am letzten Turniertag noch mit frischen Kräften aufwarten.

Allerdings wird es immer schwieriger, solche Bemühungen noch als Wissenschaft zu definieren. Einen Torwart zu programmieren kann durchaus eine Diplomarbeit sein, ihn besser zu programmieren als im letzten Jahr vielleicht nicht mehr. Ein bedeutender Fortschritt wäre erst wieder zu erwarten, wenn große Probleme gelöst würden, zum Beispiel beim Sehsystem. Noch beschränkt sich die Software auf das Erkennen von Farbflächen, statt nach Konturen oder allgemein nach Formen zu suchen. Fehlinterpretationen sind daher häufig. Konsequenterweise haben die FU-Fighters mit diesem Jahr ihre sportliche Karriere beendet und wenden sich neuen Projekten zu.

Und dass ein Roboter auf zwei Beinen übers Spielfeld läuft und den Ball tritt wie ein Mensch? Darauf werden wir noch eine ganze Weile warten müssen. Die technisch fortgeschrittensten Zweibeiner haben ungefähr die Größe und die Lauffähigkeiten eines einjährigen

Kindes, auch wenn sie viel filigraner gebaut sind und von Kindchenschema keine Rede sein kann.

Das Höchste, was ihnen gegenwärtig als Turnierleistung abverlangt wird, ist so etwas wie Elfmeterschießen. Ein schwarzer Breitfußblechmann, dessen zitternde Arme an eine Parkinson-Erkrankung denken lassen, schreitet gemessen auf den Ball zu – und daran vorbei; dann dreht er sich um, bringt sich umständlich in Position, holt mit dem Bein zum Schuss aus – und fällt um. Oder er schießt dreimal daneben; dabei wirft sich sein Kollege, der am anderen Ende des Spielfelds das Tor hütet, jedesmal recht glaubwürdig in die richtige Torecke – und muss dann von seinem menschlichen Betreuer wieder aufgerichtet werden. Oder der Torschütze meditiert so lange über die richtige Bewegungsfolge, bis die 60 Sekunden Zeitlimit abgelaufen sind. Offensichtlich sind der aufrechte Gang im Allgemeinen und das Balltreten im Besonderen etwas vom Schwersten.

Roboter aus Legosteinen

Zusätzlich zu den genannten Roboterfußball-Wettkämpfen gibt es einen Wettbewerb für Katastrophenrettungsroboter (»Rescue League«), einen für simulierte Fußballroboter (»Simulation League«, vergleiche Spektrum der Wissenschaft 1/1998, S. 20) und eine Kinderabteilung (»Junior League«). Diese ist ihrerseits in Unterklassen aufgeteilt, nach Alter der Konstrukteure (bis 14 Jahre und bis 19 Jahre) und Mannschaftsstärke (ein oder zwei Roboter pro Mannschaft). Die Spielfelder sind entsprechend nur noch von Tischgröße und von Wänden eingeraht, sodass man nicht fürchten muss, dass der Ball ins Aus gerät oder der Spie-

ler vom Tisch fällt. Der Ball meldet selbsttätig seine Position durch Infrarot- oder elektromagnetische Signale; es genügt also, wenn man die Roboter darauf programmiert, blind – im Wortsinn – auf den Ball in Richtung des gegnerischen Tors einzudreschen.

Die Kreativität der jugendlichen Erbauer ist bemerkenswert. Auffällig stark sind in der traditionellen Männerdomäne »Sport und Technik« die Mädchen vertreten. Wer die Mühen der Metallbearbeitung scheut, findet im Sortiment »Mindstorms« der Firma Lego Baumaterial wie Sensoren und Servomotoren. Niemand nimmt daran Anstoß, wenn nach einer Kollision dieser oder jener Roboterkörperteil in Form eines Legosteins vom Spielfeld geräumt werden muss. »Ball stuck« tritt hier noch weit häufiger auf als in der Blechdosenliga.

Die Begeisterung der Beteiligten ist ebenso beeindruckend wie die Enttäuschung der Verlierer – und man verliert typischerweise haushoch, weil die Fähigkeiten der Spieler weit auseinander klaffen. Genau das weckt Zweifel am Sinn der Veranstaltung: Müssen Zwölfjährige wirklich um die halbe Welt reisen, um sich von anderen Zwölfjährigen, zum Beispiel aus Singapur oder Japan, gnadenlos auf die letzten Plätze verweisen zu lassen? Wahrscheinlich hat es einen guten Grund, dass es im echten Fußball keine Kinderweltmeisterschaft gibt.

Der Veranstalter des jährlich stattfindenden Wettbewerbs Robocup proklamiert unverdrossen das Ziel, bis zum Jahr 2050 eine Mannschaft autonomer Roboter auf die Beine zu stellen, die es mit dem dann amtierenden menschlichen Fußballweltmeister aufnehmen kann. Bis dahin ist zwar noch reichlich Zeit; aber zumindest heute sind die Indizien dafür, dass dieses Ziel erreicht wird, eher spärlich.

Im nächsten Jahr wird der Robocup (www.robocup.org) in Atlanta (USA) stattfinden. ◁



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR

Schwerlast auf dem Acker

Der Unterboden der Felder verdichtet sich immer mehr. Das behindert das Pflanzenwachstum und fördert die Entstehung von Hochwasser. Schuld sind häufig schwere Landmaschinen.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei  beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Von Rienk R. van der Ploeg,
Wilfried Ehlers und Rainer Horn

Seit einiger Zeit beobachten Landwirte mit Sorge, dass sie ihre Felder immer aufwändiger bearbeiten müssen, um gute Ernten einzufahren. Sie pflügen tiefer und düngen kräftiger – und doch wird es immer schwerer, gleich hohe Erträge zu erzielen. Offenbar wird der Ackerboden trotz der Bemühungen schlechter.

Gleichzeitig stellen Agronomen fest, dass die intensiv bearbeiteten Flächen zunehmend weniger Wasser aufnehmen. Immer größere Teile der Niederschläge fließen bei Starkregen oberflächlich ab. Schäden durch Erosion sind nur eine der fatalen Folgen. Im Brennpunkt der Forschung steht derzeit auch der Zusammenhang mit Hochwasserereignissen.

Es liegt auf der Hand, die Ursache für den bedenklichen Zustand der Ackerböden in der beträchtlichen Intensivierung, Mechanisierung und Automatisierung der Landwirtschaft in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Welt-

krieg zu suchen. Um 1950 arbeiteten dort etwa zehnmal mehr Menschen als heute. Zugtiere auf dem Feld sind praktisch vollständig durch Maschinen ersetzt. Aber die Fahrzeuge werden auch immer schwerer. Speziell diesen Aspekt möchten wir in diesem Beitrag behandeln. Eine Reihe von Studien, zu denen auch Kollegen und viele Mitarbeiter beitrugen, enthüllen eine bedenkliche Entwicklung. Wie massiv zu schwere Landmaschinen dem Boden schaden – und schon bleibend geschadet haben –, konnten wir bei wiederholten Messungen feststellen, die an verschiedenen Orten teils über Jahre stattfanden.

Ein gesunder Lehmboden ist bis in tiefe Schichten, weit unterhalb des gepflügten Bereichs, deutlich porös. Die festen Teilchen liegen nahe beieinander, bilden aber unzählige feine Lücken, die idealerweise bei fruchtbarem Lössboden gut 45 Prozent des Volumens ausmachen. Bei tonigem Lehm können es über 50 Prozent sein. Besonders die gröberen dieser Poren, mit einem Durchmesser von mindestens 0,05 Millimeter, sind für

die Durchlüftung und schnelle Wasserführung wichtig. In ihnen leben die zahlreichen Bodenorganismen, und hier finden die Pflanzenwurzeln Raum. In einem solchen Bodengefüge haben wachsende Wurzeln von Feldkulturen die Kraft, die lockeren Partikel beiseite zu schieben.

Die Hohlräume werden enger, verschwinden teilweise beziehungsweise verlieren die Verbindung untereinander, wenn schwere Ackermaschinen über das Feld fahren. Deren Gewicht drückt die Partikel nicht nur senkrecht dichter zusammen: Wie wir nachwies, verschmieren die Teilchen durch Scherkräfte der fahrenden Räder auch waagrecht. Der Schlupf der Antriebsräder wie auch Pflugschare kneten besonders den feuchten Boden und streichen die Poren zu. In der Folge lässt sich die homogenere Struktur umso leichter weiter verdichten. Frisch gepflügtes, lockeres Land ist für das Zusammenpressen besonders anfällig, zum Beispiel wenn der Schlepper auf frisch umgebrochenem Acker fährt. Die gelockerten oberen Schichten bieten

*Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.*

dann weniger Eigenwiderstand als etwa eine Grasnarbe.

Noch dramatischer sind die Folgen, wenn der Boden zudem nass ist, wie leider oft zu Zeiten der Hauptfeldarbeit im Herbst und Frühjahr. Dann unterbindet das in den Poren stehende Wasser wie ein Schmierfilm den Zusammenhalt der festen Teilchen. Durch Druck und Knetung werden diese nun in einen sehr dichten Verband eingeregelt. Darum hinterlassen Landmaschinen bei Nässe tiefere Furchen und verdichten beim Fahren den Boden bis in Bereiche weit unterhalb der Ackerkrume – das ist die üblicherweise umgepflügte humusreiche, biologisch aktive Oberschicht, in der insbesondere die Bodentiere und -mikroorganismen für Fruchtbarkeit und Durchlüftung sorgen.

Fahrverbot auf der Straße

Dem Ackerland wird heute viel zugemutet. Manche großen Erntemaschinen für Kartoffeln oder Zuckerrüben wiegen beladen über 30 bis über 50 Tonnen. Neuere selbstfahrende Köpfrödebunker – die gleichzeitig 12 Reihen Rüben köpfen,

roden und bergen – bringen es mit Zuladung auf 65 Tonnen, Fahrzeuge für sechs Rübenreihen auch schon auf über 50 Tonnen. Gülleselbstfahrer und Agrarkipper, gezogen von Schleppern oder Treckern, erreichen 30 Tonnen und mehr. Auch moderne Mähdrescher wiegen beladen bis zu 30 Tonnen. Die Tendenz zu noch größeren und schwereren Maschinen ist ungebrochen.

Es klingt absurd: Auf Deutschlands Straßen sind so große Lasten grenzwertig oder nicht zugelassen. Zum Beispiel dürfen laut Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung Kraftfahrzeuge mit mehr als drei Achsen nicht über 32 Tonnen wiegen; auch darf das Gewicht pro Achse 10 Tonnen nicht übersteigen. Eine Ausnahme besteht nur für Container: Dann dürfen Sattelschlepper maximal 44 Tonnen aufbringen. Für Äcker existieren dergleichen Vorschriften bisher nicht. Dabei werden Straßen extra so gebaut, dass sie Schwerverlastverkehr aushalten – die landwirtschaftliche Fläche aber ist von Natur aus für große Lasten nicht geschaffen. Und im Gegensatz zu Straßen soll sie auch

▲ Im Frühjahr 2006 überflutete die Elbe die Altstadt von Hitzacker. Wenige wissen, dass falsch behandelte Acker- und Waldböden solche Jahrhundert-Hochwasser fördern.

noch lebenswichtige ökologische Funktionen erfüllen.

Wie stark ein natürlich lockerer Boden auf das Befahren reagiert, hängt unter anderem von seiner Zusammensetzung ab – etwa davon, wie sandig, lehmig oder tonig er ist (das heißt, wie grob oder fein seine festen Teilchen sind). Auch der Humusgehalt ist wichtig: Vom Humus und Ton gehen Bindungskräfte aus, die die Bodenpartikel zu Aggregaten vernetzen. Es entsteht ein relativ stabiles Gefüge, das von oben kommende Kräfte in Grenzen elastisch abfängt. Beim frisch gepflügten Feld ist der feste Aggregatverband zunächst zerstört, und in einem nassen Boden wird er schwächer. Dann fehlen nämlich die Kapillarkräfte, die bei mittlerer Feuchte Spannung erzeugen. ▷

▷ Daher sollte man nasse Äcker nie mit großer Last befahren. Mittelfeuchte Böden sind tragfähiger, und trockene können infolge starker Anziehungskräfte zwischen den Festteilchen außerordentlich stabil sein.

Gerade einige der wertvollsten hiesigen Ackerböden – lehmreiche Böden aus Löss, Mergel und Eiszeitgeschiebe – sind für Verdichtung hoch empfindlich. An verschiedenen Standorten in Norddeutschland haben wir die Verhältnisse seit etwa 1960 verfolgt. Daher wissen wir, dass sich zum Beispiel die tiefgründigen Lössböden in den letzten Jahrzehnten teils Besorgnis erregend verschlechtert haben.

Warum Pflügen nicht hilft

Wer nämlich meint, beim nächsten Pflügen oder Grubbern würde die Erde wieder tief aufgelockert, der irrt leider. Das gilt bedingt nur für die obere Schicht – die Ackerkrume –, in der Bodenleben, Wasser und eindringender Frost sowie die Durchwurzelung dem Landwirt helfen, die gepresste und verschmierte Erde zu zerkrümeln und Luftporen zu schaffen, mithin für eine fruchtbare, »gare« Krume zu sorgen. Die Schichten unterhalb der Krume lockert eine normale Bearbeitung aber nicht. In diesen Bereichen nimmt die Bodenverdichtung seit Jahren bedenklich zu.

Denn an der Krumbasis entsteht unter zugstarkem Ackergerät mit der Zeit eine relativ kompakte Pflugsohle oder Schlepperradsohle. Besonders hier, aber auch in noch tieferen Schichten des

Unterbodens lagern sich die Teilchen übermäßig zusammen. Dieser Effekt kann dramatisch sein, wenn die Räder direkt in der frischen Pflugfurche fahren. Druck und Scherkräfte übertragen sich dann unmittelbar auf den Unterboden. Pflugsohlen reichen heute von etwa 30 bis in 50 Zentimeter Tiefe. Die Unterbodenverdichtung kann sich aber bis 80 oder 90 Zentimeter tief erstrecken. In diesen Schichten sind Organismen nicht mehr aktiv genug, um den Grund wieder aufzulockern. Auch Frost dringt normalerweise so tief nicht vor.

Im Bodenprofil zeichnet sich die deutlich verringerte Porosität der Pflugsohle als harter Übergang ab. Man sieht auch, dass die Ackerpflanzen diesen festen Bereich kaum mit ihren Wurzeln durchdringen. In einem nicht maschinell verdichteten Boden würden sie in diese Tiefe und darunter noch Wurzeln treiben, doch bei einer dichten Pflugsohle fällt ihnen das sichtlich schwer. Zum Beispiel wurzelt Wintergerste in einem tiefgründig lockeren Boden Ende Mai bis in einem Meter Tiefe. Wir fanden aber Standorte, wo die Wurzeln zu dieser Zeit nur 30 Zentimeter tief reichten (Bild S. 85 oben). Eine flachere Durchwurzelung scheint heute immer mehr zur Regel zu werden. Nur so tief, wie der Pflug reicht, genügen offenbar die Verhältnisse auf einem modernen Acker noch vollends den Ansprüchen der Pflanzen.

Erschreckend ist dabei, dass sich der Zustand eines Felds – oft schleichend und daher unbemerkt – durch wieder-

holtes Befahren Schritt für Schritt verschlechtert. Dabei sinkt der Acker langsam Zentimeter um Zentimeter ab. Das sieht man von oben nicht, zumal er von da locker erscheint. Trotzdem kann sich, selbst bei gleich bleibendem Gewicht der Fahrzeuge, die Verdichtung des Unterbodens von Mal zu Mal fortsetzen, bis ein Endzustand der Setzung (ein Gleichgewicht zwischen den Kräften) erreicht ist.

Zu hart für Wurzeln

Dies zeigte eine unserer langjährigen Studien, die im Solling im Weserbergland stattfand. Auf dem einen Feld lag die Radlast (pro schwerstem Einzelrad) nie über zwei Tonnen. Ein anderes Feld wurde in manchen Jahren zur Ernte mit bis zu 4,5 Tonnen Radlast befahren. Im ersten Jahr der Messungen (1988) hatte sich Acker 2 bereits um 3,7 Zentimeter im Vergleich zu Acker 1 gesenkt, sieben Jahre später (1995) schon um 4,4 Zentimeter. Die Porosität von Acker 1 in 30 bis 40 Zentimeter Tiefe betrug 46 Prozent, kennzeichnete damit eine schwach ausgeprägte Pflugsohle. Bei Acker 2 sank sie von 43 auf 41 Prozent. Im Jahr 2002 betrug der Wert für große Teile dieses Felds nur noch 37,5 Prozent. Diesen wahrlich alarmierenden Zustand könnte eine ein-

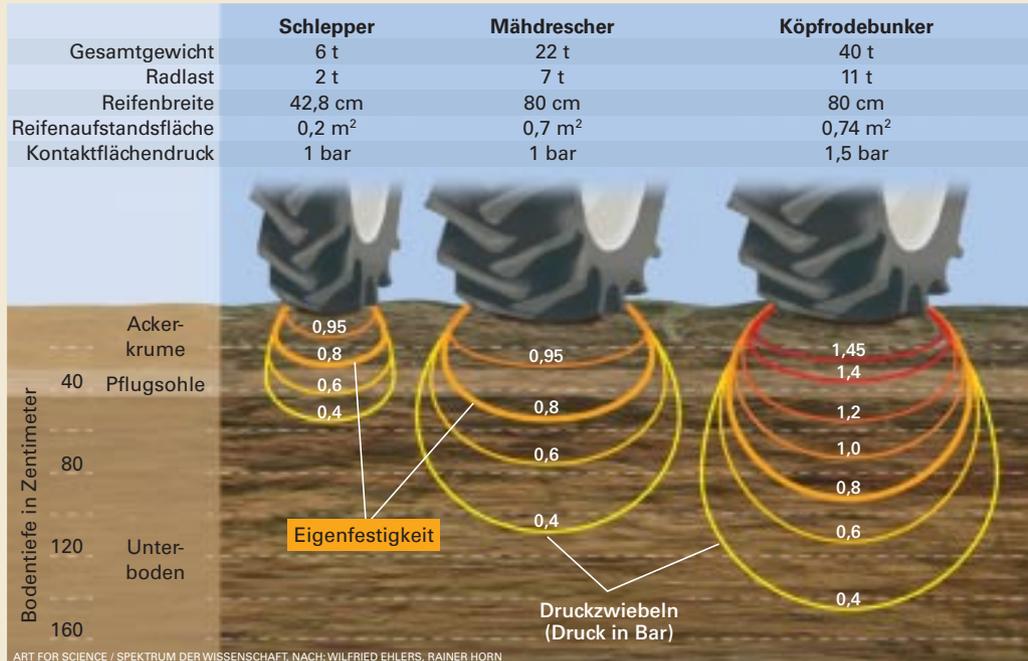
▼ Viele heute übliche große Landmaschinen wären mit ihrem Gewicht auf unseren Straßen nicht zugelassen. Sie zerstören das tiefere Bodengefüge zum Schaden für Ackerbau und Umwelt.

RAINER HORN



Künstliche Verdichtung des tiefen Ackerbodens

Die zunehmend mechanisierte und automatisierte Bearbeitung der Felder seit den 1950er Jahren veränderte den Zustand unterhalb der Krume und im tieferen Unterboden nachhaltig und leider nicht zum Vorteil. Durch tieferes Pflügen und stärker einwirkende Kräfte wurde die Krume vertieft und zugleich die Verdichtung der Pflugsohle an der Krumenbasis verstärkt. Nicht nur die Mächtigkeit der stark verdichteten Sohle, sondern auch die der Verdichtungszone bis in den tiefen Unterboden wuchs. Übersteigt der Druck die Eigenfestigkeit (im Beispiel rechts in der Pflugsohle 0,8 Bar), so schrumpft das Volumen der Poren im Unterboden kontinuierlich. Die kompakte Schicht behindert die Wurzel ausbreitung der Kulturpflanzen und vermindert den Durchfluss von Sickerwasser.



zige Zuckerrübenenernte mit einer Radlast von über 7 Tonnen bei nassem Boden herbeigeführt haben. Der Acker sank um weitere 1,9 Zentimeter, insgesamt nun 6,3 Zentimeter. Die Verdichtung reichte jetzt fast bis in einen Meter Tiefe.

Ähnliches dürfte für viele andere Äcker gelten. Durch tieferes Pflügen mit zugkräftigeren Schleppern – 1960 noch etwa 25 Zentimeter, heute 30 bis 35 Zentimeter – (und entsprechend höherem Treibstoffverbrauch) wurde die Pflugsohle immer tiefer verlagert. An sich sollte das tiefere Umarbeiten die Bodenqualität verbessern. Stattdessen wurde die Sohle mächtiger, fester und dichter.

Bedenklich ist, wie schlecht sich ein einmal verdichteter Unterboden wieder lockert, selbst wenn man Schrumpfungs- und Quellungsprozesse infolge sinkenden

und steigenden Wassergehalts sowie Frost- und Taueffekte einbezieht. Wir beobachteten das an einem Lössboden bei Göttingen auf zwei benachbarten Feldern: In einem Jahr wurde das eine Feld dreimal mit schwerem Gerät mit 5 Tonnen Radlast befahren. Im Vergleich zum Kontrollfeld verringerte sich das Porenvolumen im Bereich der Pflugsohle um 3 Prozent, nämlich von 41 auf 38 Prozent. Im Unterboden unterhalb der Pflugsohle sank es von 45 auf 42 Prozent. Bereits dieser vielleicht klein erscheinende Unterschied bewirkte noch zwei Jahre später, dass die Gerste Anfang Juni nicht mehr einen Meter tief wurzelte, sondern nur einen halben, und das bei stark verringerter Durchwurzelungsdichte.

