

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

- ▶ Hybridfahrzeuge auf der Überholspur
- ▶ Mutterschaft ist gut für das Gehirn
- ▶ ESSAY: Wie stümperhaft Forscher programmieren

www.spektrum.de

Die Quark-Ursuppe

In Teilchenbeschleunigern simulieren Physiker den Zustand des Kosmos kurz nach dem Urknall

MEDIZIN

Neue Angriffspunkte für Wirkstoffe

PARTNERWAHL

Was macht Menschen attraktiv?

RAUMFAHRT

Wie gefährlich ist ein Marsflug?

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,-€





Reinhard Breuer
Chefredakteur

Online-Talk und -Notizen

Liebe Spektrum-Leser,

sind Sie in letzter Zeit einmal auf unserer Homepage www.spektrum.de gewesen? Nicht nur haben wir unseren Online-Auftritt runderneuert. Auch tut sich inzwischen mehr auf unserer Seite!

So schreiben wir seit Kurzem unsere »Spektrum Notizen« und senden unter »Spektrum Talk« kurze Hörbeiträge, im neudeutschen Online-Sprech auch Blogs und Podcasts genannt. Warum? Ich glaube, diese Möglichkeiten des Internets geben uns die Gelegenheit, mit Ihnen direkter in Kontakt zu treten – mehr von Ihnen zu hören und Ihnen mehr zu sagen, als was monatlich im Heft steht.

Fast täglich gibt es Nachrichten, die in der Redaktion zu Diskussionen führen. Natürlich überlegen wir dabei jedes Mal, was davon »ins Heft« kommen könnte. Doch da diese Themen auch noch in sechs oder acht Wochen aktuell sein sollten, wenn die nächste Ausgabe erscheint, scheidet das Meiste aus. Wir wollen die neuen Online-Möglichkeiten nutzen, ohne dass unsere Website jedoch zum Quasselzoo wird. Es geht um Wissenschaft: was sie bewirkt, was sie verändert, wo sie hilft, wo sie missbraucht oder missverstanden wird. Wir besuchen wissenschaftliche Tagungen, sprechen mit Forschern, hören Vorträge, stoßen auf merkwürdige Publikationen. Und häufig ist die Reaktion der Medien selbst Anlass, sich aufzuregen, sodass wir uns gedrängt sehen, Dinge zu rechtzurücken. All das soll auch keine Einbahnstraße sein: Ihre Leserbriefe zu bestimmten Themen werden wir, so Sie einverstanden sind, auch online stellen, ebenso wie Kommentare zu unseren Eindrücken und Einsichten. Machen Sie mit!

Jagen in der Eiszeit darf man sich sicher als ein mühsames Unterfangen vorstellen. Gleichwohl hat mich überrascht, welche ausgefeilten Waffen den Jägern der Altsteinzeit vor mehr als elftausend Jahren schon zur Verfügung standen. Am Ende der letzten Eiszeit erbeuteten sie damit hauptsächlich Rentiere, Auerochsen, Mammuts, Wollnashörner und Bisons. Der französische Prähistoriker Jean-Marc Pétillon schildert ab S. 84, wie er diese Jagdgeräte selbst nachgebaut hat. Aber nicht nur tödliche Speerspitzen schnitzten unsere Urahnen. Auch künstlerische Zeugnisse dieser so genannten Magdalénien-Kultur haben sich erhalten – vor allem aus Frankreich, aber auch aus Deutschland: etwa Tierfiguren sowie Frauengestalten wie links im Foto eine 7,1 Zentimeter große Elfenbeinstatue aus Gönnersdorf in Rheinland-Pfalz. Es sind ungewöhnliche, abstrakt-schematische Figuren: ohne Kopf und Füße, häufig auch auf Schieferplatten graviert und dort zu Tanzszenen gruppiert – Bilder einer fernen, fremden Welt.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



VISION 2006

19. Internationale Fachmesse für
industrielle Bildverarbeitung und
Identifikationstechnologien

Messe Stuttgart
7.-9. November 2006

Die Premiumklasse

Qualität ist für Sie ein Muss? Prozessoptimierung eine Herausforderung? Und Wettbewerbsvorteile ein Grund, die Korken knallen zu lassen? Dann feiern Sie mit uns die Weltleitmesse der IBV! Denn hier servieren wir Ihnen das gesamte Spektrum für Ihren hohen Anspruch - auf der VISION 2006.

Mehr unter www.vision-messe.de

SPEKTROGRAMM

- 12 Bewusstseins Spuren im Wachkoma - Riesenplanet mit Untergewicht - Seismischer Knochensensor u. a.
- 15 **Bild des Monats**
Engel aus Rauch

FORSCHUNG AKTUELL

- 16 **Kosmische Kollision lüftet dunkles Geheimnis**
Neuer Beleg für die Dunkle Materie
- 20 **Schmerzhemmer im Rückenmark**
Ein Protein namens Homer könnte gegen chronische Schmerzen helfen
- 22 **Mit der Kraft des Strohs**
Wie aus Bioabfall Benzin wird

THEMEN

- ▶ 28 ANTHROPOLOGIE
Vom Sinn der Schönheit
- ▶ 36 **TITELTHEMA** URKNALL
Quark-Ursuppe im Labor simuliert
- ▶ 46 NEUROBIOLOGIE
Mutterschaft ist gut fürs Hirn
- 54 ROHSTOFFE
Ölpreise, Markt und Demokratie
- ▶ 64 RAUMFAHRT
Existierende Schutzschilde für Raumfahrer taugen wenig
- ▶ 74 PHARMAFORSCHUNG
Ansatzpunkte für neue Arzneimittel
- 84 STEINZEIT
Die geschickten Jäger der Magdalénien-Kultur
- ▶ 94 ALTERNATIVAUTOS
Energie sparende Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch
- ▶ 118 ESSAY
Warum Forscher nicht programmieren können

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

PARTNERWAHL

Zum Verlieben schön

Weltweit halten Menschen dieselben Gesichter für attraktiv – ein evolutionäres Erbe des Wunsches nach dem perfekten Partner



SEITE 46

HIRNFORSCHUNG

Warum Mütter klüger sind

Schon in der Schwangerschaft stellt sich das Gehirn auf die erhöhten Anforderungen der Mutterschaft ein. Bereits die Versorgung von Nachwuchs verbessert manche Hirnleistungen von Säugetierweibchen – und das sogar dauerhaft



SEITE 54

ROHSTOFFE

Ölpreis und Demokratie

Der aktuelle Ölpreis ist nicht wirklich zu hoch – er war nur lange viel zu niedrig, weil fundamentale Marktmechanismen blockiert waren



RAUMFAHRT

SEITE 64

Gesund zum Mars und krank zurück?

Raumfahrer, die das Umfeld der Erde verlassen, werden durch die kosmische Strahlung gefährdet. Damit Astronauten etwa einen Marsflug auch körperlich heil überstehen, entwerfen Forscher neuartige Schutzschilde, die das Gesundheitsrisiko für die Passagiere verringern sollen

KOMMENTAR

- 26 Springers Einwürfe**
Der Autor wundert sich: Der Glaube an Wunder nimmt offenbar zu

WISSENSCHAFT IM ...

- 27 Rückblick:** Erstes transportables Solarradio · Konservieren mit Antibiotika · Zündender Wecker u. a.
- 62 Alltag:** Senkrechtstarter im Computer – die neuen Festplatten

JUNGE WISSENSCHAFT

- 90 Die Bundeswettbewerbe für Umwelt und Informatik**

REZENSIONEN

- 113 Eine unbequeme Wahrheit**, Dokumentarfilm und Buch von Al Gore
Das autobiographische Gedächtnis von Hans J. Markowitsch und Harald Welzer
Der kleine Medicus von Dietrich Grönemeyer

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

- 104 Unser Planetensystem und seine »leeren Stellen«**

WEITERE RUBRIKEN

- 5 Editorial**
10 Leserbrief/Impressum
108 Preisrätsel
122 Vorschau



TITELTHEMA URKNALL

SEITE 36

Die Quark-Ursuppe im Labor

Am Anfang von Raum und Zeit bestand die Welt, so glauben Kosmologen, aus einem Quark-Gluonen-Plasma. Diesen extrem heißen und dichten Zustand der Materie haben sie jetzt mit Teilchenbeschleunigern reproduziert

SEITE 74

PHARMAKA

Neue Zielscheiben für Medikamente

Moleküle auf der Zellmembran bieten bisher ungeahnte Angriffspunkte für Wirkstoffe. Mit ihnen lässt sich eine Vielzahl von Krankheiten bekämpfen



SEITE 84

STEINZEIT

Jagd im Magdalénien

Zum Ende der letzten Eiszeit erschien eine neue Kultur in Mitteleuropa – das Magdalénien. Insbesondere ihre Jagdwaffen begeistern die Prähistoriker. Sie zeigen: Diese Menschen waren bestens an ihre harte Umwelt angepasst

SEITE 94

ALTERNATIVFAHRZEUGE

Hybridautos im Aufschwung

Noch bremst der Dieselmotor die Verkäufe der Energiesparer. Doch jetzt kommt eine neue Generation der Hybriden auf den Markt



TITELBILD



Teilchenkollisionen mit extrem hoher Energie reproduzieren die ersten explosiven Augenblicke des Kosmos – hier in einer künstlerischen Vision

Titelmotiv: Jean-François Podelvin



◀ SPEKTRUM-WEBSITE

Der Weblog von »Spektrum«

Manche Veranstaltungen liefern – vielleicht – Stoff für zukünftige Artikel, andere erzählen, was aus einem bereits beschriebenen Projekt geworden ist. Klaus-Dieter Linsmeier war auf dem 5. Symposium der Internationalen Studiengruppe zur Musikarchäologie, Susanne Gellweiler auf einer Abschlussveranstaltung zu »Jugend denkt Zukunft«. Mehr finden Sie unter

_____ www.spektrum.de >> **Spektrum Notizen**



◀ WELTWIRTSCHAFT

Wie sichern wir unsere Energieversorgung?

Der Energiehunger der Menschheit steigt rapide – wie kann er gestillt werden? Fossile Energieträger gelten als Klimakiller, Kernenergie genießt einen schlechten Leumund als gefährliche Zeitbombe, und die so genannten alternativen Energiequellen sprudeln bisher nur spärlich. Gerhard Samulat gibt einen aktuellen Überblick

_____ www.wissenschaft-online.de/energie

◀ REZENSION

Ulrich Kutschera: **Evolutionsbiologie**

Auch im deutschsprachigen Raum scheinen Kreationismus und »Intelligent Design« zunehmend Anhänger zu finden. Der Biologe Ulrich Kutschera widmet gleich zwei von elf Kapiteln diesem Komplex und widerlegt darin gezielt und fundiert alle Haupteinwände der Kreationisten



Aus der Rezension von Daniel C. Dreesmann

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	■ ■ ■ ■ ■
Didaktik	■ ■ ■ ■ ■
Suchen/Finden	■ ■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■
Preis/Leistung	■ ■ ■ ■ ■

Gesamtpunktzahl **22**

Spektrum+



◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Amateurastronomie vom Mars aus

Einen atemberaubenden Sternenhimmel, wesentlich klarer und kontrastreicher als auf der Erde, hat der Rote Planet des Nachts zu bieten – Grund genug, von dort aus ein wenig Astrofotografie zu betreiben

Dieser Artikel 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?

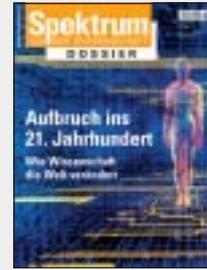
Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Direktsuche« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos



WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN ▶

Die Entschlüsselung der Wirtschaft

Ein Mensch überlegt sich nicht nur, was er haben will und wie viel er dafür zu zahlen bereit ist, sondern auch, was seine Mitmenschen tun werden



SDW DOSSIER 6/2004

Aufbruch ins 21. Jahrhundert

- ▶ Der Widerpenstigen Zähmung
- ▶ Ein Universum voll dunkler Rätsel
- ▶ Ultrakalte Atome



MIMIK ▶

Sie lächelt, sie lächelt nicht ...

Ja was denn nun? Ein berühmtes Gemälde aus der Renaissance hilft Forschern, das Abc des mimischen Gefühlsausdrucks zu entschlüsseln



G&G 4/2005

Gehirn & Geist

- ▶ Rätsel Bewusstsein
- ▶ Warum die Zeit zersplittert
- ▶ Pendler im Psychostress



BEMANNTE RAUMFAHRT ▶

Dienstreisen ins All

Auch in der bemannten Raumfahrt ist Europa ein bedeutender Mitstreiter. Fast jedes Jahr machen sich europäische Astronauten auf den Weg ins All



SUW SPECIAL 1/2004

Mars Express & Co

- ▶ Erforschung der Planeten
- ▶ Infrarotsatelliten
- ▶ Blick ins Herz der Galaxis

www.sterne-und-weltraum.de/sp1_2004



NEANDERTALER ▶

Pionier und Wegbereiter

150 Jahre ist es her, dass das erste Skelett eines Neandertalers durch einen Zufall in kundige Hände geriet. Seither hat sich das ursprüngliche Bild vom ungeschlachten Wilden gewandelt



ABA 1/2006

Abenteuer Archäologie

- ▶ Uruk – die Mutter aller Städte
- ▶ Der Schatz des Alexander
- ▶ Reformstau im Drachenboot

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

Wissenschaftler – Hände weg von der Politik

Essay, September 2006

Konsens für das Gemeinwohl

Das Wesen demokratischer Politik ist: Aus der Diskussion folgt der Konsens/Kompromiss. Problem: Welcher Konsens dient dem Gemeinwohl der Polis? Ein vor dem Forum der Vernunft konzipierter oder ein von Interessenvertretern oktroyierter?

Vor dem Forum weder der reinen noch der praktischen Vernunft kann die Argumentationskette von Sarewitz bestehen, wohl aber als Rechtfertigung des derzeitigen amerikanischen Systems. Platon würde im 21. Jahrhundert fordern: Wahre Wissenschaftler an die Macht!

Gisela Teutenberg, Lindlar

Das Kind mit dem Bade ausschütten

Ich kann dem Autor in groben Zügen zustimmen: Die Wissenschaft ist als Instrument der gesellschaftlichen Streitschlichtung meist unzureichend und politische Auseinandersetzungen lassen es an Werte- und Interessentransparenz erheblich mangeln. Die daraus abgeleiteten Folgerungen scheinen mir allerdings dennoch »das Kind mit dem Bade auszuschütten«: Sarewitz scheint sich trotz aller Wissenschaftsskepsis nach sterilen, pseudoobjektiven Bedingungen zu sehnen, wenn er fordert, dass Wissenschaftler ihre politische Position deklarieren oder »Schweigezeiten« einhalten sollten und Wissenschaft erst nachträglich in Entscheidungsprozesse einbezogen werden sollte.

Diese Ideen kommen mir wie eine Umkehrung der bereits als gescheitert erkannten Versuche der Wissenschaft vor, Werte vollständig auszuklammern, um dahinter verborgene objektive Wahrheiten freizulegen. Hier soll umgekehrt Wissen ausgeklammert werden, um Werte und Interessen greifbarer zu machen. Allerdings ist eine solche Isolation von Werten einerseits und Wissen andererseits unmöglich, wie der Autor eingangs selbst anmerkt.

Dr. Karen Kastenhofer, Augsburg

Unsinnige Forderung

Wissenschaftler sind wie alle anderen Bürger ein Teil der Gesellschaft. Was ist das für eine unsinnige Forderung, dass ein Teil der Gesellschaft sich aus der Politik heraushalten soll? Welche anderen gesellschaftlichen Gruppen sollen anschließend noch folgen? Auf welcher Basis sollen Politiker ihre Entscheidungen treffen? Sollen dabei wirklich wissenschaftliche Erkenntnisse ausgeklammert werden?

Die Forderung, Politiker erst Entscheidungen treffen zu lassen und danach Wissenschaftler heranzuziehen, um diese Entscheidungen umzusetzen, hat schon etwas Ideologisches. Hatten wir solch eine Situation nicht in Deutschland vor 1945?

Das Beispiel mit dem Problem bei der US-amerikanischen Präsidentenwahl 2000 ist als Beleg für die aufgestellte Forderung völlig abstrus. Die Probleme entstanden nicht durch Wissenschaftler, sondern durch die Verwendung eines

Abstimmverfahrens, das infolge technischer Mängel zu nicht eindeutigen Ergebnissen führte, aber von den Politikern gewollt war. Hinterher versuchte man unter Zuhilfenahme von Wissenschaftlern, das Problem zu lösen, was nicht gelang. Ist das nicht eine Widerlegung der Forderung des Autors?

Dr. Franz Peter Schmitz, Lüneburg

Beweis der Widerspruchsfreiheit unmöglich

Die Grenzen der Gewissheit, September 2006

Sie schreiben: »Gödel widerlegt damit eine Auffassung David Hilberts. Der ... hatte erklärt, es gebe ... eine endliche Zahl von Prinzipien, aus denen sich jede mathematische Wahrheit allein mit den Regeln der symbolischen Logik ableiten lässt.« Diese stringente Behauptung ist so nicht richtig oder doch zumindest ergänzungsbedürftig. Hilbert hat vielmehr 1900 auf dem Zweiten Internationalen Mathematiker-Kongress in Paris in einem Grundsatzreferat die Mathematiker zur Lösung von 23 wichtigen Problemen aufgefordert. Das zweite davon war der Beweis der Widerspruchsfreiheit der Arithmetik.

Zunächst war Hilbert ziemlich optimistisch, dass ein solcher Widerspruchsfreiheitsbeweis in greifbarer Nähe liegt, später jedoch wich seine Zuversicht einer vorsichtigeren Einschätzung.

Der Gödel'sche Unvollständigkeitssatz schließlich offenbarte die Unmöglichkeit des von Hilbert geforderten Beweises.

Dr. Klaus Geide, München

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: Slevogtstraße 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
Gestaltung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Doris Gerstner, Petra Jacoby, Dr. Peter John, Dr. Rainer Kayser, Dr. Dr. Reinhard Löser, Dr. Maria Natalie Otto, Claus-Peter Sesin, Maria-Julia Weber.

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 61896-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/1, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs/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 545907-30, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Driehel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 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 Bradford, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terleki (Circulation), Chairman: Brian Napack, 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.



»Eisbogen« im arktischen Packeis

Leuchtender Eisbogen

Spektrales Wolkenglühen – Bild des Monats, September 2006

Sie brachten als Bild des Monats September das »Spektrale Wolkenglühen«. Ich habe eine ähnliche Erscheinung am 08.08. 2005 im arktischen Packeis auf einer Fahrt zum Nordpol mit dem russischen Eisbrecher »Jamal« gesehen.

Es handelt sich hier um einen »Eisbogen«, der analog zum Regenbogen, aber durch Eiskristalle entsteht.

Dr. Peter Lengler, Duisburg

Misstrauen auf Grund unsicherer Konsequenzen

Wo der Wurm drin ist, September 2006

Die Autoren erhoffen sich durch die neue Methode der RNA-Interferenz, die ich sehr interessant finde, die Zulassung dieser gentechnisch veränderten Pflanzen sowie die Akzeptanz der Verbraucher. Nun, Verbraucher werden nicht differenzieren (können), ob sich eine Pflanze mittels fremder Proteine oder RNA-Interferenz vor Parasiten schützt. Allein der gentechnische Eingriff von außen und die Unsicherheit der Konsequenzen ist für viele Grund, um misstrauisch zu sein. Zudem gibt es noch eine andere Betrachtungsweise des Problems von gentechnisch veränderten Pflanzen in Bezug auf deren Akzeptanz, welche sich aus der

Patentierbarkeit – des eventuell sogar nicht mehr fortpflanzungsfähigen – Saatguts ergibt, das meist Länder der Dritten Welt in inakzeptable Abhängigkeit von Großkonzernen bringt.

Jürgen Jelly, Wiener Neustadt, Österreich

Forschung befasst sich mit Unbekanntem

Antwort des Autors Florian M. W. Grundler

Diese Bedenken sind durchaus nachvollziehbar, stehen aber nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Inhalt des Artikels. Tatsächlich sind wir alle in einer stets komplexer technisierten Welt – die Agrarproduktion nicht ausgenommen – immer mehr gefordert zu differenzieren.

Am Beispiel der Diskussion um gentechnisch veränderte Pflanzen lässt sich aufzeigen, mit welcher Schwierigkeiten dies verbunden ist.

Misstrauen ist oft nicht schlecht und als Grundlage naturwissenschaftlicher Forschung unerlässlich, darf aber nicht dazu instrumentalisiert werden, Letztere zu beschränken. Forschung befasst sich immer mit Unbekanntem, dessen Konsequenzen oft schwer vorhersehbar und oft auch schwierig zu bewerten sind. Verbrennungsmotoren etwa haben die Welt wie kein anderes Forschungsergebnis mit unbestreitbar positiven wie negativen Konsequenzen verändert.

Die Frage der Patentierbarkeit von Pflanzen stellt sich nicht erst im Zusammenhang mit gentechnisch veränderten Pflanzen. Bereits der derzeit geltende Sortenschutz reglementiert die Verwendung von Saat- oder Pflanzgut und führt zum Beispiel im Obstbau schon heute dazu, dass bestimmte Sorten nur noch im Vertragsanbau für den Züchter produziert werden dürfen.

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

SPEKTROGRAMM

ASTRONOMIE

Die rätselhafte Leichtigkeit des Riesen

■ Ein neu entdeckter Planet in einem 450 Lichtjahre entfernten Doppelsternsystem hat den 1,36-fachen Durchmesser von Jupiter, wiegt aber nur halb so viel. Gaspar Bakos und Kollegen fanden den untergewichtigen Riesen namens HAT-P-1b, weil er in regelmäßigen Abständen vor seiner Sonne vorbeizieht und sie dabei verdunkelt. Das Ausmaß der Helligkeitsschwankung verrät den Durchmesser und ihre Periode die Umlaufzeit – sie beträgt nur 4,5 Tage. Die Masse ergab sich aus dem Taumeln des Muttersterns, das daher rührt, dass er sich mit dem Trabanten um den gemeinsamen Schwerpunkt dreht.

Bei elf extrasolaren Planeten ließ sich durch solche Verdunklungen bisher der Umfang bestimmen. Von ihnen hat HAT-P-1b den größten Durchmesser und die geringste Dichte: Der Riese ist so leicht wie Kork. Das gibt den Astronomen Rätsel auf. Wegen der geringen Nähe zu seinem Mutterstern wird HAT-P-1b zwar stark aufgeheizt, aber längst nicht genug, als dass die Wärmebewegung der Moleküle in seinem Innern seiner enormen Gravitation die Waage halten könnte. Deshalb sollte er theoretisch um 24 Prozent kleiner sein.



Nur unter ganz speziellen Bedingungen könnte die innere Reibung durch Gezeitenkräfte die zusätzliche Hitze liefern. Allerdings hat von den elf Planeten mit bekanntem Umfang auch ein anderer knapp ein Fünftel Untergewicht. Das spricht eher dafür, dass beide einer völlig neuen Planetenklasse angehören, die aus den bisherigen theoretischen Modellen herausfällt.

ArXiv:astro-ph/0609369v2, 15. 9. 2006.

DAVID A. AGUIAR / CENTER FOR ASTROPHYSICS

SPEKTROGRAMM

VERHALTEN

Rhesusäffchen imitieren Mimik

■ Dass Säuglinge und Schimpansenbabys schon kurz nach der Geburt einfache Gesten oder Mimik nachmachen, ist seit Längerem bekannt. Offenbar beschränkt sich dieses Verhalten aber nicht, wie bisher gedacht, auf den Menschen und seine nächsten Artverwandten. Wissenschaftler um Pier Ferrari von der Universität Parma (Italien) haben es nun auch bei Rhesusaffen nachgewie-

sen. Sie machten vor 21 Tieren am ersten, dritten, siebten und vierzehnten Tag nach der Geburt jeweils zwanzig Sekunden lang fünf Gebärden: Sie schmatzten lautlos mit den Lippen, sperrten den Mund auf, streckten die Zunge heraus, rissen die Augen auf und öffneten eine zur Faust geballte Hand.

Selbst die Allerjüngsten äfften die Versuchsleiter nach. Allerdings taten sie das bei den fünf Bewegungen unterschiedlich häufig. Am schnellsten und eifrigsten imitierten sie das Lippenschmatzen und Zungeherausstrecken. Vor allem am Anfang ließen sie sich dagegen weit seltener dazu animieren, den Mund aufzusperren oder die Hand zu öffnen. Die Forscher vermuten, dass den Kleinen die Lippenbewegung deshalb so leicht fiel, weil sie bei erwachsenen Tieren zum normalen Verhaltensrepertoire gehört. Generell ist die Imitation ein Reflex, der sich ab dem siebten Tag verliert.

PloS Biology, Bd. 4, Nr. 9, S. 302



PIER FRANCESCO FERRARI / UNIVERSITÄT PARMA

Wenn der Versuchsleiter die Zunge herausstreckt, ist das Affenbaby auch so frei.

HIRNFORSCHUNG

Bewusstseins Spuren im Wachkoma

■ »Reden Sie mit ihm, er kann Sie hören, auch wenn er bewusstlos ist«, ermutigen Ärzte die Angehörigen von Komapatienten. Doch erst jetzt erbrachten britische und belgische Forscher wissenschaftliche Belege für diese Aussage. Mittels funktioneller Kernspintomografie maßen sie die Hirnaktivität einer Frau im so genannten Wachkoma. Solche Patienten erscheinen wach, reagieren aber nicht erkennbar auf äußere Reize.

Trotzdem riefen bei den Untersuchungen der Forschergruppe gesprochene Sätze im Gehirn der Frau dasselbe Aktivitätsmuster hervor wie bei gesunden Menschen. So gab es Hinweise auf semantische Prozesse, die zum Sprachverständnis dienen. Inhaltsleere Geräusche riefen keine solchen Reaktionen hervor. In einem weiteren Versuch wurde die Patientin gebeten, in Gedanken bestimmte Tätigkeiten auszuführen.



In nur einem Zwanzigstel des Abstands der Erde zur Sonne umkreist der neu entdeckte Riesenplanet HAT-P-1b seinen Mutterstern. Letzterer gehört zu einem Binärsystem, dessen zweite Komponente auf dieser künstlerischen Darstellung im Hintergrund erscheint.

PHYSIK

Quantenkühlung

■ In der Quantenwelt beeinflusst jede Messung das untersuchte System. Dessen Eigenschaften lassen sich daher nur mit begrenzter Genauigkeit ermitteln. Nun aber konnte eine Gruppe um Keith Schwab von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) dieses Handikap in einen Vorteil ummünzen.

Die Forscher arbeiteten mit einem speziellen Transistor, der ein supraleitendes Stück Metall enthält. Auf der einen Seite hüpfen Elektronen über eine Barriere auf dieses Metall und auf der anderen wieder herunter. Dicht neben dem Transistor brachten Schwab und seine Mitarbeiter einen elektrostatisch aufgeladenen winzigen Steg an. Wenn dieser oszillierte, bewegten sich die Schwingungsbüchse periodisch auf das Metallstück zu und davon weg. Weil sie dabei den Stromfluss im Transistor beeinflussten, konnte dieser die

Ein schwingender Steg kann von einem supraleitenden Einzelelektronentransistor durch Quanteneffekte abgekühlt werden.

KEITH SCHWAB, CORNELL UNIVERSITY



Schwingungen messen. Allerdings wurde die Messgenauigkeit dadurch begrenzt, dass die hüpfenden Elektronen ihrerseits auf den Steg einwirkten und seine Oszillation verstärkten.

Um das zu vermeiden, verringerte Schwabs Team die Spannung am Transistor, bis die Elektronen nicht mehr genug Energie hatten, um auf das Metallstück zu springen. Daraufhin »borgten« sie sich den fehlenden Energiebetrag vom schwingenden Steg und dämpften so dessen Oszillation, anstatt sie zu verstärken. Das aber kam einer Kühlung gleich und verbesserte so die Messgenauigkeit. *Nature*, 4.9.2006, S. 193

KLIMA

Blubbernde Bedrohung

■ In Sibirien tickt eine Zeitbombe: Durch die Erderwärmung tauen immer mehr Seen in der Permafrostzone im Sommer auf und setzen das an ihrem Grund gebildete Treibhausgas Methan frei. Das Ausmaß dieser Emission ließ sich bisher nur schätzen. Nun haben Wissenschaftler um Katey Walter von der Universität von Alaska in Fairbanks quantitative Daten erhoben. Die Forscher untersuchten dazu zwei Seen nahe Tscherski im Nordosten Sibiriens. Bei einem winterlichen Rundgang identifizierten sie Stellen, an denen Gasblasen im Eis eingeschlossen waren. An 16 davon platzierten sie im folgenden Frühjahr »Schirme«, um das Methan aufzufangen und seine Menge zu messen. Weitere

25 solche Auffangbehälter stellten sie an zufällig ausgewählten Orten auf. Um sicherzugehen, dass die Ergebnisse repräsentativ waren, untersuchten die Forscher außerdem 35 andere Seen stichprobenartig nach Gasblasen und machten von weiteren 60 Luftaufnahmen.

Die Hochrechnung der Messdaten ergab, dass in Sibirien jährlich etwa 3,8 Millionen Tonnen Methan aus solchen Blasen entweichen – wesentlich mehr als bisher gedacht. Und die Tendenz ist stark steigend: Nach einer Schätzung der Forscher nahm die Zahl der im Sommer tauenden Seen zwischen 1974 und 2000 um 14,7 und die ausgestoßene Methanmenge um 58 Prozent zu.

Nature, 7.9.2006, S. 71

ADRIAN OWEN, MRC-CBU, CAMBRIDGE



Die Gehirnaktivitäten einer Wachkomapatientin (oben) nach der Aufforderung, in Gedanken Tennis zu spielen (links) oder durch die eigene Wohnung zu gehen (rechts), entsprechen denen eines gesunden Menschen (unten).

Auch dabei traten dieselben Hirnareale für das Vorstellungsvermögen und für die Steuerung von Bewegungsabläufen in Aktion wie bei gesunden Menschen. Offenbar nahm die Patientin trotz Wachkoma sprachliche Aufforderungen nicht nur wahr, sondern kam ihnen sogar zumindest mental nach. In gewissem Sinn war sie sich ihrer selbst und ihrer Umgebung also durchaus bewusst.

Science, 8.9.2006, S. 1402

KATEY WALTER, UNIVERSITY OF ALASKA, FAIRBANKS



Die im Eis eingefrorenen Gasblasen entweichen, wenn der See im Sommer tauet.



Insgesamt 62 bisher unbekannte Schriftzeichen stehen auf einem neu entdeckten, 2900 Jahre alten Steinblock aus der olmekischen Kultur.

STEPHEN HOUSTON, BROWN UNIVERSITY AND SCIENCE

ARCHÄOLOGIE

Älteste Schrift der neuen Welt

■ Einen »Schreibblock« aus der Zeit der Olmeken haben Wissenschaftler im mexikanischen Bundesstaat Veracruz identifiziert. Eine Gruppe um Carmen Rodriguez Martinez vom mexikanischen Centro del Instituto de Antropología e Historia und Stephen Houston von der Brown University in Providence (Rhode Island) untersuchte einen rechteckigen Stein mit eingeritz-

ten Schriftzeichen, der schon Ende des letzten Jahrhunderts aus dem Schutt eines zerstörten Erdhügels geborgen worden war. Er misst 36 mal 21 Zentimeter und ist damit nur wenig größer als ein DIN-A4-Block – wiegt mit dreizehn Zentimetern Dicke aber fast zwölf Kilogramm. Aus im Umkreis gefundenen Keramikscherben, Tonfiguren und anderen Artefakten schließen die Forscher, dass der Block aus der San-Lorenzo-Periode stammen muss, die um 900 v. Chr. endete. Damit enthält er die älteste bisher entdeckte Schrift des amerikanischen Kontinents.

Insgesamt zählten Martinez und Houston 62 Zeichen. Sie wirken standardisiert, tauchen bis zu viermal auf und bilden wort- oder satzähnliche Gruppen. Demnach dürfte es sich um eine echte Schrift handeln und nicht nur um Piktogramme. Dennoch wirken viele Zeichen sehr bildhaft: Manche erinnern an Fische, Insekten oder Maiskolben. Eine Ähnlichkeit zu späteren mittelamerikanischen Schriften – etwa derjenigen der Maya – besteht nicht.