Leider gewährleistet nicht einmal eine verfestigte Pflugsohle, dass die Ver-

▲ **Breitere Reifen sind nicht die Lösung:** Steigt das Gewicht der Landmaschinen, reichen die Zwiebeln gleichen Drucks tiefer – auch wenn der Druck pro Fläche nicht zunimmt. Noch verheerender sind die Folgen bei größerem Druck.

hältnisse nicht noch schlimmer werden können. Dies erkannten wir bei Studien an Äckern, in denen zunächst nach über zehn Jahren etwa gleich bleibender Belastungen ein Gleichgewicht entstanden war: Eine ausgeprägte Pflugsohle schützte sozusagen das Bodengefüge darunter vor weiterer Verdichtung. Als dann aber Rübenroder mit über 42 Tonnen Gesamtlast über den Acker fuhren, brach diese bisher stabile Sohle ein und der Boden wurde jetzt bis in über 80 Zentimeter Tiefe schlagartig komprimiert.

Nun ist den Landwirten und Agronomen die schleichende Bodenverdichtung schon länger bekannt, und sie haben darauf auch wiederholt aufmerksam gemacht. Zumindest allen, die Böden bewirtschaften oder Agrarfahrzeuge entwerfen, ist das Problem inzwischen bewusst. Sie sind durchaus bestrebt, die beiden schwer verträglichen Erfordernisse, ökonomische Bewirtschaftung und Schonung der Böden, miteinander zu vereinbaren. Nur werden leider manche physikalischen Zusammenhänge bisher ▶

IN KÜRZE

- ▶ Die Qualität unseres Ackerlands wird seit Jahrzehnten schlechter. Durch die **schweren Arbeitsmaschinen** verdichten die Böden zunehmend, neuerdings verstärkt bis in tiefere Schichten.
- ▶ **Agrarpflanzen darben** bei einem zu dichten, schlecht durchlüfteten, porenarmen Bodengefüge. Sie wurzeln weniger tief, leiden in trockenen Jahren an Wassermangel und in regenreichen an Staunässe.
- ▶ **Verdichtete Böden fördern Erosion und Hochwasser.** Denn Niederschläge versickern weniger schnell, fließen deshalb in beträchtlichem Maß oberflächlich ab und reißen den Boden mit.
- ▶ Wissenschaftler fordern eine **gesetzliche Begrenzung der Gewichte** und Achslasten von land- und forstwirtschaftlichen Maschinen.

Wenn Regenwasser nicht versickert

Ein verdichteter Grund lässt Wasser schlechter versickern, denn darin ist für Wasser leitende Poren weniger Platz. Durch Pflügen wird zwar die obere Bodenschicht, die Krume, immer wieder gelockert, und auch die Bodenorganismen können dann darin ihr Werk verrichten.

Doch ein einmal zusammengepresster Unterboden lockert sich von allein praktisch nicht wieder, zumindest nicht wesentlich innerhalb von ein paar Jahren oder Jahrzehnten. Die Folgen sind nach starkem Regenfall Staunässe in der Krume und stehendes Wasser auf der Oberfläche. Bei Hangneigung fließt das Wasser entweder oberflächlich oder auch auf der Pflugsohle innerhalb der Krume verborgen talwärts. Einst erstklassige Ackerböden lassen heute pro Zeiteinheit höchstens noch ein Zehntel bis Hundertstel der Wassermenge versickern, die in einem ursprünglichen, lockeren Waldboden versickern würde. Selbst ein Tausendstel kommt vor.

Dazu ein vereinfachtes Rechenbeispiel für das Dezemberhochwasser von 1993 am Rhein, das die Kölner Altstadt unter Wasser setzte:

Am 19. Dezember 1993 fielen in Teilen des Saarlands 42 Millimeter Regen, am 20. Dezember nochmals 54 Millimeter. Vermutlich war der Boden, wie oft in dieser Jahreszeit, schon vorher bis zur Feldkapazität wassergefüllt. Das heißt, er enthielt die Wassermenge, welche die Kapillarkräfte der Bodenpartikel halten können – das Wasser, das praktisch nie (oder nur ganz langsam) versickert. Von den 42 Millimetern des 19. 12. konnte der Boden etwa ein Drittel (15 Millimeter) zusätzlich fassen, bis alle Poren wassergefüllt waren. Die restlichen zwei Drittel hätten dann entweder ins Grundwasser einsickern oder oberflächlich abfließen können.

Angenommen, die Bodenverdichtung war lediglich mittelstark und das Porenvolumen betrug 40 Prozent. In diesem Fall wäre das überschüssige Wasser am ersten Tag bei einer Durchlässigkeit von 2,7 Zentimeter pro Tag unter Umständen gänzlich eingesickert. Doch bei einer höheren Verdichtung hätte ein Großteil des überschüssigen Wassers nicht versickern können. Es wäre oberflächlich abgeflossen. Bei einem Porenvolumen von nur 38 Prozent (Durchlässigkeit 1 Zentimeter pro Tag) wären das schon 17 Millimeter oder 17 Liter pro Quadratmeter gewesen. Am 20. 12. hätte dieser stärker verdichtete Boden, nun wassergesättigt, gar keinen Regen mehr speichern können. An diesem Tag wären nur 10 Liter pro Quadratmeter versickert. 44 Liter pro Quadratmeter wären von der Bodenoberfläche direkt in die Zuflüsse des Rheins geleitet worden.

Erfahrungsgemäß liegen die Abflusswerte sogar höher, denn durchnässter Boden verliert seine innere Stabilität gegenüber aufschlagenden Regentropfen. Er verschlämmt und büßt offene, Wasser leitende Poren direkt an der Bodenoberfläche ein.

▷ verkannt oder sind teils noch unzureichend erforscht.

So versuchen inzwischen Konstrukteure von Landmaschinen, Schäden zu begrenzen, indem sie das Gewicht der schweren Fahrzeuge auf breitere Reifen und mehr Achsen verteilen und den Reifendruck mindern, um die Aufstandsfläche zu vergrößern. Es gibt Trecker mit Doppelbereifung und Erntefahrzeuge, die spurversetzt im »Hundegang« über das Feld fahren. Der Reifeninnendruck lässt sich während der Fahrt regulieren, was erlaubt, die Aufstandsfläche an ver-

schiedene Erfordernisse anzupassen. Nur hilft das alles wenig, wenn die Fahrzeuge dabei erstens immer schwerer werden beziehungsweise wenn man damit zweitens wegen der breiteren Reifen auf nasserem Böden fahren kann als früher.

Druckzwiebeln breiter Reifen

Die Belastung für die Böden hat trotz solcher Maßnahmen in den vergangenen Jahrzehnten immerfort zugenommen, das lässt sich eindeutig nachweisen. Dass breitere Reifen die Gefahr der Bodenverdichtung nicht bannen, hängt mit den

entsprechend breiteren und damit auch tieferen Druckzwiebeln im Boden unter den Rädern zusammen (den Linien gleichen Drucks, die sich ungefähr halbkreisförmig unter dem Rad im Boden ergeben).

Diese Druckzwiebeln kennzeichnen die Druckausbreitung im Boden. Der aufgebrauchte Druck ergibt sich aus der Radlast bezogen auf die Aufstandsfläche. Schwer verständlich erscheint selbst manchem Fachmann der folgende Sachverhalt: Verteilt man ein höheres Gewicht auf eine größere Aufstandsfläche, sodass der aufgebrauchte Druck unverändert bleibt, kann der Verdichtungseffekt für die obere Krume zwar gleich bleiben. Doch die tiefe Krume und der Unterboden werden mehr belastet, weil sich die Druckzwiebeln unter dem breiteren Reifen stärker zur Tiefe fortpflanzen (siehe Bild im Kasten S. 83).

Mit anderen Worten: Bei vermehrter Radlast werden die Druckzwiebeln größer und reichen damit auch tiefer. Aber selbst bei gleichem Kontaktflächendruck ziehen die Linien gleichen Drucks bei einem doppelt so breiten Reifen infolge erhöhter Radlast etwa doppelt so tief in den Boden. Man darf also nicht meinen, man müsse nur die Last auf mehr Fläche verteilen, dann dürften die Maschinen selbst schwerer sein. Und ein darüber hinaus noch weiter gesteigerter Druck pro Fläche – wie in der Praxis oft der Fall – bewirkt rasch noch tiefer reichende Druckzwiebeln. Dieser Zusammenhang wird oft verkannt.

Immer mehr Landwirte verzichten inzwischen auf das Pflügen. Sie arbeiten stattdessen flacher mit Grubber und Kreiselegge, die nichtwendend, eher bröckelnd-mischend in den Bodenverband eingreifen. Diese schonendere Bearbeitung, bei der eine Mulchschicht mit organischen Reststoffen an der Oberfläche verbleibt, belebt die Krume, fördert unter anderem die Regenwürmer und macht den Acker tragfähiger. Die Pflugsohle wird nicht weiter verstärkt. Allerdings ist auch hierbei der Unterboden gefährdet, wenn wirklich schwere Maschinen zum Einsatz kommen. Der Pflugsohlenbildung versuchen Landwirte auch durch »Onland-Pflügen« vorzubeugen. Dabei laufen alle Räder vor dem Pflug noch auf dem festen Boden.

Nicht nur aus pflanzenbaulichen, sondern auch aus ökologischen Gründen bereitet die zunehmende Verdichtung

des Ackerbodens Sorge. Denn sie hat nicht zuletzt erhebliche Folgen für seine Wasserführung. Im Nahbereich wirkt sich das auf den Acker selbst aus, im Fernbereich auf die Gewässer, die von den Feldern gespeist werden – somit letztlich auf Bäche, Flüsse und Küsten.

Die verdichteten Zonen können wegen ihres verringerten Porenvolumens weniger Wasser speichern als ein unbelasteter Boden. Auch leiten sie das Wasser langsamer in die Tiefe und zum Grundwasser. Die Pflanzen leiden in nassen Jahren an Staunässe und in trockenen an Wassermangel, der dadurch verschärft wird, dass das Tiefenwachstum der Wurzeln wegen des hohen Durchdringungswiderstands behindert ist.

Zu trocken im Sommer

Ein Extremjahr, das dies gut belegt, war 2003 mit seinem besonders trockenen, dazu ungewöhnlich heißen Sommer. Damals verzeichneten die Neuen Bundesländer, so Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg, wesentlich größere Ernteschäden als Niedersachsen bei ähnlicher Witterung. An sich verwundert das nicht, denn wegen der Landwirt-

▶ Ab dreißig Zentimeter Tiefe ist dieser Lössboden massiv verdichtet – zu stark für Ackerkulturen. Die auf ihm angebaute Wintergerste durchwurzelte Ende Mai, als dieses Profil genommen wurde, lediglich die lockere Krume.

schaftspraktiken in der DDR – Bearbeitung großer Felder mit schweren Maschinen – sind weite Ackerflächen Ostdeutschlands ziemlich stark verdichtet.

In regenreichen Jahren steht das Wasser, weil es nur langsam versickern kann, häufig bis zur Bodenoberfläche, was das Wurzelwachstum einschränkt. Auch bleibt ein verdichteter Boden im Frühjahr länger nass und kalt und vernässt bei starken Niederschlägen eher. Beides kann die Wachstumsperiode wesentlich verkürzen, das Pflanzenwachstum benachteiligen und auch die Arbeitszeiten des Landwirts einschränken sowie Aussaat und Ernte erschweren.

Zugleich verzögert zu viel Nässe den Abbau von Ernteresten, die Humusbildung sowie gegebenenfalls den Umsatz von Gründüngungspflanzen, denn den



WILFRIED EHLERS

dafür wichtigen Organismen fehlt der Sauerstoff. Die verminderte Stickstofffreisetzung versucht der Landwirt durch höhere Düngergaben auszugleichen. Gegen bestimmte Ungräser, die auf nasskalten Böden im Vorteil sind, geht er mit mehr Herbiziden vor. Die strukturschädigten Böden fördern auch manche Wurzelkrankheiten von Kulturpflanzen. Wundert es angesichts solcher Erschwerisse, dass die Bauern zunehmend Mühe ▶



THEO MÄHNER

Immer mehr bestes Ackerland bietet in nassen und kalten Monaten solch ein Bild. Im verdichteten Boden kann die Nässe nicht genügend versickern.

▷ haben, zuverlässig gute Ernten mit ökonomischem Erfolg einzufahren?

Die spektakulärsten Fernwirkungen betreffen Hochwasserkatastrophen. In jüngster Zeit ereigneten sich »Jahrhunderthochwasser« an Rhein, Elbe, Oder, Donau nicht selten im Abstand weniger Jahre. Unbestritten ist, dass die verdichteten Böden unserer intensiv bearbeiteten Kulturlandschaft die verheerenden Überschwemmungen begünstigen und verstärken. Denn dadurch finden Schneeschmelze und Niederschläge schneller den Weg in die Flüsse.

Dass viele Wasserläufe begradigt und eingezwängt wurden, dass es immer weniger Auenlandschaften und Niederungen gibt, die das Wasser eine Zeit lang auffangen, beschleunigt den Prozess nur. Man muss berücksichtigen: Sogar der Waldboden, der vielen als ein Was-

terspeicher schlechthin gilt, ist durch Bewirtschaftung mit schweren Fahrzeugen bereits verdichtet und wird es weiterhin. Folglich kann auch er seine Wasserspeicherfunktion oft nicht mehr so gut erfüllen wie noch vor wenigen Jahrzehnten. Sorge ist wahrlich angebracht.

Es sollte nachdenklich machen, dass der Rhein nach Regenfällen gleichen Ausmaßes heute wesentlich mehr Wasser führt als in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Sein Scheitelabfluss, die durchströmende Wassermenge pro Zeiteinheit, hat nach Starkregen um über 20 Prozent zugenommen. Auch an der Elbe ist der Scheitelabfluss bei Hochwasser heute höher als früher, und zwar besonders in landwirtschaftlich geprägten Gebieten.

In der Regel treten heutzutage in Deutschland große Flüsse über die Ufer, wenn in ihrem Einzugsgebiet auf zehntausend Quadratkilometern oder mehr binnen weniger Wochen mindestens 200 Millimeter Regen fallen. Ein Beispiel: Beim »Weihnachtshochwasser« von 1993, das die Altstadt von Köln überflutete (bei einem Pegelstand von 10,63 Meter), gab es in Südwestdeutschland, Hessen und Nordrhein-Westfalen vielerorts mehr als dreimal soviel Regen wie sonst im De-

zember. Stellenweise waren es allein am 19. und 20. Dezember 100 Millimeter und etwas mehr (also gut 100 Liter pro Quadratmeter, siehe auch Kasten S. 84).

Sicher – moderne Landwirtschaftspraktiken sind an der Misere nicht allein Schuld. Ergiebige Niederschläge nehmen zu, das ist unbestreitbar. In Rheingebiet südlich von Köln beispielsweise wurde von 1900 bis 1950 nur viermal über 200 Millimeter Niederschlag binnen 30 Tagen verzeichnet, in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts 17-mal. Davon fielen auf die 1980er Jahre vier Ereignisse, auf die 1990er fünf, insgesamt also über die Hälfte.

Hochwasserbedrohung steigt durch Bodenverdichtung

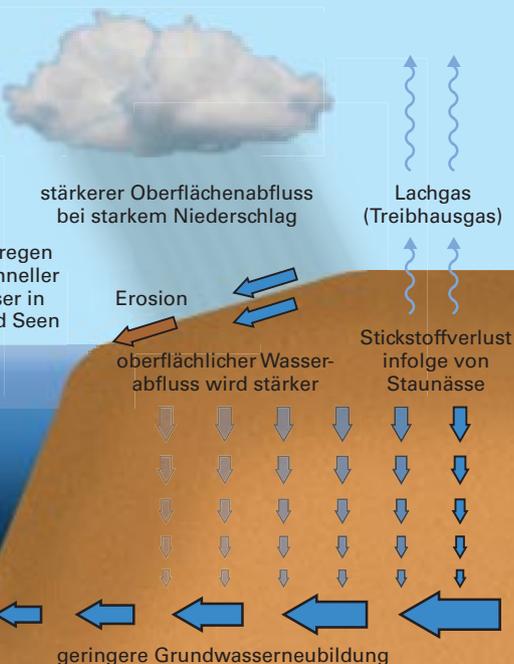
Zu den gehäuften Hochwasserereignissen trägt auch die Ausdehnung der besiedelten und damit weit gehend versiegelten Fläche bei. In der alten Bundesrepublik betraf das 1951 noch 7,4 Prozent des Landes, 1989 schon 12,2 Prozent, was zusätzlich 1,2 Millionen Hektar bedeutet, auf denen Niederschlag nicht versickern kann, sondern oberflächlich abfließt.

Ein weiterer Faktor ist die großflächige Umwandlung von Grünland in

▷ Dass unnatürlich verdichtete Böden die Landwirtschaft belasten, ist nur die eine Seite. Denn inzwischen wirkt sich das auch auf die großen Kreisläufe aus – bis hin zur Hochwassergefahr und Klimaerwärmung.

Schäden durch zunehmende Bodenverdichtung

Gefahren für die Umwelt



Erschwernisse im Pflanzenanbau





Ackerfläche. Allein zwischen 1965 und 1985 gingen dadurch in Westdeutschland 1,5 Millionen Hektar Wiesen und Weiden verloren – etwa ein Drittel der Fläche Niedersachsens. Weiden und besonders Wiesenböden mit ihrer ganzjährig geschlossenen Grasnarbe nehmen wegen ihrer lockeren und dennoch stabilen Struktur Regen und Schmelzwasser viel leichter auf als Äcker.

Zudem wurden Acker- und Grünland durch künstliche Dränung technisch entwässert. Allein in Westdeutschland hat man seit dem Zweiten Weltkrieg über vier Millionen Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche dräniert. Das brachte zwar in nassen Jahren weniger Ernteverluste und erleichterte den Bauern die Bearbeitung des Landes auch nach Regenfällen. Doch erfüllen solche Böden bei starkem Niederschlag ihre Speicherfunktion nur unzureichend.

Trotzdem sehen wir und viele unserer Kollegen die größte Hochwasserbedrohung, die von landwirtschaftlichen Flächen ausgeht, in der Bodenverdichtung insbesondere durch die modernen Ackerbaumethoden. Immerhin gut die Hälfte der Landfläche Deutschlands – 54 Prozent waren es im Jahr 2000 – wird noch heute unter anderem für Äcker und Weiden genutzt. Davon dienen fast 70 Prozent als Acker- und knapp 30 Prozent als Grünland. Das bedeutet: Deutschland ist nach wie vor ein Agrarland, auch wenn die landwirtschaftlich genutzte Fläche mit der Zeit etwas kleiner geworden ist.

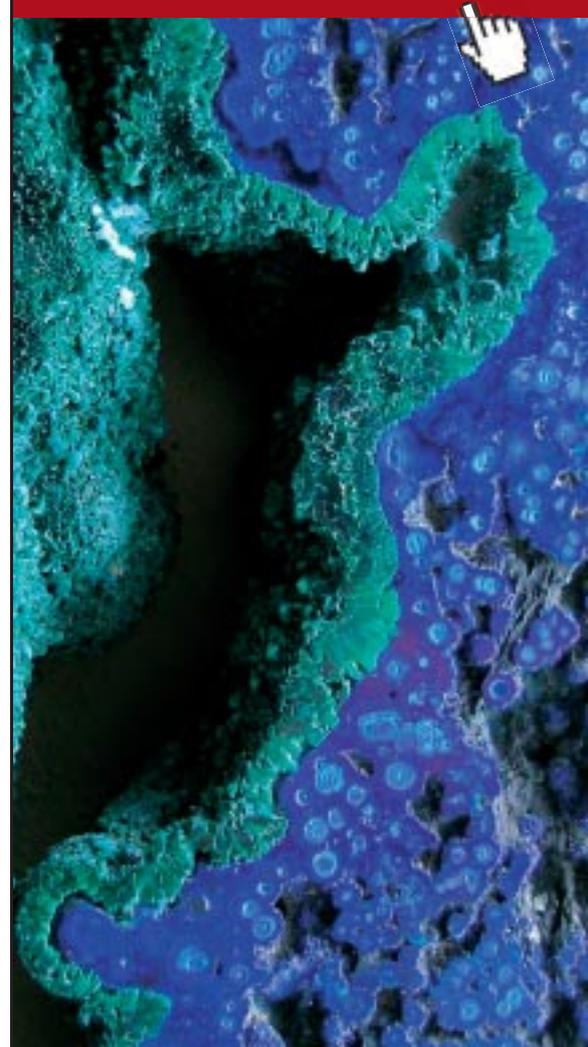
Nur am Rand erwähnt seien andere unerwünschte wirtschaftliche und ökologische Folgen, wenn Regenwasser vermehrt oberflächlich vom Acker fließt.

Zu den bedeutendsten gehört die Erosion, weil dabei fruchtbare Krume verloren geht, die stattdessen Wege und Gewässer verschlammt. Dadurch gelangen Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel ungefiltert in Bäche und Seen. Die Auswirkungen reichen von der Algenblüte bis hin zum Fischsterben. Und die Kehrseite: Weil sich die Grundwasserspeicher weniger auffüllen, sinkt der Spiegel der Bäche und Flüsse in heißen, trockenen Monaten eher. Über die gesamte Vegetationszeit gesehen haben die Ackerpflanzen weniger Wasser zur Verfügung.

Fehler verstärken Klimawandel

Nicht zuletzt dürfte die Bodenverdichtung über die ökologischen und Klimakreisläufe wenn nicht die Mengen, dann doch die Intensität der Niederschläge antreiben helfen, bilden nasse Böden doch vermehrt Lachgas – Distickstoffoxid –, eines der wirksamsten Treibhausgase. Dessen Freisetzung in die Atmosphäre schreiben Forscher zu rund einem Drittel der Landwirtschaft zu. Zur globalen Erwärmung dürfte Lachgas etwa 6 Prozent beitragen. Seine Emission scheint weltweit zu steigen, und Länder wie Deutschland nehmen hierbei pro Flächeneinheit eine Spitzenposition ein, weil sie sowohl die Verdichtung der Böden vorantreiben als auch viel Stickstoffdünger einbringen. Experten schätzen den Anteil der Landwirtschaft an der globalen Erwärmung durch alle einfließenden Faktoren auf inzwischen rund 15 Prozent.

Maschinen, die den Menschen die harte Feldarbeit abnehmen, waren immer gern gesehen. Die zunehmende Rationalisierung der Arbeitsgänge durch ▷



spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Redaktion von **spektrumdirekt** informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.



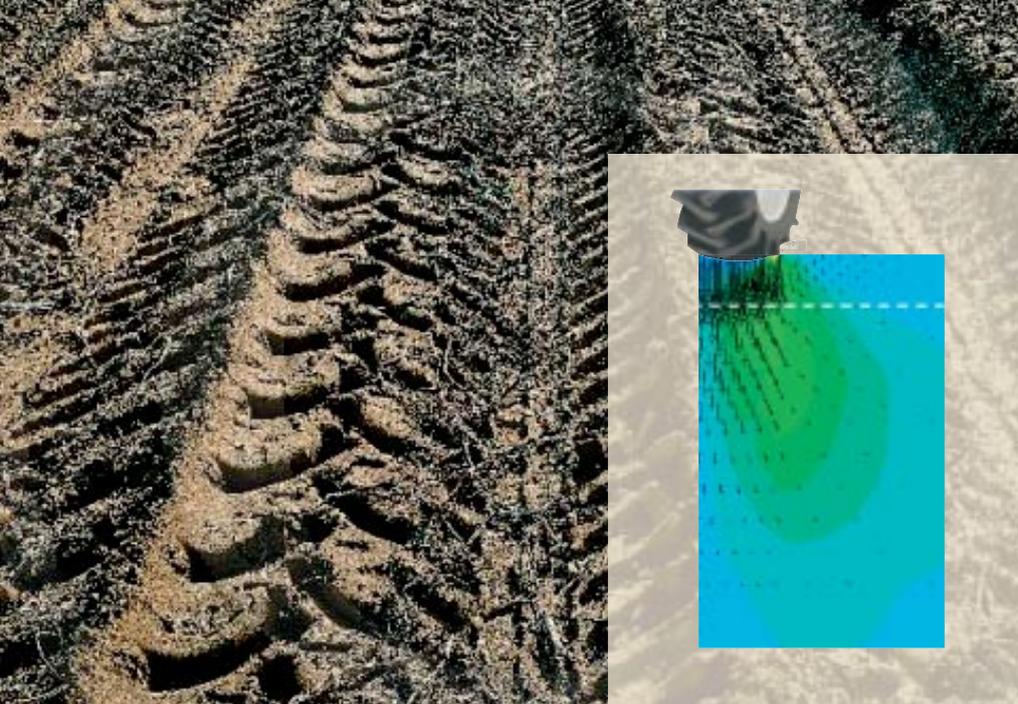


FOTO: OKAPIA; GRAFIK: RAINER HORN

◀ Besonders bei nassem Boden stauen schwer belastete Reifen die festen Bodenteilchen zusammen und verringern so das Volumen der Poren. Wie auf der eingefügten Grafik beispielhaft dargestellt, werden die Partikel nicht nur senkrecht mehr zusammengepresst, sondern zusätzlich durch den Schlupf der Räder beim Fahren verschmiert.

▷ Mähdrescher und andere Erntegeräte, die mehrere Schritte auf einmal erledigen, erschien vorteilhaft. Die besprochenen Nebenwirkungen der Entwicklung wurden erst langsam sichtbar.

Wie ließe sich zumindest eine weitere Verschlechterung unserer Bodenverhältnisse verhindern? Zu hoffen, man könnte die technischen Neuerungen der letzten Jahrzehnte in der Landwirtschaft rückgängig machen, ist sicherlich utopisch. Allein schon aus Gründen der Rentabilität hat sich in unserer Gesellschaft Ackerbau mit schlagkräftigem Gerät und geringerer Arbeitskraft eingespielt. Im Prinzip wäre es technisch möglich, die verdichteten Böden durch tieferes Pflügen wieder aufzulockern. Langjährige Erfahrungen zeigen aber, dass ein Acker nach Tieflockerung beim nächsten Befahren besonders schnell wieder rückverdichtet und der Zustand hinterher eher schlimmer ist als vorher. Nun hielte der Boden keiner der vorhandenen Maschinen mehr stand.

Hohe Folgekosten

Allerdings sollten wir anstreben, dass sich die Situation nicht noch mehr verschärft. So rasch wie möglich müssen wir Kompromisse finden, um wenigstens den jetzigen Zustand der Böden zu bewahren. Das bedeutet Umdenken – ein Prozess, der bei vielen schon eingesetzt hat. Wen die rein ökologischen Gesichtspunkte nicht überzeugen, der sollte sich die ökonomische Seite klar machen: die gesamtwirtschaftlichen Folgekosten von Hochwasser- und Klimakatastrophen, die steigenden Ausgaben für Hochwasserschutz, die Folgekosten von Boden-erosion und Ernteausfällen. Allein die

Schäden einer Überschwemmung wie in diesem Jahr wieder an der Elbe gehen in die Milliarden.

Deutschland gehört zu den 170 Staaten, die 1992 auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro die Agenda 21 unterzeichnet haben. Das Aktionsprogramm der Vereinten Nationen gibt jedem Land das Recht, seine Ressourcen zu nutzen, mit der Einschränkung, dass dabei für zukünftige Generationen eine nachhaltige Entwicklung gewährleistet ist. Das gilt auch für den Boden, für die äußerst verletzbare, dünne Haut dieser Erde. Ohne sie gäbe es kein höheres Leben und keine landwirtschaftliche Produktion.

In diesem Sinn wurde 1998 das Bundes-Bodenschutzgesetz verabschiedet. Es verpflichtet dazu, bei Eingriffen die Bodenfunktionen zu sichern oder wieder herzustellen sowie Schäden vorzubeugen. Jedoch sind die konkreten Ausführungsbestimmungen unzureichend. Der betreffende Paragraph für die landwirtschaftliche Bodennutzung verweist auf die so genannte gute fachliche Praxis. Doch darunter verstehen Landwirte und Grundbesitzer bisher vorrangig betriebswirtschaftliche Aspekte wie ökonomische, kostengünstige Arbeitsabläufe.

Dringender als je zuvor brauchen wir eine gesetzliche Regelung, die Achslast und Gesamtgewicht von Landmaschinen begrenzt. Bodenkundler fordern zum Beispiel, als höchste zulässige Last pro Rad nicht mehr als etwa fünf Tonnen zu erlauben, auch nicht bei voll beladenen Erntemaschinen. Nasse Äcker dürften selbst damit nicht befahren werden. Die Arbeiten sollten wieder mehr am Wetter

und der aktuellen Feuchtigkeit des Felds ausgerichtet sein, nicht an der technischen Durchführbarkeit.

Nicht allein Arbeitserleichterung und Produktionsverbilligung dürfen die Entwicklung bestimmen. Die nachhaltige Nutzbarkeit und die Bewahrung ökologischer Funktionen der Agrarflächen müssen wieder mehr ins Blickfeld rücken. Das sind wir nicht nur uns, sondern auch nachfolgenden Generationen schuldig. Bodenschutz ist nicht allein ein Anliegen der Landwirte und Grundbesitzer, sondern der gesamten Bevölkerung. ◀



Rienk R. van der Ploeg (links) hatte zuletzt am Institut für Bodenkunde der Universität Hannover die Professur für Bodenphysik inne. Er starb im Herbst 2005. Er war einer der Hauptinitiatoren dieses Artikels. **Wilfried Ehlers** (Mitte) war bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2004 Professor für Acker- und Pflanzenbau am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Universität Göttingen. **Rainer Horn** ist Professor für Bodenkunde am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel.

Unser Acker – durch schwere Landmaschinen gefährdet. Video-Film des IWF, Wissen und Medien (früher Institut für den Wissenschaftlichen Film), Göttingen

Böden werden zu schwer belastet. Von Wilfried Ehlers in: Land & Forst. 22.4. 2004, S. 17

Bodenverdichtung durch Landmaschinen. Ein Paradigmenwechsel ist nötig. Von K. H. Hartge et al. in: Zuckerrübe, Bd. 52, Heft 6, 2003, S. 299

Landschaftshydrologische und Hochwasser relevante Aspekte der ackerbaulichen Bodenbewirtschaftung in der deutschen Nachkriegszeit. Von R. R. van der Ploeg et al. in: Berichte über Landwirtschaft, Bd. 79, Heft 3, 2001, S. 447

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Zukunft des Internets

Höhere Datenraten allein werden nicht ausreichen, um unsere künftigen Kommunikationsbedürfnisse zu befriedigen.

Von Lars Eggert, Jürgen Quittek und Heinrich Stüttgen

Das »Netz der Netze« hat sich zu einem der wichtigsten Kommunikationsmittel entwickelt. Wurde es Anfang der 1990er Jahre nur von wenigen Spezialisten verwendet, so nutzen es inzwischen Privatleute wie Firmen mit aller Selbstverständlichkeit. Wer Informationen sucht, bedient sich dazu heute eines Web-Browsers, der Pizzaservice in der Nachbarschaft nimmt Bestellungen per E-Mail entgegen, und die persönlichen Ansichten zum Weltgeschehen finden ihren Niederschlag in Online-Tagebüchern, den so genannten Blogs.

Die Grundprinzipien des Internets stammen aus den frühen 1970er Jahren, als das amerikanische Verteidigungsministerium die Entwicklung eines ausfallsicheren Computernetzes vorantrieb. Daraus resultierten die »Interconnected Networks«, kurz Internet. Auf der Basis standardisierter Protokolle konnten Rechnernetzwerke nun kommunizieren. Die TCP/IP genannte Protokollfamilie sieht vor, dass Daten von Endsystemen wie PC oder Laptop zu Paketen geschnürt und mit den Netzwerkadressen von Absender und Adressat versehen werden. Jedes Paket geht dann für sich allein auf die Reise, wird an Verzweigungen des Netzwerks von Knotenrechnern beziehungsweise Routern weitergereicht und am Ende beim Empfänger wieder mit seinesgleichen zu den ursprünglichen Daten zusammengesetzt.

Obwohl das zunächst komplizierter klingt als etwa eine direkte Verbindung

zwischen zwei Kommunikationsteilnehmern, über die Informationen exklusiv ausgetauscht werden, hat sich dieses Vorgehen für die Kopplung von Rechnernetzwerken als äußerst robust erwiesen. Auf der doch relativ einfachen Infrastruktur des Internets können verschiedenste Dienste aufsetzen. Zu den ältesten zählt die E-Mail, zu den populärsten gehört das World Wide Web, das einen interaktiven, grafischen Zugang zu vielen Informationsquellen bietet. Die flexiblen Protokolle unterstützen darüber hinaus noch diverse andere Dienste.

Eines für alles

Zur Überraschung vieler Experten ist diese Technologie inzwischen auch in die Telefonwelt eingedrungen und hat begonnen, verbindungsorientierte Verfahren wie ISDN und ATM zu verdrängen. Lässt ein Unternehmen heute ein neues firmeninternes Telefonnetz installieren, ist eine internetbasierte Lösung meist die erste Wahl. Aus Sprache – und zunehmend auch Videobildern – werden dann Bits und Bytes, die mittels der TCP/IP-Protokolle zum Gesprächspartner eilen. In naher Zukunft dürften die meisten terrestrischen Kommunikationsnetze darauf aufbauen.

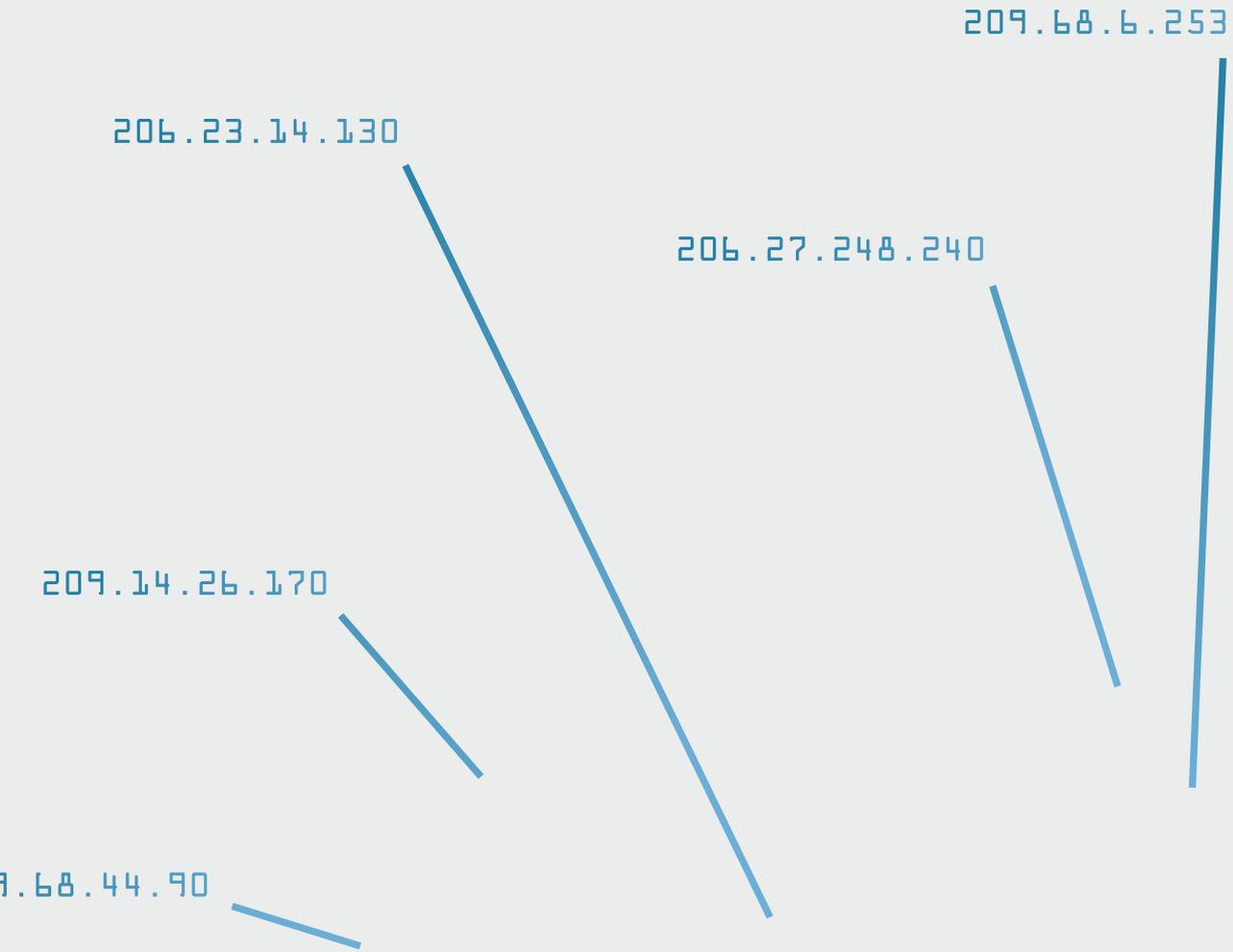
Diese Entwicklung ist alles andere als selbstverständlich. Man sollte doch meinen, dass etablierte, eigens für die jeweilige Anwendung ersonnene und optimierte Verfahren im Vorteil wären. Doch das Internet punktet mit einer einfachen und einheitlichen Infrastruktur, die viele verschiedene Kommunikationsdienste unterstützen kann. Ob Telefonieren, Online-Banking oder E-Mails – letzt-

lich sind das alles nur Daten, die packchenweise zu verschicken sind. Auf Grund der universell einsetzbaren Protokolle lassen sich neuartige Dienste einfach einbinden, was in den spezialisierten Telefonnetzen der Vergangenheit nur schwer möglich war. Erst das Internet macht auch den Computer zum universellen Arbeitsmittel. Die Verknüpfung verschiedener Kommunikationsdienste wie Online-Bestellungen, Dokumentenverarbeitung, Ablaufsteuerung und dergleichen vereinfacht Geschäftsvorgänge und steigert damit ihre Effizienz.

Allein schon dank der vereinheitlichten Infrastruktur sollten Kommunikationskosten in Unternehmen wie in Privathaushalten langfristig sinken. Darüber hinaus ist die benötigte Technologie zunächst vergleichsweise einfach, also auch günstiger herzustellen. Dringen universell einsetzbare Komponenten immer wieder in neue Bereiche vor, erschließt sich ihnen ein Massenmarkt, was ihre Kosten senkt. Allerdings gibt es inzwischen auch einen gegenläufigen Trend: Mit jeder neuen Anwendung wachsen die Anforderungen an die Komponenten und damit an deren Komplexität.

Doch allmählich werden auch Grenzen sichtbar. So schützen Protokolle nach TCP/IP-Standard die Daten oft nicht ausreichend gegen Angriffe oder unberechtigten Zugriff, und einige Kon-

Die Welt spricht TCP/IP: Das Protokoll, das den Datenaustausch zwischen Internetadressen regelt, setzt sich mittlerweile sogar in der Telefonie durch.



*Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.*

▷ zepte, die für die Großrechnerlandschaft der 1970er Jahre optimal waren, erweisen sich heute als problematisch. Das Internetprotokoll wurde deshalb bereits erweitert, doch diese Ergänzungen weisen immer noch Schwächen auf. Ein Beispiel ist die ursprüngliche Annahme, dass Computer über lange Zeit an derselben Internetadresse zu erreichen sind. Heutige mobile Computer wechseln aber als Laptops oder moderne Mobiltelefone häufig ihre Internetadresse, wenn sie sich über unterschiedliche Zugänge in das Netz einbinden.

Europäische Forschungseinrichtungen leisten wichtige Beiträge, um seine Zukunft zu sichern. Wichtige, von der Europäischen Union geförderte Projekte im Problemfeld »Internet und Mobilität« sind zum Beispiel Daidalos und Ambient Networks, in denen die meisten Hersteller von Kommunikationstechnologien, Netzbetreiber sowie führende Forschungsinstitute und Universitäten

kooperieren. Wer mit seinem Notebook auf eine Geschäftsreise geht, möchte jederzeit wichtige Informationen abrufen können, ob im Büro des Kunden, unterwegs in der Bahn oder im Auto. Zwangsläufig wechselt er dabei den Netzzugang. Ein solcher »Handover« bedeutet oft auch einen Wechsel der die Verbindung herstellenden Hardware. Der Schreibtisch-PC verwendet vielleicht einen Anschluss via Ethernet-Kabel, im Konferenzraum erfolgt die Einwahl drahtlos über einen WLAN-Router, auf der Reise wird die Infrarot- oder Bluetoothschnittstelle des Handys genutzt. Dieser Technikwechsel muss automatisch erfolgen, ohne den Nutzer zu behelligen.

Das Handy als Vorbild

Mit dem Handover geht mitunter zudem ein Wechsel des Internetanbieters, des Providers, einher. Mobiltelefone hätten niemals den bekannten Boom erlebt, wären Anrufe auf ein bestimmtes

Gebiet beschränkt gewesen. Doch ohne dass es der Telefonierende bemerkt, machen Handys jeden Ortswechsel mit und suchen sich selbstständig einen neuen Zugangsknoten zum Mobilfunknetz, gegebenenfalls auch einen neuen Netzanbieter.

Das zukünftige, universelle Internet muss in gleicher Weise eine Vielfalt von Zugangstechnologien in eine gemeinsame Infrastruktur integrieren, die von allen Netzbetreibern unterstützt wird. Wichtige Komponenten einer solchen Infrastruktur sind die Identitätsprüfung von Nutzern und im Gegenzug auch von Netzanbietern. Des Weiteren sollten die Protokolle in der Lage sein, mit schnellen Wechseln zwischen sehr unterschiedlichen Netzwerken zurechtzukommen; auch ein Handover von einem breitbandigen DSL-Anschluss zu einem langsameren Funknetz darf keinerlei Probleme bereiten. Außerdem müssen die dabei eingesetzten Protokolle Verbindungsab-

Problem Sicherheit

Kritiker erwägen, das Internet durch ein a priori sicheres Netz abzulösen.

Wo Licht ist, ist auch Schatten. In dem offenen Medium Internet werden Milliarden mit halblegalen und kriminellen Geschäften verdient. Spammer verschicken mittlerweile mehr E-Mails als reguläre Benutzer, um Kunden für ihre Auftraggeber einzufangen. Trojaner und Phishing-E-Mails spähen Kreditkartennummern, Passwörter und ähnliche schützenswerte Kundeninformationen aus. Darüber hinaus gibt es eine »sportlich anarchische Szene«, die mit großem Ehrgeiz und ohne Rücksicht schädliche Software entwickelt und verteilt. Im schlimmsten Fall legen diese Viren und Würmer die Kommunikationsnetze und den Handel ganzer Erdteile lahm. An dergleichen dachten die Entwickler nicht, als sie das Internet zu Beginn der 1970er Jahre als ein Kommunikationsmedium für einen kontrollierten Personenkreis von »freundlichen Benutzern« konzipierten.

Einige angesehene Experten haben Bedenken gegenüber der heutigen Praxis, die Mängel des Internets auf Dauer durch sukzessive Änderungen bestehender Protokolle zu beheben. Sie sehen

das Netz bereits heute als ein großes Flickwerk an, dem seit dreißig Jahren fehlende Funktionen notdürftig hinzugefügt werden. Eine schlüssige Lösung etwa der Sicherheitsprobleme habe sich dadurch nicht ergeben. Vielmehr sei die Gesamtstruktur inzwischen derart instabil, dass mit einem baldigen Zusammenbruch gerechnet werden müsse. Deshalb gibt es an vielen Forschungseinrichtungen Projekte zur grundsätzlichen Überarbeitung oder gar Ablösung der Internetarchitektur. So möchten einige Wissenschaftler ein neues Netz schaffen, das den Sicherheitsaspekt von vornherein einbindet.

Doch welche Chancen haben solche revolutionären Ansätze im Vergleich zu einer evolutionären Weiterentwicklung des Netzes? Allein die mit einem Übergang für Unternehmen, Behörden und Privatleute verbundenen Kosten wären exorbitant. Milliardenschwere Investitionen wären auf einen Schlag vernichtet. Zudem müsste das neue Netz auf längere Zeit kompatibel zum alten bleiben, um die Kommunikation der Anwender weiterhin aufrechtzuerhalten.