Science, 15. 9. 2006, S. 1610

PALÄANTHROPOLOGIE

Letzte Zuflucht Gibraltar

■ Bisher galt, dass die Neandertaler in Europa vor 35 000 bis 30 000 Jahren ausstarben. In einer Höhle im Felsen von Gibraltar hat eine Forschergruppe um Clive Finlayson vom Gibraltar Museum nun jedoch deutlich jüngere Spuren der Frühmenschen gefunden. Im relativ warmen Süden der Iberischen Halbinsel konnten sie sich demnach länger halten als im übrigen Europa.

Bei Grabungen im Boden der Gorham-Höhle in Gibraltar entdeckten die Forscher zwar keine Knochen von Neandertalern, aber Steinwerkzeuge, die typisch für diese Menschenart sind. Kohlenstoff-14-Datierungen von Holzkohle- und Ascheresten in den gleichen Boden-

schichten ergaben Alterswerte von 28 000 bis 24 000 Jahren. Aus anderen Teilen Südspaniens sind 32 000 Jahre alte Spuren des modernen Menschen bekannt. Demnach haben beide *Homo*-Arten einige Jahrtausende in unmittelbarer Nachbarschaft gelebt. Angesichts der geringen Populationsdichte ist jedoch unklar, ob sie einander je begegnet sind oder gar in kriegerische Auseinandersetzungen verwickelt waren.

Nature, Online-Vorabveröffentlichung, 13. 9. 2006

▼ In der Gorham-Höhle (zweite von links) im Felsen von Gibraltar fanden sich die jüngsten bekannten Spuren des Neandertalers in Europa.



GIBRALTAR MUSEUM

MEDIZINTECHNIK

Seismischer Knochensensor

■ Seismometer dienen gemeinhin zum Erkennen und Lokalisieren von Erdbeben. Doch bald könnten sie auch in der Medizin gute Dienste leisten. Ozan Akkus und seine Mitarbeiter an der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana) sind dabei, den Prototyp eines Miniseismografen zu entwickeln, der beim Menschen drohende Ermüdungsbrüche aufspüren soll. Denn diese kündigen sich durch Haar- oder Mikrorisse im Knochengewebe an, die ähnliche – nur viel schwächere – Erschütterungen auslösen, wie sie bei Erdbeben auftreten. Miniseismometer könnten das Geschehen aufzeichnen und



Klein und handlich soll er sein: der Miniseismometer, der drohende Ermüdungsbrüche aufspürt.

PURDUE NEWS SERVICE, DAVID LUMBERGER

an einen Computer weiterleiten, der die Daten auswertet und Alarm schlägt. An das Gerät angeschlossene Patienten würden so vor einer weiteren Belastung der nachgebenden Knochen gewarnt, bevor es zum Bruch kommt.

Da die grundlegende Technik vorhanden ist, muss sie nur noch an die sehr feinen Erschütterungen im Knochengewebe angepasst und in ein tragbares Untersuchungsgerät eingebaut werden. Besonders wertvoll wäre das Frühwarnsystem bei Leistungssportlern, deren Knochen hohen Belastungen ausgesetzt sind, oder bei Menschen mit geringer Knochendichte, der so genannten Osteoporose. *Pressemitteilung der Purdue-Universität vom 12. 9. 2006*

Mitarbeit: E. Buyer, S. Gellweiler und S. Hügl

Engel aus Rauch

Vier Salven von Leuchtgeschossen, abgefeuert von einem US-Militärtransporter des Typs C-17 Globemaster III, zeichnen mit ihren Rauchfahnen diese eindrucksvolle Figur in den Himmel. Sie erinnert mit ihren flügelähnlich geformten Armen an einen schwebenden Engel. Zu dem Eindruck von Schwingen trägt bei, dass die Luftströmung an den Spitzen der Tragflügel die Rauchfahnen jeweils zu einer Art Mini-Hurrikan verwirbelt – mit einem schön ausgebildeten Auge in der Mitte.

Die Aufnahme entstand bei Übungseinsätzen im vergangenen Sommer. Die Leuchtgeschosse dienen dazu, hitzesuchenden Raketen, die auf das Militärflugzeug abgeschossen werden, eine Vielzahl falscher Ziele zu bieten und sie so abzulenken. Die schon Anfang der 1990er Jahre in Dienst gestellte C-17 Globemaster III, hier im Hintergrund zu sehen, verfügt über ein System, das anfliegende Raketen erkennt und Alarm schlägt.

Kosmische Kollision lüftet dunkles Geheimnis

Schon seit siebzig Jahren wird vermutet, dass es sie gibt: die Dunkle Materie. Der Zusammenstoß zweier Galaxienhaufen hat nun den bisher besten Beleg für ihre Existenz geliefert.

Von Robert Gast

Der Kosmos neigt zur Gruppenbildung. Davon zeugen etwa die Kugelsternhaufen, in denen sich auf engstem Raum bis zu einige Millionen Sterne drängen. Doch gibt es noch weitaus größere Ansammlungen von Himmelskörpern. Galaxien zum Beispiel umfassen Abermilliarden von Sternen. Und auch diese schier unermesslichen Welteninseln bleiben nur selten für sich. Meist haben sich einige Dutzend bis mehrere Tausend zu gigantischen Haufen zusammengeschlossen, die im Verband durch den Weltraum fliegen.

Unser Milchstraßensystem macht da keine Ausnahme. Es gehört zum so genannten Virgo-Superhaufen, der sich über 200 Millionen Lichtjahre erstreckt. Mehr als hundert Galaxien werden darin trotz der riesigen Distanz von ihrem gemeinsamen Schwerefeld zusammengehalten.

Das verwundert Astronomen schon seit über siebzig Jahren. Die Masse der Einzelgalaxien ist nämlich zu gering, als dass sich ihr Zusammenhalt mit der Gravitation allein erklären ließe. Eigentlich sollte der Virgo-Haufen folglich auseinanderfliegen.

Was also bindet die Galaxien aneinander? Astrophysiker haben verschiedene Lösungsvorschläge entwickelt. So postuliert die so genannte Mond-Theorie (»Modified Newtonian Dynamics«) eine Zunahme der Gravitationswirkung mit der Massendichte. Demnach fiel die Schwerkraft in den extrem massereichen Galaxienhaufen weniger stark mit der Entfernung ab als im Sonnensystem. Vielen Astronomen missfällt diese Theorie jedoch, weil sie rein phänomenologisch ist und nicht auf bekannte physikalische Gesetze zurückgeführt werden kann.

Die Mehrheit der Himmelforscher glaubt deshalb lieber an die Existenz einer Dunklen Materie, die nicht mit elektro-

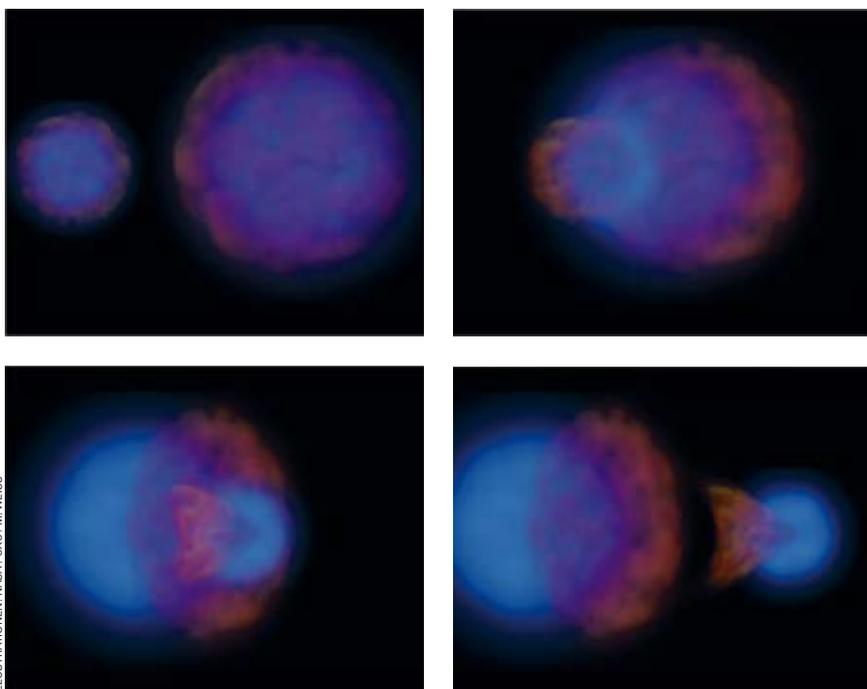
magnetischer Strahlung interagiert und somit unsichtbar bleibt. Obwohl niemand sicher weiß, aus welchen Teilchen sie eigentlich besteht, soll sie nach dem derzeit akzeptierten kosmologischen Modell immerhin 23 Prozent des Universums ausmachen. Auf die sichtbare Materie entfallen dagegen nur vier Prozent; die restlichen 73 Prozent bestehen aus einer ominösen Dunklen Energie, die für die vor einiger Zeit entdeckte beschleunigte Expansion des Universums sorgt.

Bisher gibt es nur indirekte Hinweise auf das Vorhandensein der Dunklen Materie, da sie sich ausschließlich durch ihre Gravitationswechselwirkung mit sichtbaren Objekten verrät. Einer davon ist der erwähnte Zusammenhalt von Galaxienhaufen. Diese müssten Berechnungen zufolge zu etwa vier Fünfteln aus Dunkler Materie bestehen. Die Masse der Sterne würde gerade einmal fünf und die des intergalaktischen Gases etwa fünfzehn Prozent der Gesamtmasse ausmachen. Auch dass die Objekte in den Spiralarmen von Galaxien wie unserer Milchstraße fast genauso schnell rotieren wie zentrumsnahe Himmelskörper, lässt sich nur erklären, wenn außer der sichtbaren noch andere Masse vorhanden ist.

Kollision zweier Galaxienhaufen

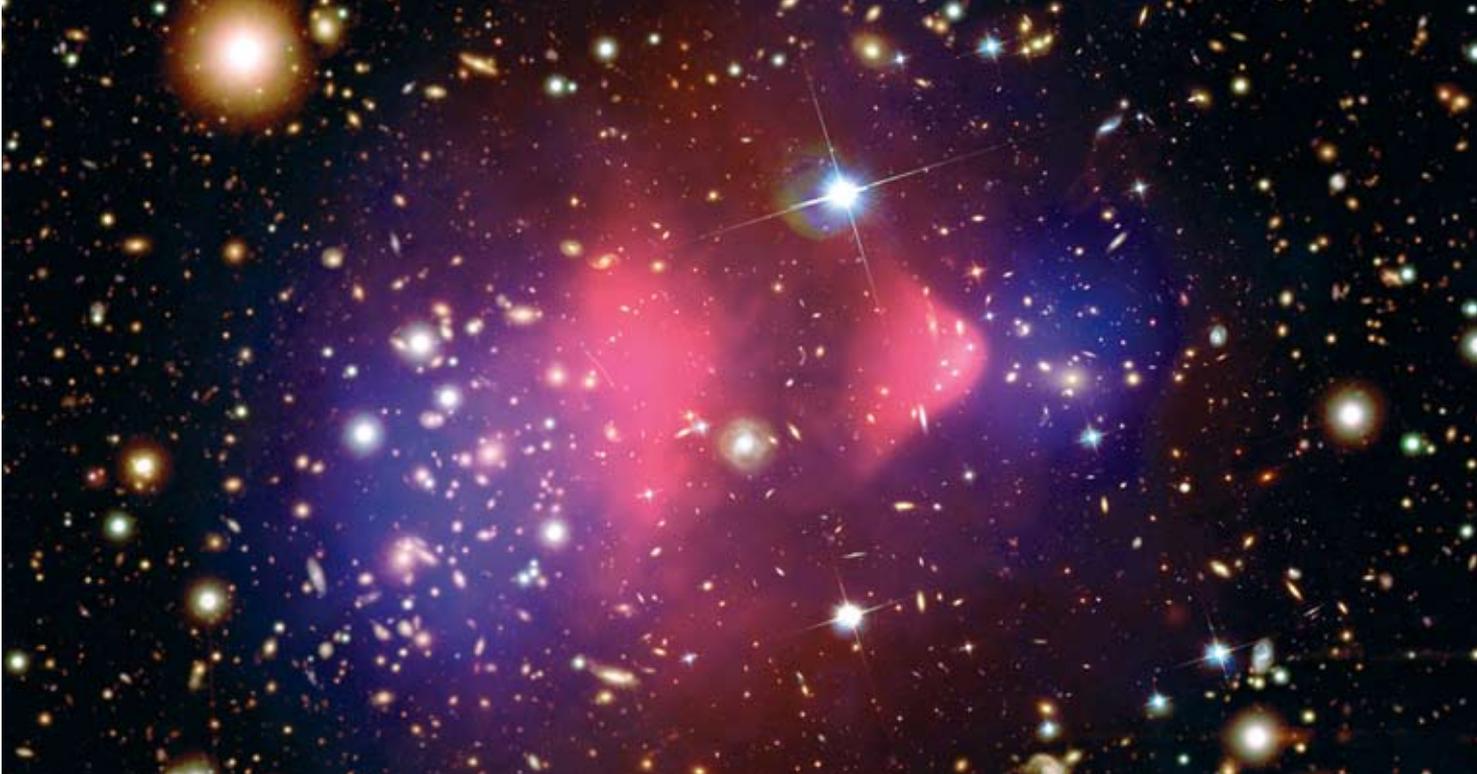
Das bisher stärkste Indiz für die Existenz der Dunklen Materie haben nun Beobachtungen im vier Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxienhaufen 1E0657-56 geliefert. Er enthält eine superheiße Gaswolke, deren Form an die Stoßwelle eines Geschosses erinnert und ihm den Spitznamen »bullet cluster« (Gewehrkuhlgalaxienhaufen) eingetragen hat. Diese besondere Struktur rührt daher, dass hier vor nur 100 Millionen Jahren zwei Galaxienhaufen kollidiert sind. Nachdem sie sich gegenseitig durchdrungen haben, fliegen sie heute wieder auseinander.

»Das ist das energiereichste kosmische Ereignis neben dem Urknall, von dem wir wissen«, begeistert sich Maxim Markevitch vom Harvard-Smithsonian Center



ILLUSTRATIONEN: NASA / CXIC / M. WEISS

Bei der Kollision zweier unterschiedlich großer Galaxienhaufen – hier eine Simulation – kam es zur Trennung von sichtbarer und Dunkler Materie. Dabei wurde das heiße Gas (rot) abgebremst, während Sterne und Dunkle Materie (blau) ungehindert weiterflogen.



für Astrophysik in Cambridge (Massachusetts). Noch mehr erregt die Astronomen aber, dass beim Zusammenstoß der beiden Galaxienhaufen Dunkle und sichtbare Materie offenbar voneinander getrennt wurden (Bilder links unten).

Das erkannte eine Forschergruppe an der Universität von Arizona in Tucson unlängst, als sie Aufnahmen des im All stationierten Röntgenteleskops Chandra mit solchen des Hubble-Weltraumobservatoriums sowie des VLT (Very Large Telescope) und des Magellan-Teleskops in Chile verglich. Chandra registrierte die intensive Strahlung im Röntgenbereich, die das heiße Gas in dem Galaxienhaufen aussendet. Damit lieferte es die Verteilung des Hauptbestandteils der sichtbaren Materie in 1E0657-56. Zu erkennen sind zwei dicht beieinanderliegende Wolken, von denen die kleinere die Geschossstruktur darstellt (Bild oben).

Die drei anderen Teleskope dienen dazu, die Verteilung der Masse in dem Galaxienhaufen anhand ihres Gravitationslinseneffekts aufzuspüren. Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie kann ein massereiches Objekt im Kosmos nämlich als Linse wirken, welche die Strahlung einer dahinter verborgenen Lichtquelle zur Erde umlenkt. Je nach den geometrischen Verhältnissen entstehen dabei oft Mehrfachbilder, die meist zu kurzen Bögen verzerrt sind.

Dieser Effekt tritt auch bei 1E0657-56 auf. Mit den Teleskopen Hubble, VLT und Magellan waren dadurch Galaxien zu erkennen, die von der Erde aus hinter dem »bullet cluster« liegen und

so eigentlich von ihm verdeckt werden sollten. Anhand dieser Beobachtungen konnten die US-Astronomen berechnen, wie stark verschiedene Regionen des Galaxienhaufens das Licht ablenken. Das wiederum erlaubte, die Gebiete größter Massekonzentration zu ermitteln.

Erstaunlicherweise fallen diese Regionen, wie sich zeigte, nicht mit den beiden von Chandra lokalisierten Wolken aus superheißem Gas zusammen, sondern liegen links und rechts davon. Demnach kann 1E0657-56 nicht nur leuchtende Materie enthalten. Dann nämlich müsste der Linseneffekt dort am stärksten sein, wo sich die heißen Gaswolken befinden; schließlich machen sie den Löwenanteil der normalen Materie in dem Galaxienhaufen aus. Da die größten Massekonzentrationen aber außerhalb liegen, müssen sie von Dunkler Materie herrühren.

Newton's Gesetz gilt überall

Dass diese Dunkle Materie von dem heißen Gas räumlich getrennt ist, lässt sich gut mit der Kollision der beiden Galaxienhaufen erklären. Das intergalaktische Gas wurde beim Aufeinandertreffen durch eine dem Luftwiderstand ähnliche Kraft abgebremst und auf Grund der Wechselwirkung aufgeheizt. Dagegen flog die Dunkle Materie einfach weiter, weil außer der anziehenden Gravitation keine Kräfte auf sie wirken.

»Diese Ergebnisse liefern den direkten Beweis, dass Dunkle Materie existiert«, resümiert Doug Clowe, der die Forschergruppe an der Universität von Arizona leitet. Mit der Mond-Theorie

▲ Auf dieser kolorierten Collage von Aufnahmen des Galaxienhaufens 1E0657-56 erscheinen Wolken aus heißem intergalaktischem Gas hellrot. Regionen höchster Massendichte, die anhand ihres Gravitationslinseneffekts ermittelt wurden, sind dagegen blau gezeichnet. Da das intergalaktische Gas den Hauptteil der sichtbaren Materie von 1E0657-56 bildet, müssen sie überwiegend aus Dunkler Materie bestehen.

wären die Beobachtungsdaten seiner Einschätzung nach nicht erklärbar. Die Physiker können also aufatmen: Newtons Gravitationsgesetz gelten offenbar uneingeschränkt und überall im Universum. »Wir haben dieses Schlupfloch in der Gravitationstheorie geschlossen und sind nun näher dran denn je, die unsichtbare Materie zu sehen«, schwärmt Clowe.

Nach wie vor bleibt jedoch rätselhaft, weshalb in einem Umkreis von 500 Lichtjahren um die Erde anscheinend keine Dunkle Materie existiert. Dies lässt sich aus den Daten des Satelliten »Hipparcos« schließen, der Ende der 1990er Jahre die Positionen der Sterne in unserer kosmischen Nachbarschaft genauestens vermaß. Eigentlich müsste hier, am Rand der Milchstraße, die Dunkle Materie fünfzigmal so häufig sein wie die sichtbare. Es bleibt also auch nach der jüngsten Entdeckung noch genug Raum für Spekulationen.

Robert Gast studiert in Heidelberg Physik.

SdW F

Prämie

Schmerzhemmer im Rückenmark

Wenn Schmerzreize länger andauern oder sich wiederholen, registriert das Nervensystem sie immer stärker. Wissenschaftlerinnen aus Heidelberg haben nun einen ungewöhnlichen Mechanismus entdeckt, der die Bildung dieses Schmerzgedächtnisses unterdrückt.

Von Andrea Groß

Etwa fünf bis acht Millionen Menschen leiden in Deutschland an chronischen Schmerzen. Für sie könnten sich jetzt neue Perspektiven ergeben: Rohini Kuner und Anke Tappe vom Pharmakologischen Institut der Universität Heidelberg haben zusammen mit weiteren Wissenschaftlern aus verschiedenen Ländern einen bisher unbekanntenen körpereigenen Schutzmechanismus gegen die gesteigerte Empfindung lang anhaltender oder immer wiederkehrender Schmerzen aufgespürt (*Nature Medicine*, Juli 2006, S. 677).

Im Mittelpunkt steht dabei eine Proteinfamilie mit dem wohlklingenden, aber willkürlichen Namen »Homer«. Entdeckt hatten sie vor neun Jahren US-Forscher um Paul F. Worley von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) im limbischen System – einem Bereich des Großhirns, der für die Verarbeitung von Emotionen zuständig ist. »Wir haben nun zum ersten Mal bewiesen, dass Homer-Proteine auch im Rückenmark vorkommen und dort an der Schmerzverarbeitung beteiligt sind«, erklärt die Neurologin Kuner.

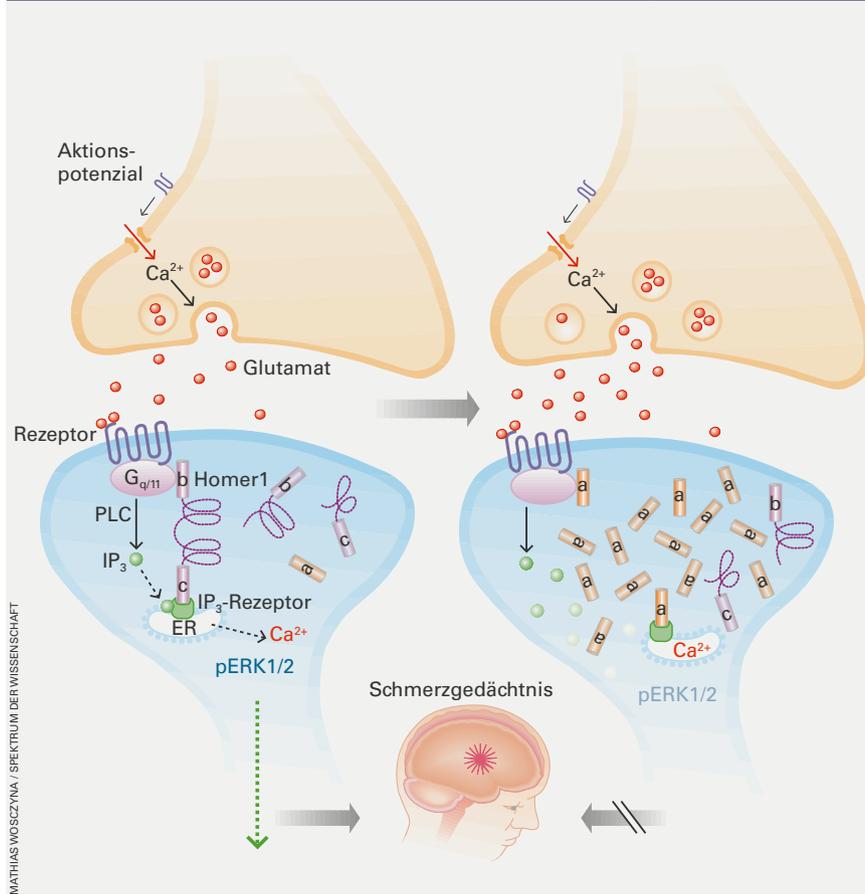
An sich sind Schmerzen sinnvoll, weil sie eine wichtige Warn- und Schutzfunk-

tion haben. Registriert werden sie über spezielle Nervenfortsätze, die Meldungen über Gewebsschäden aufnehmen können. Diese so genannten Nozizeptoren sind als Teil des peripheren Nervensystems über den ganzen Körper verteilt. Mittels elektrischer Signale, den Aktionspotenzialen, leiten sie die Information »Schmerz« über Nervenfasern zum Rückenmark und schließlich ans Gehirn weiter.

Um von einer Nervenzelle zur nächsten zu gelangen, muss der Reiz einen Zwischenraum überwinden: den synaptischen Spalt. Hier löst das elektrische Signal die Freisetzung eines chemischen Botenstoffs aus. Dieser »Neurotransmitter« überquert den Spalt und dockt an spezielle Rezeptoren auf der Empfängerzelle an. Diese wird dadurch aktiviert – oder manchmal auch gehemmt – und erzeugt, wenn die Erregung stark genug ist, ihrerseits ein elektrisches Signal.

An der Schaltstelle zwischen peripherem und zentralem Nervensystem im Rückenmark gibt es mehrere Typen von Synapsen mit unterschiedlichen Neurotransmittern. Bei einem von ihnen spie-

Wie Homer-Proteine das Schmerzgedächtnis beeinflussen



Schmerzreize gelangen als elektrisches Aktionspotenzial aus den peripheren Nervenzellen an verschiedene Umschaltstellen im Rückenmark und lassen dort Kalziumionen (Ca^{2+}) einströmen. Dadurch verschmelzen Bläschen, die einen chemischen Botenstoff enthalten, mit der Zellmembran und setzen ihren Inhalt frei. Die ausgeschütteten Neurotransmitter, wie die Botenmoleküle heißen, überqueren den Spalt zur Rückenmarkszelle. Dort heften sie sich an passende Rezeptoren und übertragen so das Signal.

Es gibt verschiedene Typen von Umschaltstellen – fachsprachlich: Synapsen – im Rückenmark. Sie unterscheiden sich durch den verwendeten Botenstoff. Homer-Proteine spielen an Synapsen eine Rolle, die den Neurotransmitter Glutamat verwenden. Sie dienen nicht zur direkten Weiterleitung des Schmerzsignals, sondern stoßen als Reaktion darauf Vorgänge an, die eine Art Schmerzgedächtnis hervorrufen.

Wenn an solchen Synapsen das Botenmolekül Glutamat an seinen Rezeptor andockt, lagert dieser daraufhin die G-Proteine G_q und G_{11} an. Unter deren Einfluss

len, wie das Team um Rohini Kuner nun zeigte, auch die Homer-Proteine eine Rolle. Diese existieren in mehreren Varianten. Zwei Vertreter – als 1b und 1c klassifiziert – entdeckten die Heidelberger Wissenschaftlerinnen in Gewebsschnitten von Ratten. Sie kommen überall im Rückenmark in relativ hoher Konzentration vor.

Protein mit Schaltfunktion

Dagegen ist eine dritte Variante namens Homer-1a normalerweise nur in sehr geringen Mengen vorhanden. Ihre Konzentration in den Nervenzellen des Rückenmarks stieg aber deutlich an, wenn das Team um Kuner in die Fußsohlen von Ratten ein entzündungsauslösendes Mittel injizierte, das lang anhaltende Schmerzen erzeugt. Das Protein reichte sich dabei vor allem auf der Seite an, wo der Nerv aus der Hinterpfote eintritt (Bild auf S. 22).

Um die Funktion von Homer-1a weiter zu untersuchen, blockierten die Forscher mittels so genannter RNA-Interferenz seine Bildung bei einem Teil der Tiere. Nach Auslösen der Entzündung zeigte sich zunächst kein Unter-

schied zu den unbehandelten Ratten. Die Schmerzreaktionen – etwa Kratzen an der Pfote – waren in beiden Gruppen anfangs gleich. Allerdings ließen sie bei den Kontrolltieren schneller nach.

Außerdem reagierten die Tiere ohne Homer-1a mit der Zeit immer empfindlicher auf zusätzlich verabreichte Hitze-reize durch Bestrahlung der Pfote mit Infrarotlicht. Offenbar hatte sich bei ihnen ein Schmerzgedächtnis entwickelt. Es entsteht dadurch, dass die Rückenmarkszellen die ankommenden Signale der Nozizeptoren stärker registrieren und effizienter weiterleiten – unter anderem weil als Reaktion auf die dauerhafte Erregung an den beteiligten Synapsen vermehrt Neurotransmitter, Ionenkanäle und Rezeptoren synthetisiert werden.

Tatsächlich finden sich die Homer-Proteine an solchen Schaltstellen zum Rückenmark, die nicht zur schnellen Weiterleitung von Schmerzsignalen dienen, sondern zu ihrer langfristigen Modulation, also Verstärkung oder Abschwächung. Diese Synapsen arbeiten mit dem Neurotransmitter Glutamat und führen über eine komplizierte Si- ▷

wird dann das Enzym Phospholipase C (PLC) dazu angeregt, den zellinternen Botenstoff Inositoltriphosphat (IP_3) zu bilden. Der wandert wiederum zu seinem Rezeptor auf dem so genannten endoplasmatischen Retikulum (ER), einem zellinternen Membransystem, und lagert sich daran an.

Dadurch öffnen sich Kanäle, durch die Kalzium-Ionen aus dem endoplasmatischen Retikulum in das Zellplasma strömen. Diese Ionen aktivieren schließlich die Regulatormoleküle pERK1 und 2, die zum Zellkern diffundieren und dort die Synthese von Stoffen veranlassen, durch die sich die Effizienz erhöht, mit der die Rückenmarkszelle Schmerzsignale empfängt und weiterleitet.

Die Rolle der Proteine Homer-1b und -1c besteht darin, eine Brücke zwischen dem Rezeptor für Glutamat und für IP_3 zu bilden und beide so in enge räumliche Nähe zu bringen. Deshalb muss der zellinterne Bote nur einen kurzen Weg zurücklegen und kann seine Nachricht schnell und effizient übermitteln. Der Brückenbau wird dadurch möglich,

dass sich die beiden Homer-Proteine mit einem Ende an den jeweiligen Rezeptor heften und sich mit dem anderen untereinander verbinden.

Treffen jedoch über längere Zeit starke Schmerzsignale an der Rückenmarkszelle ein, kommt eine Gegenreaktion in Gang, die eine weitere Steigerung des Schmerzgedächtnisses unterbindet. Ein noch nicht genau bekannter Rückkopplungsmechanismus bewirkt, dass eine dritte Art von Homer-Protein mit der Typbezeichnung 1a gebildet wird. Dabei handelt sich um eine verstümmelte Variante, die zwar noch an die Rezeptoren andocken, sich aber nicht mehr mit ihresgleichen verbinden kann. Dadurch sabotiert das verkürzte Molekül gleichsam den Brückenbau. Einerseits verdrängt es Homer 1b und 1c von den Rezeptoren, andererseits ist es aber nicht in der Lage, die Brücke zu bilden. Dadurch muss der zellinterne Bote IP_3 so weit wandern, dass er größtenteils wieder abgebaut ist, bevor er sein Ziel erreicht hat. Die Ausschüttung von Kalzium unterbleibt – und damit auch die Aktivierung von pERK1/2.

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

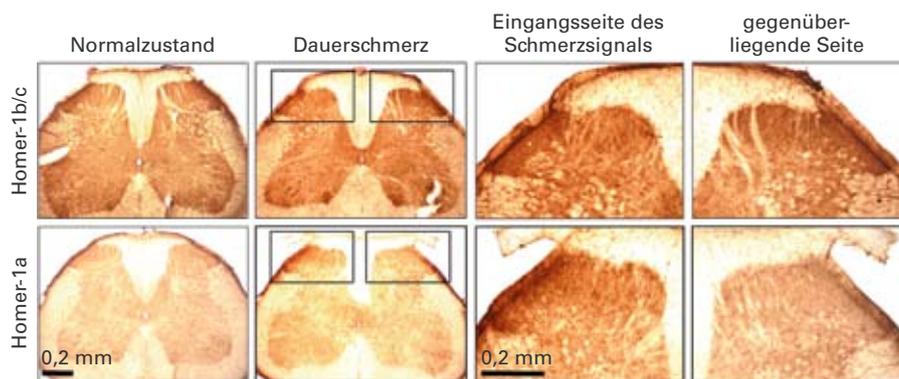
» **Quantenphysik 17.-19.11.06**
Seminar für physikalisch und philosophisch
Interessierte, geistige Anregung und
körperliche Erholung in schönem Ambiente
www.fem-institut.de

» **Top-quality, in detail-consulting**
aus Industrie & Hochschule
Energiespeicher, Superisolationen,
Oberflächen, Modeling, EU-Anträge
www.haraldriss.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



ANKE TAPPE UND ROHINI KUNER, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

▷ gnalkaskade dazu, dass die Zelle Stoffe herstellt, die ihre Empfindlichkeit für Schmerzsignale steigern (siehe Kasten auf S. 20).

Welche Rolle spielen die Homer-Proteine bei diesem Vorgang? Bekannt war, dass sich die Varianten 1b und 1c mit einem Ende an verschiedene Molekülkomplexe anlagern können, die an der vom Glutamat ausgelösten Signalkaskade mitwirken. Mit dem anderen Ende dagegen können sie sich aneinanderheften und dabei Doppelmoleküle bilden. In Homer-1a fehlt dieser Teil, sodass es nicht in der Lage ist, sich mit seinesgleichen zu verbinden.