Schrittweise Verbesserungen, die vielleicht nicht alle, aber doch die dringends-

ten Probleme lösen können, stellen einen alternativen Weg dar, das Internet Stück für Stück zu verbessern. Zum Beispiel ist es seit Langem technisch möglich, E-Mails digital zu unterschreiben und auch zu verschlüsseln, sodass sich der Empfänger über den Absender und den Inhalt einer E-Mail sicher sein kann. Für viele andere Probleme existieren ebenfalls schon technische Lösungen. Wie bei der sicheren E-Mail werden diese Verbesserungen aber viel zu selten eingesetzt. Das Problem ist nicht die technische Machbarkeit von Sicherheit.

Einer der »Väter des Internets«, Vinton Cerf, sieht die Schwachstellen weniger bei den Netzkomponenten als vielmehr in den Betriebssystemen der angeschlossenen Rechner. Der überwiegende Teil der gravierenden Störungen gehe nämlich nicht von den Netzwerkprotokollen selbst aus. Vielmehr würden diese Protokolle von den mit dem Internet verbundenen Betriebssystemen und Anwendungen unzulänglich implementiert. Es gibt also noch viele Möglichkeiten, das Netz der Netze schrittweise sicherer zu machen. Letztendlich konnten die Befürworter eines radikalen Wechsels auch noch keinen ernsthaften Gegenkandidaten präsentieren.

brüche oder Pausen besser verkraften können als heute.

Und noch eine Barriere sollte fallen – die klassische Aufteilung in Server und Endgeräte. In so genannten Ad-hoc-Netzen kommunizieren Computer direkt miteinander, jeder übernimmt Teile der Übertragungsaufgaben, die üblicherweise ausgewiesene Knotenrechner und Server erledigen. Ein Wohngebiet ohne allgemeine Breitbandversorgung könnte auf diese Weise von einem einzelnen Anschluss an das Internet profitieren: In das Ad-hoc-Netzwerk eingebunden, dient ein Rechner mit Internetzugang als Relaisstation, die diesen Anschluss von Nachbar zu Nachbar weiterreicht. In gleicher Weise lässt sich ein einzelner Netzzugang von einer Gruppe Geschäftsreisender gemeinsam nutzen.

Kombiniert man diese Technik mit Mobilität, landet man bei Visionen der Fahrzeugkommunikation. Drahtlos sollen Kraftfahrzeuge unablässig Daten austauschen. Eine wichtige Anwendung wäre die Warnung vor Gefahrenstellen innerhalb des relevanten Gebiets, eine andere ist die Versorgung jedes Fahrzeugs mit einem Internetzugang. Wer unterwegs ist, möchte vielleicht erfahren, wo die nächste Tankstelle ist oder welche Sehenswürdigkeiten die gerade durchfahrene Region zu bieten hat. Jedes entsprechend ausgestattete Automobil wäre dann ein Knoten, der solche Daten weiterleiten kann. Dazu muss sich das Netz spontan selbst organisieren. Die Wegewahl für Datenpakete folgt nicht mehr wie im Internet üblich auf vorbestimmten Routen, sondern wird anhand der Positionen der Rechner immer wieder neu bestimmt. In den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekten »FleetNet – Internet on the Road« und »NoW – Networks on Wheels« arbeiten Automobilhersteller und Kommunikationsfirmen an der Entwicklung solcher Systeme. Allerdings ist mit einer Markteinführung nicht vor 2010 zu rechnen.

Sonderfall Sensornetze

Apropos Automobil: Um sicherheitsrelevante Daten in Fahrzeugen zu erfassen, werden zunehmend auch Sensornetze verwendet. Diese bestehen aus sehr kleinen und verteilten Sensoren, deren einzige Aufgabe es ist, permanent Daten zu sammeln und bei Bedarf dem Steuerrechner zu übermitteln. Solche Netze

können wichtige Aufgaben übernehmen, wie die Überwachung des Straßenzustands oder Warnungen vor Regen- und Eisglätte. Andere kontrollieren, dass im Fahrzeuginnenraum überall angenehme Temperaturen herrschen. Im Sinn einer durchgängigen Infrastruktur müssten solche Netze in das Internet eingebunden werden. Allerdings sind dessen Protokolle für eine so einfache Kommunikation schon zu umfangreich. Andererseits wären um die entsprechenden Funktionen aufgerüstete Sensoren unnötig teuer. Änderungen der Internetprotokolle wären eine Möglichkeit, das Problem zu lösen.

Noch ein Wort zum Netzmanagement. Wer zu Hause einen PC mit Internetzugang betreibt, hat ihn wahrscheinlich selbst eingerichtet und weiß, dass dies selten ohne Probleme abgeht. Schon das DSL- oder ISDN-Modem in Betrieb zu nehmen, Windows und eine Firewall zu konfigurieren, erfordern Geduld und Frustrationstoleranz. Professionelle Systemadministratoren müssen sich mit inkompatiblen Gerätetreibern und Softwareversionen herumschlagen, um ein Netzwerk endlich in Gang zu setzen und in Betrieb zu halten – bis zum nächsten Update. Das allgegenwärtige Internet der Zukunft aber wird um ein Vielfaches komplexer werden, denn es bindet sehr heterogene Endgeräte und Dienste ein – vom Notebook über Heimkino und Telefon bis zur Fernwartung der Heizungsanlage, von der Videokonferenz über die Verwaltung von Lagerbeständen bis zu Radio-Frequency-

Identification(RFID)-Etiketten. Manche dieser Geräte bieten nur eine Basisfunktionalität für die Internetkommunikation, andere sind so leistungsstark wie ein Server. Damit wachsen die Anforderungen an die Administratoren.

Mit anderen Worten: Konfiguration und Wartung der Netze müssen weitgehend automatisiert ablaufen. Davon profitieren zuerst einmal die Anwender, aber auch die Netzanbieter, deren Betriebs- und Supportkosten sinken.

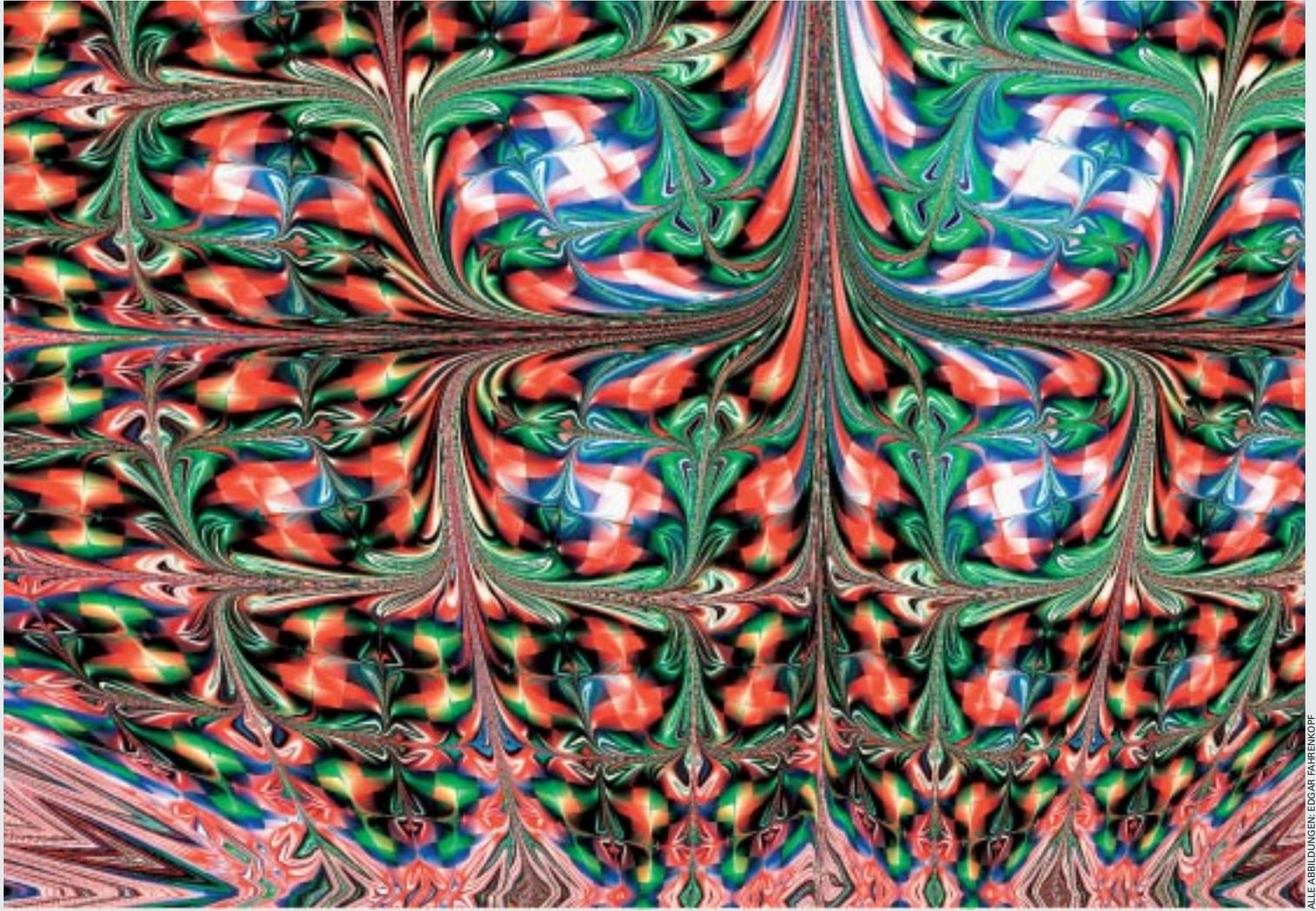
Wohin wird diese Entwicklung letztlich führen? Durch die Integration immer neuer Anwendungen und Technologien scheint die ursprüngliche Stärke des Internets bedroht: seine Einfachheit und universelle Einsetzbarkeit. Hinzu kommen massive Probleme mit der Datensicherheit (siehe Kasten links). Daher stellen sich einige Forscher inzwischen die Fragen: Wohin entwickelt sich das Internet? Wird es eines Tages sogar durch ein neues Netz abgelöst? Schlüssige Antwort darauf sind allerdings noch nicht in Sicht. ◁



Lars Eggert, Jürgen Quittek, Heinrich Stüttgen (von links) forschen bei NEC Network Laboratories in Heidelberg.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN



ALLE ABBILDUNGEN: EDGAR FAHRENKOPF

Kunstwerke aus iterierten Abbildungen

Der Hobbyprogrammierer Edgar Fahrenkopf hat ein geläufiges Erzeugungsverfahren für Computerbilder abgewandelt und zu neuer Blüte geführt.

Von Christoph Pöppe

Wilde Brandung hat bizarre Formen aus dem Gestein herausgewaschen (siehe Bild rechts unten, links); die finstere Miene der Inkagötter steht in seltsamem Kontrast zu ihren monströsen Hasenohren (Bild rechts un-

ten, rechts); an der Glasfront eines Hochhauses hat sich Friedrich Hundertwasser so intensiv zu schaffen gemacht, dass nicht nur alle Fenster krumm geworden, sondern manche zu bloßen Strichen komprimiert sind (oben); in einer Szene aus dem »Krieg der Sterne« bekämpfen sich ganze Heerscharen mit Lichtschwertern (rechts oben). Das und

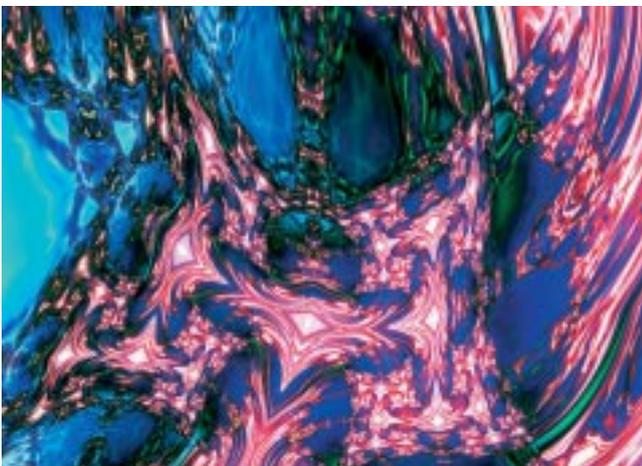
noch viel mehr kann man in den Bildern sehen, die Edgar Fahrenkopf aus Bad Homburg auf seinem kleinen, nicht besonders modernen Computer programmiert hat.

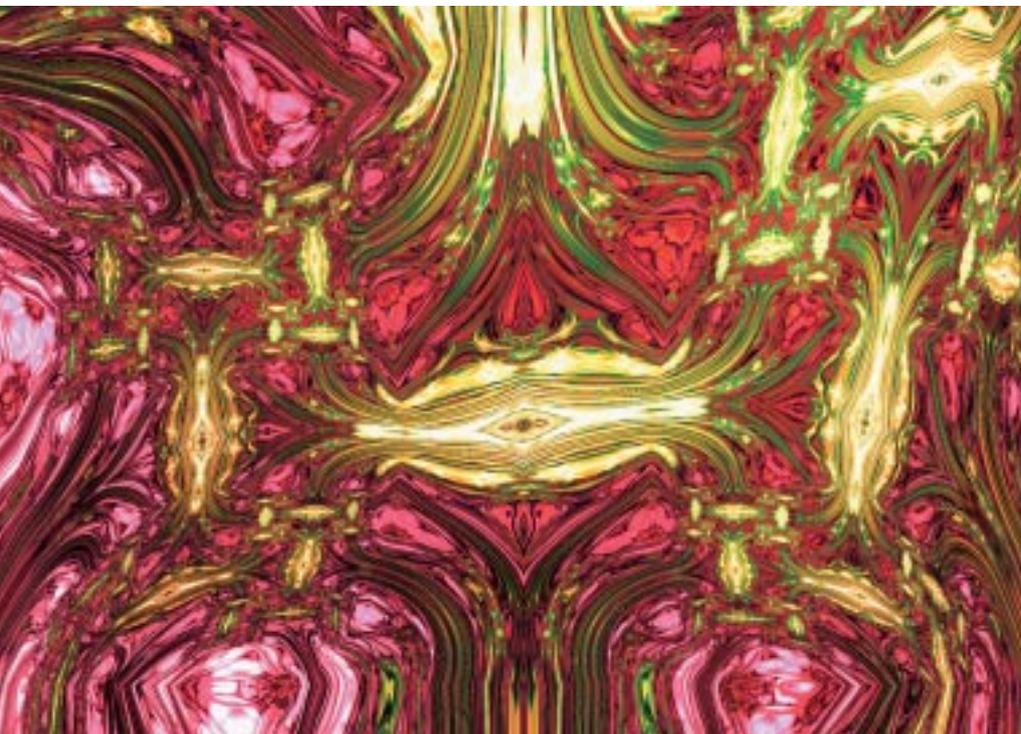
Natürlich hat Fahrenkopf bei seinem Computer nicht Fenster, Klippen oder Lichtschwert bestellt – jedenfalls nicht ausdrücklich. Vielmehr entspringt die ▷



▲ In »Schachbrett« (links oben) erkennt man annähernd quadratische Felder, von denen allerdings die meisten von einem gigantischen Rührwerk in die Länge gezogen scheinen. Aber ebenso wie die gebogenen Lichtstreifen in »Kosmos« (oben) hat Edgar Fahrenkopf sie nicht explizit einprogrammiert.

▼ Ein zentrales Element im Bild links unten, das weiße, von zahlreichen roten Streifen umgebene Viereck, findet sich verdreht und verkleinert in vielen Exemplaren wieder: eine Form von Selbstähnlichkeit. Ein ähnlich wiederkehrendes Motiv sind die roten Hasenohren im Bild unten.





▲ »Purpurholz« wirkt wie ein angeschnittener, sehr astiger Baumstamm mit vielen ausgeprägten Jahresringen.

▼ Es ist die Nichtlinearität der definierenden Funktionen, die diesen »Teppich« so schief geknüpft erscheinen lässt. Zugleich sorgt sie dafür, dass das Flammenmotiv in vielen Größen auftritt.



▷ ganze Vielfalt seiner Bilder – von der hier nur ein kleiner Ausschnitt zu sehen ist – kleinen Variationen eines Programms von kaum 50 Zeilen Text in der Programmiersprache Basic.

Der fraktale Flohzirkus

Das Grundprinzip ist dasselbe wie bei den Fraktalbildern, mit denen vor 15 bis 20 Jahren die Computer mit den damals neuen Farbbildschirmen massenhaft beschäftigt wurden: Das Bild wird aus lauter einzelnen Farbpunkten (Pixeln) zusammengesetzt. Die Position jedes Pixels auf der Bildfläche wird durch seine Koordinaten x und y beschrieben. Auf diesen Punkt, sprich das Zahlenpaar (x, y) , wird dann eine Abbildung angewandt, das heißt, nach einer gewissen Vorschrift wird aus dem alten Punkt ein neuer gemacht. Auf diesen neuen Punkt wird abermals die Abbildung angewandt (iteriert), und so weiter. Es hüpfet gewissermaßen ein Floh auf der Bildfläche von Ort zu Ort, wobei jeder Zielort durch den Absprungort eindeutig festgelegt ist. Dabei kann er auch über die Bildfläche hinaus- und wieder zurückspringen. Je nachdem, welches Schicksal den Floh am Ende ereilt, wird sein Ursprungsort eingefärbt.

Nennen wir den Zielort seines ersten Sprungs (x_1, y_1) . Ein Floh, der in (x_1, y_1) startet, erleidet dasselbe Schicksal wie derjenige, der in (x, y) losspringt, nur mit einem Takt Vorsprung. Wenn zwei verschiedene Absprungsorte denselben Zielort haben, betreiben die beiden Flöhe von diesem Zeitpunkt an Synchronspringen. In beiden Fällen erhalten ihre Ursprungsorte dieselbe oder fast dieselbe Farbe. Wenn unsere Abbildung stetig ist, gilt das ungefähr so auch für Punkte in der Umgebung der jeweiligen Absprungpunkte. Deswegen findet man dieselben Bildelemente an verschiedenen Stellen wieder, verkleinert, vergrößert oder deformiert, so wie es die Abbildung vorschreibt. Das ist die Selbstähnlichkeit, die zum Reiz der Fraktalbilder wesentlich beiträgt.

Selbstähnlichkeit findet sich auch in manchen von Fahrenkopfs Bildern (zum Beispiel bei »Purpurholz« links oben oder dem »Teppich« links). Seine Flöhe springen nicht grundsätzlich anders als die Erzeuger der berühmt gewordenen Julia-Mengen (Mathematische Unterhaltungen, Spektrum der Wissenschaft 7/1991 bis 10/1991; nachgedruckt in

Dossier 2/2004 »Mathematische Unterhaltungen III«), nur etwas komplizierter. Neu ist das Verfahren, nach dem aus der Sprungbahn des Flohs die Farbe seines Absprungpunkts berechnet wird.

Die Mathematiker, die, aufbauend auf den Arbeiten ihres französischen Fachkollegen Gaston Julia (1893–1978), die Eigenschaften der nach ihm benannten Mengen studieren, interessieren sich eigentlich nur für das Schicksal des Flohs im Grenzwert unendlich vieler Sprünge. Deswegen legen sie wenig Wert auf das, was der Floh am Anfang seiner Reise tut. Genau das macht Edgar Fahrenkopf anders. Sein Floh springt nicht, bis sein Schicksal entschieden ist, sondern vollführt eine feste Anzahl von Sprüngen, typischerweise fünfzehn. Und jeder der Punkte, die er besucht, geht in die Färbung seines Ursprungspunkts ein.

Man kann sich vorstellen, dass jeder Punkt der Bildfläche eine Art »Urfarbe« hat: die linke untere Ecke Schwarz, die anderen drei Bildecken die Bildschirmfarben Rot, Grün und Blau, und alles dazwischen so interpoliert, dass eine reichhaltige Palette zu Stande kommt. An jeder seiner Stationen sammelt der Floh ein bisschen von der dort vorhandenen Urfarbe in ein Töpfchen. Der Ursprungspunkt bekommt die Summe der so angesammelten Farben. Es ist das Prinzip der additiven Farbmischung, nach der alle Bildschirmfarben zusammengesetzt werden.

Das ist aber nur das Grundprinzip. Fahrenkopf wendet außerdem noch eine Kontrastverstärkung an: Bei jedem seiner Aufenthalte fügt der Floh nicht nur zu jeder Farbkomponente den zugehörigen Anteil Urfarbe hinzu, sondern nimmt von einer anderen Farbkomponente ein Drittel des Topfinhalts weg. Zu allem Überfluss sind die drei Komponenten der Urfarbe nicht Rot, Grün und Blau. Vielmehr ist der Rotanteil im gezeichneten Pixel das Produkt der ersten und der zweiten Urfarbkomponente, Grün entsteht entsprechend aus der zweiten und der dritten, Blau aus der ersten und der dritten.

Wohldosiertes Chaos

Welcher Art aber ist die Iterationsabbildung? Ein bisschen Chaos muss dabei sein, lehrt uns die Theorie der dynamischen Systeme. Wenn die Abbildung Abstände zwischen Punkten stets verminderte, dann würde jeder Floh ▷



▲ Die senkrechte Linie, die das Bild teilt, kommt von einer Unstetigkeit: Ein Floh mit Startpunkt unmittelbar links der Linie hat ein völlig anderes Schicksal als sein Nachbar zur Rechten.

▼ Aus einer Serie von Bildern, die ursprünglich wie Kirchenfenster anmuten, entstand dieses Duft verströmende Schlingengewächs durch eine Änderung weniger Parameter.





Der »Wald« (links) zeigt wuchernde Moose, einen großen, grünen Käfer oben am linken Bildrand und wieder angeschnittene Jahresringe. Die Strukturen in Edgar Fahrenkopfs Bildern müssen sich nicht bis ins unendlich Kleine wiederholen: »Blumen« (rechte Seite) zeigt nur grö-

▷ über kurz oder lang auf ein und demselben Punkt landen und könnte von seiner Reise nicht viel Interessantes mitbringen.

Die klassische Art der Chaoserzeugung ist die so genannte Blätterteigtransformation, definiert durch die Abbildung $f(x) = 2|x| - 1$ auf dem Intervall $[-1, 1]$. Man klappt die linke Hälfte des Intervalls nach rechts (das macht die Betragsfunktion), rollt es mit dem Nudelholz auf die doppelte Länge aus (der Faktor 2), schiebt das Intervall an seinen ursprünglichen Platz zurück (die Addition von -1), und dasselbe immer wieder, wie bei Blätterteig eben. Zwei Rosinen, die dicht beieinander im Blätterteig stecken, verdoppeln ihre Entfernung

voneinander bei jedem Ausrollen: Kleine Ursachen haben große Wirkungen. Andererseits werden jede Zahl und ihr Negatives auf die gleiche Zahl abgebildet, es gibt also stets zwei Absprungspunkte mit gleichem Zielpunkt.

Die doppelte Blätterteigtransformation

Edgar Fahrenkopfs Flöhe wenden eine Blätterteigtransformation in x -Richtung und eine in y -Richtung an. Interessant wird es aber erst, wenn beide Koordinaten gemischt werden. Das erreicht Fahrenkopf, indem er eine dritte Variable einführt, die anfangs gleich dem Produkt von x und y ist. Genau genommen springt der Floh also nicht in der Ebene,

sondern im dreidimensionalen Raum. Und selbst das stimmt nicht ganz. Der jeweils nächste Punkt wird nicht nur von dem gegenwärtigen Punkt im Raum bestimmt; der Floh schleppt auch noch etwas Vergangenheit mit sich herum. Oder man interpretiert das Programm so, dass der Floh in einem fünfdimensionalen Raum umherhüpft. Gleichwohl ist seine gesamte Bahn von den zwei Koordinaten seines Ursprungspunkts determiniert.

Die Blätterteigfunktion macht in eine gerade Linie einen Knick, dessen Folgen in manchen Bildern ins Auge springen, aber sie krümmt sie nicht. Die ebenfalls in den Bildern zu sehenden geschwungenen Linien kommen durch die Multiplikation zu Stande.



ßere Formen und die auch in »Kosmos« (S. 95) auftretenden gebogenen Lichtstreifen. Das Bild in der Mitte besteht zwar erkennbar aus zwei einander ähnlichen Hälften; aber die Abweichung von der Spiegelsymmetrie erstreckt sich nicht nur auf die Form, sondern auch auf die Farbe.



Hat also Edgar Fahrenkopf bei seinem Computer wenn schon keine Lichtschwerter oder Krummfenster, so doch wenigstens Knicke und krumme Linien bestellt? Nicht wirklich. Er hat das hier beschriebene Prinzip abgewandelt, zum Beispiel den Faktor bei der Blätterteigtransformation nicht gleich 2, sondern etwas kleiner gewählt, die Produkte mit Vorfaktoren versehen, hier und da noch eine kleine Konstante hinzuaddiert ... Insgesamt gleicht sein Programm einer Maschine mit zehn bis fünfzehn Stellrädchen; dabei sind diejenigen, die im Wesentlichen die »Kameraeinstellungen« wie Bildausschnitt, Vergrößerung, Helligkeit und Farbkontrast bestimmen, schon mitgezählt.

Dreht man an einem Stellrädchen, so geschehen manchmal merkwürdige und überraschende Dinge. Fahrenkopf hat durch Variation eines einzigen Parameters lange Bildserien erzeugt. Einige dieser abstrakten Kurzfilme können Sie unter der Webadresse www.spektrum.de/fahrenkopf abrufen.

Stellt man die Rädchen aber irgendwie wild ein, ist das Ergebnis in aller Regel langweilig oder unansehnlich. Die eigentliche künstlerische Leistung besteht daher nicht im Verfassen des Programms, sondern darin, unter den unüberschaubar vielen Einstellungen der Rädchen diejenigen ausfindig zu machen, die eindrucksvolle Bilder ergeben. Das wiederum erfordert neben einem Gespür für

Farben und Formen sehr viel Geduld beim Ausprobieren, selbst wenn die Berechnung eines Bilds den Computer nur drei Sekunden in Anspruch nimmt.

Weitere Bilder und Bestellmöglichkeiten finden Sie auf der Website des Künstlers: www.edgarfahrenkopf.de. ◁



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Chaos, Kosmos, Märchen. Von Klaus Gorzny mit Bildern von Edgar Fahrenkopf. Piccolo-Verlag, Marl, im Druck

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ANATOMIE

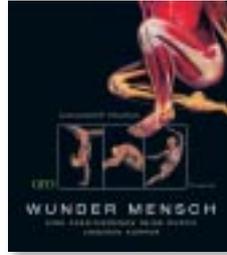
Alexander Tsiaras

Wunder Mensch

Eine faszinierende Reise durch unseren Körper

Aus dem Amerikanischen von Henning Thies.

Droemer/Knaur, München 2005. 264 Seiten, € 29,90



Wie es in ihrem Inneren aussieht, das interessiert viele Menschen lebhaft – die langen Schlangen vor jeder »Körperwelten«-Ausstellung beweisen es. Der Versuch, diesem Interesse durch den Erwerb eines Buchs nachzugehen, führte bislang fast zwangsläufig zu einem Anatomieatlas und damit zu nüchternen, mit lateinischen Begriffen gespickten Illustrationen.

Mit »Wunder Mensch« gibt es jetzt einen Folianten der etwas anderen Art. Alexander Tsiaras ist Wissenschaftsjournalist, Fotograf und Gründer der Firma Anatomical Travelogue in Manhattan. Er selbst hat die Software für die Visualisierungen erdacht, die auf den über 250 Bildtafeln des Buchs zu sehen sind. Als Basis dienen Daten aus bildgebenden Verfahren wie

Computer- und Magnetresonanztomografie, doch was die Grafiker und Programmierer daraus machen, ist faszinierend – der Untertitel verspricht nicht zu viel. Dreidimensional und äußerst detailliert zeigen die Abbildungen, was sich im Inneren unseres Körpers verbirgt.

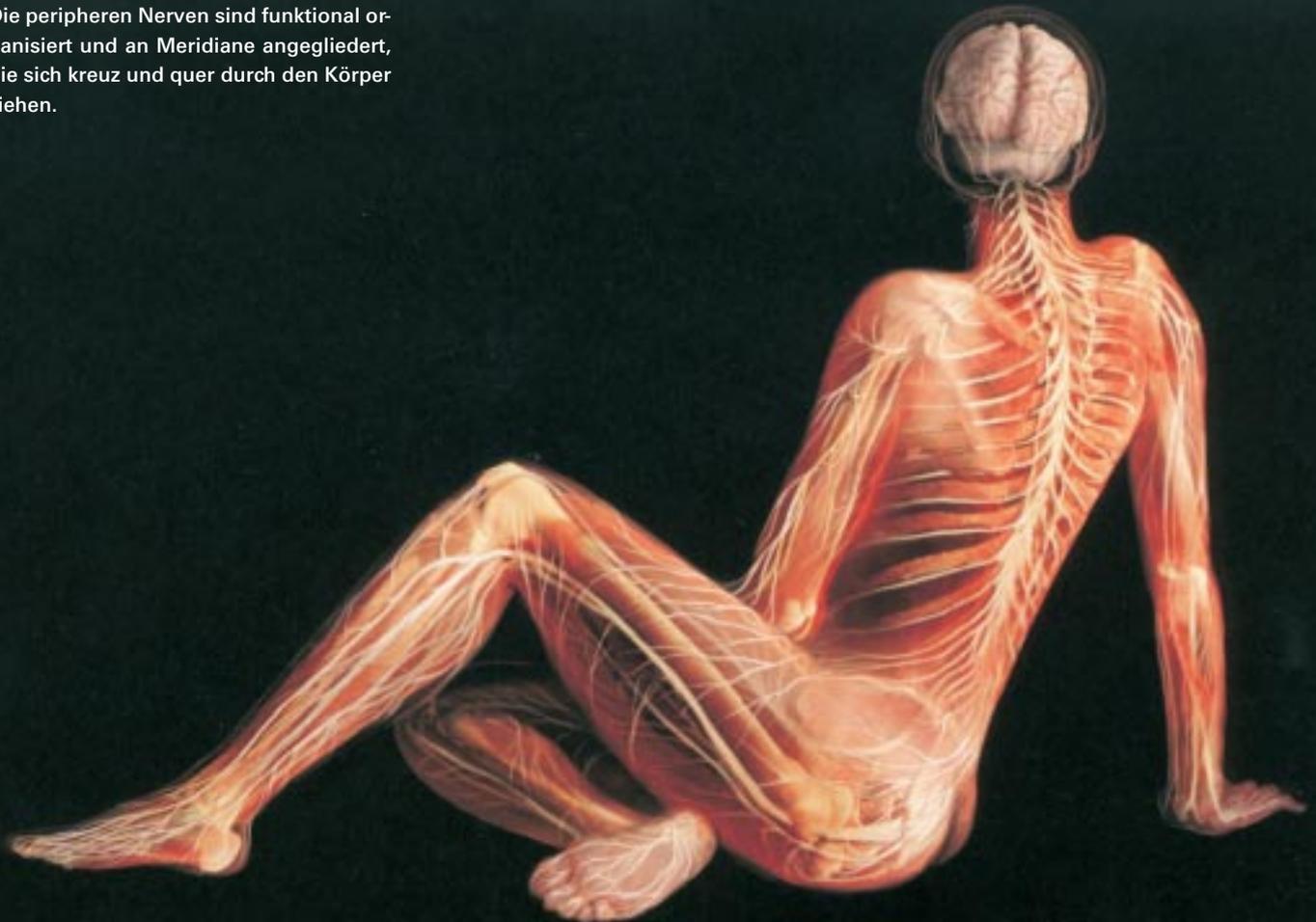
In zwölf Kapiteln führt Tsiaras den Leser auf eine Reise durch die verschiedenen Organsysteme, von der Haut über das Skelett, Herz, Leber, Nieren bis zu den Fortpflanzungsorganen. In jedem Kapitel geht es vom Großen ins Kleine: erst die makroskopischen Strukturen, dann die Details zu Arbeitsweise und Funktion, die durch eingeklinkte licht- und elektronenmikroskopische Aufnahmen noch verdeutlicht werden. Das lädt tatsächlich

dazu ein, tiefer und tiefer in die Feinheiten des menschlichen Organismus vorzudringen. Manchmal will das Auge aber auch einfach verharren, verzaubert von der Schönheit unserer Anatomie.

Einen im Klappentext zitierten Rezensenten der »Washington Post« erinnern die digital animierten Abbildungen an die »Meisterwerke der Renaissance-maler«. Tsiaras wird das gefreut haben, sagt er doch selbst über sein Werk, dass sich Kunst und Wissenschaft hier trafen.

Fototechnisch mag das richtig sein. An einigen Stellen von »Wunder Mensch« merkt man aber, dass Tsiaras sich sehr um die Ästhetik bemüht. Manchmal zu sehr. Vor allem auf den Anfangsseiten der einzelnen Themengebiete posieren die Figuren teilweise wie Supermodels in der Unterwäschewerbung. Im Kapitel »Immunsystem« rasiert sich eine attraktive Blondine die Beine. Auf einer der ersten Seiten sieht der Leser eine schwangere Frau, die mit selbigem Gesichtsausdruck die Hände auf ihren Mama-Bauch legt. Durch ihre transparente Bauchde-

Die peripheren Nerven sind funktional organisiert und an Meridiane angegliedert, die sich kreuz und quer durch den Körper ziehen.



cke eröffnet sich dann der Blick auf den zusammengekrümmten Fötus. Manchmal lenkt dieses Beiwerk das Auge zu sehr von dem ab, was der Bildband eigentlich zeigen kann: zeigen, wie es in unserem Inneren wirklich aussieht.

Dass Tsiaras' Bilderreise durch den menschlichen Körper nicht nur optischen Wert besitzt, liegt zum Gutteil an den Texten von Barry Werth. Während die Bilder selbst spärlich oder gar nicht beschriftet sind, erklärt der prominente amerikanische Wissenschaftsjournalist dem interessierten Laien die komplexe Physiologie unseres Organismus auf ebenso anschauliche wie launige Art und Weise. Abbildungen und Text ge-

meinsam machen die Faszination für dieses ungeheuer komplexe System komplett. Man schaut nicht nur, sondern erfährt auch, wie es funktioniert.

Dabei greift Werth oft zu Vergleichen aus der Welt der Technik. Nerven sind »Bündel von lebendigen Kabeln«, mit ihren Sinneszellen bildet die Haut ein »Kontinental-Radarsystem«, die Linse des Auges »funktioniert wie eine Kamera«, der Bandapparat ist die »Takelage«, die Leber eine »Chemiefabrik«. Diese abgegriffenen Bilder funktionieren immer noch. Sie etwas weniger inflationär zu verwenden wäre allerdings kein Schaden gewesen. Das gilt auch für die reichlich eingestreuten Zahlen. Was wird hier nicht alles auf-

summiert: die Anzahl der Nervenzellen, die Gesamtlänge des Blutgefäßsystems in Kilometern, die Lebenspumpleistung des Herzens in Litern – zu Millionen, Milliarden, Billionen. Superlative, die wohl auch den Titel rechtfertigen sollen: Ein öffentlicher Bewusstsein grenzt eine riesig große Zahl ja schon fast an ein Wunder.

Doch wo so viel Licht ist, darf auch ein wenig Schatten sein. Tsiaras' Visualisierungstechnik liefert jedenfalls Einblicke in den menschlichen Körper, die es so bislang nicht gab. Selbst Fachkundige dürften begeistert sein.

Ulrich Kraft

Der Rezensent ist studierter Mediziner und Wissenschaftsjournalist in Berlin.

MEDIZIN

Jörg Blech

Heillose Medizin

Fragwürdige Therapien und wie Sie sich davor schützen können

S. Fischer, Frankfurt am Main 2005. 240 Seiten, € 17,90



Feindliche Soldaten, Verschwörer und Kopfgeldjäger – der englische König Charles II. (1630–1685) hatte viele Feinde, die ihm den Tod wünschten. Den entscheidenden Hieb jedoch versetzten ihm seine eigenen Ärzte. Als er im Februar 1685 einen Schlaganfall erlitt, eilten sie sofort an sein Krankenbett. Mit Aderlass und Schröpfen setzten sie ihm zu, stäubten ihm Nieswurzpulver in die Nase und flößten ihm die verschiedensten Kräuter und Tinkturen ein. Mal waren es Brech-, mal Abführmittel, und als der Monarch schon sichtlich geschwächt war, rasierten sie ihm die Haare und beschwerten das kahle Haupt mit einem glühenden Stück Eisen. Schließlich entkam der König seinen Peinigern – indem er starb.

Geht es uns heute besser als Charles II.? Nur bedingt, meint Jörg Blech. Viele der heute gängigen Therapien gegen Bandscheibenverschleiß, Arthrose, Herzbeschwerden, Alzheimer und Osteoporose sind kaum besser begründet als der Aderlass. Zum Beispiel die Infusionen, die Ärzte bei Hörsturz zu verschreiben pflegen: »Die Wirksamkeit keiner einzigen der darin enthaltenen Substanzen konnte bisher belegt werden.«

Warum jubeln Mediziner ihren Patienten nutzlose Verfahren unter? Das Problem ist das System, meint Blech. »Es

orientiert sich nicht an Verbrauchern, sondern an Ärzten. Sie bieten medizinische Leistungen an und steuern zugleich die Nachfrage danach.« Die Zahl der Rückenoperationen etwa steige linear mit der Zahl der verfügbaren Rückenchirurgen. Außerdem stehe mittlerweile in vielen Praxen der Kommerz an erster Stelle. Paradebeispiel sind die so genannten Individuellen Gesundheitsleistungen, die privat abgerechnet werden. Immer häufiger würden Ärzte ihren Patienten diese Prozeduren anbieten. Doch das sei rausgeschmissenes Geld. »Die allermeisten IGeL-Posten«, schreibt Blech, »taugen nichts.«

Der Trend vom »Heiler zum Händler« wird auch deutlich, wenn Ärzte einmal selbst krank werden: »Viele Pillen und Prozeduren, aber auch Vorsorgemaßnahmen, die den Bürgern als neuester Stand der Forschung gepredigt werden, lehnt die Mehrheit der Ärzteschaft für sich selbst ab.«

Aber »Heillose Medizin« ist nicht einfach eine reißerische Ärzteschelte. Immer wieder betont Blech, dass die Medizin auch »viel Gutes bietet« und dass die meisten Ärzte wirklich bestrebt sind, ihren Patienten zu helfen. Es geht ihm nicht darum, dem Leser Angst vor dem nächsten Arzttermin einzujagen, sondern ihn aufzuklären, damit dieser der medizi-

nischen Praxis nicht mehr allzu blauäugig gegenübersteht. »Menschen werden umso seltener behandelt werden, je besser sie informiert sind«, glaubt Blech. »Wissen ist die beste Medizin« lautet deshalb sein Rezept gegen die »Übertherapie«.

Ein guter Ansatz, doch verkennt Blech, dass viele Ärzte auf kritische Fragen empfindlich reagieren. »Alle Patienten müssen so gut informiert sein wie Ärzte«, verlangt er. Das ist utopisch, überfordert den Normalbürger und unterschätzt maßlos die Bedeutung einer medizinischen Ausbildung. Interessant ist aber sein Vorschlag, »einen Verbraucherschutz für Patienten« einzurichten.

»Heillose Medizin« ist ein gut recherchiertes Aufklärungsbuch. Sein großes Plus ist zugleich auch sein Problem: die zahlreichen Studien und Statistiken, mit denen Blech seine Behauptungen belegt. Dieser Datenwust nimmt einen Großteil des Inhalts ein und verdrängt Blechs Tipps zum Schutz vor fragwürdigen Therapien auf die letzten zehn Seiten. Trotz der vielen Zahlen ist das Buch gut lesbar und allgemein verständlich. Als Medizinredakteur des »Spiegel« versteht Blech sein Handwerk. Sein erstes Buch »Die Krankheitserfinder« stand wochenlang ganz oben auf den Bestsellerlisten.

Zu empfehlen ist »Heillose Medizin« besonders denjenigen, die noch jedes Mal vor Ehrfurcht erstarren, wenn sie einen Arztkittel sehen. Dann würden auch diese Leute der medizinischen Praxis ein wenig kritischer gegenüberstehen.

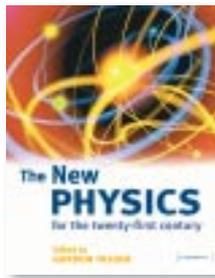
Sonja Huhndorf

Die Rezensentin ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Osnabrück.

PHYSIK

Gordon Fraser (Hg.)
The New Physics
 for the twenty-first century

Cambridge University Press, Cambridge 2006. 556 Seiten, £ 30,-



Die neue Physik für das 21. Jahrhundert. Der Titel klingt reichlich anmaßend – und spiegelt doch den Kern des Buchs vortrefflich wider. Der britische Physiker und Wissenschaftsautor Gordon Fraser überspringt mutig die Grundlagen der Physik und lässt international hoch angesehene Experten, die er als Autoren für sein Werk gewinnen konnte, ausschließlich über ihre topaktuellen Forschungsschwerpunkte berichten.

Michael B. Green, Professor für theoretische Physik an der Universität Cambridge, schreibt über die Grundzüge der Superstring-Theorie; Wendy L. Freedman, Direktorin des Carnegie-Observatoriums in Pasadena (Kalifornien), und

▼ Je nach Wahl der Parameter zeigt die Lösung der komplexen Ginzburg-Landau-Gleichung eine Art chaotischen Verhaltens (links) oder eine andere (rechts); die Zeitkoordinate läuft abwärts.

Edward W. Kolb, Direktor des Zentrums für Teilchenastrophysik am Beschleunigerzentrum Fermilab bei Chicago, erklärt das Neueste zur Dunklen Materie und Dunklen Energie im Kosmos; der österreichische Quantenphysiker Anton Zeilinger berichtet über die wunderbaren Verschränkungen in der Teilchenwelt, und Yoseph Imry vom Weizmann-Institut in Rehovot (Israel) gibt einen umfassenden Überblick über die neuesten Entwicklungen in der Nanotechnologie. Es folgen Ausflüge in die Anwendungen: Biologie, Medizin und Materialwissenschaften. Den Abschluss bildet ein Beitrag des bekannten Elementarteilchenphysikers Ugo Amaldi über die Rolle der Physik in der Gesellschaft.