Sabotierter Brückenbau

Kuners Team kombinierte diese schon länger bekannten Fakten mit seinen Ergebnissen und gelangte so zu einem Modell, wie die Homer-Proteine die Übertragung des Schmerzsignals ins Rückenmark und die Bildung eines Schmerzgedächtnisses beeinflussen können. Danach knüpfen die normalerweise vorhandenen Vari-

anten 1b und 1c an den Glutamat-Synapsen eine Art Brücke zwischen zwei Molekülkomplexen, die an der Signalkaskade innerhalb der Rückenmarkszelle beteiligt sind. Erreicht die Schmerzintensität einen bestimmten Schwellenwert, wird dagegen Homer-1a verstärkt produziert. Es konkurriert dann mit 1b und 1c beim Brückenbau. Da es aber verstümmelt ist und sich nicht mit einem gleichartigen Molekül verknüpfen kann, taugt es nicht zum Brückenbildner und vereitelt so die Konstruktion. Dadurch werden die Prozesse unterbrochen, die zur Bildung eines Schmerzgedächtnisses führen.

»Bisher kannten wir nur schmerzhemmende Rückkopplungsmechanismen, welche auf der Freisetzung eines inhibierenden Botenstoffs wie Gamma-Aminobuttersäure basieren«, resümiert die Leiterin des Heidelberger Teams. »Jetzt haben wir dagegen erstmals einen negativen Rückkopplungsmechanismus gefunden, der durch die aktivitätsbedingte Unterbrechung eines Signalwegs zu Stande kommt.«

◀ Auf diesen Rückenmarksschnitten von Ratten erscheinen die verschiedenen Homer-Proteine durch immunohistochemische Färbung bräunlich. Die Typen Homer-1b und -1c (oben) sind sowohl im Normalzustand als auch bei lang anhaltenden Schmerzen in hoher Konzentration vorhanden – und zwar nicht nur dort, wo der Nerv aus der Hinterpfote eintritt, sondern auch an der gegenüberliegenden Seite. Das Protein Homer-1a (unten) liegt dagegen nur nach einem länger andauernden Schmerzreiz in größeren Mengen vor und konzentriert sich an der dem Nerv aus der Hinterpfote zugewandten Seite.

Diese Entdeckung ist nicht nur für die Grundlagenforschung hoch interessant, sondern lässt sich möglicherweise auch therapeutisch nutzen. Nach Aussage der Forscherinnen aus Heidelberg könnte man zusätzliche Exemplare des Gens für das Homer-1a-Protein in die betroffenen Zellen einschleusen, damit dieser Hemmstoff in größerer Menge gebildet wird. Einfacher wäre es jedoch sehr wahrscheinlich, eine Minimalversion von Homer-1a, die noch dessen Hemmfunktion beinhaltet, synthetisch herzustellen und zum Medikament zu entwickeln.

Andrea Groß ist promovierte Biochemikerin und freie Journalistin in Mannheim.

TECHNIK

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

Mit der Kraft des Strohs

Karlsruher Forscher haben ein neues Verfahren zur Herstellung von Biosprit entwickelt.

Von Frank Schubert

Die Weltmarktpreise für Rohöl erklimmen um die Mitte des Jahres immer neue Rekordmarken. Politische Probleme in einigen der Hauptförderländer – vor allem der Atomstreit mit dem Iran – sorgten für Unsicherheit und schürten die Angst vor einer Energiekrise. Mag sein, dass die irdischen Erdölvorkommen noch lange nicht erschöpft sind, doch unbestreitbar wird die Versor-

gung mit dem schwarzen Gold schon jetzt schwieriger. Die globale Nachfrage steigt, weil neben den westlichen Staaten Schwellenländer wie China und Indien einen wachsenden Bedarf anmelden.

Der Umstieg auf andere, regenerative Energiequellen erscheint deshalb dringender denn je – zumal die massive Verfeuerung fossiler Brennstoffe auch das Erdklima bedroht. Neben Sonne, Wind und Wasser rücken dabei zunehmend nachwachsende Rohstoffe in den Fokus

von Wissenschaft und Politik. Sie bieten vor allem einen viel versprechenden Ersatz für Erdölprodukte wie Benzin und Diesel, die in großen Mengen im motorisierten Straßenverkehr gebraucht werden.

»Das ist zurzeit ein großes Modethema«, meint Edmund Henrich vom Institut für technische Chemie am Forschungszentrum Karlsruhe. Die europäische Union fördert die Nutzung von Biokraftstoff massiv und schreibt in einer Richtlinie vor, dass er bis Ende 2010 knapp sechs Prozent des hiesigen Spritverbrauchs abdeckt. Bis 2020 soll sein Anteil sogar bis auf zwanzig Prozent steigen.

Vor diesem Hintergrund haben nun Wissenschaftler am Forschungszentrum Karlsruhe ein Verfahren entwickelt, das trockene Biomasse wie Stroh, Rinde oder Holz zu einem flüssigen Kraftstoff verarbeitet. Derzeit bauen sie eine Pilotanla-

ge, die den Gesamtprozess von der Biomasse bis zur Zapfsäule technologisch demonstriert. Sie soll 2008 in Betrieb gehen. »Unser Vorhaben ist weltweit einmalig; es gibt nirgendwo sonst etwas Vergleichbares«, sagt Henrich, der das Projekt leitend betreut.

Mit ihrem Verfahren namens »bioliq« wollen die Karlsruher Forscher ein altes Problem lösen. Stroh, Rinde und Holz fallen in der Landwirtschaft zwar zuhauf an, haben aber einen relativ niedrigen Brennwert. Es lohnt deshalb nicht, sie zur Energiegewinnung über große Strecken zu transportieren – der Aufwand wäre höher als der erzielte Nutzen. Gefragt ist darum eine Möglichkeit, den Energiegehalt des Pflanzenmaterials zu konzentrieren.

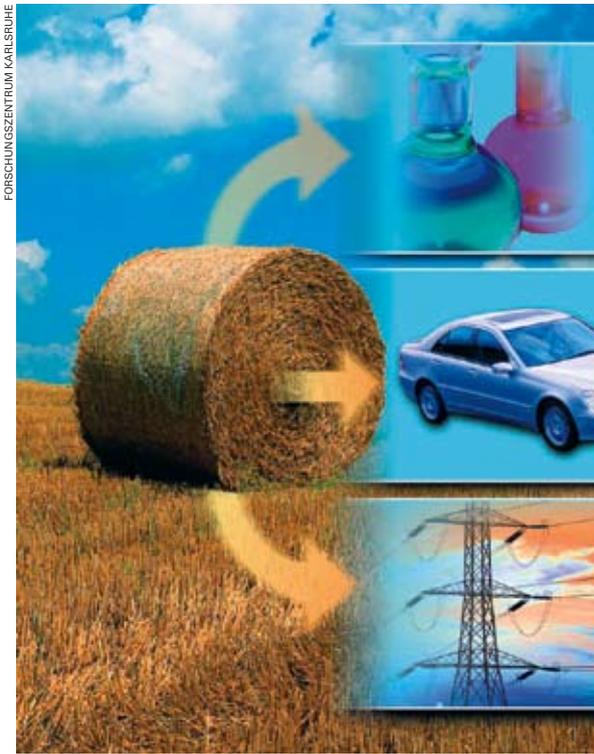
Verflüssigung von Bioabfall

»Dies gelingt uns, indem wir die Biomasse verflüssigen«, erklärt Nicolaus Dahmen vom Forschungszentrum Karlsruhe, der den Bau der Versuchsanlage leitet. Dabei greifen er und seine Kollegen auf die so genannte Schnellpyrolyse zurück. In einem Mischreaktor werden Holz und Stroh unter Luftabschluss mit großen Mengen heißen Sandes vermengt

und so in kürzester Zeit auf 500 Grad Celsius erhitzt. Unter diesen Bedingungen zersetzen sie sich zu Brenngas, das zum Heizen des Reaktors dient, sowie zu einem Gemisch aus flüssigem Teer und Koks – im Fachjargon »Slurry« genannt (englisch für »Schlick«). Dessen Energiedichte ist zehnmal so hoch wie die von Stroh und mit derjenigen von Rohöl vergleichbar.

Das macht es wirtschaftlich vertretbar, den Brei zur Weiterverarbeitung auch über größere Entfernungen zu einer zentralen Anlage zu transportieren. Dort wird er in einem speziellen Flugstromvergaser auf 1200 Grad Celsius erhitzt und einem Druck von bis zu achtzig Bar ausgesetzt. Teer und Koks verwandeln sich dabei in so genanntes Synthesegas: ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff.

Daraus wiederum lassen sich viele wichtige organisch-chemische Grundstoffe erzeugen. Insbesondere kann man Synthesegas über Methanol zu synthetischen Kraftstoffen weiterverarbeiten. Deren Preis läge bei etwa einem Euro pro Liter. Das Verfahren hätte den Vorteil, dass es Benzin produziert, während die gängigen Methoden zur Herstellung ▷



▲ Aus trockenen Bioabfällen wie Stroh könnten mit einem neu entwickelten Verfahren auf wirtschaftliche Weise Benzin, chemische Grundstoffe und Energie gewonnen werden.

NOBELPREISE 2006



Nobelpreis für Physik

Die Auszeichnung ging an **John C. Mather** vom Goddard-Raumflugzentrum der Nasa und **George F. Smoot** von der Universität von Kalifornien in Berkeley. Beide waren maßgeblich daran beteiligt, mit dem 1989 gestarteten Satelliten Cobe die kosmische Hintergrundstrahlung in allen Raumrichtungen zu vermessen und den Grad ihrer Isotropie zu ermitteln. Daraus ergaben sich tiefe Einsichten in die Entwicklung und Struktur des Kosmos.

Nobelpreis für Chemie

Die Ehrung erhielt **Roger D. Kornberg** von der Universität Stanford (Kalifornien) für seine akribische Aufklärung der Transkription bei höheren Lebewesen. Darunter versteht man das Umschreiben der Erbsubstanz in Boten-RNA-Moleküle. Es handelt sich um den ersten Schritt beim Ablesen eines Gens und der Produktion des darin codierten Proteins. Entsprechend große Bedeutung hat der Vorgang für die Biologie.

Nobelpreis für Medizin

Gewürdigt wurden **Andrew C. Fire** von der Universität Stanford (Kalifornien) und **Craig C. Mello** von der Universität von Massachusetts in Worcester für die Entdeckung der RNA-Interferenz. Dabei sorgen kurze, doppelsträngige RNA-Stücke dafür, dass Boten-RNA-Moleküle mit einem gleichartigen Abschnitt zerstört werden. Diese einfache Methode der Genblockade hat sich zum wichtigen Werkzeug der Genforschung entwickelt.

Genauerer zu den Preisträgern finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/nobelpreise im Internet. Außerdem werden im Dezemberheft von Spektrum ausführliche Berichte stehen.

▷ von Biosprit nur Dieselöl liefern. Zudem ist der Kraftstoff nach Aussage von Henrich sehr rein und lässt sich im Hinblick auf Zusammensetzung und Klopffzahl maßschneidern. Autohersteller wie VW und DaimlerChrysler haben bereits Interesse angemeldet und bereiten Motortests mit dem neuen Biosprit vor.

Die Aussichten scheinen also glänzend. Gleichwohl dämpft Dahmen überschwängliche Erwartungen. Die Karlsruher Versuchsanlage gehe frühestens 2008 in Betrieb und könne von ihrer Auslegung her pro Stunde nur 500 Kilogramm Biomasse zu siebzig Kilogramm Treibstoff umsetzen. »Eine Raffinerie arbeitet erst dann wirtschaftlich, wenn sie jährlich mindestens eine Million Tonnen Kraftstoff erzeugt«, rechnet Dahmen vor. Davon sind die Karlsruher noch weit entfernt. Dennoch könnte ihr Forschungsprojekt, sollte es sich als erfolgreich erweisen, eine groß angelegte Biokraftstoff-Industrie anstoßen.

Vorteile gegenüber Biodiesel

»Wir schätzen, dass sich mit unserem neuen Verfahren bis zu zehn Prozent des Kraftstoffbedarfs in Deutschland decken lassen«, sagt Henrich. Würde die Landwirtschaft großflächig umstrukturiert, wäre auch ein höherer Anteil möglich. Die Karlsruher Versuchsanlage wird vorerst überschüssiges Stroh und Holzreste verwerten, die ortsansässige Bauern abliefern. Sie sollen dafür siebzig Euro pro Tonne erhalten – durchaus ein lukrativer Nebenverdienst.

Dass das bioliq-Verfahren minderwertigen Abfall nutzt, könnte sich als großes Plus erweisen. Herkömmlicher Biodiesel wird vor allem aus so genannten Energiepflanzen gewonnen: Raps, Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen oder Palmen. Da sich dabei nur die Früchte verwerten lassen, ist die Kraftstoffaus-

beute relativ gering. Um nennenswerte Erträge zu erzielen, muss man die Pflanzen massenhaft anbauen und abernten, teilweise mehrmals im Jahr.

»Das ist mit Nachteilen verbunden, allen voran der Überdüngung und der Freisetzung von Stickstoffgasen aus dem Boden«, sagt Sven Gärtner, Ökobilanzierer am Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Die entweichenden Stickstoffverbindungen – darunter Lachgas und Ammoniak – seien hochaktive Treibhausgase, bewirkten eine Versauerung des Regens und beschleunigten den Abbau der Ozonschicht. Diese negativen Auswirkungen und der hohe Landverbrauch können die ökologischen Vorteile von Biodiesel teilweise oder sogar völlig zunichtemachen.

In tropischen Gebieten sei der Effekt, so Gärtner, besonders verheerend. »Dort wird in großem Umfang Regenwald gerodet, um Anbauflächen für Energiepflanzen, vor allem Palmen, zu gewinnen«, beklagt er. In Brasilien, Indonesien und Malaysia betrieben Bauern teils illegal riesige Palmenplantagen. Wenn die Europäische Union mit einer allzu ehrgeizigen Förderung von Biokraftstoff diese Praktiken begünstigt, leistet sie der Umwelt einen Bärendienst.

Auch Gärtner sieht den Hauptvorteil der Neuentwicklung aus Karlsruhe deshalb darin, dass die gesamte Pflanze einschließlich ihrer Lignin- und Zellulose-

▼ Durch rasches Erhitzen auf 500 Grad Celsius unter Luftabschluss lässt sich Stroh in ein energiereiches Gemisch aus flüssigem Teer und Koks – einen so genannten Slurry – verwandeln. Was hier noch im Laborversuch stattfindet, gelingt inzwischen auch großtechnisch in einem Mischreaktor.



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

▲ Mit einem Flugstromvergaser – hier bei der Firma Future Energy in Freiberg – lässt sich aus dem Slurry Synthesegas gewinnen. Diese Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid kann als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Benzin dienen.

▷ anteile verarbeitet wird. Dadurch lässt sich pro Einheit landwirtschaftlicher Nutzfläche mehr Biokraftstoff erzeugen als mit herkömmlichen Methoden. Steht dem bioliq-Verfahren also eine große Zukunft bevor? »Früher«, meint Heinrich, »wären wir mit unserem Biokraftstoff nicht konkurrenzfähig gewesen. Jetzt, angesichts ständig steigender Benzinpreise, ändert sich das.« Immerhin zeigt sogar China Interesse an dem Verfahren; die staatliche Firma Zibo Treichel Industry & Trade hat sich beim Besuch der deutschen Bundeskanzlerin im Mai vertraglich die Option auf den Bau einer Demonstrationsanlage gesichert.

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Springers EINWÜRFE

von Michael Springer



Ist das ein Wunder?

Warum der Wunderglaube scheinbar zunimmt

Vor Kurzem machte das Institut für Demoskopie Allensbach eine repräsentative Umfrage zum Thema: »Glauben Sie an Wunder?«. Da die Meinungsforscher dieselbe Frage schon vor sechs Jahren gestellt hatten, konnten sie der Versuchung nicht widerstehen, die Antworten zu vergleichen und einen Trend abzuleiten: Anno 2000 glaubten nur 29 Prozent der Deutschen an Wunder, heute sind es hingegen 56 Prozent. Demnach hätte sich das Land binnen sechs Jahren von einer zu zwei Dritteln skeptischen zu einer mehrheitlich wundergläubigen Nation gewandelt.

Da Wunder üblicherweise als Ereignisse definiert werden, bei denen die Naturgesetze außer Kraft gesetzt sind, scheint das zu bedeuten: Die Bevölkerung verliert rapide das Vertrauen in den Anspruch der Naturwissenschaften, die Welt zu erklären. Während mich diese Nachricht auf den ersten Blick in einen Abgrund kulturpessimistischer Melancholie stürzte – zunehmende Lähmung des Verstandes! schmähliches Versagen populärwissenschaftlicher Publizistik! –, schien die Allensbacher Institutschefin Noelle-Neumann leise zu frohlocken. Sie stellte eine gewagte Verbindung zum kirchlichen Spektakel des bayrischen Papstbesuchs her und sah »Hinweise darauf, dass sich die Menschen wieder etwas mehr dem Glauben zuwenden« (Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 20. September).

Doch auf den zweiten Blick wurde mir wohlter. Die meisten der zitierten Beispiele für Wunder blieben im Rahmen diesseitiger Welterklärung und fielen in die Kategorie »glücklicher Zufall«: Heilung von einer schweren, scheinbar hoffnungslosen Krankheit sei ein Wunder, meinten 67 Prozent der Befragten, »65 Prozent nannten es ein Wunder, wenn jemand einen schweren Unfall unbeschadet übersteht«. Sogar durchaus nicht seltene, zugleich aber stark ersehnte Ereignisse galten jedem Zweiten als Wunder: »Fast die Hälfte der Befragten, jeweils 47 Prozent, bezeichneten die Geburt eines Menschen und die Rettung aus scheinbar aussichtslosen Notlagen als Wunder, 42 Prozent nannten die Schönheit der Natur.«

Da bin ich aber beruhigt. Die Entstehung neuen Lebens, die Schönheit der Natur – sind das nicht Wunder, die gerade die Wissenschaft nicht müde wird zu erforschen? Dennoch frage ich mich, was der von Frau Noelle-Neumann konstatierte Trend zum – obzwar bis zur Unkenntlichkeit erweiterten – Wunderglauben wohl bedeuten mag. Immerhin zitiert sie zum Beleg, dass die Religion an Einfluss gewinne, folgendes Meinungsforschungsergebnis: »Auf die Frage ›Glauben Sie an die Kraft des Gebetes oder glauben Sie nicht daran?‹ antworten heute 46 Prozent: ›Ich glaube daran‹, 1993 waren es nur 39 Prozent.«

Heißt das, der Einfluss der Religion im Alltag – abgesehen von punktuellen Medienereignissen wie Kirchentagen und Papstbesuchen – nimmt tatsächlich dauerhaft zu? Dagegen sprechen die allermeisten soziologischen Untersuchungen, etwa die Shell-Studien zum jugendlichen Bewusstsein: Der Einfluss der institutionalisierten Religion auf das Alltagsbewusstsein sinkt ständig.



Darum erscheint mir ein in 13 Jahren signifikant gesteigerter Glaube an die Kraft des Gebets eher als Indiz für sinkendes Vertrauen in die Lösbarkeit wachsender Lebensprobleme. Auch ich Atheist habe schon im Selbstgespräch gefleht, dass ein drohendes schreckliches Ereignis nicht eintreten möge – so verzweifelt war ich. Not lehrt beten. Das ist kein Wunder.

1956

Erstes transportables Solarradio



»Das erste durch Sonnenenergie betriebene Rundfunkgerät der Welt ist jetzt in den Vereinigten Staaten regulär auf den Markt gekommen. Hersteller ist die Admiral Corporation ... Der nötige Betriebsstrom wird vom »Sun Power Pak«, einer Art Dynamo, geliefert, der Sonnenlicht in elektrische Energie umwandelt und an der Rückseite des Rundfunkgeräts angeschlossen wird. Das wichtigste Element in diesem Sonnenlicht-Dynamo ist reines Silizium in Form von 32 dünnen, waffelähnlichen Zellen.« *Kosmos*, 52. Jahrgang, Heft 11, November 1956

▲ Das Sonnenradio ist ein handliches, röhrenloses Koffermodell, das mit Sonnenlicht betrieben wird.

Entfernungsbestimmung im Bienentanz

»Man nahm bereits an, daß im Zeitablauf des Schwänzeltanzes die Entfernungsmitteilung enthalten ist, konnte jedoch diesen bisher nicht genauer analysieren, da die Schwänzelfrequenz für das menschliche Auge zu hoch ist. Durch Entwicklung einer neuen Methode war es jetzt Esch möglich, die gesuchte Beziehung zu finden. Auf das vorletzte Hinterleibssegment der Arbeitsbienen wurden senkrecht zur Tanzebene polarisierte Magnete aufgeklebt ... Wie schon v. Frisch beobachtet hatte, wechseln gradlinige Schwänzellaufstrecken mit halbkreisartigen Rücklaufstrecken ab, bei denen die Schwänzelsbewegung unterbleibt. Zwischen der Anzahl der Schwänzelsbewegungen pro Lauf und der Entfernung zur Futterquelle ließ sich eine klare Gesetzmäßigkeit herausstellen.« *Umschau*, Heft 22, S. 698, November 1956

Konservieren mit Antibiotika

»Während immer neue Antibiotika entdeckt werden ... erweitert sich zugleich der Anwendungsbereich dieser Wirkstoffe auch über die Grenzen der medizinischen Therapie hinaus. So werden in den USA bereits Aureomycin, Streptomycin und Terramycin mit Erfolg zur Konservierung frischer Lebensmittel verwen-

det. Fleisch hält sich auch ohne Kühlvorrichtungen länger, wenn dem Vieh vor der Schlachtung Antibiotika injiziert werden ... Fisch und Geflügel lassen sich länger konservieren, wenn das Eis, in das sie verpackt werden, Spuren von Aureomycin enthält.« *Westermanns Monatshefte*, 97. Jahrgang, Heft 11, S. 80, November 1956

Kondensmilch aus Soja

»In einer japanischen Zeitschrift hat T. Kalayama die Herstellung kondensierter vegetabiler Milch beschrieben ... Dies Präparat wird aus Sojabohnen gewonnen, die geweicht, gepresst und in Wasser gekocht werden. Die Flüssigkeit hat das Aussehen von Kuhmilch, doch ist ihre Zusammensetzung eine völlig andere. Die Sojabohnenmilch enthält 92,5 % Wasser, 3,02 % Protein, 2,13 % Fett, 0,03 % Fasern, 1,88 % stickstofffreie Substanzen ... Die kondensierte Pflanzenmilch hat eine gelbliche Farbe und einen angenehmen Geschmack, der sich wenig von dem der Kuhmilch unterscheidet, doch haftet ihr der Duft der Sojabohnen an. Sie wird als billiger Ersatz für kondensierte Kuhmilch empfohlen.« *Umschau*, 10. Jahrgang, Nr. 48, S. 957, November 1906

Wohltat durch Dreizellenbad

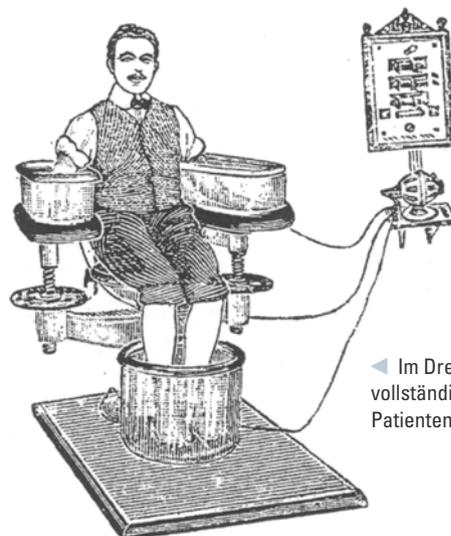
»Für viele Krankheitsfälle wendet man die elektrischen Wasserbäder an, bei denen Elektroden von großer Oberfläche in der Wanne angebracht sind und den Strom durch die Körperteile beliebig zirkulieren lassen. Da jedoch ein großer Teil der Elektrizität dabei seinen Weg um den Körper herum nehmen kann, verwendet man neuerdings auch gern das sogenannte Dreizellenbad mit Benützung dreiphasiger Wechselströme. Die drei Leitungen endigen dabei in zwei kleineren Wannen für die Unterarme und einer größeren für die Füße, und der Strom muß vollständig durch den Körper des Patienten kreisen, um zum Ausgleich zu kommen.« *Illustriertes Jahrbuch der Erfindungen*, 6. Jahrgang, S. 249, 1906

Zündender Wecker

»Einen Wecker mit Zündvorrichtung für eine Nachtkerze hat F. Anderle, Uhrmacher in Mackersdorf erfunden ... Zwischen der Kerze und dem Wecker ist eine Schiene angebracht, die eine Reibfläche enthält, gegen die sich der Kopf eines Streichholzes lehnt. In dem Augenblick, da der Wecker ertönt, schleudert eine Auslösungsfeder die Schiene

1906

nach unten. Dabei entzündet sich das Streichholz an der Reibfläche, worauf es brennend so weit vorgeschneilt wird, daß die Flamme den Docht der Kerze anzünden muß.« *Deutsche Uhrmacher-Zeitung*, Nr. 21, S. 336, November 1906



▲ Im Dreizellenbad kann der Strom vollständig durch den Körper des Patienten fließen.

Zum Verlieben schön

Weltweit halten Menschen dieselben Gesichter für hübsch und anziehend – ein evolutionäres Erbe des Wunsches nach dem perfekten Partner.

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

Von Bernhard Fink,
Karl Grammer und Peter Kappeler

Gutes Aussehen hat im Leben manche Vorteile. Darin nehmen wir uns den Mitmenschen gegenüber keineswegs gerecht. Schöne Menschen halten wir eher für intelligent, kompetent, nett und ehrlich. Sie bekommen leichter einen Job. Adrette Frauen haben es im Geschäftsleben einfacher und werden mitunter selbst vor Gericht bevorzugt behandelt. Schon niedlichen, hübschen Kindern begegnen wir allgemein freundlicher – wie umgekehrt bereits kleine Kinder Bilder von schönen Gesichtern aufmerksamer betrachten.

Forschungsrichtung, die sich mit derartigen Fragen befasst, fällt in den Bereich der Evolutionspsychologie. Diese noch recht junge Disziplin verwendet grundlegende Konzepte der vergleichenden Evolutionsforschung, um speziell die Naturgeschichte und manche Mechanismen des menschlichen Verhaltens zu erklären. Zu den hierbei interessierenden Fragen gehört auch die Bedeutung von Attraktivität – als ein wichtiges Kriterium der Partnerwahl.

Schon im 19. Jahrhundert machten sich Biologen Gedanken über die körperliche Schönheit, insbesondere über ihren Nutzen. Angesichts ihrer vielfältigen Erscheinungsarten, Ausdrucksformen und Stilisierungen in den einzelnen mensch-

lichen Kulturen möchte man annehmen, dass sich ihre Bewertung nach sehr verschiedenen Attributen richten kann. Der Evolutionsforscher Charles Darwin (1809–1882) meinte denn auch: »Es ist gewiss nicht wahr, dass es im Geiste der Menschheit irgendeinen allgemeinen Maßstab der Schönheit in Bezug auf den menschlichen Körper gibt.« Wie wir heute wissen, irrte Darwin.

Über viele Jahrzehnte meldeten sich in der Wissenschaft aber nur vereinzelt Gegenstimmen. Erst in den letzten zwanzig Jahren, vor dem Hintergrund neuer theoretischer Ansätze in Evolutionsbiologie und -psychologie, erfuhr das Thema einen Aufschwung. Vor dem Hintergrund manch unerwarteter Befunde aus dem Tierreich, ja selbst aus der Pflanzenwelt, begannen Forscher vieles im Erscheinungsbild und Verhalten des Menschen neu zu hinterfragen und anders zu bewerten. Mittlerweile boomt diese Forschungsrichtung regelrecht. Eine beliebte Untersuchungsmethode sind beispielsweise Fotovergleiche, hauptsächlich mit computergrafisch manipulierten Bildern. Viele der Studien zur Einschätzung der Schönheit beziehungsweise Attraktivität von Gesichtern benutzen solche Bildserien. Vor allem von einigen Ergebnissen dieser Forschung möchten wir hier einen Eindruck vermitteln.

Zwar hört man unter den Wissenschaftlern auch Widerspruch, wenn es heißt, zumindest manche Elemente unseres Schönheitsverständnisses seien offenbar universell. Allerdings zeichnet sich in letzter Zeit in der Verhaltensbiologie und Evolutionspsychologie immer deutlicher ab, dass sehr wohl allgemeine, kulturübergreifende Bewertungskriterien für Attraktivität existieren. Interessanterweise halten sich die Menschen dabei weniger an feste Merkmale als an ein Zusammenspiel verschiedener Prinzipien. Den Stand dieser Forschungen wollen wir im Folgenden skizzieren.

Als Beispiel für die These, überall auf der Welt würden dieselben Menschen als schön gelten, seien die Studien des Psychologen Michael Cunningham von der Universität Louisville (Kentucky) angeführt: Cunningham und seine Kollegen ließen die Gesichter von Frauen unterschiedlicher ethnischer Herkunft von Frauen und Männern – ebenfalls unterschiedlicher ethnischer Herkunft – nach ihrer Attraktivität beurteilen. Sie definierten zahlreiche Merkmale und Pro-

Schönheit, wie wir sie fühlen, bleibt unfasslich: Ihr Wesen und ihr Sinn sind unbeschreiblich

George Santayana

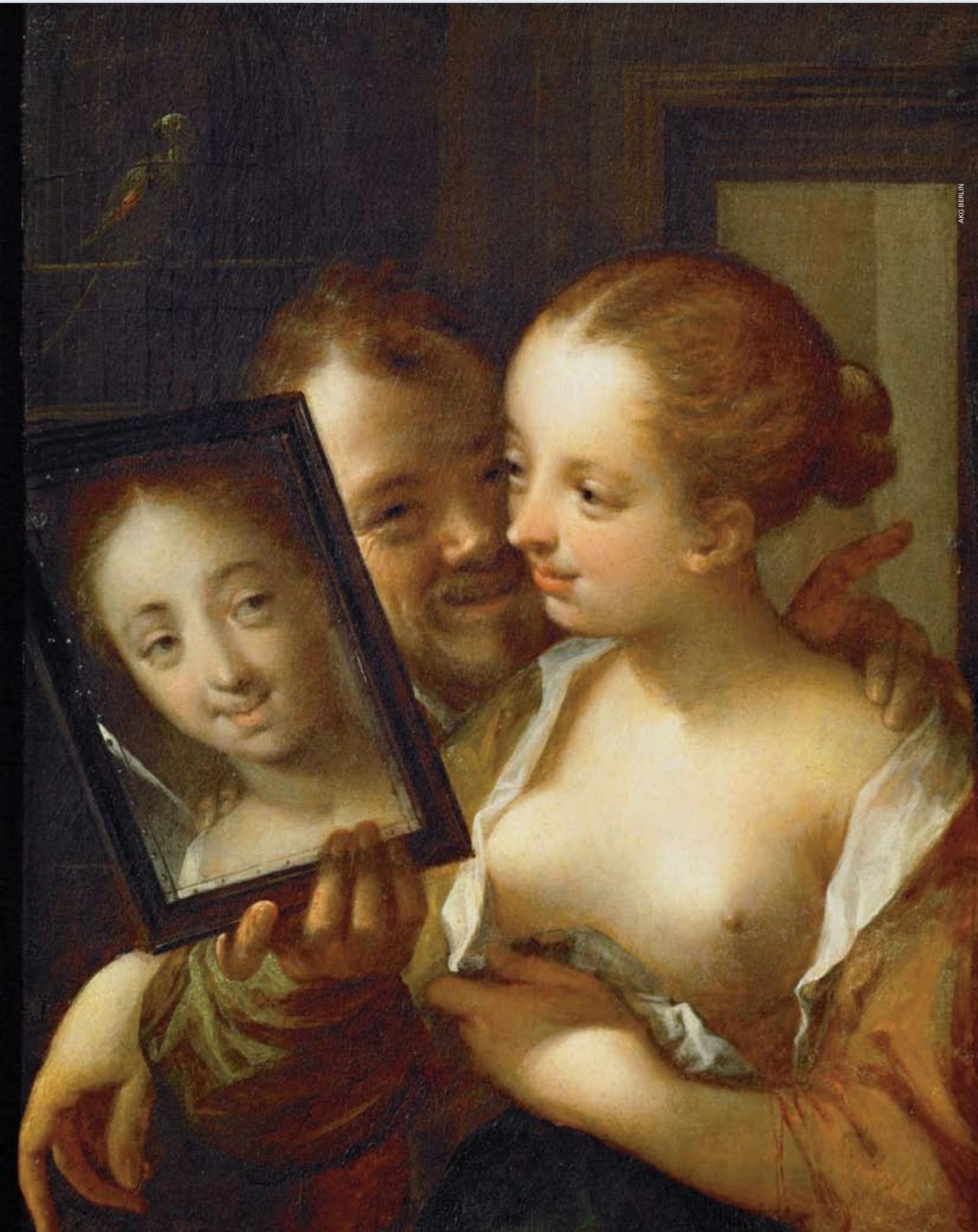
Und natürlich haben gut aussehende Frauen und Männer beim anderen Geschlecht mehr Chancen. Damit sind wir beim Thema. Wir postulieren, dass die Wertschätzung menschlicher Schönheit starke biologische Wurzeln hat. Und zwar beruht dieses Interesse in der Tiefe, ganz prosaisch gesehen, auf komplexen Verhaltenstendenzen, die in der Evolution geformt wurden und für die Partnerwahl und Partnerselektion wichtig waren – und vielleicht noch sind?