Doch obwohl alle Autoren mit ihren komplexen Gedanken weit über dem Niveau des Normalmenschen schweben, verstehen sie es, dem Laien selbst vielschichtigste Sachverhalte klar und einleuchtend nahe zu bringen. Der englische Text liest sich trotz Sprachbarriere erstaunlich

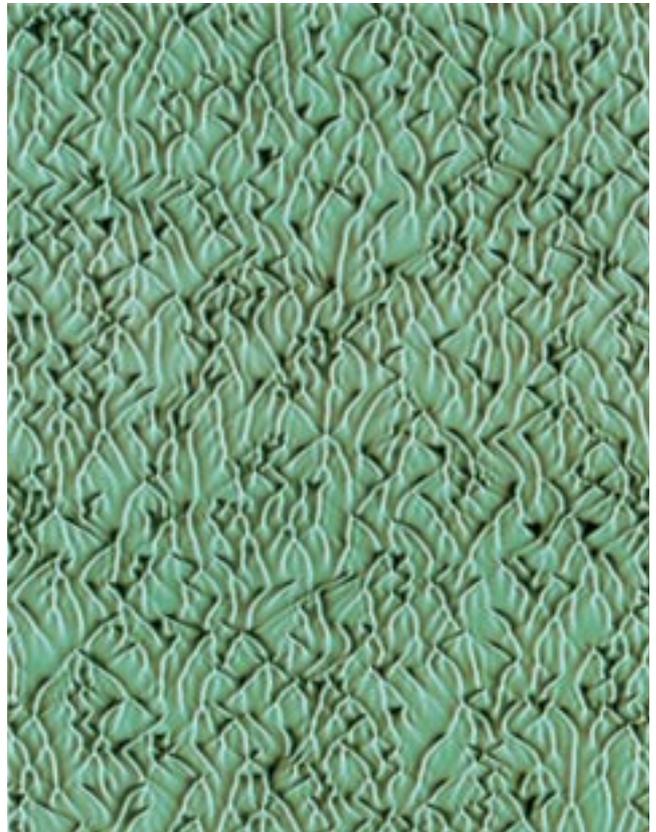
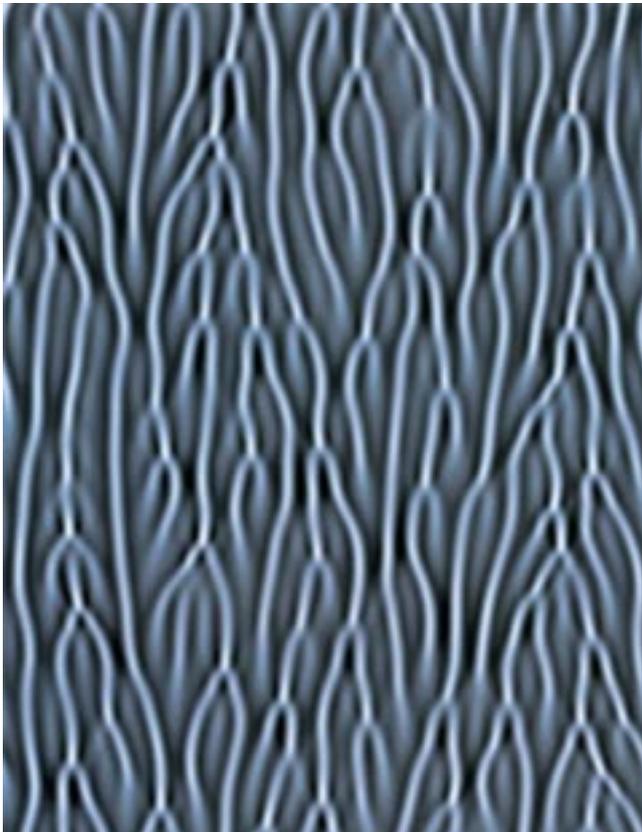
leicht. Man muss das dicke Buch auch nicht auf einmal konsumieren: Jedes Kapitel ist in sich abgeschlossen.

Dabei machen die Autoren beim Inhalt keine Kompromisse. Wer es ganz genau wissen will, findet mathematische Zusammenhänge oder tiefer gehende Erklärungen in separaten Kästen. Bis auf historische Aufnahmen sind die zahlreichen, durchweg vorzüglichen Grafiken und Fotos farbig. Am Schluss jedes Kapitels geben die Autoren Empfehlungen zu weiterführender Lektüre.

Gordon Fraser hat ein inhaltlich überaus anspruchsvolles, qualitativ hochwertiges, aber dennoch verständliches und in sich stimmiges Werk vorgelegt. Es ist ein echter Leckerbissen für all diejenigen, die sich über den aktuellen Stand der physikalischen Forschung informieren wollen. Der Leser bekommt zwei Kilo hochdichte Informationen in die Hand. Dass die Beiträge britischer Wissenschaftler ganz besonders intensiv gepriesen werden und manch ein Autor alle Wissenschaft außer der eigenen für nebensächlich hält – damit kann man leben. Journalistische Ausgewogenheit wäre bei diesem Prachtwerk dann doch zu viel verlangt.

Gerhard Samulat

Der Rezensent ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.



Martin Borré und Thomas Reintjes**Warum Frauen schneller frieren****Alltagsphänomene wissenschaftlich erklärt**

C. H. Beck, München 2005. 176 Seiten, € 9,90



Seit zwei Jahren macht es sich die Sendung »Nano« auf 3sat zur Aufgabe, die Wissenschaft hinter Alltagsphänomenen aufzudecken. Einmal pro Woche werden in der Rubrik »aha« die kniffligen Fragen neugieriger Zuschauer beantwortet. Die hundert besten sind jetzt mitsamt den Antworten auch in Buchform erhältlich.

Da ist für jeden etwas dabei, einerlei, ob man sich für die wissenschaftlichen Zusammenhänge von Alltäglichem interessiert oder einfach beim nächsten Smalltalk mit seinem Wissen beeindrucken möchte. Ein paar Kostproben: Eintagsfliegen leben länger als einen Tag. Es ist kein Zufall, dass Sportler im Stadion stets gegen den Uhrzeigersinn laufen, sondern wurde 1912 festgelegt. Die Gründe für diese Regel sind nicht überliefert; möglicherweise hat man sich an

den britischen Verkehrsregeln orientiert oder daran, dass bei vielen Menschen die rechten Gliedmaßen stärker ausgebildet sind. Bei Rennen gegen den Uhrzeigersinn können die Athleten so der Fliehkraft effektiver entgegenwirken und liegen besser in den Kurven.

Der Ausruf »Ich hab' schon Pferde kotzen sehen« spielt auf ein zwar unwahrscheinliches, aber nicht unmögliches Ereignis an: Tatsächlich haben Pferde keinen Würgereflex, und ihr großes Gaumensegel verhindert, dass sie verdorbene Nahrung erbrechen können. Immerhin können sie bei verstopfter Speiseröhre oder einem überfüllten Magen Flüssigkeit über ihre Nüstern herauslaufen lassen.

Auch wer schon immer auf bestimmte Fragen wie »Was besagt die Quantenmechanik?«, »Warum erscheint der

Mond am Horizont größer?« und »Wie funktioniert ein Laser?« eine knappe, aber präzise Antwort (notfalls zum Auswendiglernen) sucht, wird hier fündig.

Das Taschenbuch räumt mit einigen Vorurteilen auf und bringt ein für allemal Klarheit in oft heiß diskutierte Themen. Warum schwirren Insekten nachts um Lampen? Weil sie mit Hilfe des Mondlichts ihre Flugrichtung zu bestimmen pflegen. Verwechseln sie eine Straßenlaterne mit dem Erdtrabanten, schwirren sie hilflos um diese Lichtquelle. Der Aufbau ihrer Augen in viele Einzelaugen und die Intensität des Lampenlichts tragen zusätzlich dazu bei, die Insekten von ihrer geplanten Route abzubringen.

Und – die Titelfrage – warum haben Frauen meist kältere Hände und Füße als Männer? Letztere haben zwar im Durchschnitt niedrigere Körperfettwerte als Frauen, aber mit ihrem höheren Muskelanteil und einer dickeren Oberhaut beugen sie kalten Fingern und Zehen erfolgreich vor.

Die beiden Wissenschafts- und Technikjournalisten Martin Borré und Tho- ▷

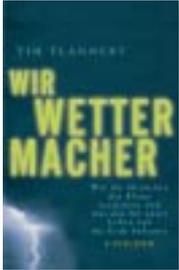
▷ mas Reintjes meistern ihre schwierige Aufgabe, komplexe Sachverhalte auf höchstens zwei Seiten anschaulich und amüsant zu beschreiben. So einfach manche Frage auch klingt, die Antwort stellt sich oft als recht kompliziert heraus: So lässt sich das alltägliche Phänomen, dass es nachts dunkel wird, nicht

einfach mit »weil die Sonne untergeht« erklären.

Ich freue mich schon auf die nächsten hundert Fragen und Antworten.

Eva Hörschgen

Die Rezensentin hat Archäologie und Ethnologie studiert und ist freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.



KLIMAFORSCHUNG

Tim Flannery

Wir Wettermacher

Wie die Menschen das Klima verändern und was das für unser Leben auf der Erde bedeutet

Aus dem Englischen von Hartmut Schickert.

S. Fischer, Frankfurt am Main 2006. 350 Seiten, € 19,90

Tim Flannery, Professor für Zoologie an der Universität von Adelaide (Australien) und bekannter Umweltschützer, stand 1981 auf einem Berg in Papua-Neuguinea und fand Anzeichen dafür, dass sich die Baumgrenze mit dramatischer Geschwindigkeit nach oben verschoben hatte. Zwanzig Jahre später ist er davon überzeugt, dass die Ursache der menschengemachte Klimawandel ist. Alarmiert beschließt er, das vorliegende Buch zu schreiben, eine »Gebrauchsanleitung für den Thermostat der Erde«. Das ist ein hoher Anspruch.

Anschaulich erzählt der Autor zu Beginn vom »großen Luftozean« und vom Wärmefang der Treibhausgase.

Das Ausbleichen der Korallen, hier im Großen Barriereriff vor der Küste Australiens, ist Folge der Klimaveränderungen.



Er schildert lebendig, wie die fossilen Brennstoffe (»vergrabener Sonnenschein«) entstanden sind und ausgebeutet werden. Deren Verbrennung lässt bekanntlich die CO₂-Konzentration in der Luft ansteigen.

Für die Zukunft malt uns Flannery ein apokalyptisches Szenario aus: Super-El-Niños bringen zwei Dritteln des Globus Trockenheit, Überschwemmungen oder andere extreme Wetterverhältnisse, das Polareis schmilzt, Hurrikane schwelgen an. Die Ökosysteme reagieren heute schon auf die Veränderungen: Korallenriffe erleiden (Bild), der Klimawandel rotet die erste Tierart aus – die Goldkröte in Costa Rica –, und die Lemmings werden nach Norden an die Küste getrieben. Packend liest sich das allemal. Doch der Wahrheitsgehalt ist dünn. Keiner dieser Umweltschäden lässt sich nämlich monokausal auf den Ausstoß von Treibhausgasen zurückführen.

Wie reagiert unsere Zivilisation auf die globale Erwärmung? Den Trend umzukehren sei zu teuer; man solle sich besser beizeiten an die veränderten Umweltbedingungen anpassen, empfehlen manche Wirtschaftswissenschaftler. Flannery nennt das einen Völkermord und dramatisiert, dass es nur so kracht: Ohne Klimaschutz stehe der Kollaps ganzer Megastädte bevor. »Schon 0,63 Grad Celsius Erwärmung haben sich als ausreichend erwiesen, um ... den Sahel, die Arktis oder die subantarktischen Gewässer erheblich zu schädigen.«

In den Kapiteln über die Klimapolitik kommt Flannerys Heimatland schlecht weg – kein Wunder, denn das

an Kohle reiche Australien produziert pro Kopf sogar ein Viertel mehr CO₂ als die USA. Wenig überraschend lehnt Australien das Kioto-Protokoll ab. Flannery hält den Zauderern entgegen, dass sie die Kosten für die Einhaltung des Abkommens überschätzen, und erinnert daran, dass der Handel mit Emissionsrechten in den USA erfunden wurde – die Maßnahme hat erfolgreich die Umweltverschmutzung mit Schwefeldioxid verringert.

Zum Schluss lässt der Autor Maßnahmen für den Klimaschutz Revue passieren. Die Kernenergie fasst er wegen des Müllproblems nur vorsichtig ins Auge, und von der Speicherung von CO₂ im Untergrund hält er mangels Lagerstätten nicht viel. Er empfiehlt vor allem alternative Energiequellen, die Erdwärme etwa. Und wie es sich für einen richtigen Umweltschützer gehört, geht er selbst mit gutem Beispiel – Solarpaneele auf dem Dach und Auto mit Hybridantrieb – voran.

So flockig sich manche Passage liest – der hohe Anspruch des engagierten Buchs wird nicht eingelöst. Das liegt zum einen daran, dass es dem Autor an wissenschaftlicher Skepsis mangelt. So propagiert er die »Gaia«-Theorie von James Lovelock, doch diese Vorstellung von einem sich selbst stabilisierenden, die Erde umspannenden Ökosystem ist äußerst umstritten. »Telekinese« oder »magische Tore« existieren vielleicht in Flannerys Fantasie, aber nicht im Klimasystem. Auch referiert der Autor viele Studien, als ob sie der letztgültige Stand der Forschung wären – die Unsicherheit in der Wissenschaft kommt viel zu kurz. Nicht von ungefähr trägt eines der seriösesten Bücher über den Klimawandel, George Philanders »Is the temperature rising?«, den Untertitel »The uncertain science of global warming«.

Darüber hinaus fabriziert Flannery eine Fülle von groben Patzern. Im Zusammenhang mit der Klimawirkung von Kondensstreifen schreibt er: »Flögen die Flugzeuge tiefer, könnte man ... die CO₂-Emissionen um vier Prozent senken.« Das ist physikalisch widersinnig – die Jets fliegen ja gerade so hoch, um Treibstoff zu sparen – und falsch abgeschrieben: In der Quelle heißt es korrekt, dass die Emissionen um vier Prozent steigen würden. Zu allem Überfluss dichtet der Autor den Kondensstreifen eine kühlende Wirkung an – in Wirklichkeit erwärmen sie die Luft unter sich.

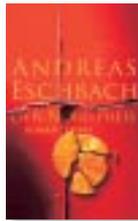
Es sei »mittlerweile klar, dass das Abschmelzen des Südpolareises in den kommenden Jahrzehnten den bei Weitem größten Beitrag zum Meeresspiegelanstieg leisten wird«. Das ist Nonsens; der wichtigste Faktor ist die Ausdehnung der Ozeane durch Erwärmung. Unter Forschern ist sogar umstritten, ob das Eis der Antarktis überhaupt schrumpfen wird.

Und die schwimmenden Eisschollen! Nach Flannery lässt ihr Schmelzen den Meeresspiegel steigen, wenn auch nicht sehr stark: »Nur das Volumen, das vorher den Meeresspiegel überragte, verdrängt entsprechend viel vorhandenes Wasser.« Archimedes würde sich in der Wanne herumdrehen.

Gewiss, »Wir Wettermacher« ist streckenweise unterhaltsam zu lesen. Doch Flannerys Fehler und Übertreibungen können Laien ganz erheblich in die Irre führen. Der ehrgeizige Versuch, ein populäres und zugleich seriöses Sachbuch über die globale Erwärmung zu schreiben, ist gescheitert.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.



THRILLER

Andreas Eschbach

Der Nobelpreis

Lübbe, Bergisch-Gladbach 2005. 555 Seiten, € 22,90

Es beginnt mit der gemütlichen Beschreibung eines Banketts zur Verleihung der Nobelpreise. Aber nach und nach gerät die Welt aus den Fugen: Jemand bietet einem Angehörigen des Nobelpreis-Komitees viel Geld dafür, dass dieser für eine bestimmte Forscherin stimmt. Als der auf den Bestechungsversuch nicht eingeht, wird seine Tochter entführt.

Sein Schwager, frisch aus dem Gefängnis entlassen und eigentlich überhaupt nicht gut auf ihn zu sprechen, verspricht professionelle Hilfe; immerhin ist er ein gewiefter Industriespion und alles andere als zimperlich. Doch bereits die allerersten Nachforschungen ergeben ein bestürzendes Bild von Verwicklungen und Verschwörungen, und je tiefer der Protagonist in den Sumpf gerät, desto ungeheurer und bedrohlicher wird alles, bis der Leser zu der verzweifelten

Überzeugung gelangt, dass die Welt wirklich so korrupt ist, wie Eschbach sie darstellt.

So weit, so amerikanisch. Nach einem eher kraftlosen Anfang mit einem einfältigen Erpresser, einem zögerlichen Forscher und einem Bruch – die Perspektive geht auf den Fiesling und Industriespion über – gewinnt der Roman zunehmend an Fahrt und Spannung. Wie fängt der Autor das an?

Eschbach arbeitet nicht mit dem üblichen Maß an Geheimnissen, Entdeckungen und Cliffhangers. Er zieht vielmehr die Aufmerksamkeit des Lesers auf geradezu hinterhältige Weise in eine eigene Welt hinein, macht diese immer unerträglicher – und demontiert die dadurch generierten Vorstellungen hernach auf elegante, stets unvorhergesehene Weise und dabei doch vollkommen logisch, wie es Agatha Christie und ▷

»STERNE UND WELTRAUM« FÜR SCHULEN

Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung übernimmt erstmalig im Rahmen der Aktion »Wissenschaft in die Schulen!« für 100 Schulen die Kosten eines Online-Zugangs zum Archiv von »Sterne und Weltraum« für ein Jahr!

Wenn Sie Lehrer sind und mit Ihrer Schule teilnehmen möchten, wenden Sie sich bitte innerhalb von sechs Wochen nach Erscheinen dieser Anzeige an:

Wissenschaft in die Schulen!

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Deutschland

E-Mail: wis@wissenschaft-schulen.de

Voraussetzung für eine Teilnahme ist die Begründung der Bewerbung (max. eine Seite Text), die Angabe von Namen und Anschrift der Schule sowie Ansprechpartner inklusive E-Mail-Adresse.



»Wissenschaft in die Schulen!« bietet monatlich praxisnahes didaktisches Material zu ausgewählten naturwissenschaftlichen Themen und kann in den regulären Unterricht einbezogen werden. Für das Gebiet Physik ist dies dank einer Kooperation des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg, der Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen, Donaueschingen, und der Klaus-Tschira-Stiftung gGmbH möglich. Das Material befindet sich bei www.wissenschaft-schulen.de.

Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung ist eine gemeinnützige Stiftung des bürgerlichen Rechts. Ihr Zweck ist die Förderung von Forschung und Ausbildung in den Naturwissenschaften, insbesondere der Physik. Die Stiftung arbeitet eng mit der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zusammen.

Eine Initiative von Spektrum der Wissenschaft mit den Schirmherren Max-Planck-Institut für Astronomie und Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie e. V.

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft in die schulen!

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

▷ Michael Crichton nicht besser gekonnt hätten. Wenn am Ende alle feinen Handlungsstränge wieder zusammenlaufen, wissen wir sogar, warum der Erpresser sich so ungeschickt angestellt hat. Das alles ist nicht nur kunstvoll, sondern auch in höchstem Maße raffiniert gestrickt. Allerdings auch wieder so europäisch, korrekt und logisch – dabei vielleicht sogar etwas zu happy ending –, dass man sieht, dass Eschbach kein Amerikaner ist.

Wie immer hat Eschbach blendend recherchiert. In »Eine Billion Dollar« (2003) hatte er schon fast zu genau die ökonomischen Zusammenhänge der Welt erklärt; diesmal rafft er die Informationen noch dichter zusammen. So gewinnt der geneigte Leser reichlich Einblicke in das Marketing von Pharmakonzernen, die Industriespionage und so nebenbei in die Wissenschaft, etwa die Neurophysiologie.

Jede einzelne Person ist glaubhaft dargestellt, einschließlich der Forscherin, die für den Medizin-Nobelpreis vorgeschlagen wird. Sie fällt aus dem Rahmen, denn sie ist ja nicht nur eine Frau, sondern mit Anfang fünfzig noch so jung. Ihr Fachgebiet ist – nomen est omen! – die Wahrnehmungspsychologie, und als der Protagonist in ihr Hotelzimmer eingedrungen ist und ihr erklärt, warum sie den Nobelpreis keinesfalls annehmen dürfe, erlaubt sie sich, ihm eine einzige, über Leben und Tod entscheidende, simple Frage zu seiner Wahrnehmung zu stellen. Und plötzlich wird die ganze Geschichte umgestülpt wie ein Socken: Nichts ist mehr so, wie es vorher den Anschein hatte.

Eschbachs Professionalität und Handwerkskunst zu rühmen, hieße seinen zahllosen Literaturpreisen hinterherzulaufen. Den Literatur-Nobelpreis hat er noch nicht erhalten. Aber er ist mit Mitte vierzig ja noch so jung.

Fangen Sie nur an, dieses Buch zu lesen, wenn Sie am nächsten Tag ausschlafen können. Es ist sehr schwer, es zwischendurch beiseite zu legen.

Frank G. Gerigk

Der Rezensent ist Diplomgeologe und freier Journalist in Leinfelden-Echterdingen. ◀

PREISRÄTSEL

Geburtsdatum

Von Helmut Karcher

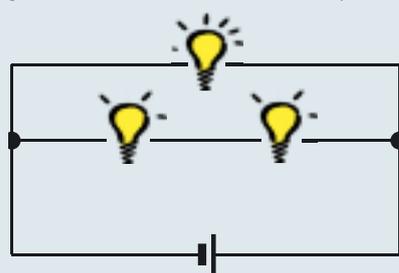
Ein Astronom antwortet auf die Frage nach seinem Geburtsdatum:

»Ich bin an einem Freitag, den 13. geboren. Nach meiner Geburt gab es im gleichen Jahr noch zwei weitere Freitage und zwei Sonntage, die auf den 13. Tag eines Monats fielen. Im nächsten Schaltjahr hatte ich an einem Mittwoch Geburtstag.«

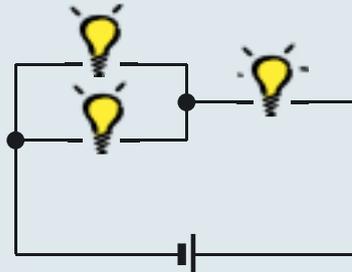
Lösungen zu »Verdrahtet« (Juni 2006)

Es gibt vier Möglichkeiten, drei gleichartige Glühlampen an eine Stromquelle anzuschließen. Neben der reinen Parallel- und der reinen Reihenschaltung sind das die beiden folgenden:

Entweder man schaltet zwei in Reihe geschaltete Birnen mit der dritten parallel



oder zwei parallel geschaltete Birnen in Reihe mit der dritten.



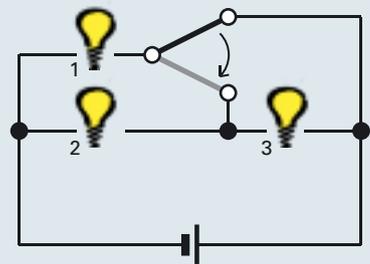
Mit nur einem Wechselschalter kann man weder von der Reihen- noch von der Parallelschaltung der drei Birnen zu einer der drei anderen Möglichkeiten umschalten.

Die einzige mögliche Lösung der Aufgabe schaltet daher zwischen den beiden abgebildeten Schaltungen hin und her. Dabei ändern alle drei Birnen ihre Leuchtkraft: In einer Parallelschaltung fällt über jedem Ast die gleiche – und

In welchem Jahr wurde der Astronom geboren?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei lebensgroße Einstein-Standfiguren. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15.8. 2006, eingehen.

zwar die volle – Spannung ab, in einer Reihenschaltung teilt sich der Spannungsabfall über den einzelnen Schaltelementen proportional zu deren Widerständen auf (die Widerstände der Zuleitungen werden vernachlässigt).



Vor Umlegen des Schalters fällt an der Birne 1 die volle, an den Birnen 2 und 3 jeweils die halbe Batteriespannung ab. Nach Umlegen des Schalters sind die Birnen 1 und 2 parallel geschaltet, ihr Gesamt Widerstand ist also geringer als der einer einzelnen Lampe. Daher fällt an Birne 3 jetzt mehr als die Hälfte der Spannung ab, an den Birnen 1 und 2 jeweils weniger als die Hälfte der Gesamtspannung. Das gilt auch, wenn man berücksichtigt, dass die Temperatur und damit der elektrische Widerstand eines Glühdrahts mit der angelegten Spannung ansteigt (siehe die »Physikalischen Unterhaltungen«, nächste Seite).

Somit leuchten nach Umlegen des Schalters alle Birnen mit einer anderen Helligkeit als zuvor.

Die Gewinner der drei USB-Sticks sind Inga Ludwig, Freiburg; Andreas Oelzant, Wien; und Jan Reisacher, Bollschweil.

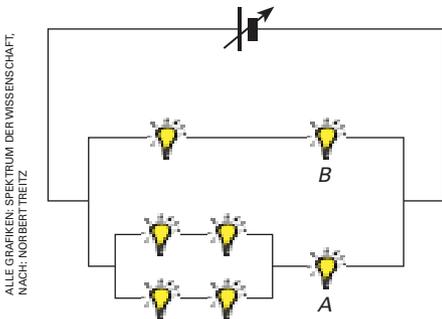
Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal [wissenschaft-online \(www.wissenschaft-online.de\)](http://www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knochelei.

Spiele mit Widerständen

Was haben elektrische Widerstände mit geometrischen Zerlegungsrätseln zu tun?

Von Norbert Treitz

Vorab ein kleines Rätsel. Dieser Stromkreis wird mit so viel Spannung betrieben, dass von den sieben gleichen Glühbirnen zumindest einige ihre Betriebsspannung bekommen und daher schön leuchten. Leuchten aber auch *A* und *B* gleich stark?



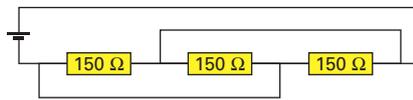
ALLE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Bekanntlich nennt man bei Gleichstrom den Quotienten aus der elektrischen Spannung an einem Leitungsstück und der darin bestehenden Stromstärke den (elektrischen) Widerstand, und das Gesetz von Ohm besagt, dass dieser weitgehend von der Spannung unabhängig ist, jedenfalls für gängige Materialien und bei konstanter Temperatur. Deswegen ist es sinnvoll, gewissen Bauteilen ihren elektrischen Widerstand, gemessen in Ohm (Ω) gleich Volt durch Ampere, zuzuschreiben, als Zahl oder als Farbkodierung aufzudrucken und sie schlicht »Widerstand« zu nennen. Schaltet man zwei Widerstände – die Bauteile – hintereinander, so addieren sich ihre Widerstände – die Messgrößen –, weil sich die an beiden anliegenden Spannungen addieren. Schaltet man sie parallel, so addieren sich die Stromstärken und daher auch die Kehrwerte der Widerstände (die so genannten Leitwerte).

Bei den sieben Birnchen liegt nun der Trick darin, dass sie nicht gleich heiß werden. In reinen Metallen, also auch im Heizdraht von Glühbirnen, steigt der Widerstand mit der Temperatur. Bei Zimmertemperatur haben die vier Birn-

chen links unten zusammen den gleichen Widerstand wie jede der drei anderen einzeln, und *A* und *B* haben gleiche Bedingungen. Im Betrieb aber bekommt jedes der vier Birnchen weniger als die halbe Spannung der anderen, bleibt also ziemlich kalt, und *B* bekommt eine höhere Spannung als *A*.

Noch ein Rätsel: Wenn man drei Widerstände zu je 150Ω in Reihe schaltet, bekommt man die Summe, also 450Ω . Hier hat aber jemand noch zwei Überbrückungen eingelötet. Lesen Sie bitte erst weiter, wenn Sie ernsthaft eine Lösung gesucht oder gefunden haben!



Es wird sehr einfach, wenn man fragt, welche Knoten auf gemeinsamen Potenzialen (Spannungsniveaus) sitzen (der Widerstand der Drähte wird zu null vernachlässigt). Man findet dann, dass die Widerstände einfach parallel zueinander geschaltet sind und daher gemeinsam nur 50Ω haben.

In seiner Kolumne »Mathematical Games« vom Dezember 1958 im Scientific American, die eigentlich die platonischen Körper zum Thema hatte, stellte Martin Gardner folgende Frage: Zwölf gleiche Widerstände, sagen wir zu je 1Ω , sind wie die Kanten eines Würfels zusammengelötet. Wie groß ist der Widerstand zwischen zwei gegenüberliegenden Ecken? Das Problem habe viele Fachleute zu längeren Rechnungen veranlasst.

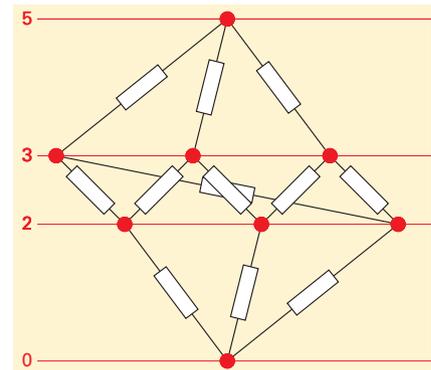
Wie bestimmt man den Widerstand eines großen Netzes aus Widerständen? Häufig kann man zwei hintereinander oder parallel geschaltete Widerstände zu einem Ersatzwiderstand zusammenfassen und mit der so vereinfachten Schaltung weiterarbeiten.

Mitunter kommt man durch Symmetrieüberlegungen sehr elegant zum Ziel. Bei Gardners Widerstandswürfel besteht der entscheidende Pfiff – den er

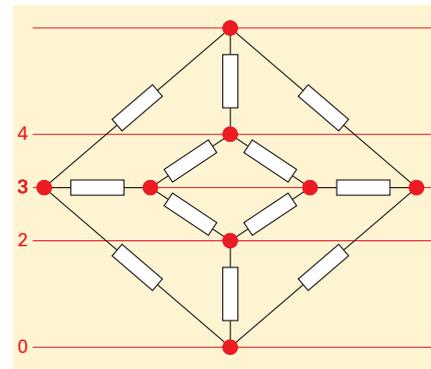
im Januar 1959 mitteilte – in der Erkenntnis, dass die drei Ecken, die einer der beiden gewählten Ecken benachbart sind, gleichermaßen verbunden sind: Vertauscht man zwei dieser Ecken, so ändert sich an der Verbindungsstruktur – der »Topologie« – des Netzes gar nichts. Daher müssen sie auf gleichem Potenzial sein. Man kann also alle drei ohne weitere Konsequenzen zusammenlöten und bekommt eine Reihenschaltung von $(1/3 + 1/6 + 1/3) \Omega = 5/6 \Omega$.

Im Folgenden wollen wir stets $1 \text{ k}\Omega$ statt 1Ω nehmen; wir haben dann weniger Probleme mit der Aufheizung und mit den Widerständen der Zuleitungen.

In diesem Bild ist der Würfel so verzerrt, dass die Ecken mit ihren *y*-Koordinaten auf einer vertikalen Potenzialskala sitzen. Die *x*-Koordinaten erscheinen zunächst sehr willkürlich.



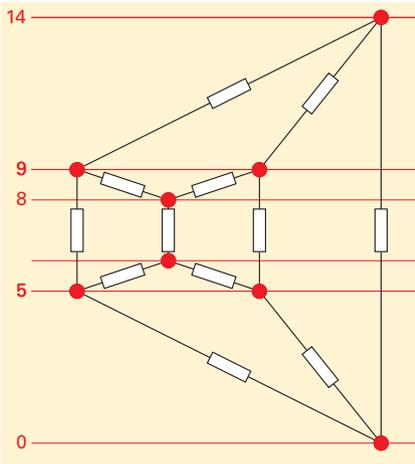
Übersichtlicher ist es, wenn wir die Spannung an zweitnächste Ecken anschließen:



Es fließen bei 6 Volt offenbar 8 mA.

Am wenigsten offenkundig ist der Widerstand zwischen benachbarten Ecken. Er ist deutlich kleiner als $1 \text{ k}\Omega$, weil die anderen 11 Kanten einen Nebenschluss vergleichbarer Größe bilden. Durch Zeichnen des Würfels mit geeigneter Verzerrung, Beachtung von »gleich-

▷ wertigen« Ecken und schrittweises Zusammenfassen von parallel- und reihengeschalteten Gruppen bekommt man $7/12 \text{ k}\Omega$, und zwar so, dass bei der Gesamtspannung von 14 Volt jeder Einzelwiderstandskörper ganzzahlige Werte für Spannung in Volt und Stromstärke in mA hat:



Für den Würfel gibt es also drei Abgreifmöglichkeiten, für das Oktaeder (das ebenfalls 12 Kanten hat) insgesamt nur zwei, und für das Tetraeder nur eine einzige, und zwar mit $0,5 \text{ k}\Omega$.

Was machen wir bei Widerstandsnetzen, die komplizierter oder aus verschiedenen Widerständen aufgebaut sind? Man kann ein (lineares) Gleichungssystem aufstellen und lösen. Die Unbekannten sind die Potentiale in den Knotenpunkten; nur die Potentiale der Punkte, an die man die Spannung anlegt, sind vorgegeben. Die Gleichungen gewinnt man aus dem Kirchhoffschen Gesetz: Die – mit den richtigen Vorzeichen gerechnete – Summe der auf einen Knotenpunkt zufließenden Ströme ist gleich null.

Eine iterative Lösungsmethode ahmt die Natur nach: Für jeden Knoten wird zunächst ein beliebiges Potenzial, etwa mit dem Zufallsgenerator, als Startwert vorgegeben. Dann beginnt eine Wiederholungsschleife, in der zunächst für jede Leitung die anliegende Potentialdifferenz und daraus mit dem Widerstand die Stromstärke berechnet wird.

Man kann sich nun vorstellen, die Knoten wären winzige Kondensatorplatten, deren Potenzial umso höher ist, je mehr Ladung ihnen zufließt. Entsprechend werden die Potentiale der beiden Endknoten einer Leitung proportional der Stärke des durchfließenden Stroms leicht verändert. Diese Veränderung wird

aber nicht sofort wirksam; vielmehr werden mit den bisherigen Potenzialen die Stromstärken durch alle Leitungen berechnet und dann alle Korrekturen gesammelt auf die Potentiale angewandt. Die beiden an die Spannungsquelle angeschlossenen Knoten werden auf ihre festen Werte zurückgesetzt; dann durchläuft das Programm die Schleife aufs Neue.

Nach einigen zehntausend Durchläufen in wenigen Sekunden stellen sich sehr genau stabile Potentiale ein, und in jedem Knoten ist – nun erst, wie auch in der Natur nach dem ähnlich verlaufenden Einschleichen – das Kirchhoffsche Fließgleichgewicht erreicht, also die Knotenregel erfüllt. Die Numeriker kennen diese Methode als das Jacobi'sche Iterationsverfahren für lineare Gleichungssysteme.

Wenn alle Widerstände gleich $1 \text{ k}\Omega$ sind, dann sind die Koeffizienten des Gleichungssystems sämtlich – ziemlich kleine – ganze Zahlen, und ihre Lösungen bei einer angelegten Spannung von 1 Volt rationale Zahlen mit nicht allzu großem Nenner. Indem man die Spannung mit diesem – durch Probieren oder Berechnen gefundenen – Nenner multipliziert, ergeben sich für alle Potentiale in den Knoten ganzzahlige Werte.

Rechtecke aus Blech

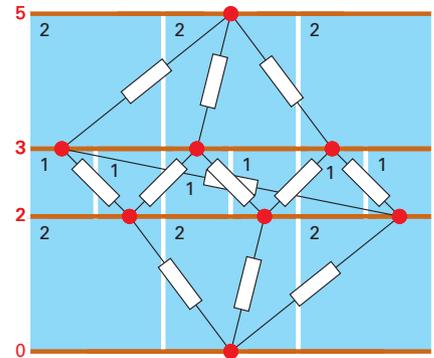
Wir nehmen in Gedanken Blech von gleichmäßiger, geringer Dicke und nicht zu geringem spezifischem Widerstand, und außerdem »idealen« Kupferdraht, dessen Widerstand wir uns verschwindend klein denken. Zuerst löten wir solchen Draht auf zwei gegenüberliegende Kanten eines Rechtecks aus dem Blech und fragen nach dem Widerstand zwischen ihnen. Er ist proportional zur Länge des Rechtecks und zum Kehrwert der Breite, also zum Abstand zwischen den Kupferdrähten und zum Kehrwert ihrer Länge. Wir denken uns die Dicke und das Material des Bleches so, dass für ein quadratisches Stück – beliebiger Größe! – gerade $1 \text{ k}\Omega$ herauskommt.

Jetzt nehmen wir ein großes Blechrechteck mit den Drähten oben und unten und schließen eine Spannung an. Die Stromdichte ist im Blech homogen und das Potenzial proportional zur vertikalen Koordinate. Daran ändert sich auch nichts, wenn wir vertikale Schlitze in das Blech schneiden oder waagerechte, ideal leitende Drahtstücke auflöten. Wir können nun auch einzelne rechteckige Stücke zwischen solchen Schlitzen

und Drahtbrücken durch ganz gewöhnliche Widerstandskörper ersetzen, deren Werte den Seitenverhältnissen dieser Rechtecke entsprechen. Eine derartige Zerlegung eines Rechtecks entspricht also genau einem Widerstandsnetzwerk ohne Überkreuzungen.

Diesen Zusammenhang zwischen Flächenzerlegung und Gleichstromtechnik haben erstmalig um 1936 William T. Tutte und seine Kollegen C. A. B. Smith, H. Stone und R. L. Brooks am Trinity College in Cambridge bemerkt. Damit fanden sie eine Verknüpfung zwischen zwei ganz verschiedenen Gebieten der Unterhaltungsmathematik: der Zerlegung von Rechtecken und speziell von Quadraten in Quadrate einerseits und der Berechnung von Netzen aus lauter gleichen Widerständen – zum Beispiel in Form von Polyederskeletten – andererseits. Martin Gardner berichtet darüber im November 1958 in einem Beitrag nur über dieses Thema, also einen Monat vor dem Stellen der erwähnten Würfelaufgabe (siehe auch »Die Quadratur des Quadrates« von Ian Stewart, Spektrum der Wissenschaft 4/1998, S. 10).

Für den Würfel sieht die zu der ersten Abgreifmöglichkeit gehörige Zerlegung der Rechtecke in Quadrate mitsamt dem eingblendeten Netzwerk so aus:



Die kupferroten Balken an den Rändern der Quadrate stellen die »unendlich guten« Kontaktdrähte und die weißen die isolierenden Schlitze dar, natürlich viel zu dick gemalt. Die Zahlen in den Ecken sind die Quadratseiten und daher zugleich Spannungen in Volt und Stromstärken in mA (wenn wir bei $1 \text{ k}\Omega$ für jedes einzelne Quadrat bleiben).

Den Würfelgraphen kann man plätten (also kreuzungsfrei in der Ebene darstellen), indem man eine Masche so groß darstellt, dass alle anderen durch sie gesehen werden und hineinpassen; die Innenfläche dieser Masche kann man sich

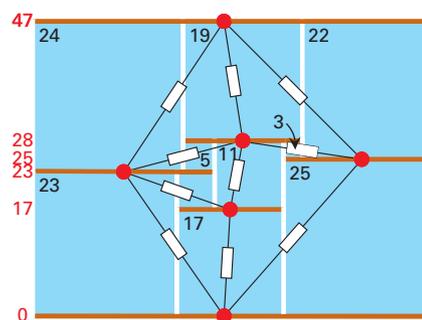
nach außen in den Rest der unendlichen Ebene gewendet denken. Wenn wir aber bestimmte Ecken festlegen, wie es für die Schaltung mit den Gegenecken geschieht, dann sind Überdeckungen von Maschen nicht zu vermeiden. Immerhin können wir uns das Netz auf einem Zylindermantel denken, dessen Achse die Potenzi­alskala bildet. Auch das Puzzle der Quadrate muss dann notfalls auf dem (endlich langen) Zylindermantel stattfinden.

Die Quadratur des Quadrats

Ein Quadrat in lauter gleiche Quadrate zerlegen wie beim Schachbrett kann jeder. Es ist auch noch nicht besonders schwer, ein Quadrat in – verschieden breite – Streifen zu schneiden und aus jedem Streifen eine Reihe gleicher Quadrate zu machen. Interessanter sind Zerlegungen eines Rechtecks – noch schöner: eines Quadrats – in lauter verschiedene Quadrate.

Leider führt ausgerechnet die Symmetrie eines Netzwerks, die uns seine Analyse erleichterte, zu vielen gleichen Quadraten. Um weniger langweilige Zerlegungen zu erhalten, muss man die Symmetrie zerstören, etwa indem man aus dem – hoch symmetrischen – Kantenskelett eines platonischen Körpers diese oder jene Kante herausnimmt.

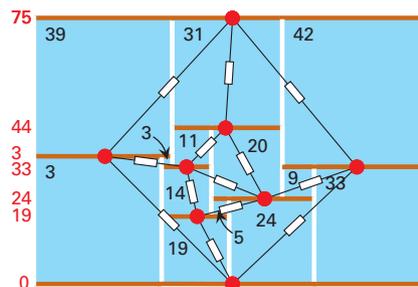
Wenn man an zwei benachbarten Ecken eines Oktaeders eine Spannung anlegt, findet man im ganzen Netzwerk nur fünf verschiedene Werte für Teilspannungen und Stromstärken. Diese Anzahl ändert sich nicht, wenn man die direkte Verbindung der benachbarten Ecken weglässt. Nimmt man aber noch eine weitere Kante weg, so wird das Bild wesentlich unregelmäßiger:



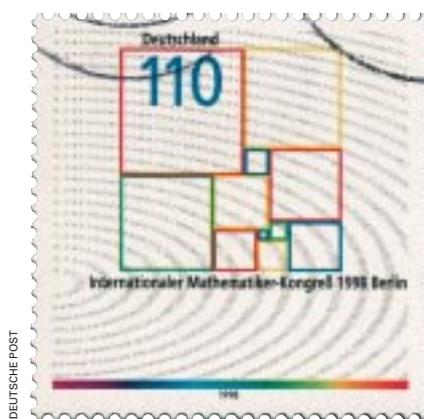
Wir haben eine Zerlegung eines Rechtecks der Größe 47 mal 65 in zehn verschiedene Quadrate gefunden. Aus Wellpappe oder besser aus Moosgummi exakt ausgeschnitten, ergeben sie ein (ziemlich leichtes) Puzzle.

Man kann es auch um 90 Grad drehen. Das zugehörige Stromnetz hat sieben Potenzialstufen und ebenfalls 10 Widerstände. Betreibt man es mit 65 Volt, so fließen zwischen den Enden 47 mA und durch jeden einzelnen Widerstand (nach wie vor von je 1 kΩ) ganzzahlige Ströme (in Milliampere).

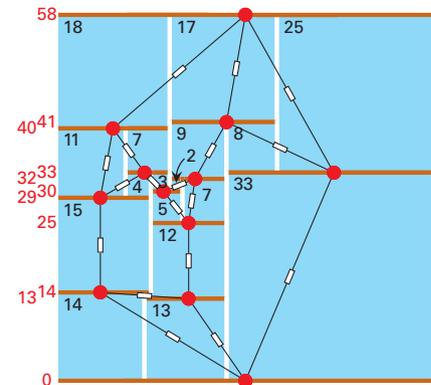
Immerhin gibt es nur sechs verschiedene Zerlegungen eines Rechtecks in genau zehn verschiedene Quadrate. Für weniger Quadrate gibt es – abgesehen vom trivialen 1·1-Rechteck – nur zwei Lösungen: 1925 fand Zbigniew Moron (1904–1971) ein 32·33-Rechteck und später Tutte ein 61·69-Rechteck, jeweils aus 9 verschiedenen Quadraten (siehe den zitierten Beitrag von Ian Stewart). Für die von Brooks gefundene Zerlegung des 112·75-Rechtecks gibt es zwei Möglichkeiten mit den gleichen 13 verschiedenen Quadraten, zu denen zwei verschiedene Widerstandsnetze gehören. Eines von ihnen ist ein Würfelskelett mit einem zusätzlichen (dreizehnten) Widerstand auf einer der Flächendiagonalen, der die Symmetrie offenbar erheblich bricht:



Die Deutsche Post hat 1998 das um 1936 von Stone gefundene in 11 verschiedene Quadrate zerlegte 176·177-Rechteck gezeigt. Wenn man weiß, dass die beiden kleinsten 9 und 16 Einheiten lang sind, kann man die anderen leicht nachrechnen:



Von Natur aus weniger symmetrisch und daher aussichtsreichere Kandidaten sind die archimedischen (halbbregelmäßigen) Körper. Der Tetraederstumpf, an zweitnächsten Ecken unter Spannung gesetzt, ergibt folgendes Bild:



Ist es nicht irgendwie schade, dass die Sieben zweimal darin auftaucht?