Gern pflegt man in dem Zusammenhang auch den Begriff »Attraktivität« zu benutzen, der letztlich nichts anderes bedeutet als Anziehungskraft. Zwar sind Schönheit und Attraktivität nicht unbedingt dasselbe, doch für unsere Fragestellung können wir beide Wörter synonym setzen. Schöne Menschen sind »anziehend«, und die Verhaltensbiologie beginnt zu verstehen, warum das so ist. Die

Über viele Jahrzehnte meldeten sich in der Wissenschaft aber nur vereinzelt Gegenstimmen. Erst in den letzten zwanzig Jahren, vor dem Hintergrund neuer theoretischer Ansätze in Evolutionsbiologie und -psychologie, erfuhr das Thema einen Aufschwung. Vor dem Hintergrund manch unerwarteter Befunde aus dem Tierreich, ja selbst aus der Pflanzenwelt, begannen Forscher vieles im Erscheinungsbild und Verhalten des Menschen neu zu hinterfragen und anders zu

Als Beispiel für die These, überall auf der Welt würden dieselben Menschen als schön gelten, seien die Studien des Psychologen Michael Cunningham von der Universität Louisville (Kentucky) angeführt: Cunningham und seine Kollegen ließen die Gesichter von Frauen unterschiedlicher ethnischer Herkunft von Frauen und Männern – ebenfalls unterschiedlicher ethnischer Herkunft – nach ihrer Attraktivität beurteilen. Sie definierten zahlreiche Merkmale und Pro-

▶ **Hans von Aachen (1552–1615), zuletzt Kammermaler am kaiserlichen Hof in Prag, malte dieses heitere Liebespaar. Das Bild befindet sich heute im Wiener Kunsthistorischen Museum.**





← gering

Bewertung der Weiblichkeit der Originalfotos

hoch →

▲ Jedes dieser Durchschnittsbilder beruht auf zehn anderen Fotos: jeweils links auf den am wenigsten weiblichen, rechts auf den weiblichsten einer Serie von Originalfotos. Auf S. 31 gilt das Gleiche in Bezug auf Attraktivität.

▷ portionen wie Kinngröße, Größe der Augen, Höhe der Augenbrauen oder Prominenz der Wangenknochen (siehe Bilder S. 32 unten). Wie sich herausstellte, stufen Angehörige ganz verschiedener Kulturen dieselben Merkmale als attraktiv ein. Das sind vor allem jene Charakteristika, die sexuelle Reife ausdrücken.

Damals waren Cunnighams Studien wegbereitend. Allerdings hat die Evolutionspsychologie inzwischen erkannt, dass man Attraktivität besser nicht anhand von Einzelmerkmalen erklärt. Was aber zeichnet ein schönes Antlitz dann aus? Manchen mag es verwundern: Systematische Studien erbrachten, trotz individueller Geschmäcker, recht einheitliche Muster in attraktiven Gesichtszügen, wenn auch in einigen Attributen verschiedene bei Männern und Frauen. Viele der neueren Forschungen zur Attraktivität von Gesichtern befassen sich mit den drei Aspekten: Durchschnitts-

typ, Symmetrie im Antlitz und geschlechtstypische Gesichtsbildung.

Schon im 19. Jahrhundert kam die These vom attraktiven Durchschnitt ins Gespräch. Der britische Naturforscher Francis Galton (1822–1911) wollte typische Merkmale von Verbrechergesichtern herausstellen, indem er Fotos mehrerer Krimineller aufeinander projizierte. Er staunte, dass die »gemittelten« Gesichter oft viel hübscher und angenehmer erschienen als die Originale. Diesen Effekt haben verschiedene Studien neuerer Zeit bestätigt, bei denen Testpersonen ineinandergeblendete Gesichtsaufnahmen bewerteten.

Ebenmaß – aber bitte nicht zu viel

Symmetrische Gesichter gefallen mehr als schiefe – diese aus Ergebnissen der Tierforschung abgeleitete Idee ließ sich in Testreihen mit manipulierten Fotos ebenfalls klar nachweisen. Doch bei genauerer Nachprüfung haben die genannten Charakteristika offenbar auch ihre Grenzen, wie besonders jüngere Forschungen ergaben. So kann man die fotomechanisch hergestellten Durchschnittsgesichter ohne Weiteres noch beträchtlich verschönern, indem man bestimmte Einzelmerkmale überhöht. Mittelmaß entspricht ja per se mehr der Norm und

wirkt daher unauffällig, unter Umständen sogar langweilig. Auch scheinen völlig symmetrische Gesichter nicht so anziehend zu sein wie solche mit ganz leichten, kaum bewusst wahrgenommenen Seitenunterschieden – als würden wir in einem ebenmäßigen Gesicht gern eine kleine Abweichung entdecken; man erinnert sich an das Schönheitspflasterchen. Merkwürdig ist ebenso, dass nur ein dem Durchschnitt angenähertes Frauenabbild oft für schöner als die Originale befunden wird. Gemittelte Männergesichter gelten durchaus nicht als attraktiver als manches wirkliche Gesichtsfoto.

Um zu erklären, wie solche Effekte entstehen mögen, sei weiter ausgeholt. Eine zentrale Frage unseres Forschungsfelds ist, warum der Mensch Schönheit so wichtig nimmt. Wie kommt es, dass wir intuitiv über ein fremdes Gesicht diesbezüglich sofort ein Urteil fällen? Blitzschnell taxieren wir nicht nur Geschlecht und Alter des anderen, sondern auch seine Attraktivität. Obwohl hierbei nachweislich der eigene Geschmack mitspielt, ist es doch erstaunlich, wie einheitlich die verschiedensten Menschen letztlich urteilen. Stars wie Heidi Klum oder Jennifer Lopez gelten weithin als ideal schön, und George Clooney oder Brad Pitt finden viele begehrenswert.

Die Antwort der Biologen lautet, knapp gefasst: Ein Gesicht signalisiert unter anderem die physische Verfassung. Die Gesichtszüge spiegeln körperliche Qualitäten, und ein attraktives Erscheinungsbild steht für Gesundheit und Widerstandskraft, mithin Lebensstärke. Schönheit ist somit ein Zeichen für besonders gute körperliche Eigenschaften. Genau genommen müsste man es umgekehrt sagen: Wenn jemand über seine Gesichtsbildung hohe physische Qualitäten signalisiert, empfinden wir diese Person als attraktiv und schreiben ihr automatisch auch bessere Charaktereigenschaften zu.

Warum aber sollten wir Menschen, die gesund und lebensstüchtig aussehen,

IN KÜRZE

- ▶ Unser **Schönheitsempfinden** für Menschen erwächst aus allgemeinen, kulturübergreifenden Grundschemas. Das hat wesentlich biologische Gründe: Kriterien für Attraktivität und Schönheit entstanden in der Evolution im Kontext der **Partnerwahl**. Das Aussehen war ein schnell einzuschätzendes Signal dafür, ob sich der andere als Partner für gemeinsame Kinder eignete.
- ▶ Hohe Bedeutung in dem Zusammenhang haben die Gesichtszüge. Ein attraktives Erscheinungsbild lässt auf einen guten **Gesundheitsstatus** und zugleich ein hohes **Fortpflanzungspotenzial** schließen – es ist gleichsam ein Fenster mit Blick auf Immunsystem und genetische Ausstattung.
- ▶ Attraktiv sind symmetrische Gesichter – sowie bei Frauen durchschnittliches Aussehen. Doch kann ein Antlitz durch **markante geschlechtsspezifische Züge** an Schönheit gewinnen. Damit signalisiert der Träger Eigenschaften, die in mancher Hinsicht ein Handicap darstellen, das er sich wegen seiner besonderen genetischen Qualitäten aber leisten kann – und gerade deshalb wird er begehrt.



← gering

Bewertung der Attraktivität der Originalfotos

hoch →

besonders schätzen? Hier bringen Biologen die Partnerschaft mit dem anderen Geschlecht in die Diskussion. Auch noch in der heutigen Zeit beschäftigt die meisten Menschen mindestens in jungen Jahren die Wahl des richtigen Lebenspartners vordringlich. Und nach wie vor besteht bei einer Familiengründung meist der Wunsch nach Kindern. Der perfekte Partner, der möglichst gut zu einem passt, sollte sich dazu eignen, die-

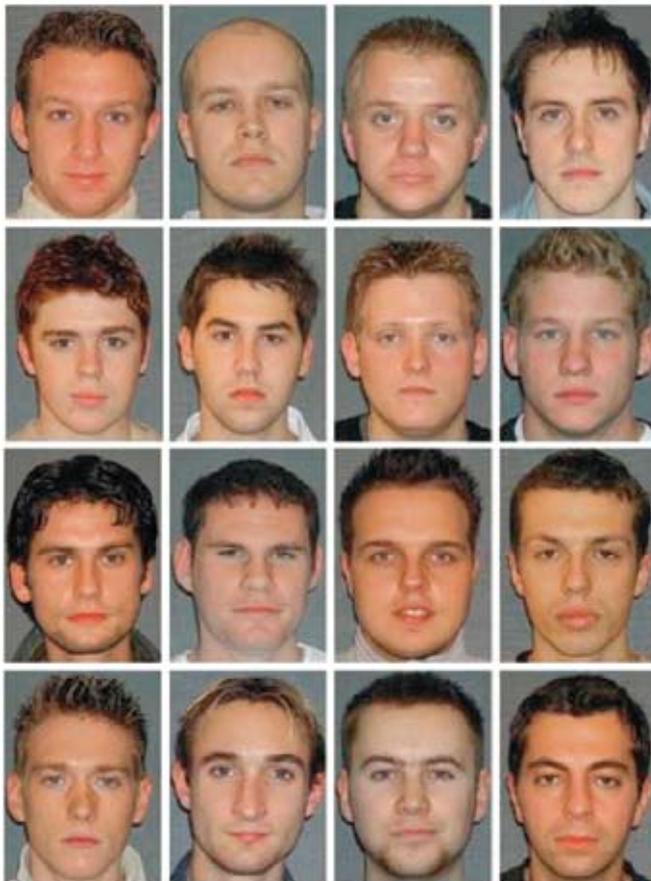
sen Wunsch zu erfüllen. Verschiedene Kulturen wie auch der Einzelne gehen hiermit zwar nicht einheitlich um, und in der westlichen Welt sind die Vorstellungen diesbezüglich nicht mehr so streng. Trotzdem folgen die bei der Partnerwahl angesetzten Kriterien – weitgehend unbewusst – anscheinend universellen Schemas, die sich im Grunde auf dieses biologische Ziel ausrichten. Wenn wir Schönheit beurteilen, können wir uns dem in der Regel nicht entziehen.

Unsere These: Diese Schemas sind großenteils Ergebnis der Evolution. Denn als deren treibende Kraft wirkt nach Erkenntnis der Evolutionsbiologie das Bestreben, Nachwuchs zu haben, sprich beim Menschen der Wunsch nach Kindern. Um nun überhaupt im Voraus Eigenschaften möglicher Partner abschät-

zen zu können, haben sich ausgeklügelte Erkennungssysteme herausgebildet. Die Fachleute sprechen von Signalsystemen. Das menschliche Gesicht ist hierin ein besonders aussagekräftiger Signalgeber geworden, mit dem sich nach Einschätzung von Biologen wenig betrügen lässt. Und offensichtlich haben wir als Pendant dazu scharfe Detektormechanismen entwickelt.

Von daher verwundert es nicht mehr so sehr, dass einerseits das Ebenmaß von Gesicht – und Körper –, also seine Symmetrie, andererseits das Mittelmaß hoch bewertet werden, und zwar anscheinend in fast allen Kulturen. An sich sind ja Gestalt und Gesicht auf Symmetrie hin angelegt. Das macht Sinn: Mit zwei gleich langen Beinen kann man besser laufen, mit zwei gleichen Augen besser

▼ Auch wenn das gemittelte Gesicht netter wirkt als manches der Originale – hohe Werte für Attraktivität dürfte es kaum erzielen. Wir bewerten männliches Aussehen nach anderen Kriterien als weibliches.



ALLE BILDER DIESEER DOPPELSEITE: BENNHARD FINK

▷ Entfernungen abschätzen. Aber »schlechte Gene«, Krankheiten oder etwa irgendwelche Mangelsituationen könnten ein gleichmäßiges Wachstum und somit die körperliche Leistungsfähigkeit behindern. Ein Ebenmaß spricht nach Erkenntnissen der Populationsgenetik für eine eher breit angelegte Ausstattung des Individuums. Mit einer größeren Auswahl an Genvarianten gelingt es nämlich leichter, vielerlei Widrigkeiten von Seiten der Umwelt abzufangen oder Störungen auszugleichen, welche zum Beispiel die individuelle Entwicklung beeinträchtigen könnten. Verhaltensforscher brachten in dem Zusammenhang Parasiten beziehungsweise Krankheitserreger ins Gespräch: Schmarotzer sowie sämtliche schädigenden Umwelteinflüsse können einen Organismus beträchtlich schwächen, aber gute Abwehrkräfte – letztlich als Zeichen für »gute Gene« genommen – würden die Parasiten eindämmen und Pathogene unterdrücken.

Beobachtungen der Populationsgenetik zufolge kommt eine individuell hohe genetische Bandbreite – fachlich Variabilität oder Flexibilität – zu Stande, wenn sich verschiedenartige Genvarianten oder Allele mischen. Das wiederum geschieht in der Regel bei den Individuen sozusagen im Mittelfeld von Populationen stärker als am Rand. Wer eher durchschnittlich aussieht, verfügt somit wahrscheinlich über eine recht gute genetische Variabilität und vermag auf Notsituati-

▼ Schemas wie diese entwarf der amerikanische Psychologe Michael Cunningham, um die Proportionen ideal schöner Gesichter zu erfassen.



onen flexibler zu reagieren, so die These. Ein besonders krasses Beispiel für das Gegenteil ist der Inzuchteffekt: Individuen mit fast homogenen Erbanlagen leiden auffallend oft mindestens an leichten Entwicklungsstörungen.

Gesichter lügen nicht

Diese Ideen entstammen weit gehend dem Studium von Tieren. Im Tierreich scheinen sie recht allgemein gültig zu sein. Was ähnliche Zusammenhänge beim Menschen angeht, so sind sich die Forscher noch nicht über alles im Klaren. Allerdings sprechen die bisherigen Ergebnisse bereits dafür, dass manches davon auch für die menschliche Attraktivität erwogen werden muss.

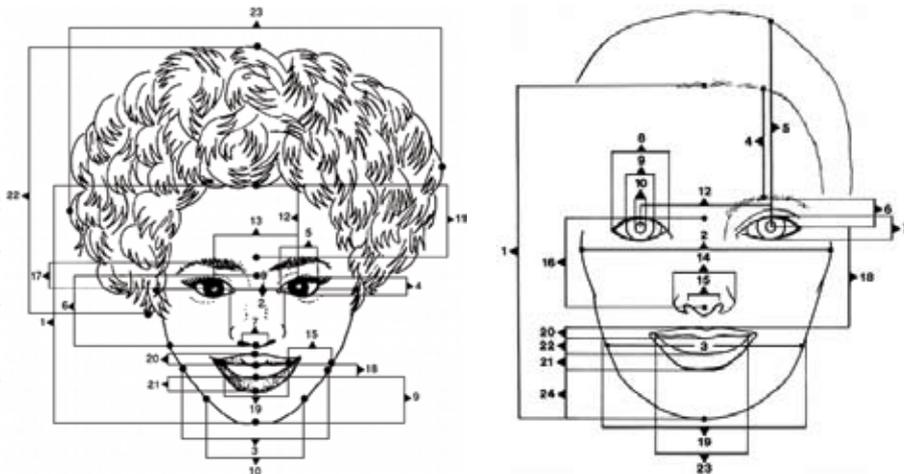
Spannender ist die Frage, warum Männer und Frauen überhaupt so verschieden aussehen – nicht nur körperlich, sondern auffallenderweise auch im Gesicht. Hierbei waren ebenfalls Evolutionskräfte am Werk, allerdings wohl insbesondere Effekte, die Darwin »sexuelle Selektion« nannte. Es ist nicht allzu

schwierig sich vorzustellen, welche Eigenschaften Mann oder Frau beim Partner vorzugsweise wünschen. Interessant ist aber zu ergründen, inwieweit diese Eigenschaften tatsächlich aus einem Gesicht sprechen. Besonders hierzu trägt die neuere biologische Forschung faszinierende Ideen bei. Denn erst in letzter Zeit erkannten die Wissenschaftler, dass sie diesen Aspekt früher unterschätzt haben. Unser Gesicht signalisiert mehr, als wir denken und manchmal wollen.

Was macht ein Männer-, was ein Frauenantlitz nun wahrhaft attraktiv? Erwähnt wurde bereits, dass Bilder weiblicher Durchschnittsgesichter erst wirklich schön erscheinen, wenn man einzelne Züge verstärkt beziehungsweise überhöht. Welche mögen das sein? In den 1980er Jahren versuchte Cunningham auch hierzu die wichtigsten Merkmale hübscher Frauen zu bestimmen, indem er den Juroren eines internationalen Schönheitswettbewerbs unterschiedlichste Fotos vorlegte, bei denen einzelne Gesichtszüge und -proportionen variierten.

Wie zunächst erwartet, schätzten die Preisrichter zum großen Teil Gesichtsmarkmale, die ins so genannte Kindchenschema (entsprechend einem Konzept aus der Verhaltensforschung) passen: etwa eine hohe Stirn, große, weit auseinanderstehende Augen, eine kleine Nase, ein schmales Kinn, volle Lippen. Nach der Theorie sollte kindliches Aussehen die weibliche Attraktivität für Männer erhöhen, weil es deren Beschützerinstinkte weckt und zugleich Unterwürfigkeit, sprich Fügsamkeit, signalisiert. Zudem müsste biologisch gesehen eine recht jugendliche Ausstrahlung der Partnerin wegen des eher zu erwartenden

LINKS: AUS: MICHAEL CUNNINGHAM ET AL., THEIR IDEAS OF BEAUTY ARE ON THE WHOLE THE SAME AS OURS, IN: APA/JPSP FEB. 1986, S. 281-290. RECHTS: AUS: MICHAEL CUNNINGHAM, MEASURING THE PHYSICAL ATTRACTIVENESS, IN: APA/JPSP MAI 1986, BD. 50 (5), S. 925-935



Kindersegens erwünscht sein. Doch so einfach machen es sich Männer nicht.

Beispielsweise ergab eine Studie des Evolutionspsychologen David Buss von der Universität von Texas in Austin mit Angehörigen von 37 Kulturen, dass die Befragten keineswegs Partnerinnen bevorzugten, die jünger als sie selbst waren. Jugendlichkeit und kindliche Merkmale waren sogar eher unerwünscht. Viel bessere Chancen hatten Gesichtssignale, die Reife und den Erwachsenenstatus anzeigen. Im Übrigen bestätigten das auch die Juroren in Cunnighams Studie: Gute Punktwerte erzielten parallel zu bestimmten kindlichen Merkmalen beispielsweise eher schmale, leicht einfallende Wangen und hohe, etwas breitere Wangenknochen. Das aber kennzeichnet erwachsene Frauen. Das heißt, ein ideales Frauenantlitz besitzt sowohl kindliche als auch Erwachsenenmerkmale.

Und wie sieht das ideale Männerantlitz aus? Im Gesicht eines Mannes müssen die geschlechtstypischen Erwachsenenmerkmale noch stärker als bei Frauen hervortreten, damit er als attraktiv

der Staatsuniversität von New Mexico in Las Cruces. Dass ein maskulines Aussehen tatsächlich auf frühen Einflüssen des Hormons Testosteron beruht, ergab etwa eine Studie von Nick Neave von der Universität Newcastle (England) und anderen, auch einem von uns (Fink). Nun haben hohe Testosteronwerte allerdings einen Nachteil, zumal in der Entwicklung: Sie schwächen das Immunsystem, würden das Individuum somit verstärkt Krankheiten aussetzen. Die Evolutionsforscher behaupten jedoch: Nur wer sich dieses Handikap auf Grund seiner besonders guten genetischen Ausstattung leisten kann, wird extreme maskuline Merkmale ausbilden. Oder anders gesagt: Je maskuliner die Züge, umso schwerer das hormonelle Joch. Ein markantes Kinn wäre dann ein Signal, dass man ein beträchtliches Handikap mit sich herumschleppt und dennoch – vielmehr gerade deswegen – ein toller Kerl ist.

Ursprünglich stammen diese Überlegungen aus der Tierforschung. Letztlich gehen sie auf Darwins Theorie einer »sexuellen Selektion« zurück (die der so ge-

Das Geheimnis des Lebens liegt in der Suche nach Schönheit

Oscar Wilde

eingestuft wird. Das mag eine von mehreren Erklärungen dafür sein, warum einem männlichen Durchschnittsabbild nicht viele Herzen zufliegen: Wie weiter unten ausgeführt wird, sollte ein Mann eher auffallen, nicht unscheinbares Mittelmaß sein. Kindliche Züge haben in den Befragungen besonders wenige Chancen.

Symmetrie ist allerdings auch beim Männerantlitz gefragt, wie viele Untersuchungen deutlich machten. Was man als männlich-markante, maskuline Züge zu bezeichnen pflegt, ein kräftiges Kinn oder eine kantige Gesichtsbildung zum Beispiel, erwies sich in Tests jedoch als zweischneidig – zumindest in der Wertschätzung des anderen Geschlechts. Denn Frauen bevorzugen stark maskuline Männergesichter nur an den empfängnisbereiten Tagen ihres Zyklus. Zu anderen Zeiten schätzen sie etwas weichere, gewissermaßen femininere Gesichtszüge mehr. Das belegten Forscher um den Psychologen Ian Penton-Voak, damals an der Universität St. Andrews (Schottland), sowie ein Team um Victor Johnston von

nannten natürlichen Selektion mitunter konträr entgegensteht, weil es dabei eben nicht auf die üblichen Umweltanpassungen ankommt). Der Biologe Amotz Zahavi von der Tel-Aviv-Universität (Israel) erklärt dies am Beispiel des Pfauenhahns, dessen langer Schwanz eigentlich einen höchst hinderlichen Zierat abgibt. Nur den Pfauenweibchen kann er gar nicht prächtig genug sein. Gewissermaßen ermessen sie daran, so die Annahme, welches das gesündeste, folglich kräftigste Männchen ist. In neuerer Zeit haben Forscher diese Zusammenhänge an verschiedenen Tieren eingehend untersucht. Immer wieder stellten sie fest, dass bei Vogel Männchen etwa die Schönheit des Gefieders von der Gesundheit abhängt, die sich beispielsweise am Parasitenbefall ablesen lässt.

Die Immunkompetenz von Individuen, also ihre Abwehrkraft gegen Krankheitskeime aller Art, umschreiben Evolutionsbiologen gern mit dem Schlagwort »Parasitenresistenz«. Dass sich diese Eigenschaft im menschlichen Antlitz abzeichnen könnte, brachten Biologen ▷



spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

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



DIESE REIHE: BERNHARD FINK

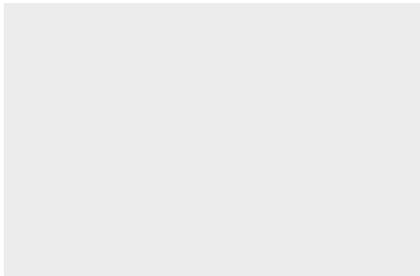


▷ von der Universität von New Mexico in Albuquerque in die Diskussion. Sie erörterten damals die Gesichtssymmetrie, von der weiter oben schon die Rede war. Recht symmetrische Züge, so der Gedanke, spiegeln wie gesagt wider, dass dieses Individuum widerstandsfähiger gegenüber Parasiten beziehungsweise Krankheitserregern ist, und bedeutet folglich eine gute genetische Ausstattung. Weitet man diese These auf die

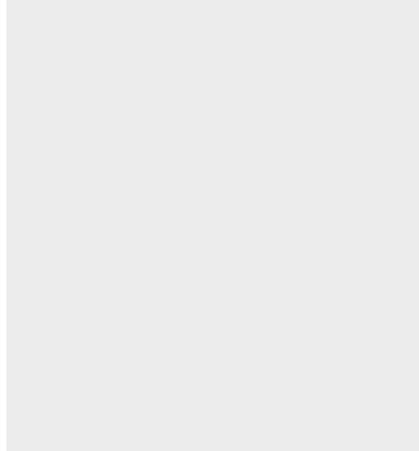
sexuelle Selektion aus, dann signalisiert auch ein markantes männliches Gesicht all dies: Immunkompetenz, Parasitenresistenz, gute Gene – und obendrein Maskulinität und daran gekoppelte Eigenschaften.

Denn Signale für Gesundheit genügten den wählerischen Frauen in der menschlichen Evolution offensichtlich nicht. Laut Evolutionspsychologie zeigt ein attraktives Männergesicht zugleich

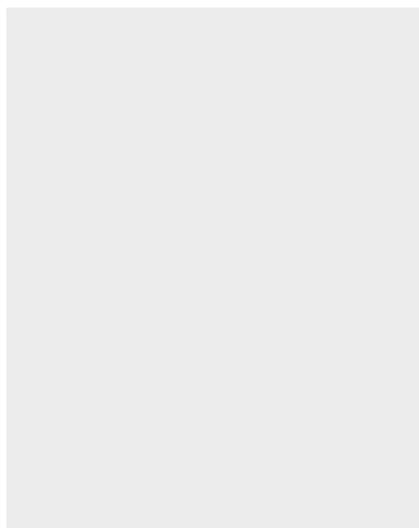
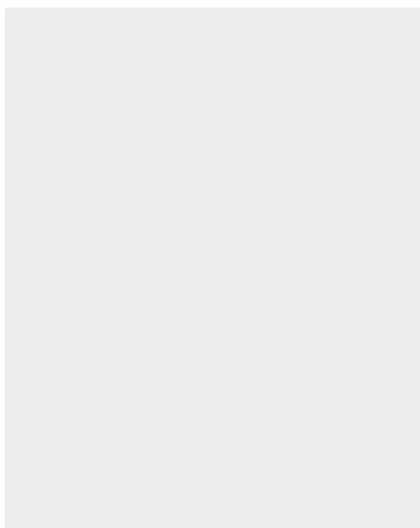
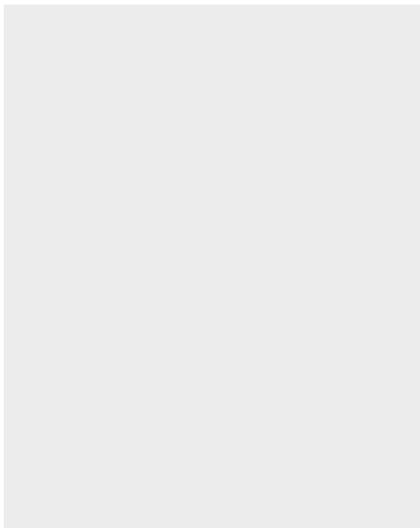
mentale Eigenschaften an, die sich in Konkurrenzsituationen bewähren: nämlich Durchsetzungsfähigkeit und eine Tendenz zu Dominanz, was in Kombination einen hohen sozialen Status bedingen kann. Nach der oben erwähnten Untersuchung von Neave und anderen gehen diese – hormonbedingten – Qualitäten mit einer ausgeprägt männlichen Gesichtsbildung einher. Das erklärt die Evolutionsbiologie folgendermaßen: Zum



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



▲ Nicht feste Maße bestimmen, ob wir ein Gesicht für schön halten. Trotzdem richten wir uns dabei nach Gesetzmäßigkeiten, die hauptsächlich biologischen Ursprungs sind.





einen müssen Männer stärker um Frauen konkurrieren als umgekehrt. Zum anderen sollten sie aus Sicht der Frau den Nachwuchs beschützen, Nahrung beschaffen, überhaupt Ressourcen gewinnen können. Durch ihre Wahl forcierten die Frauen beim anderen Geschlecht die Entwicklung von gut sichtbaren Merkmalen, an denen sie diese Qualitäten relativ zuverlässig erkannten. Attraktiv waren für sie Männer, deren Züge eben solche Eigenschaften versprochen.

Täuschung wider den Verstand

Dennoch erfordert es immer auch Kompromisse, damit geschlechtsspezifische Merkmale durch die sexuelle Selektion nicht zu extrem werden. Im Fall der menschlichen Partnerwahl erscheint dies recht klar: Wie erwähnt, bevorzugen Frauen zu den meisten Zeiten nicht ganz so markant aussehende Männer. Man könnte sagen, sie wünschen sich dann weniger nach Dominanz strebende Hormonprotze als vielmehr verträgliche, wirkliche Partner. Im Übrigen dürften auch ungute Nebeneffekte übermäßiger Hormonwirkungen, wie die Schwächung der Immunabwehrkräfte, Grenzen setzen.

Von den untersuchten Schönheitskriterien, die Menschen anwenden, haben wir nur einige besprochen. Nicht erwähnt wurde beispielsweise die Haut: Ihr Zustand ist ein besonders guter Indikator für Gesundheit und Befinden eines Menschen. Tatsächlich gilt ja eine glatte, reine, rosige – oder auch gebräunte – Haut als schön, und so mancher tut viel, um das wenigstens so inszenieren. Erst kürzlich konnten zwei von uns (Fink und Grammer) demonstrieren, dass die Beschaffenheit der Hautoberfläche sowie deren farbliche Ebenmäßigkeit die Beurteilung von Alter und Attraktivität stark beeinflussen. Die Altersschätzung kann

um bis zu zwanzig Jahre differieren, wenn auf den Bildern allein die Haut anders wirkt, auch wenn das Gesicht sonst unverändert ist. Als entsprechend mehr oder weniger attraktiv wird es empfunden.

Das Fazit dieser Forschungen lautet: Feste Maße für Attraktivität gibt es nicht, dafür aber generelle Regeln und Gesetzmäßigkeiten, nach denen wir gutes Aussehen bewerten. Mode, Kosmetik, zunehmend auch die Schönheitschirurgie machen sich das zu Nutze und schüren geradezu einen Schönheitswahn. Dass wir diesen überkommenen Regeln kaum entweichen können, zeigt sich an vielem. Von einem geschickt geschminkten Gesicht lassen wir uns verführen, auch wenn wir wissen, dass dieser Augenschein trügen kann. In allen Kulturen schmücken und schminken sich die Menschen, um schöner auszusehen. Warum mancherorts ausgerechnet ein Lippenpflock, lang gedehnte Ohrläppchen oder ein künstlich gestreckter Hals besonders attraktiv sind, müssen zukünftige Arbeiten ergründen. Vielleicht werden so Schönheitsmerkmale akzentuiert, wie es in der Mode oft geschieht. Fest steht hingegen, dass einige kulturspezifische Schönheitsideale auch von ökologischen Rahmenbedingungen beeinflusst sind. Das heißt: Schönheitsvorstellungen können zwar verschieden sein, aber dennoch folgen sie der postulierten Vorgabe zu signalisieren, dass man mit den Lebensbedingungen gut zurechtkommt.