Mit einer Erweiterung meines Computerprogramms kann ich nicht nur Widerstandsnetze, sondern daraus halbautomatisch auch Zerlegungen eines Rechtecks in relativ wenige Quadrate erzeugen. Ich finde das mindestens so spannend wie Sudoku.

Die wirklich hohe Kunst ist, ein Quadrat in lauter verschiedene Quadrate zu zerlegen. A. J. W. Duijvestijn bewies 1962, dass für eine einfache perfekte Zerlegung, das heißt eine, die kein kleineres Rechteck aus Quadraten enthält, mindestens 21 Quadrate erforderlich sind. Bis er tatsächlich eine Lösung mit genau 21 Quadraten gefunden und deren Eindeutigkeit bewiesen hatte, vergingen weitere 16 Jahre. ◀



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

The five platonic solids / Squaring the square. Von Martin Gardner in: The second Scientific American book of mathematical puzzles and diversions, Kapitel 1 bzw. 17. University of Chicago Press, 1987

Weblinks zu diesem Thema sowie weitere Rechteckszerlegungen zu Kantenskeletten platonischer Körper finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Von der Schönheit der Naturgesetze

Was macht die ästhetische Qualität einer Gleichung, einer Herleitung oder eines Beweises aus?

Von Henning Genz

Ein Gesicht, ein Sonnenuntergang, ein Kunstwerk erregen unsere spontane Begeisterung. »Das ist schön« ist unsere unmittelbare Empfindung, und dass der Kunstsachverständige den Gegenstand zerpfückt, um Merkmale von Schönheit in ihm auszumachen, erscheint uns entbehrlich.

Einem solchen Schönheitsverständnis muss es hoffnungslos abwegig erscheinen, wenn ein Naturwissenschaftler ein Experiment, eine lo-

gische Herleitung oder gar eine Gleichung als schön bezeichnet. Was veranlasste Johannes Kepler (1571–1630), sich ob der Schönheit und Einfachheit der von ihm entdeckten Gesetze der Planetenbewegung der »heiligen Raserei« hinzugeben? Wie kam Ludwig Boltzmann (1844–1906) dazu, seine ästhetische Verzückung über die Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik mit dem Faust-Zitat »War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?« auszudrücken?

Der deutsche Philosoph Georg Wilhelm Hegel (1770–1831) hat in seinen Vorlesungen über Ästhetik eine Definition gegeben, unter der sich auch die Begeisterung des Naturwissenschaftlers wiederfinden kann: Das Schöne sei »das sinnliche Scheinen der Idee«. Je tiefer die Idee, je deutlicher ihre sinnfällige Verwirklichung, desto schöner ist diese Verwirklichung – sei es als Gedicht, Gemälde, Komposition oder eben als Beweis, Theorie oder Experiment, auch wenn Letzteres Hegel nicht in den Sinn gekommen ist: In der langen Liste der Ideen, deren »sinnliches Scheinen« ihm als schön erscheint, kommen physikalische Experimente und Theorien, für ihn selbstverständlich, nicht vor.

Unsere naive Vorstellung von Schönheit hält dem genaueren Nachdenken ohnehin nicht lange stand. Schönheit ist nicht eine Eigenschaft, die schönen Dingen innewohnt; sie liegt »im Auge des Betrachters«. Und selbst diese viel zitierte Redensart ist noch eine Verkürzung. Die so spontan anmutende Empfindung von Schönheit erfordert Vorwissen. Ohne verinnerlichte, gar unbewusste Kenner-schaft kann sie sich nicht einstellen. Demjenigen, der kaum je mit Gleichungen umgeht, ist schwerlich glaubhaft zu machen, dass Physiker gewisse Gleichungen – unter emotionaler Anteilnahme! – als schön empfinden.

Vielleicht sind die unterschiedlichen Auffassungen über die Schönheit gewisser Dinge,

»Inneres Schauen – rosiges Licht« von Alexej von Jawlenski, 1926

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



die wir als Geschmacksunterschiede einzu-
stufen und nicht weiter zu hinterfragen ge-
wohnt sind, wesentlich auf Unterschiede in
dieser unbewussten Kennerschaft zurückzu-
führen. Für mich sind die späten, Meditati-
onen genannten Darstellungen menschlicher
Anlitze des deutsch-russischen Malers Alexej
von Jawlenski (1864–1941) ungeheuer schön
(Bild links unten). Andere Betrachter langwei-
len die paar Pinselstriche dieser Bilder. Umge-
kehrt kann ich mit den Environments des
deutschen Künstlers Joseph Beuys (1921–
1986) nichts anfangen. Die – sehr zahlrei-
chen – Kunstkenner, die sie als schön bewer-
ten, besitzen offenbar eine verinnerlichte Ken-
nerschaft, die mir fehlt.

Die magische Kraft der Allgemeinen Relativitätstheorie

Eine Kennerschaft, die ich zu besitzen glaube,
gilt der Schönheit der Naturgesetze. Diese
Empfindung stellt sich vor allem dann ein,
wenn mathematisch formulierte Naturgesetze
aus einsichtigen Prinzipien hergeleitet werden,
die zu ihrer eigenen Formulierung der Mathe-
matik nicht bedürfen. Diese Naturgesetze wie-
derum vermitteln zwischen den Prinzipien und
den aus ihnen folgenden Phänomenen.

Ein eindrucksvolles Beispiel für ein sol-
ches Prinzip ist das, was Albert Einstein selbst
als seinen »glücklichsten Gedanken« bezeich-
net hat: Ein in einem Schwerfeld frei fal-
lender, also sich beschleunigt bewegender Be-
obachter spürt weder das Schwerfeld noch
seine Beschleunigung. Gilt das Prinzip, kann
er durch kein Experiment mit irgendwelchen
mitgeführten Apparaten ohne »Blick aus dem
Fenster« feststellen, ob er sich wie beschrieben

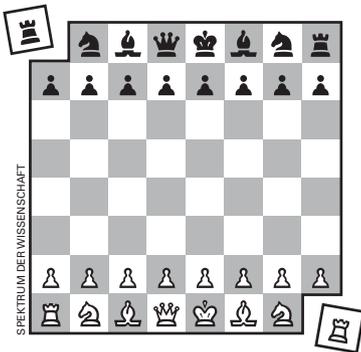
bewegt oder in einem schwerkraftfreien Raum
ruht. Filme von Astronauten, vor denen ihre
Zahnbürsten schweben, bieten dafür eine
sinnfällige Veranschaulichung. Zusammen
mit einigen weiteren, unproblematischen An-
nahmen folgt aus diesem Prinzip die gesamte
Allgemeine Relativitätstheorie. Es ist die
Zwangsläufigkeit, die vom Prinzip zur endgül-
tigen Theorie führt, die Kenner von der su-
perben Schönheit der Allgemeinen Relativi-
tätstheorie sprechen lässt.

Verwurzelt ist Einsteins glücklichster Ge-
danke in seinem umfassenderen Prinzip, dass
die Wirkungen von Schwerkraft und Beschleu-
nigung in kleinen Raum- und Zeitbereichen
nicht unterschieden werden können. Also –
und dies ist eine besonders schöne direkte Kon-
sequenz des Prinzips – muss Licht in Schwere-
feldern wie dem der Sonne abgelenkt werden.
Denn für beschleunigte Beobachter verfolgt
Licht offenbar eine krumme Bahn. Also muss
es das, damit die Ununterscheidbarkeit ge-
wahrt bleibt, auch in Schwerfeldern tun. Aus
nichts als dem abstrakten Ununterscheidbar-
keitsprinzip folgt ein experimentell überprüf-
bares Naturgesetz – das ist wunderschön!

Wenn darüber hinaus auch die Prinzipien
in eine mathematische Form gegossen werden,
kommt etwas hinzu, das den mathematischen
Naturgesetzen ihre geradezu magische Kraft
verleiht. Dieses Etwas ist, wie Einstein zu be-
tonen nicht müde wurde, vor allem »Einfach-
heit«. Staunenswert ist, dass in der Natur ein-
sichtige Prinzipien herrschen; staunenswert ist
aber auch, dass sie in einer so einfachen ma-
thematischen Form ausdrückbar sind.

Wenn umgekehrt ein Prinzip einsichtig
ist, nötigt das die Natur noch keineswegs, ▷

▲ Das Gesetz, unter dem
Schneekristalle entste-
hen, erzwingt die sechszählige
Symmetrie, lässt ihnen aber
Freiheit in den Einzelheiten ih-
rer Gestalt – zwei Bedingungen
für Schönheit.



▲ Kann man die 62 Felder des verstümmelten Schachbretts mit 31 Dominosteinen lückenlos bedecken?

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Foucault'sches Pendel im Panthéon in Paris (zeitgenössischer Stich)

▷ ihm zu folgen. Kein Naturgesetz, das den Namen verdient, bezieht seine Gültigkeit aus schierer logischer Notwendigkeit; Ableitungen »a priori« von Aussagen mit empirischem Gehalt kann es nicht geben.

Beweise aus dem Buch

Nehmen wir das Prinzip, dass die Naturgesetze spiegelsymmetrisch sind. Als schöne Konsequenz daraus muss das Spiegelbild eines jeden physikalischen Prozesses in der Wirklichkeit auftreten können. Schöner noch ist der experimentelle Beweis, dass das tatsächlich nicht so ist, die Naturgesetze also nicht spiegelsymmetrisch sind. Wo das Prinzip nicht schön sein kann, weil es falsch ist, hat immerhin seine Widerlegung ästhetische Qualitäten.

Schönheit als Qualität von Herleitungen tritt deutlich in der Mathematik hervor, deutlicher noch in ihrer Karikatur, der Denksportaufgabe. Ein klassisches Beispiel: Ein Schachbrett sei dadurch verstümmelt, dass die beiden einander diagonal gegenüberliegenden Eckfelder, die bei den Schachspielern a8 und h1 heißen, entfernt wurden (Bild links oben). Zusammengefügt bilden diese beiden Felder einen Dominostein. Ist es möglich, mit Dominosteinen dieser Art aus jeweils zwei Feldern das verstümmelte Schachbrett lückenlos zu überdecken?

Offensichtlich kann man diese Frage beantworten, indem man (mit dem Computer) sämtliche Möglichkeiten, Dominosteine auf dem verstümmelten Schachbrett auszulegen, durchprobiert. Nicht offensichtlich, aber einfach, präzise und deshalb schön ist der folgende Lösungsweg: Man bemerke, dass die beiden herausgelösten Felder dieselbe Farbe haben; Weiß bei unserem Beispiel. Unverstümmelt besaß das Schachbrett gleich viele weiße wie schwarze Felder; verstümmelt besitzt es also mehr schwarze als weiße. Weil nun aber offenbar jeder Dominostein gleich viele schwarze wie weiße Felder überdeckt – nämlich je eines –, können Dominosteine das verstümmelte Schachbrett nicht lückenlos und ohne Überlappung überdecken, was zu beweisen war.

Zu einem bereits bewiesenen Satz einen noch schöneren Beweis zu finden gilt den Mathematikern alleweil der Mühe wert. Es ist mehr als eine nette Anekdote, dass der legendäre Zahlentheoretiker Paul Erdős (1913–1996) einen besonders gelungenen Beweis mit der Bemerkung »Der ist aus dem Buch!« zu preisen pflegte – jenem Buch, in dem Gott in seiner Allwissenheit zu jedem mathematischen Satz den unübertrefflich schönsten, vollkommensten Beweis notiert habe. Inzwischen gibt es unter dem Titel »Proofs from the Book«

(deutsch »Das Buch der Beweise«) sogar eine irdische Näherung an das göttliche Buch.

Leider ist es nach allem Anschein so, dass in der Geschichte der Mathematik alle überhaupt möglichen schönen Antworten auf schöne Fragen bereits gegeben worden sind. Eine schöne Frage ist, ob es unendlich viele Primzahlen gibt, und die bejahende Antwort, deren schöner Beweis auf einen Bierdeckel passt, hat bereits Euklid vor 2300 Jahren gegeben.

Schön wegen ihrer Einfachheit sind auch zwei Vermutungen der Mathematik, die unter den Bezeichnungen »Vierfarbenproblem« und »Fermats letzter Satz« viel Aufmerksamkeit gefunden haben. Sie wurden inzwischen bewiesen und damit von Vermutungen zu Theoremen befördert. Aber die Beweise mag wohl niemand als schön bezeichnen. Hätte Pierre de Fermat (1601–1665) Recht gehabt mit seiner berühmt gewordenen Randbemerkung, er habe für seinen Satz einen wahrhaft wunderbaren Beweis gefunden, der nur nicht ganz auf diese Randspalte passe, das wäre ein wahrhaft schöner Beweis gewesen! Aber der Beweis des Vierfarbensatzes beruht auf einem Computerprogramm, das mehrere hundert Seiten Output produzieren würde, wenn jemand sie ausdrucken wollte; der Beweis der Fermatschen Vermutung ist ebenfalls mehrere hundert Seiten lang und keinem zugänglich, der diesem besonderen Zweig der Mathematik nicht sein Leben gewidmet hat.

Eine weitere schöne Vermutung wird ebenfalls aller Voraussicht nach keinen schönen Beweis finden: die Goldbach'sche Vermutung, dass jede gerade Zahl oberhalb von zwei die Summe zweier Primzahlen ist. Probieren wir es aus: $4=2+2$, $6=3+3$, $8=3+5$, $10=3+7=5+5$, $12=5+7$, $14=3+11=7+7$...; experimentierfreudige Mathematiker haben ihre Computer bis $2 \cdot 10^{17}$ laufen lassen und kein Gegenbeispiel gefunden. Stimmt also die Goldbach'sche Vermutung? Niemand weiß es – aber verdient nicht bereits die Beobachtung die Qualifikation schön? Und würde nicht deren Schönheit bis zur Schmerzgrenze gesteigert, wenn gezeigt werden könnte, dass die Goldbach'sche Vermutung weder bewiesen noch widerlegt werden kann? So, dass wir gewiss wären, niemals ein Gegenbeispiel zu finden, wenn zugleich auch unbeweisbar wäre, dass keins existiert? Wer dies auf sich wirken lässt, muss ein Gefühl der Schönheit, ja Erhabenheit der Logik empfinden, welches jedes andere derartige Gefühl weit hinter sich lässt.

In einer Umfrage, die im Mai 2002 in der Zeitschrift »Physics World« veröffentlicht wurde, fragte der Philosophieprofessor Robert P. Crease die Leser, welches Physikexperiment sie für das schönste hielten. Die zehn meistge-

nannten Experimente unter mehr als zweihundert hat Crease in seinem Buch »The Prism and the Pendulum« beschrieben, interpretiert und mit Zwischenkapiteln (»Interludes«) versehen, die sich lesenswert mit der Anwendbarkeit des Begriffs des Schönen auf Experimente auseinandersetzen.

Anstelle einer Übersetzung dieses Buchs, die ich mir gewünscht hätte, ist unter dem Titel »Die Top Ten der schönsten physikalischen Experimente« eine Beschreibung eben dieser Experimente durch Einzeldarstellungen von Spezialisten erschienen; das Original wird nicht einmal erwähnt. Immerhin hat einer der Herausgeber, Claus Jönsson, den Spitzenreiter der Liste, das Zweilochexperiment der Quantenmechanik mit Elektronen, in seiner Doktorarbeit 1959 bei Gottfried Möllenstedt in Tübingen als Erster durchgeführt.

In den Augen Creases ist ein Experiment schön, wenn es erstens das Denken verändern kann, zweitens ökonomisch – will sagen, frei von Firlefanz – ist und drittens etwas über die Natur zeigt, das unserer Kontrolle nicht unterliegt; »deep play« nennt er das. Ablenkender, wenn auch publikumswirksamer Firlefanz ist, dass Otto von Guericke (1602–1680), der deutsche Erfinder der Vakuumpumpe, in seinem berühmten Experiment mit den Magdeburger Halbkugeln Pferde an beiden ziehen lässt, statt die eine Halbkugel festzubinden und nur an der anderen Pferde ziehen zu lassen, was, wie er wusste, auf dieselbe Zugkraft hinausgelaufen wäre.

Unvermeidlicher Firlefanz

Ich will mich auf ein einfach zu schilderndes, uneingeschränkt schönes Beispiel aus den beiden Büchern beschränken: den Pendelversuch, durch den 1851 Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868) sinnfällig gemacht hat, dass die Erde sich einmal am Tag um 360 Grad dreht. Es ist Firlefanz, wenn auch unumgänglicher, dass Foucault das Pendel nicht – zum Beispiel – am Nordpol schwingen ließ, sondern im Panthéon in Paris. Unter einem Pendel am Nordpol dreht sich offenbar die Erde, während es selbst seine Schwingungsebene beibehält. Für einen Beobachter, der sich mit der Erde dreht, rotiert also die Schwingungsebene des Pendels: einmal ganz herum in zwölf Stunden, wie man sich leicht überlegen kann. Weil nun aber die Erde das Panthéon auf einem Breitenkreis mit sich führt, ist die Analyse des tatsächlichen Effekts nicht ganz so einfach. Doch auch so ist das Experiment geeignet, irriges Denken zu verändern, und hat vor allem Teil am *deep play*. Crease hat es so formuliert: »Lautlos und von uns unbeeinflusst schwingt das Foucault'sche Pendel in feierlicher Majes-

tät. Wie es das tut, legt Zeugnis ab von einer Realität, die mit unserer auf Erfahrung beruhenden Intuition unvereinbar ist.«

Was bedeutet es umgekehrt für die Schönheit, dass sie Experimenten zukommen kann? Crease beruft sich auf die antiken griechischen Philosophen. Ihnen, insbesondere Platon, galt alles als schön, was um seiner selbst willen sehenswert ist – seien es Kunstwerke, Gesetze, Institutionen, Seelen oder Handlungen. Dieser Liste fügt Crease exemplarisch erkundete Naturphänomene hinzu.

Für die theoretische statt der experimentellen Seite der Physik leistet Ähnliches das Buch »It Must Be Beautiful«. Von den hier versammelten Essays verschiedener Autoren sind etwa sieben der Schönheit von Naturgesetzen gewidmet. Zwei dieser Autoren, Steven Weinberg und Frank Wilczek, sind Träger des Nobelpreises für Physik.

Die Symmetrien und das strukturelle Erklärungspotenzial einer Gleichung sind dasselbe. Dass eine Gleichung eine gewisse Symmetrie besitzt, bedeutet genauer, dass ihre Variablen einer Transformation unterworfen werden können, welche die Gleichung nicht ändert: Für die durch die Transformation eingeführten neuen Variablen gilt dieselbe Gleichung wie für die ursprünglichen. Ein simples Beispiel: Gilt für die Variable x die Gleichung $x^2 = 1$, dann gilt dieselbe Gleichung $y^2 = 1$ für die durch die Transformation $y = -x$ neu eingeführte Variable y . Je mehr Transformationen ihrer Variablen eine Gleichung auf Grund ihrer Struktur unverändert übersteht, desto mehr – durch diese verschiedenen Variablen beschriebene – Sachverhalte kann sie erklären.

Schönheit? Gewiss für den Naturwissenschaftler, der mit seinen Gleichungen so umgeht wie ein Kristallograf mit Schneekristallen. Deren sinnlich erfahrbare Schönheit beruht darauf, dass sie um 60 Grad um ihre Mittelachse gedreht werden können, ohne dadurch geändert zu werden. Spiegelsymmetrie an sechs Ebenen kommt hinzu. Dabei legt die Symmetrie von Schneekristallen ihre Form im Einzelfall nicht fest; sowohl frei als auch symmetrisch ist das Gesetz, unter dem ihre Existenz steht. So auch die fundamentalsten, gegenwärtig bekanntesten Naturgesetze – sie sind schön vermöge ihrer Symmetrien und des Spielraums, den diese erlauben.

Die Schönheit symmetrischer Gleichungen besteht auch darin, dass sie gegen Bedeutungswandel der Größen, für die sie gelten, immun sind. Wilczek und Weinberg führen hierfür Beispiele an. Es ist ihre Allgemeinheit, die die Schönheit symmetrischer Gleichungen ausmacht: das schillernde Scheinen immer derselben Idee der Symmetrie. ◀



Henning Genz ist pensionierter Professor für theoretische Physik an der Universität Karlsruhe. Sein Arbeitsgebiet ist die Theorie der Elementarteilchen.

Die Top Ten der schönsten physikalischen Experimente. Von Amand Fäßler und Claus Jönsson (Hg.). Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2005

Das Buch der Beweise. Von Martin Aigner und Günter Ziegler. Springer, Berlin 2003

The Prism and the Pendulum: the ten most beautiful experiments in science. Von Robert P. Crease. Random House, New York 2003

It Must Be Beautiful: Great Equations of Modern Science. Von Graham Farmelo (Hg.). Granta Books, London 2002



Das Beste von Hubble

Vom Sonnensystem bis zu fernen Galaxien: Kein anderes Gerät gibt der Astronomie so wichtige Impulse wie das Weltraumteleskop Hubble. Grund für einen Rückblick auf seine bislang spektakulärsten Beobachtungen

ESA

WEITERE THEMEN IM SEPTEMBER

Ein Jesuit in China

Um im 16. Jahrhundert in China für das Christentum zu missionieren, versuchte der Jesuit Matteo Ricci der dortigen Elite westliche Wissenschaft nahe zu bringen – eine Strategie, die scheiterte



TINA WEST

Begründete Hoffnung auf Alzheimer-Therapie

Zum ersten Mal sind Behandlungen in Sicht, die der bisher unaufhaltenden Demenzkrankheit Einhalt gebieten könnten. Verschiedene dieser Ansätze werden bereits an Patienten getestet

Der größte Teilchenbeschleuniger der Welt

Ab Herbst 2007 soll der Large Hadron Collider Kernteilchen durch einen 27 Kilometer langen Kreistunnel aufeinander schießen. Physiker erhoffen sich davon spektakuläre Entdeckungen



CERN



DUSAN PETRICIC

Grenzen der Gewissheit

Nicht alles, was wahr ist, können Mathematiker auch beweisen – und zwar grundsätzlich nicht