Dass unser Empfinden für menschliche Schönheit seinen Ursprung in der Evolution der Partnerwahl hat, mag manchen befremden. Doch diese Entscheidung wirkt sich auch heute noch auf den Lebensverlauf nachdrücklich aus. Es wundert nicht, dass sich die meisten Menschen jemanden wünschen,

▲ Mit digitalen Tricks werden gemittelte Gesichter maskuliner oder femininer – auch weit über natürliche Proportionen hinaus. Solche Serien eignen sich für Befragungen zur Einschätzung von Attraktivitätsmerkmalen.

der möglichst gut zu ihnen passt. Gerade in der modernen Zeit mit ihren unzähligen anonymen Begegnungen hilft dabei nach wie vor der uralte Hang, ein fremdes Gesicht unverzüglich einzuordnen. Für Verhaltensforscher, die sich mit Gesichtssignalen befassen, ist es immer wieder erstaunlich, wie viel allein ein ruhiges, unbewegtes Antlitz erzählt. ◀



Bernhard Fink (oben), **Karl Grammer** und **Peter Kappeler** (unten) sind Verhaltensbiologen. Fink arbeitet an der Abteilung Soziobiologie/Anthropologie der Universität Göttingen. Grammer ist Direktor des Ludwig-Boltzmann-Instituts für Stadtethnologie in Wien. Kappeler ist an der Universität Göttingen sowie am Deutschen Primatenzentrum Professor für Soziobiologie/Anthropologie beziehungsweise für Verhaltensökologie und Soziobiologie.



Verhaltensbiologie. Von Peter Kappeler. Springer-Verlag, Berlin 2005

Darwinian aesthetics: Sexual selection and the biology of beauty. Von Karl Grammer et al. in: *Biological Reviews*, Bd. 78, Heft 3, S. 385, 2003

Evolutionary psychology of facial attractiveness. Von Bernhard Fink und Ian Penton-Voak in: *Current Directions in Psychological Science*, Bd. 11, Heft 5, S. 154, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852736.

Die ersten millionstel Sekunden

Mit riesigen Partikelschleudern reproduzieren Physiker den unvorstellbar heißen und dichten Zustand der Materie unmittelbar nach dem Urknall. Dieses Quark-Gluon-Medium verhält sich ganz anders als gedacht.

Von Michael Riordan
und William A. Zajc

Seit fünf Jahren nutzen Hunderte von Wissenschaftlern einen mächtigen Teilchenbeschleuniger, um Bedingungen nachzuahmen, wie sie einst bei der Geburt des Alls herrschten. Der Rhic (Relativistic Heavy Ion Collider) am Brookhaven National Laboratory auf Long Island (US-Bundesstaat New York) lässt zwei fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigte Strahlen aus Goldionen gegeneinanderrasen. Wenn zwei dieser »relativistischen« Atomkerne zusammenprallen, herrschen am Ort der Kollision für einen Augenblick so unvorstellbar hohe Temperaturen und Dichten wie bei der Entstehung des Universums. Der künstliche Mini-Urknall gibt Aufschluss über den exotischen Anfangszustand der Materie.

Am Beginn war das Universum erfüllt von einem ultraheißen, superdichten Gebräu aus Quarks und Gluonen, die wild durcheinanderwirbelten und unentwegt zusammenstießen. Eine Prise Elektronen, Photonen und andere leichte Elementarteilchen würzten die Mischung. Die Ursuppe war Billionen von Grad heiß, mehr als hunderttausendmal heißer als das Innere der Sonne.

Doch als der Kosmos expandierte, sank die Temperatur, wie wir das von einem gewöhnlichen Gas kennen, das bei rascher Ausdehnung abkühlt. Die

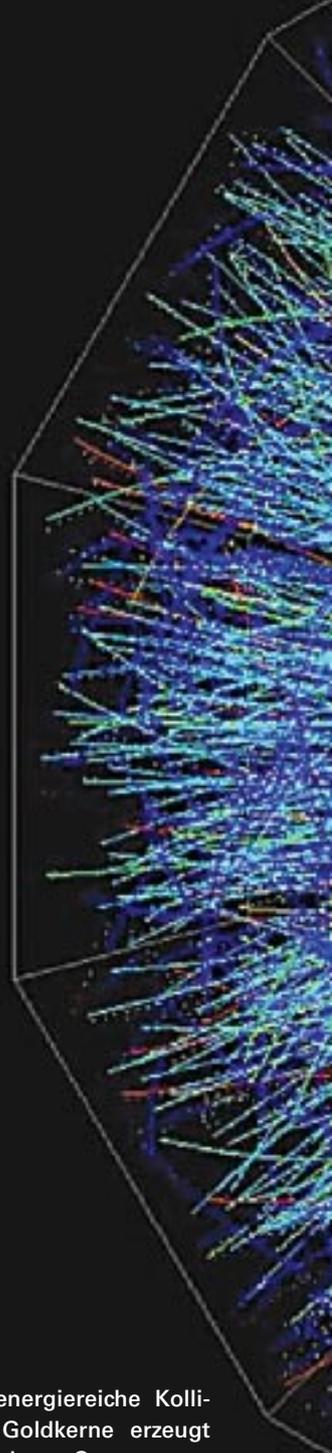
Hektik der Quarks und Gluonen erlahmte, bis einige für kurze Zeit zusammenklebten. Schon nach knapp zehn Mikrosekunden (millionstel Sekunden) wurden sie allesamt durch die zwischen ihnen wirkende starke Kraft dauerhaft gefesselt. Aus Quarks und Gluonen entstanden Hadronen, das heißt Protonen, Neutronen und andere stark wechselwirkende Teilchen.

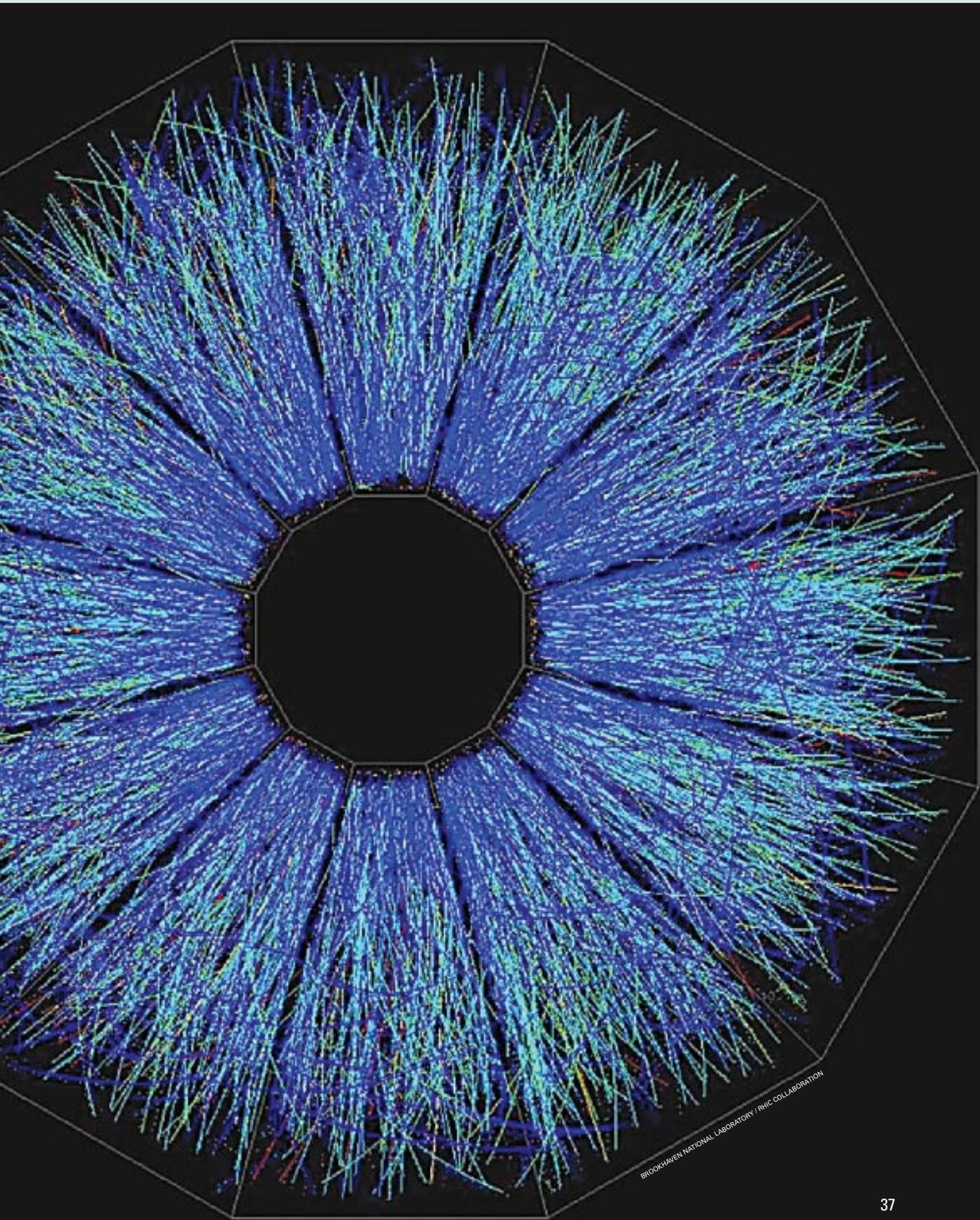
Ein derart abrupter Wandel in den Eigenschaften eines Materials wird Phasenübergang genannt, wie das Gefrieren von Wasser zu Eis. Der kosmische Phasenübergang vom exotischen Quark-Gluon-Gemisch zu vertrauten Protonen und Neutronen ist für Wissenschaftler von höchstem Interesse, denn er verspricht Aufschluss über fundamentale Fragen: Wie hat sich das Universum zu seinem heutigen hochkomplexen Zustand entwickelt? Wie wirkten die Naturkräfte dabei zusammen?

Die Protonen und Neutronen, aus denen heutzutage jeder Atomkern besteht, sind Überbleibsel jener Ursuppe – winzige subatomare Gefängniszellen, in denen die Quarks für immer eingesperrt bleiben. Selbst bei heftigen Kollisionen gibt es für die Quarks kein dauerhaftes Entkommen. Trotz vieler Versuche ist es noch nie gelungen, im Teilchendetektor ein einzelnes Quark zu beobachten.

Der Rhic bietet nun die kostbare Chance, Quarks und Gluonen dennoch außerhalb von Protonen und

Die extrem energiereiche Kollision zweier Goldkerne erzeugt tausende Teilchen, deren Spuren vom Star-Detektor am Rhic aufgezeichnet werden. Während des Stoßes herrschen Bedingungen wie in den ersten Mikrosekunden nach dem Urknall.





BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY / RHIC COLLABORATION

Die Zeitleiste zeigt wichtige Phasen in der frühen Geschichte des Universums. Das Super Proton Synchrotron (SPS) bei Cern, der Rhic sowie der künftige Large Hadron Collider (LHC) stoßen immer weiter zu den ersten Mikrosekunden vor.



▷ Neutronen zu beobachten – in einem kollektiven quasifreien Zustand, der an die ersten Mikrosekunden erinnert. Die Theoretiker taufte diesen Materiezustand Quark-Gluon-Plasma, weil sie bis vor Kurzem annahmen, er gleiche einem ultraheißem Gas aus geladenen Teilchen; ein solches Plasma entsteht beispielsweise im Innern einer Blitzentladung. Doch die größte Überraschung, die der Rhic den Forschern bisher bereitet hat, ist die Erkenntnis, dass sich diese exotische Substanz anscheinend nicht wie ein Gas verhält, sondern wie eine – allerdings höchst eigenartige – Flüssigkeit.

Freiheit für die Quarks!

Als der Theoretiker Steven Weinberg 1977 sein inzwischen klassisches Buch »Die ersten drei Minuten« über die Physik des frühen Universums veröffentlichte, vermied er jede definitive Aussage über die erste Hundertstelsekunde. »Wir wissen einfach noch nicht genug von der Physik der Elementarteilchen, um die Eigenschaften eines solchen Gemischs auch nur annähernd berechnen zu können«, stellte er bedauernd fest. »Unsere Unwissenheit in der Physik des Allerkleinsten ist also gewissermaßen der Schleier, der uns den Blick auf den wirklichen Anfang verwehrt.«

In diesen Jahren begann sich der Schleier zu heben. Man entdeckte, dass

Protonen, Neutronen und alle anderen Hadronen aus Quarks bestehen. Bereits Mitte der 1970er Jahre entstand eine Theorie der starken Wechselwirkung zwischen Quarks, die Quantenchromodynamik (QCD). Dieser Theorie zufolge bilden acht neutrale Teilchen, die Gluonen (nach englisch *glue* für Leim), den Klebstoff, der die Quarks unnachgiebig in den Hadronen festhält.

Das Besondere an der QCD ist, dass die Kopplungsstärke mit sinkendem Quarkabstand schwächer wird, statt wie die gewohnten Kräfte Gravitation und Elektromagnetismus bei Annäherung zu wachsen. Die Physiker nennen dieses seltsame Verhalten asymptotische Freiheit. Das bedeutet: Falls zwei Quarks einander deutlich näherkommen als ein Proton-Durchmesser – rund 10^{-13} Zentimeter –, erfahren sie eine reduzierte Kraft, die sich mit Standardmethoden sehr präzise berechnen lässt. Erst wenn ein Quark versucht, zu entwischen, wird es mit voller Kraft zurückgerissen wie ein Hund an der Leine.

In der Quantenphysik hängen kleine Partikelabstände mit hochenergetischen Kollisionen zusammen. Darum kommt die asymptotische Freiheit erst bei extrem hohen Temperaturen ins Spiel, wenn die Teilchen auf engstem Raum zusammengepfercht sind und immerfort heftig zusammenstoßen.

Gerade die asymptotische Freiheit der QCD ermöglicht den Physikern, den von Weinberg beklagten Schleier zu lüften und zu ergründen, was in den ersten Mikrosekunden geschah. Solange die Temperatur höher lag als zehn Billionen Grad, verhielten sich Quarks und Gluonen praktisch wie unabhängige Teilchen. Selbst bei niedrigeren Temperaturen bis zwei Billionen Grad schwirren die Quarks noch einzeln umher, spürten aber bereits, wie die einschränkende Kraft der QCD an ihnen zerrte.

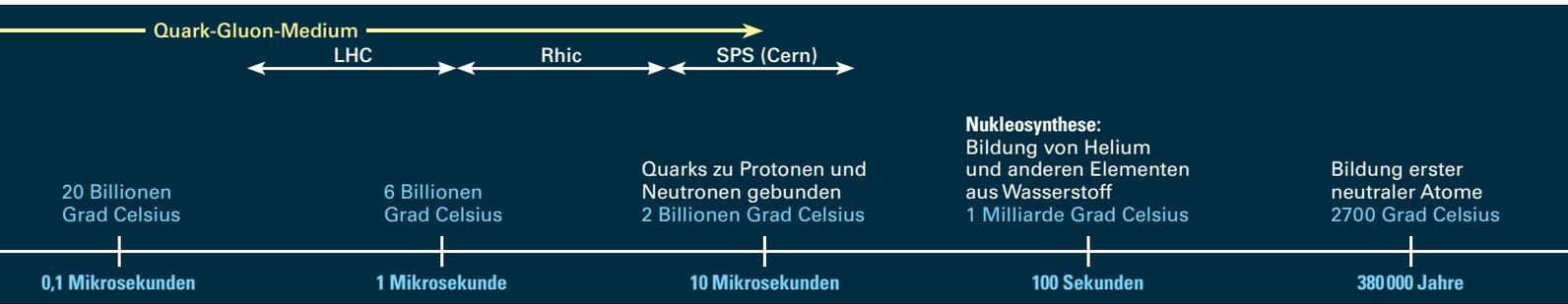
Um solch extreme Bedingungen in irdischen Labors nachzuahmen, müssen Physiker die gewaltigen Temperaturen, Drücke und Dichten der ersten Mikrosekunden reproduzieren. Die Temperatur eines Partikelschwarms entspricht der mittleren kinetischen Energie eines Teilchens, während der Druck mit der Energiedichte des Schwarms wächst. Also gilt es, möglichst hohe Energie in ein möglichst kleines Volumen zu pressen.

Zum Glück stellt uns die Natur extrem dichte Materiekümpchen zur Verfügung: die Atomkerne. Ein Fingerhut voll Kernmaterie würde 300 Millionen Tonnen wiegen. Wie die jahrzehntelange Erfahrung mit der Kollision schwerer Blei- und Goldkerne bei hohen Energien zeigt, übertreffen die dabei auftretenden Materiedichten bei Weitem die Dichte normaler Kernmaterie. Die erzeugten Temperaturen dürften fünf Billionen Grad übersteigen.

Schwere Atomkerne, die je rund 200 Protonen und Neutronen enthalten, verursachen beim Zusammenprall ein viel größeres Inferno als die einzelnen Protonen, mit denen Hochenergiephysiker häufig experimentieren. Statt einer winzigen Explosion mit einer Hand voll emittierter Partikel entsteht ein brodelnder Feuerball aus Tausenden von Teilchen. Diese Menge reicht aus, kollektive Eigenschaften des Feuerballs zu definieren: Temperatur, Dichte, Druck und Viskosität. Das macht einen wichtigen

IN KÜRZE

- ▶ **In den ersten zehn Mikrosekunden** bestand das Universum aus einem brodelnden Mahlstrom fundamentaler Teilchen. Seither sind diese Quarks und Gluonen in den Protonen und Neutronen gefangen, aus denen die Atomkerne bestehen.
- ▶ **Der Relativistische Schwerionenbeschleuniger Rhic** reproduziert das ertümliche Quark-Gluon-Plasma auf kleinstem Raum, indem er Goldkerne fast mit Lichtgeschwindigkeit zur Kollision bringt. Zur großen Überraschung der Physiker verhält sich das bei diesem Mini-Urknall erzeugte Medium nicht wie ein Gas, sondern wie eine fast vollkommene Flüssigkeit.
- ▶ **Modelle des sehr frühen Universums** müssen darum vielleicht revidiert werden. Auch manche Annahmen, mit denen die Physiker ihre Berechnung des Verhaltens von Quarks und Gluonen vereinfachen, stehen auf dem Prüfstein.



Unterschied – wie beim Verhalten einzelner Wassermoleküle gegenüber dem eines ganzen Tropfens.

Der mikroskopische Feuerball

Der Rhic – wie »Rick« ausgesprochen – ist die derzeit modernste Anlage für Schwerionen-Kollisionen. Ältere Beschleuniger schossen Ionenstrahlen auf ruhende Metalltargets. Hingegen ist der Rhic ein Collider, der zwei solche Strahlen gegeneinander führt. Die resultierenden Frontalzusammenstöße erzeugen bei gleicher Teilchengeschwindigkeit viel größere Energien, vergleichbar dem katastrophalen Zusammenprall zweier ein-

ander entgegenrasender Autos anstelle eines bloßen Auffahrunfalls. Die Bewegungsenergie verwandelt sich komplett in die zufallsverteilte thermische Energie der Fragmente, die in fast alle Richtungen entweichen.

Bei den am Rhic erzeugten hochrelativistischen Energien jagen die Ionen mit mehr als 99,99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit im Kreis und erreichen bis 100 GeV (Milliarden Elektronenvolt) Energie pro Kernteilchen; ein GeV entspricht ungefähr der Ruhemasse eines Protons. 870 supraleitende Magneten, die von mehreren Tonnen flüssigen Heliums gekühlt werden, führen die Strah-

len auf zwei verflochtenen Kreisbahnen mit 3,8 Kilometer Umfang. An vier Kreuzungspunkten werden die Strahlen zur Kollision gebracht. Dort registrieren raffinierte Teilchendetektoren namens Brahms, Phenix, Phobos und Star die subatomaren Teilchentrümmer.

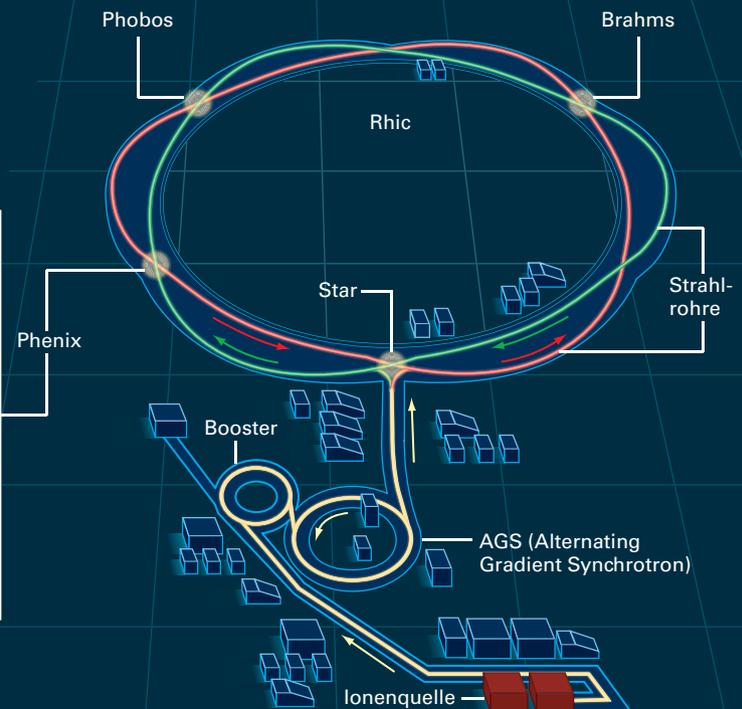
Wenn zwei Goldkerne mit der am Rhic erreichbaren Höchstenergie aufeinanderprallen, konzentrieren sich mehr als 20 000 GeV in einem mikroskopischen Feuerball von weniger als einem billionstel Zentimeter Durchmesser. Die Protonen und Neutronen der Atomkerne schmelzen buchstäblich, und aus der verfügbaren Gesamtenergie entste-

Wie der Rhic Urknall-Partikel erzeugt und nachweist

Der Rhic besteht im Wesentlichen aus zwei Beschleunigerringen mit je 3,8 Kilometer Umfang (rot und grün), in denen schwere Atomkerne 99,99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreichen. Die Strahlrohre kreuzen sich an sechs Punkten. An vier dieser Kreuzungen prallen die Atomkerne frontal zusammen und erzeugen einen Mini-Urknall: Für kurze Zeit herrschen Bedingungen wie bei der Entstehung des Universums. Vier Detektoren namens Brahms, Phenix, Phobos und Star analysieren die bei den Kollisionen erzeugten Teilchenschauer.



Das Phenix-Experiment – hier wegen Wartungsarbeiten teilweise demontiert – sucht nach speziellen Teilchen, die gleich zu Beginn des Mini-Urknalls entstehen.



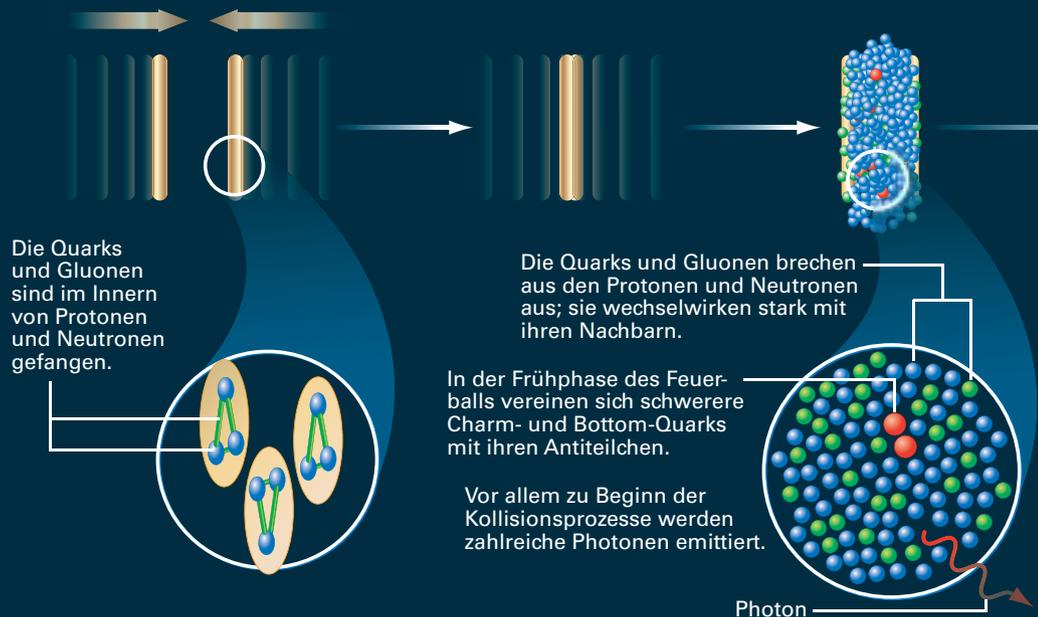
Anfang und Ende eines Mini-Urknalls

Im Rhic treffen Goldkerne fast mit Lichtgeschwindigkeit aufeinander. Jede Kollision durchläuft mehrere Stadien, wobei für kurze Zeit ein expandierender Feuerball aus Gluonen (grün), Quarks und Antiquarks entsteht. Die meisten Quarks und Antiquarks gehören zu den Typen Up, Down und Strange (blau). Die schwereren Charm- und Bottom-Quarks (rot) kommen nur selten vor. Schließlich explodiert der Feuerball als Hadronenschauer (grau), der zusammen mit Photonen und anderen Zerfallsprodukten in den Detektoren nachgewiesen wird. Aus den Eigenschaften dieser Teilchen schließen die Wissenschaftler auf die physikalischen Eigenschaften des Quark-Gluon-Mediums.

Die auf 99,99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Goldkerne werden durch relativistische Effekte abgeflacht.

Die Kernteilchen kollidieren und erzeugen ein Gebiet hochangeregter Quarks und Gluonen.

Nach $0,7 \cdot 10^{-23}$ Sekunden hat sich das Quark-Gluon-Plasma vollständig ausgebildet und erreicht seine höchste Temperatur.



Die Quarks und Gluonen sind im Innern von Protonen und Neutronen gefangen.

Die Quarks und Gluonen brechen aus den Protonen und Neutronen aus; sie wechselwirken stark mit ihren Nachbarn.

In der Frühphase des Feuerballs vereinen sich schwerere Charm- und Bottom-Quarks mit ihren Antiteilchen.

Vor allem zu Beginn der Kollisionsprozesse werden zahlreiche Photonen emittiert.

Photon

▷ hen zahlreiche Quarks, Antiquarks – die Antiteilchen der Quarks – und Gluonen. In der Regel werden für kurze Zeit mehr als 5000 Elementarteilchen freigesetzt. Im Augenblick der Kollision herrscht immenser Druck – das 10^{30} -Fache des Atmosphärendrucks –, und die Temperatur im Feuerball erreicht mehrere Billionen Grad.

Doch schon binnen 50 Billionstel einer Billionstelsekunde ($5 \cdot 10^{-23}$ Sekunden) vereinen sich sämtliche Quarks, Antiquarks und Gluonen wieder zu Hadronen, die auswärts in die umgebenden Detektoren geschleudert werden. Hochleistungsrechner sammeln so viel Information wie möglich über Tausende eintreffender Teilchen. Zwei Experimente, Brahm und Phobos, sind relativ klein und konzentrieren sich auf bestimmte Eigenschaften der Kollisionstrümmer. Die beiden anderen, Phenix und Star, umfassen riesige Mehrzweckgeräte, die dreistöckige Experimentierhallen mit tausenden Tonnen von Magneten, Detektoren, Absorbieren und Abschirmungen füllen (siehe Kasten S. 39).

Für Entwurf, Bau und Betrieb der vier Rhic-Experimente sind separate internationale Arbeitsgruppen aus je 60 bis

500 Wissenschaftlern zuständig. Jede Gruppe verfolgt ihre eigene Strategie, um die enorme Komplexität der Rhic-Ereignisse zu bewältigen. Die Brahm-Kollaboration beschloss, sich auf Überbleibsel der ursprünglichen Kernteilchen zu konzentrieren, die fast in Richtung der kollidierenden Goldkerne entweichen. Phobos hingegen beobachtet Teilchen über einen möglichst großen Winkelbereich und untersucht Korrelationen zwischen ihnen.

Die große Überraschung

Das Star-Experiment umfasst die größte »digitale Kamera« der Welt: Ein riesiger Gaszylinder liefert dreidimensionale Bilder aller geladenen Teilchen, die in einem großen Öffnungswinkel um die Strahlachse emittiert werden (Bild S. 37). Phenix schließlich sucht nach speziellen Teilchen, die ganz zu Anfang der Kollisionen entstehen und unversehrt aus der brodelnden Quark-Gluon-Suppe entkommen; daraus entsteht eine Art Röntgenaufnahme vom Innern des Feuerballs.

Aus allen vier Experimenten ergibt sich ein übereinstimmendes physikalisches Bild. Die Quarks und Gluonen brechen tatsächlich aus dem Arrest aus

und zeigen – wenn auch nur momentan – kollektives Verhalten. Doch zur größten Überraschung der Theoretiker verhält sich dieses heiße Gemisch nicht wie ein ideales Gas, sondern wie eine Flüssigkeit.

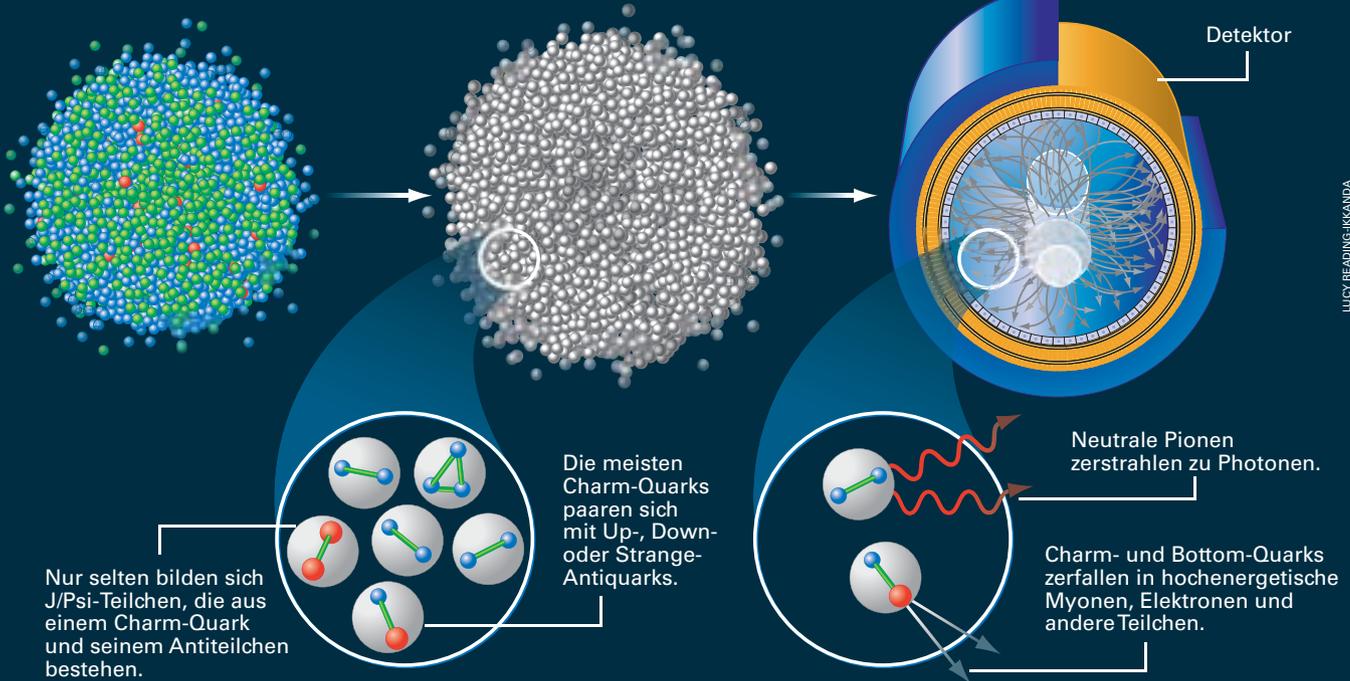
Bei frontalen Zusammenstößen zwischen zwei Goldkernen werden erstaunliche Energiedichten erreicht, die ungefähr das Hundertfache der gewöhnlichen Kerndichte betragen. Der Grund ist vor allem ein relativistischer Effekt, die so genannte Längenkontraktion. Aus der Laborspektive erscheinen die beiden Kerne unmittelbar vor ihrer Begegnung als ultradünne Scheiben; ihre gesamte Energie konzentriert sich somit im Augenblick des Zusammenpralls auf ein winziges Volumen. Physiker schätzen die resultierende Energiedichte auf mindestens fünfzehnmal höher als zur Freisetzung der Quarks und Gluonen erforderlich. Diese Teilchen beginnen sofort kreuz und quer umherzuflitzen, stoßen wiederholt zusammen und tauschen Energie aus, wodurch eine mehr oder weniger thermische Zufallsverteilung entsteht.

Indizien für die blitzschnelle Bildung eines heißen, dichten Mediums liefert das so genannte Jet-Quenching (etwa: Teilchenschauer-Löschung). Wenn zwei Pro-

Enormer Druck treibt das System fast mit Lichtgeschwindigkeit auseinander.

Nach $5 \cdot 10^{-23}$ Sekunden vereinen sich Quarks und Gluonen wieder zu Hadronen – zu Pionen, Kaonen, Protonen und Neutronen.

Die Hadronen rasen fast mit Lichtgeschwindigkeit auf die Detektoren zu, wobei einige Partikel unterwegs zerfallen.



tonen mit hoher Energie kollidieren, stoßen einige ihrer Quarks und Gluonen nahezu frontal zusammen und erzeugen beim Rückprall zwei schmale, entgegengesetzte Hadronenschauer – so genannte Jets (siehe Kasten auf S. 42). Doch die Phenix- und Star-Detektoren weisen bei Gold-Gold-Kollisionen immer nur einen der beiden Jets nach. Dieser eine Jet zeigt zwar an, dass tatsächlich freie Quarks und Gluonen mit hoher Energie kollidieren. Aber wo ist der zweite? Das zurückprallende Quark oder Gluon muss sich tief in das eben entstandene heiße, dichte Medium eingegraben haben; dabei hat es seine hohe Energie durch viele Begegnungen mit niederenergetischen Quarks und Gluonen eingebüßt. Der Vorgang gleicht dem Pistolenschuss in einen Wasserbehälter: Das Projektil verliert so viel Energie an die langsamen Wassermoleküle, dass es die andere Seite des Behälters nicht zu durchschlagen vermag.

Anzeichen dafür, dass sich das Quark-Gluon-Medium wie eine Flüssigkeit verhält, traten in den Rhic-Experimenten in Form eines Phänomens auf, das als elliptischer Fluss bezeichnet wird. Wenn die Stöße nicht ganz zentral erfolgen – was häufig der Fall ist –, misst der Detek-

tor eine elliptische Verteilung der herausgeschleuderten Hadronen. Energereiche Hadronen werden vorzugsweise in der Streuebene emittiert, weniger zahlreich senkrecht zu dieser Ebene; die Streuebene wird durch die Stoßrichtung sowie durch die Lage der Stoßpartner aufgepannt. Das elliptische Muster zeigt an, dass im Quark-Gluon-Medium erhebliche Druckgradienten herrschen müssen und dass Quarks und Gluonen sich kollektiv verhalten, bevor sie wieder Hadronen bilden. Sie ähneln dabei eher einer Flüssigkeit; jedenfalls verhalten sie sich nicht wie ein Gas, denn aus einem Gas würden die Hadronen gleichförmig in alle Richtungen austreten.

Daraus folgt, dass Quarks und Gluonen im kurzen Rausch ihrer Befreiung ziemlich heftig miteinander wechselwirken müssen. Durch die asymptotische Freiheit der QCD sollte die Stärke ihrer Wechselwirkung eigentlich sinken, doch das wird anscheinend durch eine dramatisch zunehmende Anzahl neu befreiter Teilchen mehr als wettgemacht. Kaum sind unsere armen Gefangenen glücklich aus ihren Zellen ausgebrochen, bleiben sie auf dem Gefängnishof mit allen anderen Ausbrechern in einem heillosen

Gedränge stecken. Dieser eng gekoppelte Teilchentanz ist genau das, was in einer Flüssigkeit geschieht, und passt überhaupt nicht zu dem naiven theoretischen Bild eines fast idealen Gases aus kaum wechselwirkenden Partikeln. Die Details der elliptischen Asymmetrie lassen zudem vermuten, dass diese überraschende Flüssigkeit fast ohne Viskosität fließt. Sie ist vermutlich die vollkommenste Flüssigkeit, die je beobachtet wurde.

Eine harte Nuss für Theoretiker

Es ist besonders schwierig, die starken Wechselwirkungen von Quarks und Gluonen zu berechnen, wenn sie unvorstellbar dicht zusammengedrückt sind und fast mit Lichtgeschwindigkeit entweichen. Oft versuchen die Theoretiker, mit Brachialgewalt Lösungen der QCD zu finden, indem sie riesige Gruppierungen spezieller Mikroprozessoren auf das Problem ansetzen. Bei diesem so genannten Gitteransatz wird der Raum durch ein Gitter diskreter Punkte approximiert; die QCD-Gleichungen werden durch sukzessive Näherungen auf dem Gitter gelöst.

Mit dieser Methode wurden zum Beispiel Druck und Energiedichte als Funktion der Temperatur berechnet; beide stei-

▷ gen dramatisch, wenn Hadronen in ein Quark-Gluon-Medium verwandelt werden. Allerdings eignet sich das Verfahren am besten für statische Probleme, bei denen das Medium im thermodynamischen Gleichgewicht ist, wovon unter den rasch wechselnden Bedingungen eines Mini-Urknalls im Rhic gewiss nicht die Rede sein kann. Selbst mit den raffiniertesten Gitter-QCD-Rechnungen lassen sich dynamische Eigenschaften wie Jet-Quenching und Viskosität nicht bestimmen. Die Viskosität eines Systems stark wechselwirkender Teilchen ist zwar vermutlich winzig, aber auf Grund der Quantenmechanik darf sie nicht völlig verschwinden. Die Frage »Wie klein kann sie sein?« lässt sich nur schwer beantworten.

Einen Ausweg bieten überraschenderweise die Stringtheorien der Quantengravitation. Eine ungewöhnliche Vermutung des theoretischen Physikers Juan Maldacena vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) verknüpft eine Stringtheorie in einem gekrümmten fünfdimensionalen Raum mit einer QCD-ähnlichen Partikeltheorie auf der vierdimensionalen Grenze dieses Raums (siehe »Schwerkraft – eine Illusion?« von Juan

Maldacena, SdW 3/2006, S. 36). Die beiden Theorien sind mathematisch äquivalent, obwohl sie völlig verschiedene Bereiche der Physik zu beschreiben scheinen. Wenn die QCD-ähnlichen Kräfte erstarken, wird die zugehörige Stringtheorie schwach und somit leichter beherrschbar. Eine Größe wie die Viskosität, die in der QCD schwer zu berechnen ist, hat in der Stringtheorie ein mathematisch viel einfacheres Gegenstück – in diesem Fall die Absorption von Gravitationswellen durch ein Schwarzes Loch.

Heiß, dicht und dennoch flüssig

Aus diesem Ansatz ergibt sich eine sehr kleine, aber von null verschiedene Untergrenze für die Viskosität; sie liegt bei einem Zehntel des Werts für superflüssiges Helium. Anscheinend kann uns die Stringtheorie auf diese Weise helfen, das Verhalten der Quarks und Gluonen in den ersten Mikrosekunden nach dem Urknall zu verstehen.

Wieso fließt ausgerechnet die heißeste, dichteste Materie, die je erzeugt wurde, reibungsloser als alle anderen bekannten Flüssigkeiten? Das ist die größte

Frage, vor der die Physiker am Rhic derzeit stehen. Die Fülle der experimentell gewonnenen Daten zwingt die Theoretiker schon jetzt, einige lieb gewordene Vorstellungen über die uranfängliche Materie zu überdenken. Früher wurden die freigesetzten Quarks und Gluonen in den meisten Rechnungen nicht wie eine Flüssigkeit behandelt, sondern als ideales Gas. Die Theorie der QCD und der asymptotischen Freiheit ist nicht in Gefahr; es gibt keinen Grund, an den grundlegenden Gleichungen zu zweifeln. Strittig sind die vereinfachenden Annahmen, mit denen die Theoretiker Schlussfolgerungen aus den Gleichungen ziehen.

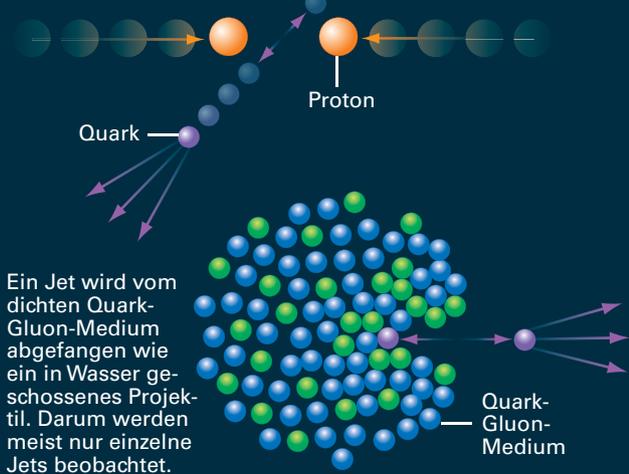
Um diese Fragen zu klären, untersuchen die Experimentatoren die verschiedenen Arten von Quarks, die aus einem Mini-Urknall hervorgehen, insbesondere die schwereren Varianten. Als die Quarks im Jahre 1964 vorhergesagt wurden, postulierte man drei Typen: Up, Down und Strange. Da diese drei Quarks und ihre Antiquarks Massen unter 0,15 GeV haben, werden sie bei den Rhic-Kollisionen reichlich und in ungefähr gleichen Mengen erzeugt. In den 1970er Jahren tauchten zwei schwerere Quarks namens

Indizien für eine dichte Quark-Gluon-Flüssigkeit

Insbesondere zwei Phänomene zeigen an, dass das exotische Quark-Gluon-Medium einer dichten Flüssigkeit gleicht: Jet-Quenching und elliptischer Fluss. Aus dem Jet-Quenching

Jet-Quenching

Beim Zusammenstoß von Protonen werden zwei Quarks gestreut und erzeugen entgegengesetzte Teilchenschauer, so genannte Jets.

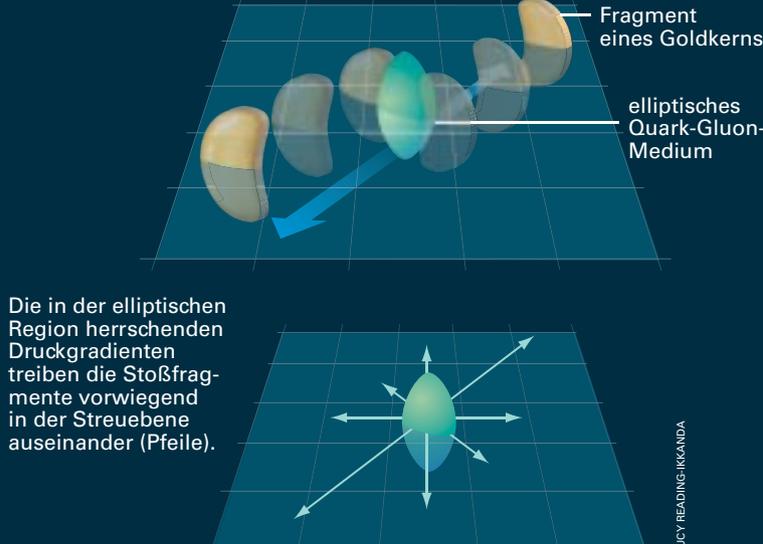


Ein Jet wird vom dichten Quark-Gluon-Medium abgelenkt wie ein in Wasser geschossenes Projektil. Darum werden meist nur einzelne Jets beobachtet.

folgt, dass die Quarks und Gluonen sehr dicht gepackt sind. Der elliptische Fluss wiederum würde nicht auftreten, wenn das Medium ein Gas wäre.

Elliptischer Fluss

Bei nichtzentralen Stößen zwischen Goldkernen nimmt das Quark-Gluon-Medium eine elliptische Form an.



Die in der elliptischen Region herrschenden Druckgradienten treiben die Stoßfragmente vorwiegend in der Streuebene auseinander (Pfeile).



Der Alice-Detektor soll 2008 am Large Hadron Collider bei Cern in Betrieb gehen. Er kann Kollisionen von Bleikernen analysieren, die fünfzigmal energiereicher sein werden als der am Rhic erzeugte Mini-Urknall.

PETER GINTER

Charm und Bottom auf, mit Massen von rund 1,6 und 5 GeV. Da das Erzeugen schwerer Quarks gemäß Einsteins Gleichung $E = mc^2$ weitaus mehr Energie erfordert, entstehen sie beim Mini-Urknall früher, wenn die Energiedichte größer ist, und viel seltener. Gerade ihre Seltenheit macht sie zu wertvollen Indikatoren für die Strömungsmuster und andere Eigenschaften, die sich zu Beginn eines Mini-Urknalls ausbilden.

Die Experimente Phenix und Star eignen sich gut für solche detaillierten Untersuchungen, weil sie hochenergetische Elektronen und Myonen nachweisen können, die oft aus dem Zerfall der schweren Quarks hervorgehen. Indem die Physiker die Zerfallsprodukte zum Ursprung zurückverfolgen, gewinnen sie entscheidende Informationen über die exotischen Quarks. Wegen der größeren Massen zeigen schwere Quarks ein anderes Flussverhalten als ihre viel häufigeren Verwandten. Durch Messung solcher Unterschiede möchten die Forscher präzise Werte für die erwartete winzige Restviskosität erhalten.

Insbesondere Charm-Quarks sind aus einem weiteren Grund für die Erforschung des Quark-Gluon-Mediums nützlich. In der Regel entsteht ungefähr ein Prozent dieses Quarktyps in enger Ummarmung mit seinem Antiquark; beide bilden ein neutrales Teilchen namens J/Psi. Da der Abstand zwischen den Partnern nur ein Drittel des Protonradius beträgt, sollte die Erzeugungsrate der J/Psi-Teilchen in empfindlicher Weise von der zwischen den Quarks auf kurze Distanz wirkenden Kraft abhängen. Die Theoretiker vermuten, dass diese Kraft stark ab-

nimmt, weil der umgebende Schwarm leichter Quarks und Gluonen das Charm-Quark und sein Antiteilchen voneinander abschirmt; dadurch würden weniger J/Psi-Teilchen produziert werden.

Den Phenix-Resultaten zufolge lösen sich die J/Psi-Teilchen tatsächlich in der Flüssigkeit; das war zuvor auch bei Cern, dem europäischen Forschungszentrum für Teilchenphysik bei Genf, beobachtet worden. Am Rhic erwartete man, dass die Erzeugung von J/Psi-Teilchen wegen der höheren Dichten noch stärker unterdrückt würde. Doch wie es aussieht, macht sich bei diesen Dichten ein konkurrierender Mechanismus bemerkbar, vielleicht eine Neubildung von J/Psi-Teilchen. Künftige Messungen werden sich auf dieses Rätsel konzentrieren, indem sie nach anderen Paaren schwerer Quarks suchen und beobachten, ob und wie deren Erzeugung unterdrückt wird.

Bei einem anderen Ansatz versucht man die Quark-Gluon-Flüssigkeit buchstäblich in ihrem eigenen Licht zu sehen. Eine heiße Brühe dieser Teilchen sollte blitzartig aufleuchten, denn sie emittiert hochenergetische Photonen, die dem Medium ungehindert entkommen. Wie Astronomen, welche die Temperatur eines fernen Sterns anhand seines Strahlungsspektrums messen, versuchen die Physiker mit den energiereichen Photonen die Temperatur der Quark-Gluon-Flüssigkeit zu bestimmen. Allerdings lässt sich dieses Spektrum nur sehr schwer ermitteln, da durch den Zerfall bestimmter Hadronen – der neutralen Pionen – viele andere Photonen entstehen. Obwohl diese Photonen erst erzeugt werden, nachdem die Quark-Gluon-Flüssigkeit längst wieder zu

Hadronen kondensiert ist, können die Detektoren sie nicht unterscheiden.

Unterdessen bereiten viele Physiker am Large Hadron Collider (LHC) bei Cern den Vorstoß zur nächsten Energiegrenze vor (siehe »Ring der Erkenntnis« von Gerhard Samulat, Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 80). Von 2008 an werden dort mit Bleikern-Kollisionen Energien von mehr als einer Million GeV erzeugt werden. Ein internationales Team von gut tausend Physikern baut derzeit den Mammutdetektor Alice, der die Fähigkeiten von Phenix und Star in sich vereinigt. Der vom LHC erzeugte Mini-Urknall wird ein Mehrfaches der am Rhic erreichten Energiedichte erzielen, und die Temperatur dürfte zehn Billionen Grad übersteigen. Dann können die Physiker sogar Bedingungen herstellen, die während der allerersten Mikrosekunde des Urknalls herrschten.

Die entscheidende Frage ist, ob das am Rhic beobachtete flüssigkeitsähnliche Verhalten auch bei den höheren Temperaturen und Dichten des LHC bestehen bleibt. Manche Theoretiker vermuten, die zwischen den Quarks wirkende Kraft müsse erlahmen, sobald deren mittlere Energie im LHC ein GeV übersteigt, und dann werde sich das Quark-Gluon-Plasma endlich verhalten wie ursprünglich erwartet – wie ein Gas. Andere behaupten, die QCD-Kraft könne bei diesen höheren Energien nicht schnell genug abnehmen; Quarks und Gluonen würden weiterhin wie in einer Flüssigkeit eng gekoppelt bleiben. Diesen Streit vermag nur das Experiment zu entscheiden, das uns wohl noch weitere Überraschungen bescheren wird. ◀



Michael Riordan (oben) lehrt Geschichte der Physik an der Stanford-Universität in Palo Alto und an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz. Er hat populärwissenschaftliche Bücher über Physik und Kosmologie verfasst. **William A. Zajc** ist Physikprofessor an der Columbia-Universität in New York und seit acht Jahren wissenschaftlicher Sprecher des Phenix-Experiments am Rhic, dem Relativistischen Schwerionen-Collider auf Long Island.



What have we learned from the Relativistic Heavy Ion Collider? Von Thomas Ludlum und Larry McLerran in: Physics Today, Bd. 56, S. 48, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852733.

Warum Mütter klüger sind

Das Gehirn weiblicher Säugetiere richtet sich auf eine Mutterschaft ein. Es gewinnt an Kompetenzen – zum Wohl des Nachwuchses.

Von Craig Howard Kinsley
und Kelly G. Lambert

Ein Kind zur Welt zu bringen und großzuziehen, bedeutet nicht nur mental, sondern auch für das Gehirn eine große Umstellung. Was Schwangeren und Müttern da innerlich widerfährt, konnte die Wissenschaft bisher nur unzureichend aufklären. Allmählich verstehen wir immerhin die physiologischen Hintergründe besser. Dazu haben hauptsächlich Tierstudien verholfen. Viele der grundlegenden Verhaltensänderungen, die mit einer Schwanger- und Mutterschaft einhergehen, verlaufen letztlich bei allen Säugetieren recht ähnlich – ob bei Nagetieren, Affen oder bei Menschen.

Versetzen wir uns in ein Tierweibchen, etwa in eine Nagetiermutter. Früher kümmerte sie sich hauptsächlich um ihre eigenen Bedürfnisse und ihr eigenes Wohlergehen. Jetzt steht in ihrem Verhalten die Sorge für die Jungen im Vordergrund. Was bringt das Tier dazu? Nach neueren Forschungen scheinen die starken Hormonumschwünge während Schwangerschaft, Geburt und Stillzeit das Gehirn umzumodulieren. In einigen Hirnregionen werden die Zellen größer, andere Bezirke werden sogar umstrukturiert.

Manche der betroffenen Hirngebiete helfen, wie zu erwarten, das mütterliche Verhalten zu kontrollieren und zu steuern. Sie sind beispielsweise beim Nestbau hochaktiv, bei der Brutpflege oder

etwa dann, wenn das Weibchen seinen Nachwuchs beschützt. Erstaunlicher ist, dass sich unter den Hormoneinflüssen auch Zonen verändern, die arbeiten müssen, wenn das Tier etwas lernt oder wenn es sein Gedächtnis beansprucht. Auch Hirngebiete für Angst- und Stressreaktionen passen sich an die neue Situation an. Kürzlich konnten wir demonstrieren, wie viel besser Tiermütter manche Umweltanforderungen bewältigen. So übertreffen Nagermütter jungfräuliche Weibchen darin, sich räumlich zu orientieren oder Futter aufzustöbern. Mehr Geschick, mehr Mut und ein besserer Orientierungssinn dürften letztlich dem Nachwuchs zugutekommen. Besonders verblüfft waren wir allerdings darüber, dass die Nagerweibchen auch noch nach Ende der Mutterschaft, ja bis ins Alter, versierter blieben als Artgenossinnen, die nie Junge hatten.

Hirnevolution dank der Frauen

Es erscheint sehr wohl möglich, dass eine Mutterschaft auch die mentale Konstitution von Frauen stärkt. Wahrscheinlich werden wichtige mütterliche Verhaltensweisen beim Menschen von den gleichen Gehirnregionen gesteuert wie bei Tieren. Einige Forscher spekulieren, mütterliches Verhalten sei für die Evolution des Säugergehirns einer der entscheidenden Faktoren, eine wichtige treibende Kraft gewesen.

Bereits vor fünfzig Jahren erkannten Wissenschaftler, dass die Schwangerschaftshormone Östrogen und Proges-

teron mütterliche Gefühle hervorbringen helfen. Seit den 1940er Jahren hatte Frank A. Beach von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) bei Ratten, Hamstern, Katzen und Hunden Einflüsse dieser Hormone unter anderem auf deren Aggressions- und Sexualverhalten nachgewiesen. Den Stellenwert dieser Hormone für die Brutpflege demonstrierten dann Daniel S. Lehrman und Jay S. Rosenblatt, damals an der Rutgers-Universität in New Brunswick im Bundesstaat New York. Als Versuchstiere hatten sie Ratten beobachtet. Robert S. Bridges, der heute an der Tufts-Universität in Medford (Massachusetts) arbeitet, führte solche Forschungen fort. Einer Studie zufolge, die er 1984 veröffentlichte, steigt die Produktion beider Hormone in gewissen Schwangerschaftsphasen an. Die Art, wie sie zusammenspielen und schließlich abnehmen, scheint darüber zu bestimmen, ob mütterliches Verhalten auftritt. Bridges und seine Kollegen untersuchten auch Wirkungen des Hormons Prolactin, das die Milchbildung fördert. Prolactingaben animierten Rattenweibchen, die mit Östrogen und Progesteron vorbehandelt worden waren, zur Brutpflege.

Neben diesen Hormonen fördern offenbar noch andere Stoffe Muttergefühle ▷

▶ **Mutterschaft fordert vom Gehirn Höchstleistungen. Darauf stellt es sich schon in der Schwangerschaft ein.**



▷ und mütterliches Verhalten. 1980 erkannte Alan R. Gintzler von der Staatsuniversität von New York, dass auch Endorphine, hirneigene schmerzstillende Proteine, mithelfen, damit ein Weibchen seine Jungen annimmt. Während der Tragzeit und besonders kurz vor der Geburt bildet das Gehirn vermehrt Endorphine. Offensichtlich können sie auch Brutpflegeverhalten anstoßen. Damit ein Säugetierweibchen seine Jungen versorgt, müssen folglich eine Reihe hormoneller und anderer biochemischer Systeme zusammenarbeiten. Auf die hormonellen Veränderungen während der Schwangerschaft spricht das Gehirn sehr genau an.

Süchtig nach Neugeborenen

Die für Mutterverhalten zuständigen Hirnregionen kennen wir inzwischen weitgehend (Bildkasten rechts). Michael und Marilyn Numan vom Boston College in Chestnut Hill (Massachusetts) identifizierten als eine zentrale Schaltstelle einen Abschnitt des Hypothalamus – das mediale präoptische Areal (mPOA). Setzt man dort bei Rattenmüttern eine Läsion oder injiziert an der Stelle Morphin, so vernachlässigen sie ihre Jungen. Allerdings müssen weitere Hirngebiete mitarbeiten, wenn mütterliches Verhalten auftritt. In jedem dieser Hirnstrukturen tragen Nervenzellen reichlich Rezeptoren für die Hormone und für andere Signalsubstanzen. Der Neurowissenschaftler Paul MacLean vom Nationalen Institut für Geistige Gesundheit in Bethesda (Maryland) vermutet, dass auch neuronale Bahnen teilnehmen, die vom Hypothalamus zum Gyrus cinguli verlaufen, also von der zentralen Schaltstation zu einer Stelle, die Gefühle reguliert. Ein Rattenweibchen mit geschädigtem Gyrus cinguli versorgt seine Jungen nicht. MacLean vertritt die These, dass den Säugetieren über das alte Reptilienghirn sozusagen ein weiteres, fortschrittlicheres übergestülpt wurde. Ein

entscheidender Schritt in dieser Evolution könnte gewesen sein, dass jene Nervenbahnen entstanden.

Ist mütterliches Verhalten durch die Hormone einmal in Gang gesetzt, scheint das Gehirn sie dafür erstaunlicherweise nicht mehr so stark zu benötigen. Jetzt wird die Mutter allein durch die Jungen genügend stimuliert, sie gut zu betreuen. Obwohl so ein Neugeborenes wirklich lästig, anspruchsvoll und in vieler Hinsicht nicht gerade angenehm ist, weil es rundum versorgt werden muss, mitunter stinkt und nur mit Unterbrechungen schläft, übertrifft bei Tieren kein anderes Verhalten an Hingabe das einer Mutter. Sogar Sexualtriebe und Fressen verblassen dagegen. Nach Joan I. Morrell von der Rutgers-Universität können Jungtiere allein durch ihr Vorhandensein eine so starke Belohnung darstellen, dass dies die Mutter in ihrer Zuwendung genügend bestärkt. Nicht einmal Kokain bringt Muttertieren größere Wohlgefühle: vor die Wahl gestellt, ziehen sie neugeborene Junge vor.

Kürzlich untersuchte der Physiologe Craig Ferris von der Universität von Massachusetts in Worcester die Gehirnaktivität säugender Rattenweibchen mit dem Kernspintomografen. Tatsächlich wächst beim Säugen die Aktivität im Nucleus accumbens, einem Belohnungszentrum des Gehirns. Als Ronald J. Gandelman von der Rutgers-Universität Rattenmüttern beibrachte, einen Hebel zu drücken, woraufhin jedes Mal noch ein Jungtier in ihren Käfig rutschte, waren die Tiere unermüdlich. Sie betätigten die Taste, bis es rundum von rosa-nackten kleinen Wesen wimmelte.

Möglicherweise bewirkt das Säugen an den Zitzen, dass kleine Mengen von Endorphinen auftreten, die dann gewissermaßen wie Opiate eine Art Drogeneffekt entwickeln. Einen ähnlichen Effekt könnte das Hormon Oxytocin erzielen, das beim Säugen und überhaupt

beim Kontakt zu den Jungen freigesetzt wird. Dergleichen mag der Hintergrund sein, wieso sich einfache Säugetiere derart intensiv um ihren Nachwuchs kümmern, obwohl sie sicherlich nicht von Grundsätzen und hohen Gefühlen getragen sind, die beim Menschen hinzukommen: Es fühlt sich einfach gut an.

Wie steht es da mit menschlichen Müttern? Der Neurowissenschaftler Jeffrey P. Lorberbaum von der Medizinischen Universität von Süd-Carolina in Charleston hat die Gehirnaktivität von Frauen mittels Tomografie aufgezeichnet, wenn er ihnen Tonbandaufnahmen ihrer schreienden Babys vorspielte. Er erhielt dabei ganz ähnliche Erregungsmuster wie bei den Tierrmüttern. Im Hypothalamus etwa arbeitete die gleiche Hirnregion (das mediale präoptische Areal). Auch die präfrontale und orbitofrontale Rinde leuchteten bei den Frauen auf. Eine andere Studie – von Andreas Bartels und Semir Zeki vom University College in London – demonstrierte, dass das Belohnungssystem des Gehirns anspricht, wenn eine Mutter ihr Kind nur anschaut. Besitzt das Säugehirn sozusagen einen Schaltkreis für das Muttersein?

Schwangerschaft kompensiert Reizarmut

Frühe Hinweise darauf, dass sich das Gehirn eines Säugeweibchens durch Schwanger- und Mutterschaft verändert, fand Marian C. Diamond von der Universität von Kalifornien in Berkeley in den 1970er Jahren. Wachsen Ratten in einem mit vielen Anregungen – Spielzeug, Laufrädern, Röhren – ausgestatteten Käfig auf, so wird die Hirnrinde dicker und faltet sich stärker als bei Aufzucht in öder Umgebung. Bei viel Abwechslung und Anregung geschieht das auch noch bei älteren Tieren. Wie Diamond entdeckte, gewinnen Weibchen, auch wenn sie in einem kargen Käfig leben, in der Schwangerschaft eine ebenso komplex strukturierte Hirnrinde, wie sie Weibchen haben, die in einer anregungsreichen Umwelt leben. Offenbar, so überlegte die Forscherin, fördern hormonelle Einflüsse im Zusammenhang mit fetalen Faktoren die Struktur der Hirnrinde.

Zwanzig Jahre später untersuchten Neurowissenschaftler das mediale präoptische Areal des Hypothalamus. Lori Keyser, eine Mitarbeiterin Kinsleys, wies

IN KÜRZE

- ▶ **Hormoneinflüsse** in Schwanger- und Mutterschaft verändern bei Säugeweibchen nicht nur Hirnregionen für mütterliches Verhalten, sondern sie modifizieren auch für **Gedächtnis und Lernen** zuständige Areale.
- ▶ Die meisten Studien dazu stammen bisher von **Nagetieren**. Die Tierrmütter können sich besser orientieren und finden leichter Nahrung als jungfräuliche Artgenossinnen.
- ▶ Ob auch **das menschliche Gehirn** in dieser Weise profitiert, möchten Forscher als Nächstes herausfinden.

nach, dass die Zellkörper der dortigen Neuronen bei trächtigen Ratten größer werden (siehe Bild S. 50). Auch die Menge und Länge der Zellausläufer, über die Signale eintreffen (die Dendriten), nehmen im Verlauf der Tragzeit zu. Das Gleiche geschieht, wenn man Weibchen hormonell so einstellt, als wären sie schwanger. Offenbar bereiten die Hormone diese Region im Hypothalamus auf Geburt und Mutterschaft vor. Sofort nach der Geburt kann dieses Hirngebiet dann dafür sorgen, dass das Weibchen

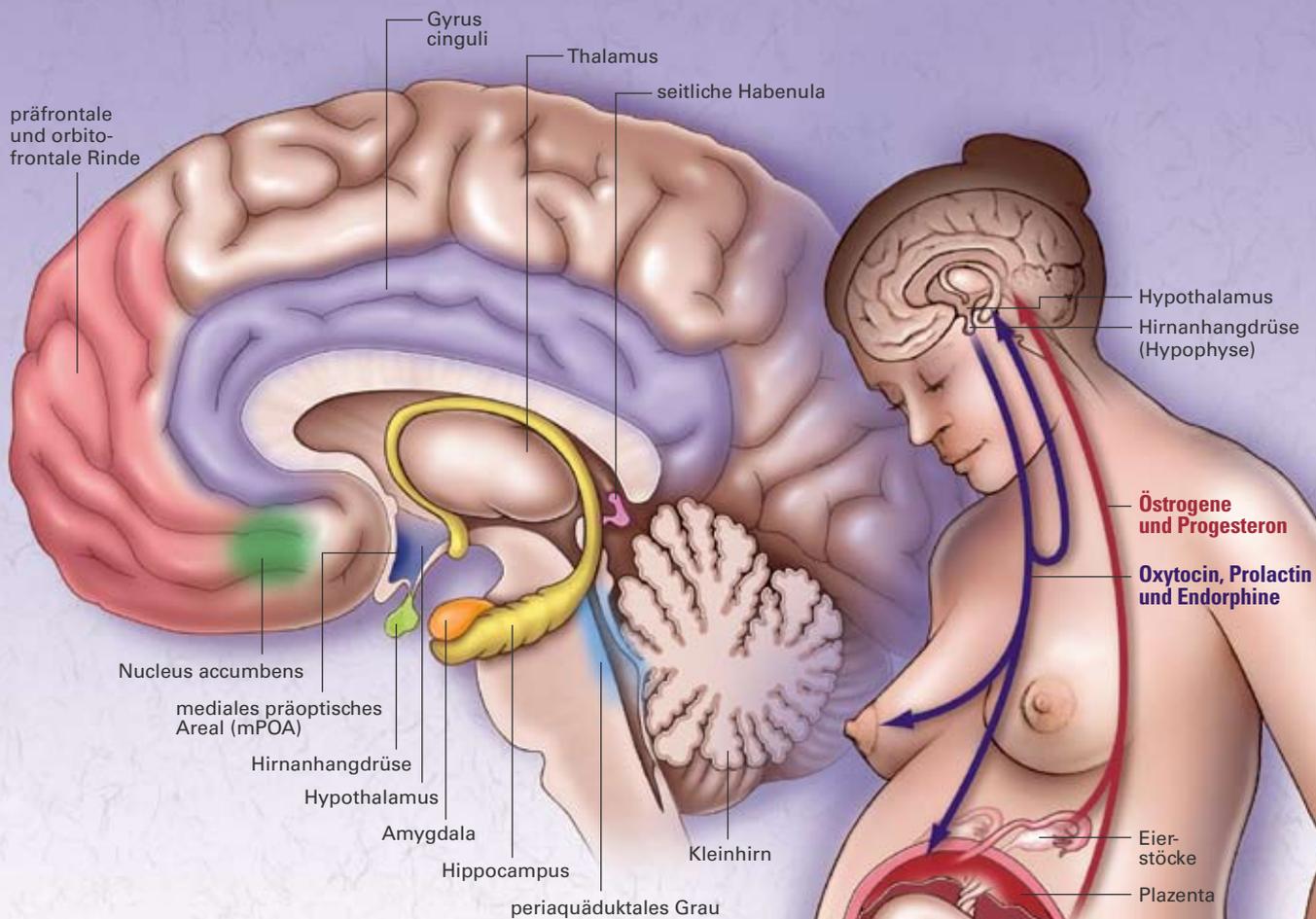
seinen Jungen volle Aufmerksamkeit und alle Fürsorge schenkt.

Muttersein bedeutet allerdings einiges mehr als nur den Nachwuchs zu füttern, putzen und wärmen. Wenn ein Weibchen seine Jungen hütet, setzt es sich auch Gefahren aus – und ebenso, wenn es sie allein lassen muss, um für sich selbst Nahrung zu suchen. Beutezüge sollten darum schnell vonstatten gehen und so ergiebig wie möglich sein, damit das Tier dem Nest nicht so lange fernbleibt. Wir überlegten zweierlei: Ers-

tens müsste sich das Muttertier besonders gut zurechtfinden, also sich beispielsweise leicht orientieren können. Zweitens dürfte es nicht besonders ängstlich sein, sodass es ihm leichter fiel, das Nest zügig zu verlassen, größere Distanzen zurückzulegen und sich den Gefahren eines Beutezugs auszusetzen.

Tatsächlich konnten wir 1999 zeigen, dass Fortpflanzungserfahrung das räumliche Lernen und Gedächtnis von Rattenweibchen stärkt. Wir hatten Versuchstiere in verschiedenen Labyrinth

Denken für zwei



Die hier eingezeichneten Hirngebiete dürften daran beteiligt sein, das Verhalten einer Mutter zu steuern und zu regulieren. Mehrere Hormone wirken dabei mit, Hirnleistungen auf die Anforderungen einzustellen. Zum Beispiel scheinen die weiblichen Geschlechtshormone Östrogen und Progesteron – wovon Eierstöcke und Plazenta in der Schwangerschaft große Mengen bilden – zu veranlassen, dass sich die Nervenzellen im medialen präoptischen Areal (mPOA) des Hypothalamus vergrößern, einem Zentrum für mütterliche Reaktionen. Diese beiden Hormone sorgen auch dafür, dass sich signalempfangende Oberflächen im Hippocampus vermehren, der für Gedächtnis und Lernen zuständig ist. Auch das Wehenhormon Oxytocin stimuliert den Hippocampus. Das Milchhormon Prolactin scheint nicht nur die Milchdrüsen anzuregen und die Endorphine nicht nur den Geburtsschmerz zu lindern.

TAMITOLA

▷ getestet, wie sie in solchen Studien üblich sind (siehe Kasten S. 52/53). Dabei erinnerten sich junge Weibchen, die bereits eine oder zwei Schwangerschaften hinter sich hatten, an den Ort, wo Futter lag, wesentlich besser als andere gleich alte Artgenossinnen, die nie eine Schwanger- oder Mutterschaft erfahren hatten. Tiere, die seit mindestens zwei Wochen wieder ohne Junge waren, bestanden diese Tests ebenso gut wie Weibchen, die gerade Nachwuchs zu versorgen hatten. Interessanterweise schnitten auch jungfräuliche Weibchen ähnlich gut ab, wenn sie Pflegekinder betreuten. Für ein besseres Raum- und Ortsgedächtnis müssen offenbar einfach nur Jungtiere vorhanden sein. Wir wissen aber nicht, inwieweit die Gehirntätigkeit bei der Brutpflege die betreffenden neuronalen Strukturen verändert, oder ob hauptsächlich das Hormon Oxytocin die Steigerung veranlasst.

Ob Tiermütter besser Beute zu fangen verstehen, untersuchten Studentinnen in Kinsleys Labor. Sie setzten hungrige Rattenweibchen jeweils einzeln in ein gut zwei Quadratmeter großes Gehege, das mit Holzspänen ausgestreut war. In der Streu hatten sie eine Grille versteckt. Jungfräuliche Tiere benötigten im Durchschnitt über vier Minuten, um die Grille aufzustöbern und zu fressen, Mütter mit kleinen Jungen dagegen nicht einmal eine Minute. Sogar Nichtmütter, die besonders hungrig waren, fanden die Beute langsamer. Auch mussten die Mütter, um schneller zu sein, die Grillen nicht einmal zirpen hören.

Die Stressforscherin Inga Neumann von der Universität Regensburg hat in vielen Studien untersucht, wie Mutterschaft die Angst von Rattenweibchen beeinflusst. Anhand von Stresshormonen wies die Forscherin nach, dass trächtige und säu-

gende Tiere weniger ängstlich sind als jungfräuliche Weibchen – zum Beispiel wenn sie durch ein Wasserbecken schwimmen müssen. Eine Mitarbeiterin von Kinsley beobachtete Unterschiede im Verhalten, die zu Neumanns Befunden passen: In einem fremden Gehege erstarren Muttertiere nicht so leicht wie Weibchen, die nie trächtig waren. Erstere sind kühner und erkunden den Raum mehr. Als wir die Gehirntätigkeit untersuchten, registrierten wir in zwei Regionen von Hippocampus und Amygdala, die Stress und Emotionen regulieren, eine geringere neuronale Aktivität als bei den Nichtmüttern. Wie es aussieht, gewinnt eine Rattenmutter tatsächlich an Eigenschaften, die ihren Mut und ihr Können bestärken. Darum wagt sie, ihr Nest zu verlassen. Es gelingt ihr, zügig Beute zu machen und rasch zu den Jungen zurückzukehren.

Starke Nerven für die Säuglingspflege

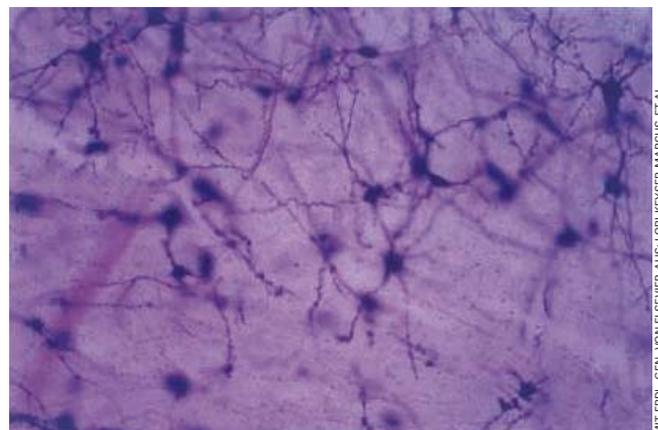
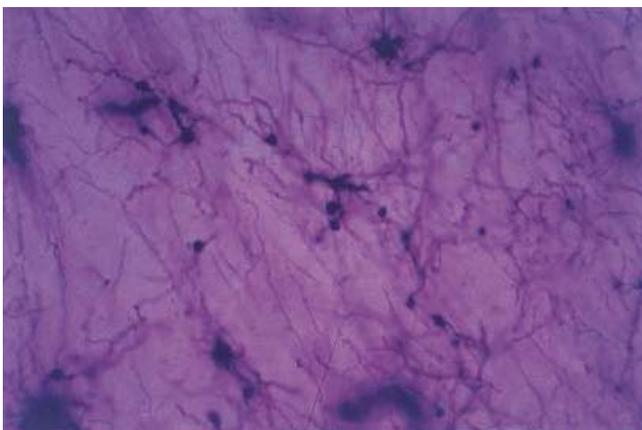
Wenn Tiermütter mutiger sind als andere Weibchen, dürfte dabei der Hippocampus eine entscheidende Funktion haben. Diese Hirnstruktur regelt sowohl Gedächtnis und Lernen wie auch Emotionen. Mit dem Östruszyklus eines Rattenweibchens, also dem Wechsel von Empfängnisbereitschaft und Zwischenphasen, steigt und sinkt in der CA1-Region des Hippocampus die Zahl der Dornen an den Dendriten, wodurch die gesamte Oberfläche für den Signalempfang zyklisch wächst und schrumpft. Immer wenn die Östrogenmenge steigt, wachsen mehr solche Dornen. Diesen faszinierenden Befund lieferten Catherine Woolley und Bruce McEwen von der Rockefeller-Universität in New York. Wir fragten uns: Wenn schon diese relativ kurz dauernden Hormonschwankungen so gravierende Strukturverände-

rungen auslösen, was geschieht dann erst in der Schwangerschaft bei beständig hohen Mengen von Östrogen und Progesteron? Tatsächlich wiesen Mitarbeiter von Kinsley bei Rattenweibchen in der CA1-Region des Hippocampus gegen Ende der Tragzeit eine erhöhte Dornendichte nach. Gleiches sahen sie bei Tieren, denen sie Schwangerschaftshormone verabreicht hatten. Offensichtlich erhalten die betreffenden Nervenzellen nun mehr Input, sodass sich die Leistungen der Weibchen verbessern.

Auch das Hormon Oxytocin scheint Gedächtnis und Lernvermögen zu steigern. Bekannt ist es als Wehen- und Stillhormon. Aber Kazuhito Tomizawa und seine Kollegen von der Okayama-Universität in Japan wiesen nach, dass es im Hippocampus die Ausbildung von lange bestehenden Nervenzellverbindungen fördert. Wird jungfräulichen Ratten Oxytocin ins Gehirn injiziert, so verbessert sich ihr Langzeitgedächtnis. Erhalten Rattenmütter Oxytocinhemmer, lernen sie schlechter.

In der Schwangerschaft verändern sich selbst die Gliazellen des Gehirns, die das Gewebe zwischen den Neuronen bilden. Gordon W. Gifford und Mitarbeiter in Kinsleys Labor haben die so genannten Astrozyten untersucht, die den Nervenzellen unter anderem Halt geben und sie mit Nährstoffen versorgen (siehe SdW 9/2004, S. 46). Hochträchtige, säugende

▼ Die Zellkörper der Neuronen im medialen präoptischen Areal (mPOA), einer Motivationsinstanz im Hypothalamus, werden bei schwangeren Ratten dicker. Links das Schnittpräparat von einem jungfräulichen, rechts von einem trächtigen Tier



MIT FRIEDRICH VON EISENER AUS: LORI KEYSER-MARCUS ET AL.: ALTERATIONS OF MEDIAL PREOPTIC AREA NEURONS FOLLOWING PREGNANCY AND PREGNANCY-LIKE STEROIDAL TREATMENT IN THE RAT. BRAIN RESEARCH BULLETIN 2001, BD. 55 (6)



und hormonbehandelte Ratten weisen im Hippocampus und im medialen präoptischen Areal mehr und komplexere Astrozyten auf als unbehandelte jungfräuliche Weibchen. Demnach scheint in der Schwangerschaft auch die Leistung der Glia in Hirngebieten gesteigert, die Lernen und Raumgedächtnis steuern.

Natürlich wollten wir wissen, ob die bessere Leistung anhält, nachdem die Rattenmutter ihre Jungen entwöhnt hat. Nach Studien in Kinsleys Labor lernen betagte Weibchen räumliche Aufgaben leichter, wenn sie in ihrem Leben wenigstens ein Mal Junge gehabt haben. Auch baut das Gedächtnis von Muttertieren im Alter langsamer ab. Letztlich bestanden Tiere mit Muttererfahrung in jedem Alter die Labyrinthtests leichter, wenn sie Futterplätze wiederfinden sollten. Später untersuchten wir ihre Gehirne. In zwei entscheidenden Regionen des Hippocampus entdeckten wir weniger der verheerenden Amyloid-Ablagerungen, die vermutlich den alterungsbedingten Abbau von Hirnzellen mitverschulden.

Mutproben im Labyrinth

Die Studien zum Lernen haben Mitarbeiter in Lamberts Labor mit einem anderen Rattenstamm und mit anderen Testaufbauten bestätigt. Auch betagte einstige Muttertiere lernten und behielten Ortszusammenhänge einfach besser. Überdies mussten die Nager ihren Mut in einem kreuzförmigen Labyrinth beweisen, von dem zwei Arme einen überdeckten Gang hatten und die beiden anderen völlig frei lagen (siehe Bild S. 53). Ratten fürchten offene Flächen ohne Versteckmöglichkeit. In welchem Alter wir die Weibchen auch auf diese Vorrichtung setzten – fast immer wagten

sich die Mütter öfter auf die exponierten Wege vor. Als wir später die Gehirne der Tiere untersuchten, zählten wir im Gyrus cinguli sowie in der Stirn- und Scheitelrinde von Müttern weniger altersbedingt degenerierte Nervenzellen. Diese Gebiete nehmen an der Sinnesverarbeitung teil. Wir glauben, dass die Schwangerschaftshormone zusammen mit den vielen Eindrücken aus der Zeit mit den Nestlingen den Schwund des kognitiven Leistungsvermögens im Alter mildern können.

Was weiß die Forschung hierzu über Menschenmütter? Finden sich irgendwelche Parallelen zu den Ergebnissen aus Tierstudien? Dass dies tatsächlich der Fall sein könnte, deuten neuere Forschungen an. Denn anscheinend kann sich auch beim Menschen die Verarbeitung von Sinneseindrücken stark verändern. Wie Alison Fleming von der Universität Toronto (Kanada) nachwies, erkennen Mütter Gerüche und Laute ihrer Kinder erstaunlich gut. Die entsprechenden Sinneskanäle scheinen dafür besonders empfindlich zu sein.

Mütter, die nach der Geburt viel von dem Stresshormon Cortisol bildeten, fühlten sich vom Geruch ihres Babys besonders stark angezogen. Sie waren dadurch mehr als andere Frauen motiviert, sich dem Kind intensiv zu widmen. Auch konnten sie das Weinen des eigenen Kindes besser identifizieren. Allzu viel Cortisol kann zwar mitunter schaden, doch bei einer jungen Mutter scheint das Hormon normalerweise einen sinnvollen Zweck zu erfüllen. Ein erhöhter Cortisolspiegel macht die Mutter wacher, aufmerksamer und empfindlicher. Das fördert und stärkt die Bindung zu ihrem Kind. ▶



Vereinigung der Sternfreunde e.V.

Deutschlands größter Astronomieverein!

- ★ Über 4000 Mitglieder!
- ★ Mitgliederzeitschrift „VdS-Journal für Astronomie“, 3x pro Jahr mit mehr als 420 Seiten praktischer Astronomie
- ★ Kostenlose Beratung und Betreuung von Mitgliedern
- ★ 20 Fachgruppen, die Sie beraten
- ★ VdS-Sternwarte Kirchheim e.V.
- ★ Jugendlager und Exkursionen
- ★ Rabatte bei Abonnements für „Sterne und Weltraum“ und „Astronomie Heute“
- ★ Aktuelle Informationen auf unserer Website: www.vds-astro.de
- ★ Jahresbeitrag nur 30,- EUR, 20,-EUR ermäßigter Beitrag

Werden Sie Mitglied!

Fordern Sie kostenloses Infomaterial an:

Vereinigung der Sternfreunde e.V.
Geschäftsstelle · Am Tonwerk 6
D-64646 Heppenheim
Fax: 0 62 52 / 78 72 20
info@vds-astro.de

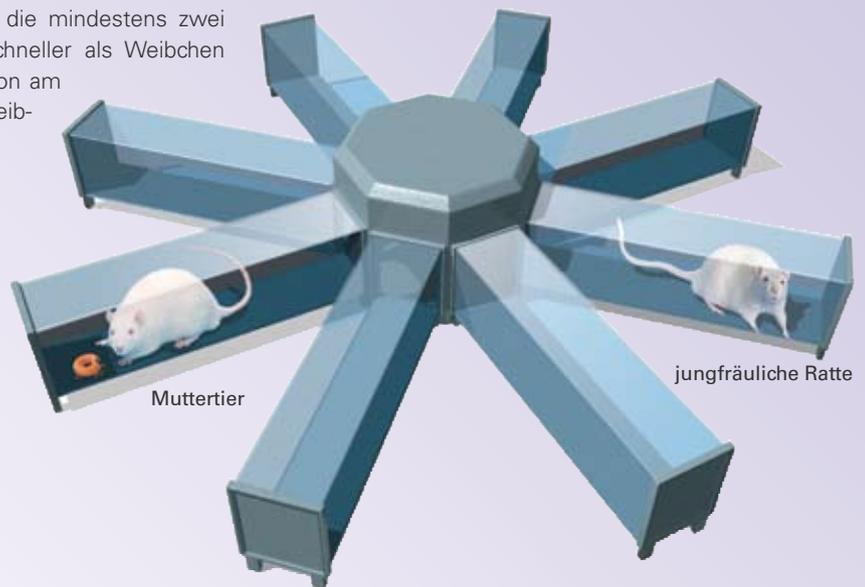
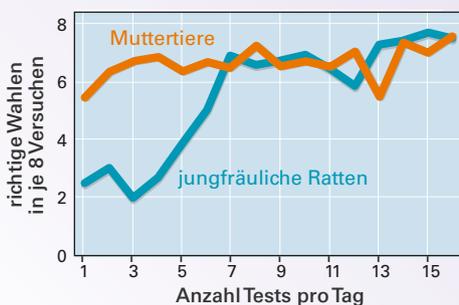
www.vds-astro.de

Wer Junge hat, der (die) kann es besser

Schwanger- und Mutterschaft steigern das räumliche Lernen und das Gedächtnis von Rattenweibchen. Anscheinend sind sie weniger ängstlich und stressanfällig. Weil ihnen darum die Nahrungssuche leichter fällt, haben die Jungen bessere Überlebenschancen.

Orientierung

Am Anfang der Studie war in jedem von acht Labyrintharmen ein Leckerbissen platziert, später nur noch in vieren, dann in zweien, am Ende in einem. Welcher der Gänge übrigblieb, behielten Rattenweibchen, die mindestens zwei Schwangerschaften durchgemacht hatten, viel schneller als Weibchen ohne Schwangerschaft. Sie fanden das Futter schon am ersten Testtag in drei Minuten, die jungfräulichen Weibchen erst am siebenten Tag.



SLIM FILMS

▷ Dass eine Mutterschaft dem Gehirn noch in späteren Jahren Vorteile bringen könnte, schließt der Altersforscher Thomas Perls von der Boston-Universität (Massachusetts) aus Ergebnissen der Neu-England-Studie über Hundertjährige. Danach lag die Wahrscheinlichkeit, hundert Jahre alt zu werden, für Frauen, die mit vierzig Jahren oder noch später schwanger gewesen waren, viermal so hoch wie sonst.

Perls vermutet, dass jene Frauen, die noch mit vierzig oder darüber auf natürliche Weise schwanger wurden, einfach insgesamt langsamer gealtert sind. Wir können uns allerdings einen weiteren Effekt vorstellen: Gerade in dem kritischen Lebensabschnitt, in dem die Fortpflanzungshormone abzusinken beginnen, haben bei diesen Frauen Schwangerschaft und Muttersein das Gehirn stimuliert. Vielleicht konnte dieser kognitive Schub den Verlust der Hormone abfangen, die auch das Gedächtnis schützen. Das mag den Gehirnzustand verbessert und diesen Frauen zu einem längeren Leben verholfen haben.

Bringt eine Mutterschaft im Wettbewerb um knappe Ressourcen den Müttern Vorteile vor anderen Frauen?

In einer kleinen Studie von J. Galen Buckwalter von der Universität von Südkalifornien in Los Angeles schnitten Schwangere in verschiedenen verbalen Gedächtnistests sogar schlechter ab als die Norm. Das besserte sich aber bald nach der Geburt wieder. Die Studie umfasste allerdings nur 19 Frauen. Insgesamt veränderte sich ihre Intelligenz nicht. In ihrem Buch »Mutter sein macht schlau« nennt die amerikanische Journalistin Katherine Ellison viele Fertigkeiten, die sich eine Mutter aneignen muss und die auch bei einer Erwerbsarbeit nützlich sein dürften. Zum Beispiel verfügt eine gute Führungskraft über viel Einfühlungsvermögen und Fingerspitzengefühl für die Bedürfnisse der Mitarbeiter. Zugleich ist sie stets wachsam und reaktionsbereit, sodass sie neue Situationen und drohende Schwierigkeiten schnell erkennt und bewältigt oder ihnen sogar vorgreift. All das muss auch eine Mutter leisten. Doch hilft ihr die Kompetenz als Mutter wirklich in der Berufswelt?

In jüngster Zeit beschäftigt die Forscher eine typische Eigenschaft, die Müttern seit jeher selbstverständlich abverlangt wird: Sie müssen vieles – und Ver-

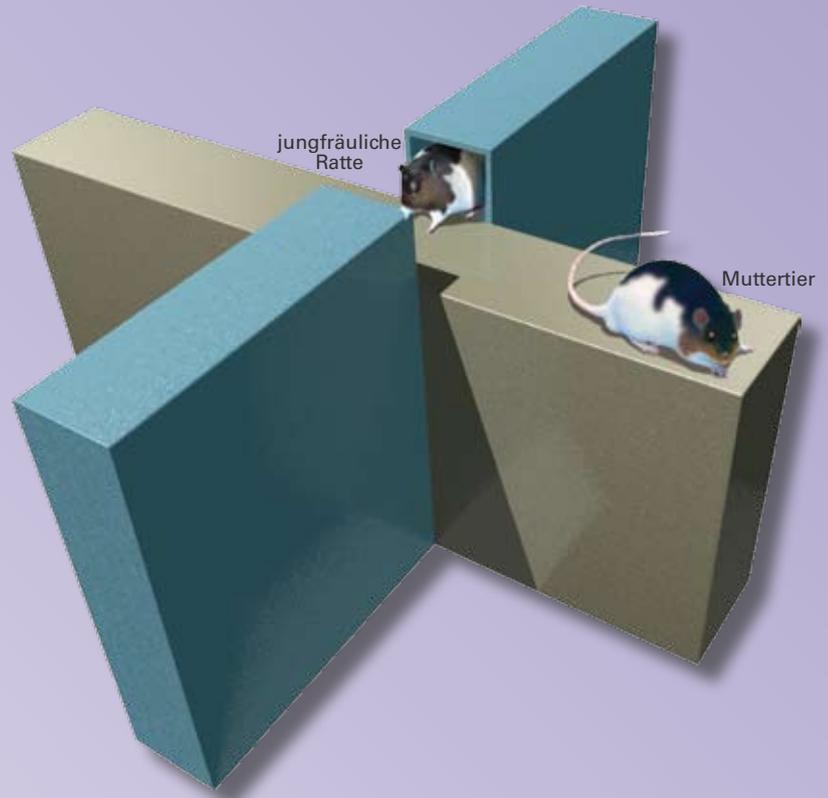
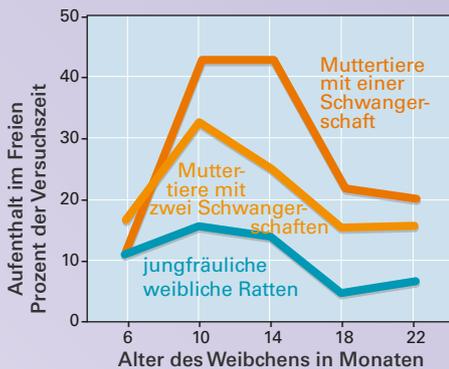
schiedenes – gleichzeitig tun können. Spannend wäre zu wissen, ob sich das Gehirn speziell in der Mutterschaft hierauf einrichtet. Können Mütter besser als andere Frauen mehrere Dinge vereinbaren – Kinderbetreuung, Berufstätigkeit, soziale Pflichten? Möglich wäre das durchaus, denn unser Gehirn ist wesentlich plastischer und anpassungsfähiger, als Hirnforscher früher vermuteten. Offenbar verändert es sich sogar recht schnell, wenn eine neue Aufgabe bewältigt werden muss.

Jonglierkünstlerin im Familienalltag

In einem Gemeinschaftsprojekt mit der Universität Jena fanden der Neurologe Arne May von der Universität Regensburg und seine Kollegen bei jungen Frauen und Männern strukturelle Änderungen im Gehirn, als diese mit mehreren Bällen zu jonglieren gelernt hatten. Und zwar hatten sich Stellen vergrößert, die für visuelle Wahrnehmung und die Vorhersage von wahrgenommenen Bewegungen zuständig sind. Nach einiger Zeit ohne Training schrumpften sie wieder. Warum sollten sich die Gehirne von Müttern unter dem Anspruch ihres All-

Mut

Dieses Labyrinth mit zwei verdeckten und zwei offenen Wegen steht über einen Meter hoch. Die offenen Arme empfinden Ratten als extrem gefährlich. Dennoch wagten sich Muttertiere jeden Alters öfter hinaus als andere Weibchen.



tags nicht auch verändern, jonglieren sie doch gewissermaßen ständig mit Tausenderlei?

Zur flexiblen Vielseitigkeit gibt es ebenfalls Tierversuche. Wettbewerbstests in Lamberts Labor, bei denen sich Rattenweibchen gleichzeitig mit visuellen Eindrücken, Geräuschen, Gerüchen und Artgenossen befassen sollten, bestanden die Muttertiere fast immer besser als jungfräuliche Weibchen. Bei einer Art Rallye zu einem Lieblingskeks siegten in 60 Prozent der Rennen Tiere mit mindestens zwei Schwangerschaften, zu 33 Prozent Ratten mit nur einer Schwangerschaft und lediglich zu 7 Prozent jungfräuliche Weibchen.

Wie steht es aber um fürsorgliche Väter? Bei Weißbüscheläffchen, monogam lebenden südamerikanischen Kralenaffen, kümmern sich beide Eltern um die Jungen. Mitunter überlässt das Männchen sie der Mutter fast nur zum Säugen. Das Geschick dieser Affenväter konnte Lamberts Mitarbeiterin Anne Garrett in Zusammenarbeit mit Sian Evans und V. Jessica Capri vom Affenzoo »Monkey Jungle« in Miami prüfen. Die Tiere sollten lernen, welche Behälter an einem Kunstbaum am meisten Futter

enthielten. Mütter wie Väter zeigten sich dieser Aufgabe besser gewachsen als Affen beider Geschlechter ohne Junge. In die gleiche Richtung deuten auch verschiedene ältere Studien in Lamberts Labor mit kalifornischen Hirsch- oder Weißfußmäusen, bei denen die Männchen ebenfalls an der Brutpflege teilnehmen. Schneller als Junggesellen meisterten Vatermäuse Labyrinth oder trauten sich, fremde Objekte zu untersuchen.

Wie es aussieht, verändern Schwangerschaft und der Umgang mit Nachwuchs wirklich manche Hirnstrukturen und fördern so einige Verhaltensleistungen. Das betrifft naturgemäß besonders das weibliche Geschlecht. Aus der Evolutionsperspektive gesehen kommt es für Weibchen vor allem darauf an, ihre Gene weiterzureichen, das heißt dafür zu sorgen, dass Nachkommen überleben. Das Mutterverhalten entstand zu eben diesem Zweck. Das bedeutet nun nicht, dass Mütter in allem besser sind als Nicht-Mütter. Höchstwahrscheinlich heben sie sich hauptsächlich in solchem Verhalten ab, das den Kindern nützt. Das Gehirn scheint durch Mutterschaft dennoch zu gewinnen. Wenn es hoch hergeht, läuft es eben zu Hochform auf. ◁



Craig Howard Kinsley und **Kelly G. Lambert** erforschen seit zwanzig Jahren die Auswirkungen von Schwanger- und Mutterschaft auf das Gehirn. Kinsley hat an der Universität Richmond (Virginia) die MacEldin-Trawick-Profeurur für Neurowissenschaften. Lambert wirkt am Randolph-Macon-College in Ashland (Virginia) unter anderem als Professorin für Verhaltens-Neurowissenschaft und Psychologie.



The neurobiology of parental behavior. Von Michael Numan und Thomas R. Insel. Springer, 2003

A tribute to Paul MacLean: The neurobiological relevance of social behavior. Von K. G. Lambert und R. T. Gerlai (Hg.). Sonderheft von: Physiology and Behavior, Bd. 79, Heft 3, August 2003

The maternal brain: Neurobiological and neuroendocrine adaptation and disorders in pregnancy and post partum. Von J. A. Russel et al. (Hg.). Elsevier, 2001

Mother nature: Maternal instincts and how they shape the human species. Von Sarah B. Hrdy. Ballantine Books, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852950.



Ölpreis und Demokratie

Der aktuelle Preis des Erdöls ist nicht wirklich zu hoch; er war jahrzehntelang zu niedrig, weil fundamentale Marktmechanismen in ihrer Wirkung blockiert waren. Das ist letztlich auf einen Mangel an Demokratie in den Ölförderländern zurückzuführen.

Von Mohssen Massarrat

Erdöl ist das mit Abstand bedeutendste strategische Gut der Welt. Die Wirtschaft der Industrieländer ist auf Gedeih und Verderb von diesem Rohstoff abhängig; ihre energieintensive Wirtschaftsweise ist weder auf den Rest der Welt noch auf die Zukunft übertragbar, und die Destabilisierung des Weltklimas ist wesentlich durch die Verfeuerung fossiler Brennstoffe verursacht. All diese Entwicklungen sind auf einen einzigen Zahlenwert zurückzuführen: den Ölpreis.

Über Jahrzehnte hinweg lag dieser Preis weit unter dem, was die – richtig interpretierte – neoklassische Wirtschafts-

theorie vorausgesagt hätte. Dieses unrealistisch niedrige Niveau, das die genannten Fehlentwicklungen ausgelöst hat, ist vorrangig durch politische Faktoren zu erklären. Insbesondere haben die Industrieländer politisch Einfluss auf die Preisentwicklung genommen, und die Interessen der Eliten in den Ölförderländern des Mittleren Ostens waren weit von denen ihrer Bevölkerungen entfernt. (Die überkommene Bezeichnung »Naher Osten« wird zunehmend durch »Mittlerer Osten« abgelöst.) In diesem Artikel will ich eine Theorie des Ölpreises vorstellen, die diese politischen Faktoren mit einbezieht. Unversehens wird die Frage nach der Zukunft der Energiewirtschaft zu einer Frage nach der Demokratisierung.

Wodurch wird der Preis des Erdöls bestimmt? Durch Angebot und Nachfrage, ist die erste Antwort der Wirtschaftswissenschaft. Das ist richtig, hilft aber nicht wirklich weiter. Es kommt darauf an, wie die Anbieter von Öl ihre Preisforderungen bestimmen und am Markt durchsetzen. Die – stark ansteigende – Nachfrage dagegen hätte eigentlich die Preise in die Höhe treiben müssen. Sie tat es nicht, weil die Nachfrager die Preise mit nichtökonomischen Mitteln niedrig hielten.

In einem funktionierenden Markt wird der jeweils aktuelle Ölpreis nicht durch die billigste, sondern durch die teuerste Sorte Öl reguliert: Er entspricht den Kosten und Gewinnerwartungen



AVENUE IMAGES / INDEX STOCK, HENRY FICHER

des so genannten Grenzanbieters; das ist derjenige Anbieter, der mit seinen Preisen so hoch liegt, dass er gerade noch nicht aus dem Markt ausscheidet. Man spricht von Grenzkosten (*marginal costs*) für gerade noch realisierte Geschäfte. So wie die kostengünstig nutzbaren Ölquellen wegen Erschöpfung oder zu hoher Nachfrage den Bedarf nicht mehr decken können, wird es rentabel, neue, kostenaufwändige Ölquellen, zum Beispiel in der Nordsee und in Alaska oder Ölsandfelder in Kanada, zu erschließen. Entsprechend steigt der Marktpreis.

In dem neoklassischen Modell des funktionierenden Marktes herrscht vollkommene Konkurrenz sowohl unter den Anbietern als auch unter den Konsumenten. Das bedeutet insbesondere, dass jeder Marktakteur die Freiheit hat, seinen individuellen Grenznutzen zu maximieren; unter dieser Voraussetzung stellt sich das – volkswirtschaftlich erwünschte – »Marktgleichgewicht« ein, in dem die Gesamtkosten minimiert werden. Vollkommene Konkurrenz setzt also voraus, dass alle Marktteilnehmer souverän handeln, mögen sie Individuen, Kleinfirmen, multinationale Konzerne oder aber Staaten sein. Die Gleichgewichtspreise (Kasten nächste Seite), die sich unter diesen Bedingungen einstellen, sind auch

faire Preise, weil dabei die Waren zu ihren wirklichen Werten verkauft werden.

Bei vollkommenem Wettbewerb und steigender Nachfrage, aber gleichbleibender Technologie und sinkender Naturproduktivität steigen in der Regel die Ressourcenpreise.

Allerdings wird kein Anbieter sich mit einem Preis zufrieden geben, der nur die Förderkosten deckt. Unter kapitalistischen Bedingungen nehmen alle erschöpfbaren Güter, also auch das Öl, Warenform an und werden als Anlagekapital handelbar, noch bevor sie aus dem Boden herausgeholt werden.

Lohn des Besitzers: die Ölrente

Der Eigentümer einer Ölquelle kann kraft seines Monopols, einerlei ob er selbst das Öl fördert oder das anderen überlässt, als Gegenleistung für die Nutzung seines Kapitals eine Rente verlangen; deren Höhe wird durch das Gesetz von Angebot und Nachfrage bestimmt.

Diesen Marktmechanismus haben schon die Klassiker wie David Ricardo (1772–1823) und Karl Marx (1818–1883) theoretisch erfasst und überzeugend nachgewiesen. In der Literatur (zum Beispiel bei Marx in »Das Kapital«, 3. Band, 6. Abschnitt) wird die genannte Rente allgemein als »Grundrente« be-

▲ Am Ölgeschäft ist alles groß, auch die Industrieanlagen – so groß, dass der Weltmarktpreis merklich anstieg, als diese Raffinerie in New Orleans in den Fluten des Hurrikans »Katrina« versank.

zeichnet, da sie im Wesentlichen in Form der Pacht auftrat, die der Nutzer von Acker- oder Weideland an den Grundstückseigentümer zu zahlen hat. Die Öl produzierenden Staaten am Persischen Golf verdanken ihre vergleichsweise hohen Renteneinnahmen der besonders hohen natürlichen Produktivität der Ölquellen, die sehr niedrige Produktionskosten verursachen.

Warum aber gibt es unter vollkommener Konkurrenz überhaupt eine Ölrente? Warum verzichtet ein etwas teurer Anbieter nicht auf diesen Zuschlag zu den Produktionskosten und nimmt stattdessen in Kauf, überhaupt kein Geschäft zu machen? Weil er mit gutem Grund hoffen kann, in der Zukunft ein besseres Geschäft zu machen. Öl im Boden ist eine Form von Kapital. Es bringt Zinsen in dem Sinn, dass es in der Zukunft – wahrscheinlich – einen höheren Preis erzielen wird als heute. Unterstellen wir, dass der Ölbesitzer auf ▶

▷ die Einnahmen aus dem Ölgeschäft nicht unmittelbar angewiesen ist. Dann kann er das Öl – ausreichende Förderkapazitäten vorausgesetzt – entweder sofort aus dem Boden holen und den Erlös auf den internationalen Finanzmärkten anlegen; oder er kann die Produktion in Erwartung steigender Marktpreise auf einen späteren Zeitpunkt verschieben.

Bei hohen Zinsraten auf den Finanzmärkten ist die erste Alternative profitabler, bei niedrigen Zinsen die zweite. Dieses plausible Optimierungsverhalten zwingt die Anbieter von erschöpfbaren Rohstoffen wie Öl – wiederum funktionierende Märkte vorausgesetzt – grundsätzlich zu einer Angebotszurückhaltung. Wenn die Anbieter in diesem Sinn ihren Profit optimieren, müssen generell die Marktpreise von erschöpfbaren Rohstoffen langfristig steigen, und zwar expo-

nentuell und mindestens so stark wie der Wert einer Geldkapitalanlage. Das ist der Inhalt einer These, die 1931 der amerikanische Ökonom Harold Hotelling (1895–1973) aufstellte.

Mit den klassischen Ansätzen von Ricardo und Marx in eine systematische Beziehung gesetzt, liefert sie eine schlüssige Theorie des Ölpreises, die auch empirisch belegbar ist – allerdings zunächst nur für die erste Phase in der Geschichte des Ölsektors, die vom Beginn der Ölproduktion 1861 bis etwa 1920 reicht (Grafik S. 58). Während dieser Zeit wurde Öl hauptsächlich in den Vereinigten Staaten produziert und verbraucht. In der Tat sank nach den ersten Entdeckungen in den USA der Ölpreis zwischen 1861 und 1880 zunächst rapide durch die Entwicklung neuer Bohr- und Gewinnungstechnologien, um dann infolge

zunehmender Nachfrage und entsprechend zunehmender Grenzkosten bis 1905 wieder zu steigen. Mit der Entdeckung neuer Ölquellen am Ende des 19. Jahrhunderts gab es einen neuen Preisverfall, der durch einen anschließenden Anstieg wieder kompensiert wurde.

Ab 1920 wurde Öl auch außerhalb der Vereinigten Staaten produziert und zu einer Weltmarktware. Dieses Datum markiert den Wendepunkt des Ölpreistrends: Die Ölpreise sinken kontinuierlich, teils wegen der Entwicklung neuer Technologien, vor allem aber wegen der Entdeckung neuer und hochproduktiver Ölfelder im Mittleren Osten, und stabilisieren sich auf dem niedrigen Niveau von 1 bis 2 Dollar pro Barrel. Fast ein halbes Jahrhundert lang, bis 1974, bleibt der von Hotelling postulierte erneute Anstieg der Preise aus, obwohl die Öl-

Angebot und Nachfrage – die klassische Theorie

Verschiedene Anbieter können das auf einem Markt gehandelte Gut zu verschiedenen Kosten produzieren; so gibt es mehr oder weniger leicht erschließbare Ölquellen. Man sortiert die Anbieter vom billigsten zum teuersten und erhält die Angebotskurve A . Diese Kurve ist entgegen der üblichen Ableseweise zu interpretieren: Zu jedem Preis P gibt sie die Menge M an, die zu diesem Preis auf dem Markt verfügbar ist; das heißt, wenn man alle Anbieter zusammennimmt, die zum Preis P oder billiger zu verkaufen bereit sind, kommt die Menge M zu Stande.

Entsprechend gibt es eine Nachfragekurve N : Je höher der Preis, desto weniger Interessenten sind bereit, zu diesem Preis zu kaufen. Ein Punkt auf der Kurve N kennzeichnet die Menge, die zu einem gegebenen Preis P ihre Käufer finden würde.

Der Schnittpunkt von Angebots- und Nachfragekurve ist der Gleichgewichtspreis. Auf diesen Wert pendelt sich bei vollkommenem Wettbewerb der Preis ein. Es handelt sich um den Preis, zu dem der teuerste Anbieter, der überhaupt zum Zuge kommt, noch zu verkaufen bereit ist.

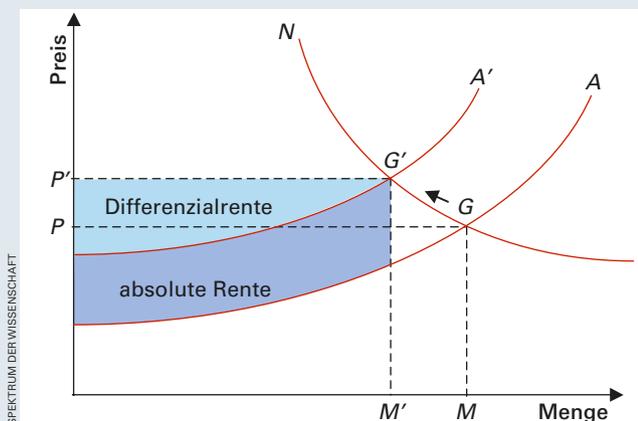
Diese Darstellung gilt unter der Voraussetzung, dass jeder Anbieter sich mit seinen Produktionskosten zufrieden gibt.

Wenn es sich jedoch um einen Bodenschatz handelt, wird er darüber hinaus eine so genannte Grundrente – in unserem Zusammenhang: Ölrente – fordern. Dadurch verschiebt sich die Angebotskurve A nach oben zu A' . Der Gleichgewichtspunkt wandert von G nach G' , die insgesamt gehandelte Menge sinkt von M auf M' , der Gleichgewichtspreis steigt von P auf P' , der bisher teuerste Anbieter scheidet aus dem Markt aus. Der nunmehr teuerste Anbieter kassiert die »absolute Rente« und alle anderen darüber hinaus die »Differenzialrente«.

Der Begriff »Erschöpfbarkeit«, der in der Preistheorie von Harold Hotelling eine zentrale Rolle einnimmt, ist nicht unproblematisch. Im 18. und 19. Jahrhundert drohte Kohle als Energieträger sich zu erschöpfen; heute ist von Kohleknappheit nicht mehr die Rede, weil wir es vorziehen, Energie aus der Verbrennung von Öl statt Kohle zu gewinnen. Wenn künftige Generationen auf regenerative Energiequellen umsteigen – was uns heute als Ausweg aus dem globalen Klimaproblem dringend geboten erscheint –, dann werden die Ölvorräte für die dann noch verbleibenden Verwendungen vielleicht sehr reichlich sein.

Gleichwohl ist es richtig, heute Öl als erschöpfbare Ressource anzusehen. Wir wissen ja noch nicht, wann die Technologien, die uns von der Abhängigkeit vom Öl befreien sollen, in großem Maßstab auf den Markt kommen werden. Unter dieser Unsicherheit ist es für jeden Ölanbieter vernünftig zu erwarten, dass das Öl unter seinen Füßen wegen zunehmender Knappheit im Preis steigen wird. Auf diesem Weg sind die Nachfrager der Zukunft zwar nicht leibhaftig, aber im Effekt auf dem Markt präsent, weil nämlich die Anbieter der Gegenwart bereits mit ihnen rechnen.

Nur bei der unerschöpflichen Ressource Sonnenenergie würde es weder Eigentum noch Knappheitsrente geben – und keinen Grund, um ihre Nutzung Kriege zu führen.



nachfrage in diesem Zeitraum weltweit auf das Vierzehnfache gestiegen ist.

Auf Grund dieser empirischen Fakten, die auch bei anderen Rohstoffen zu beobachten waren, hielt die neoklassische Schule die Hotelling-Theorie für widerlegt. Der amerikanische Ökonom Robert Solow (Wirtschaftsnobelpreis 1987, siehe Spektrum der Wissenschaft 12/1987, S. 22) ging 1974 in einem viel beachteten Artikel noch darüber hinaus: Natürliche Ressourcen seien im Prinzip unerschöpflich. Diese These lieferte die Rechtfertigung für die Fortsetzung des ungezügelten, verschwenderischen Konsums fossiler Energien. Sie war angesichts der ökologischen Folgen unverantwortlich und hat sich schließlich als eine grandiose Fehleinschätzung erwiesen.

Welches waren aber die tatsächlichen Gründe für die sinkenden Ölpreise, die den Lauf der Geschichte und die energieintensiven Konsum- und Produktionsmuster in den kapitalistischen Staaten entscheidend prägten? Solow hatte in seinem Artikel übersehen, dass zum Zeitpunkt der Globalisierung der Ölindustrie noch mehr als drei Viertel der Weltbevölkerung im vorindustriellen Zeitalter lebten – und daher auf den Märkten nicht als Konsumenten in Erscheinung traten – und dass das Überangebot des Öls aus dem Persischen Golf nur eine vorübergehende Erscheinung war. Der entscheidende Grund ist jedoch, dass eine wesentliche Voraussetzung für einen vollkommenen Markt nicht erfüllt war: die Souveränität der Akteure.

Die Öleigentümerstaaten des Südens hatten die Kontrolle über ihre Ölquellen bis Anfang der 1970er Jahre buchstäblich an eine Hand voll multinationaler Ölkonzerne übertragen, in der Regel gegen eine vernachlässigbare Gewinnbeteiligung von 10 bis 20 Prozent. Damit übernahmen wirkungsmächtige Akteure der Nachfrageseite das Kommando über das Angebot und konnten so das Anbieterverhalten im Interesse der Nachfrageseite, das heißt der Industriestaaten, manipulieren. Da die Ölmultis fürchten mussten, dass die unfairen Verträge nicht von langer Dauer sein würden, hatten sie wenig Anlass, Gewinne aus künftiger Verwertung des Öls gegen die unmittelbaren Gewinne abzuwägen. Also holten sie über beinahe vier Dekaden und ohne Rücksicht auf ökonomische und geologische Nachhaltigkeitsregeln so viel Öl, wie sie nur konnten, aus den Bohrlö-

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

chern, um anschließend den Erlös auf den internationalen Finanzmärkten anzulegen. Damit entzogen die Ölkonzerne der Hotelling-Regel die Grundlage.

Die starke Konkurrenz um die Verwandlung des mit geringem Aufwand geförderten Öls in Geldkapital machte einerseits die Ölmultis zu den finanzkräftigsten Konzernen der Welt, rief andererseits aber eine permanente Überproduktion mit Dumpingpreisen von 1 bis 2 Dollar pro Barrel hervor (Grafik nächste Seite). Während die Ölschwemme aus dem Mittleren Osten zum Grundstein des Massenkonsums und des Wirtschaftswachstums in den USA und Europa wurde, verloren Völker ganzer Regionen unwiederbringlich einen Teil ihres natürlichen Reichtums.

Dumpingpreise sind Subventionen

Die Eliten der Ölstaaten ließen sich von den Ölkonzernen Verträge zur uneingeschränkten Ölausbeutung abtrotzen, weil sie sich ausschließlich von ihren eigenen kurzfristigen Partialinteressen leiten ließen und weder zum Wohl ihrer Völker noch zum Wohl künftiger Generationen handelten. Demokratisch legitimierte Eliten hätten derartigen Verträgen höchstwahrscheinlich nicht zugestimmt.

Dumpingpreise sind in der Regel Subventionen und dienen – als kurzfristige Transferleistungen der Mehrheit der Bevölkerung an eine bevorzugte Minderheit – der gezielten Förderung ökonomisch schwacher Sektoren einer Volkswirtschaft. Dagegen ist der Dumpingpreis für Öl nichts anderes als eine gigantische Subventionierung der Mehrheit durch die Minderheit der Eigentümerstaaten: zu Gunsten der gegenwärtigen

▲ **Selbst die niedrigen Ölpreise bescherten den Eliten der Förderländer noch aberwitzig hohe Einnahmen: Gold ist Massenware in diesem Geschäft in Bahrain.**

Konsumenten, zu Lasten der eigenen Bevölkerung und künftiger Generationen, mit verhängnisvollen Folgen für die Zukunft der Menschheit und die Stabilität des globalen Klimas.

Stellt man sich auf den – plausiblen – Standpunkt, dass das Erdöl eigentlich das Erbe der Menschheit und nur durch Zufall in den Besitz weniger Staaten geraten ist, so ist es nicht eine Minderheit, welche die Mehrheit subventioniert; vielmehr subventioniert die ganze Menschheit einen zahlenmäßig relativ geringen Teil ihrer selbst, den man beim besten Willen nicht als ökonomisch schwach bezeichnen kann.

Diese Fehlentwicklung war schon Mitte des 20. Jahrhunderts erkennbar. Durchaus nicht zufällig setzte 1951 die erste demokratisch gewählte Regierung des gesamten Mittleren Ostens, die des iranischen Ministerpräsidenten Mohammed Mossadegh (1882–1967), sich die Nationalisierung der Ölindustrie zum Hauptziel. Damit wurde sie zum ersten souverän handelnden Akteur aus dem Mittleren Osten auf dem internationalen Ölmarkt. Sie hätte schon damals andere Völker zum Nachahmen animiert, vielleicht sogar eine Demokratisierungswelle in der gesamten Region ausgelöst, wäre sie nicht 1953 gestürzt und der diktatorisch regierende Schah erneut eingesetzt worden. Dwight D. Eisenhower, damals ▷

▷ Präsident der USA, hatte erkannt, dass sich die Demokratisierung im Mittleren Osten zu einer Gefahr für das Wirtschaftswachstum und das amerikanische Konsummodell entwickeln könnte, und gab dem Geheimdienst CIA unter dem Vorwand der kommunistischen Gefahr grünes Licht für den Sturz Mossadeghs. Durch Ausschaltung eines souveränen Marktakteurs verstieß damit der vom Ölausch befallene Westen massiv gegen seine eigenen fundamentalen Prinzipien: die Gesetze der freien Marktwirtschaft.

Derartiges Handeln – das in der Folge noch mehrfach praktiziert wurde – ist zwar prinzipienlos, aber durch die Interessen des Westens zumindest kurz- und mittelfristig wohlbegründet. Jeder will seine Waren so günstig wie möglich einkaufen. Die niedrigen Ölpreise haben sich in den westlichen Industriestaaten zu einem wirksamen Instrument der innenpolitischen Konsensbildung und der Stabilität von »Wohlstandsdemokratien« entwickelt. Bei den gigantischen Ölmen- gen, die jedes Jahr gehandelt werden, hat jede Preisänderung massive Auswirkungen auf die beteiligten Volkswirtschaften. Nach Berechnungen der Inter-

nationalen Energie-Agentur IEA sinkt das Wachstum in den OECD-Staaten um 0,4 Prozent, wenn der Ölpreis um zehn Dollar pro Barrel ansteigt. Bei einer Differenz zwischen dem aktuellen Preis von über 70 Dollar und dem noch 2000 gültigen von 20 Dollar macht das mehr als zwei Prozent, was das gegenwärtig diskutierte deutsche Wirtschaftswachstum von einem Prozent in sein Gegenteil verkehren würde. Andererseits beschieren steigende Ölpreise den Anbieterstaaten einen höheren Anteil an der theoretischen Ölrente, das heißt der Differenz zwischen dem Nutzen für den Konsumenten und den Grenzkosten.

Insofern entsprach es den Interessen der OECD-Staaten, dass wider jede Marktlogik in den letzten sieben Jahren trotz zunehmender Erschöpfung der Reserven eine strukturelle Überproduktion von Öl und allen anderen fossilen Energieträgern vorherrschte.

Jom-Kippur-Krieg und iranische Revolution

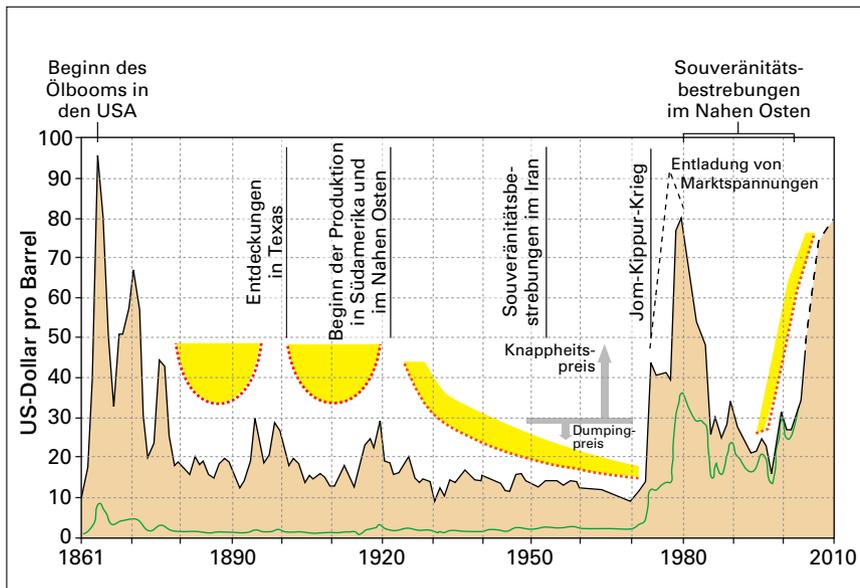
Die Ölmultis hatten Recht, die diskriminierenden Verträge konnten nicht von langer Dauer sein. Unter dem wachsenden Legitimationsdruck der eigenen Bevölkerungen mussten selbst Diktatoren wie der auf den Thron zurückgeholte Schah Reza Pahlawi im Iran Anfang der 1970er Jahre allesamt die Ölindustrie nationalisieren. Sie gewannen dadurch einen Teil ihrer Marktsouveränität zurück. Daraus folgten 1973 anlässlich des Jom-Kippur-Kriegs und 1979 anlässlich der iranischen Revolution zwei Ölpreissprünge, zunächst von 2 auf 10 und dann auf 40, in heutigen Preisen auf über 80 Dollar pro Barrel.

Gleichwohl stellte sich die Normalisierung der Marktkräfte als eine kurze Episode heraus. Erst unter demokratischen Verhältnissen wären die Eliten eines Landes in einen offenen Wettbewerb miteinander um den besten Weg zur Optimierung des nationalen Nutzens aus dem Ölgeschäft eingetreten. Stattdessen waren die weit und breit herrschenden Petrodollar-Monarchien weiterhin bereit, sich auf einen Kuhhandel mit dem größten Ölverbraucher USA einzulassen: eigene Herrschaftsabsicherung und militärische Kooperation gegen niedrige Ölpreise. Mangels Legitimation und Kontrolle durch das eigene Volk blieben so die Regierungen der Ölstaaten weiterhin erpressbar.

Wie diese Regierungen – vor allem die Saudi-Arabiens – zum Vollstrecker eines politisch manipulierten Ölpreissystems gemacht wurden, beschreibt der ehemalige amerikanische Wirtschaftsagent John Perkins in seinem erschütternden Bericht »Bekenntnisse eines Economic Hit Man«. Über Jahrzehnte hinweg pflegten sich US-Regierungen mit Hilfe ihrer Geheimdienste Herrscher von Dritte-Welt-Staaten mit Schlüssel-funktionen für die Weltwirtschaft unterhalb der Schwelle der Gewaltanwendung gefügig zu machen. »In den 1970er Jahren«, schreibt Perkins, »wirkte ich bei einem besonderen Deal mit, über den heute wieder oft gesprochen wird. Das saudische Königshaus stimmte zu, den größten Teil seiner Petrodollars ... in amerikanischen Regierungsanleihen anzulegen. Sie stimmten auch zu, den Ölpreis innerhalb für uns akzeptabler Grenzen zu halten. Im Gegenzug verpflichteten wir uns, das Haus Saud an der Macht zu halten.«

Tatsächlich sind die drei oligarchisch regierten Ölstaaten Saudi-Arabien, Kuwait und Arabische Emirate de facto Protektorate der USA. Mit einem Weltmarktanteil von knapp unter 20 Prozent schufen sie hohe Förderkapazitäten und sorgten auch in den 1980er und 1990er Jahren für eine kontinuierliche Überproduktion. Als Folge der beträchtlichen Überkapazitäten in der Opec und des Ausbaus kostenaufwändigerer Energiequellen außerhalb der Opec fiel der Ölpreis rapide von 40 bis auf 10 Dollar pro Barrel Ende der 1990er Jahre. Selbst als während der Kuwait-Krise und des ersten Golfkriegs die kuwaitischen und irakischen Öllieferungen plötzlich ausfie-

▼ Rohölpreise seit 1861: Die grüne Kurve gibt den nominellen Preis für ein Barrel Öl an, die schwarze den Preis umgerechnet auf die Kaufkraft von 2003. Angegeben ist der amerikanische Durchschnittspreis (1861 bis 1944), der Preis für die Ölsorte Arabian Light (1945 bis 1983) und für die Sorte Brent (ab 1984). Rot gepunktete Linien geben längerfristige Trends wieder.



SIGANIMI / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

len, die immerhin 20 Prozent des Opec-Anteils ausmachten, stiegen die Ölpreise weder dramatisch noch nachhaltig, wie eigentlich zu erwarten gewesen wäre (Bild links unten). Die Saudis hatten binnen kürzester Zeit die Marktlücke durch höhere Auslastung bestehender Überkapazitäten vollständig gefüllt.

Neoklassiker bestreiten keineswegs, dass es Ölüberproduktion gibt, erklären sie jedoch durch das strategische Interesse der Opec selbst: Dieses Kartell fahre die Überkapazitäten nicht zurück, um durch Dumpingpreise andere Anbieter vom Markt zu verdrängen und damit langfristig höhere Preise durchzusetzen. Solche Strategien werden zweifellos praktiziert; nur bestehen die Dumpingpreise schon viel zu lange, um einen solchen Zweck zu erfüllen. Vielmehr handelt die Opec damit den Interessen ihrer Mitglieder zuwider – was bei diesen nicht unbemerkt bleibt. Viele von ihnen haben sich vehement gegen eine solche Politik zu Wort gemeldet. Kamal Daneshjar, der Vorsitzende der Energiekommission des iranischen Parlaments, hat sogar dafür plädiert, die Opec zu verlassen.

Die drei Etappen der Ölpreisgeschichte

Über einen Zeitraum von beinahe sieben Dekaden gelang es also den Industriestaaten, erst durch zweifelhafte Nutzungsverträge und später durch gezielte Kooperation mit bestenfalls halbsouveränen, demokratisch nicht legitimierten Öllieferstaaten des Mittleren Ostens, die Marktgesetze im Ölsektor unwirksam zu machen.

Mangel an Demokratie in den Ölstaaten war und ist der entscheidende, jedoch nicht der ausschließliche Grund dafür. Aus den verschiedensten Gründen gerieten diese Staaten in Geldnot, sodass sie sich nicht in der Lage sahen, auf Einnahmen aus dem Ölgeschäft zu verzichten: Mehrere Golfkriege und die darauf folgenden Wiederaufbauaktivitäten rissen große Löcher in die Devisenkassen; die Anhebung des Zinsniveaus in den USA während der 1980er Jahre veranlasste ölfreiche Opec-Mitglieder wie Saudi-Arabien und Kuwait zur Produktionssteigerung, um die Einnahmen profitabel in den USA anzulegen. Hinzu kommt, dass das IWF mit Strukturanpassungsprogrammen die hoch verschuldeten Opec-Staaten dazu zwang, die Ölproduktion ebenfalls zu erhöhen.

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

Insgesamt finden sich in der Geschichte der Ölpreise drei unterscheidbare Etappen:

► In der Ära der US-Öldominanz (1861–1920) bewegte sich der Ölpreis auf dem nahezu vom Weltmarkt unabhängigen US-Ölmarkt entsprechend der Ricardo-Marx-Hotelling-Theorie.

► Von 1920 bis Anfang der 1970er Jahre tendierte dank neokolonialistischer Nutzungsverträge und unter dem Druck der strukturellen Überproduktion der Kapitalwert der Ölquellen gegen null, und der Ölpreis sank auf das niedrige Grenzkostenniveau.

Die Spannungen zwischen den künstlich niedrig gehaltenen Preisen und dem Niveau eines vollkommenen Markts, der zu dieser Zeit nicht existierte, entluden sich schockartig in zwei Preissprüngen 1974 und 1979. Den Öl verbrauchenden Industriestaaten gelang es jedoch, durch wirksame Gegenstrategien wie die Gründung der IEA, den Ausbau der Kernenergie und die Erschließung neuer Ölfelder die neu gewonnene Verhandlungsmacht der Opec zu schwächen und ab 1985, dem Höhepunkt des Iran-Irak-Kriegs, den Zustand von Überproduktion und Dumpingpreisen wiederherzustellen, der bis Ende der 1990er Jahre andauerte.

► Vor unseren Augen beginnt schließlich ein neues Zeitalter von Ölknappheitspreisen. Aller Wahrscheinlichkeit nach ist diese Transformation nicht mehr rückgängig zu machen. Denn neue nachfragemächtige Staaten wie China, Indien und andere Schwellenländer machen dem Nachfragemonopol der Industriestaaten Konkurrenz.

Die Zeiten, als nur 20 Prozent der Weltbevölkerung 100 Prozent der Ölquellen für sich in Anspruch nahmen, ge-

▲ **Ölboom in Texas 1919: Nur die Entdeckung neuer Ölquellen konnte den Preisanstieg nach der Hotelling-Regel bremsen.**

hören für immer der Vergangenheit an. Das Nachfrage-Angebot-Verhältnis für Öl (und wohl auch für andere Ressourcen) beginnt sich zu normalisieren. Ab jetzt müssen auch entwickelte Industrieländer lernen, die Ölknappheit als Tatsache anzuerkennen, statt sie zu ignorieren.

Im Zuge der Demokratisierung werden die Regierungen der Ölstaaten sich konsequenter als bisher den langfristigen nationalen Interessen verpflichtet und den – wie neoklassische Ökonomen sagen würden – kollektiven Grenznutzen ihrer Völker zu optimieren suchen. An die Stelle des politisch motivierten Diktats der Nachfrageseite tritt dann die volle Entfaltung der Marktkräfte. Daraus resultieren unweigerlich steigende Ölpreise. Wirklich freie und unabhängige Parteien in demokratisierten Ölstaaten könnten sich kaum dem innergesellschaftlichen Diskurs über Souveränität und nationale Interessen entziehen; sie würden einerseits mit neuen Ölmengen- und Ölpreisstrategien, andererseits mit einer Politik der Verringerung der eigenen Abhängigkeit von Öleinnahmen Wählerstimmen zu gewinnen versuchen. Diese Ziele können die Ölstaaten möglicherweise sogar effizienter ohne die Opec verfolgen, die damit auf die Dauer überflüssig würde.

Durch die steigenden Preise werden die Nachfragerländer sich genötigt sehen, nach Alternativen zu suchen. Gleichzeitig werden diese Alternativen im Gegensatz zu den bisherigen Verhältnissen ►

▷ konkurrenzfähig und können im Endeffekt dem Anstieg der Ölpreise Grenzen setzen. Auf lange Sicht dürfte die einzige gangbare Alternative die Nutzung regenerativer Energieformen sein. Kurzfristig erscheint dagegen die Erschließung weiterer fossiler Energiequellen, zum Beispiel der umweltschädliche Ölsandabbau in Kanada, attraktiver; denn sie erspart – zumindest vorübergehend – den Energieverbrauchern die ungeheuer kostspielige Umstellung ihrer Heizungs- und Verkehrssysteme. Daher stellen Ölnknappheitspreise keine Garantie für den weltweiten Übergang zu regenerativen Energien dar.

Hierfür wird die Weltgemeinschaft ohne eine globale Regulierung des Angebots aller fossilen Energiequellen nicht auskommen. Durch eine weltweite Kooperation von Anbieter- und Verbraucherstaaten würde das Angebot an fossilen Brennstoffen im 21. Jahrhundert in Anlehnung an allgemein anerkannte Klimaschutzszenarien drastisch reduziert werden. Der Übergang zu regenerativen Energietechnologien wird jedoch dem Markt überlassen. Ölnknappheitspreise steigen in diesem Modell auf eine – erträgliche – Größenordnung von 50 bis 100 Dollar pro Barrel an und forcieren den massiven Ausbau regenerativer Energien, sinken jedoch in dem Maß, wie sich die regenerativen Energietechnologien verbilligen (Bild unten). Im Rahmen eines politisch im Menschheitsinteresse geschaffenen globalen Regulierungssystems für Energien stünden die Marktmechanismen nicht länger im Gegensatz zur Idee der nachhaltigen Entwicklung. Demokratisierung in den Ölstaaten würde so zu einem komplementären Baustein

einer Strategie global nachhaltiger Energieversorgung und des Klimaschutzes.

Das neue Projekt »Demokratisierung des Greater Middle East« der US-Neokonservativen geriete nach dieser Analyse in Widerspruch zur Hegemonial- und auch zur derzeitigen Klimaschutzpolitik der Vereinigten Staaten, es sei denn, dieses Projekt wäre eine Leerformel für die Fortsetzung der bisherigen Hegemonialpolitik in dieser Region. Denn Demokratisierung und souveräne Staaten im Mittleren Osten machen eine kostspielige militärische Sicherung der Energieversorgung überflüssig. Der faire Handel würde, wie beim Handel innerhalb der Industrieländer, diese Sicherheit hinreichend gewähren. Die Demokratisierung muss jedoch, im Gegensatz zu dem Demokratieexport, den die Bush-Regierung anstrebt, authentisch und in der Gesellschaft verwurzelt sein.

Gleichgewichts- und faire Preise

Der Ölmarkt ist nur das krasseste Beispiel dafür, dass Anbieter erschöpfbarer Rohstoffe entgegen der Marktlogik ihr Angebot nicht zurückhalten, sondern zu Dumpingpreisen auf den Markt werfen. Man findet dieses Muster allenthalben in den Wirtschaftsbeziehungen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern. Warum hat die neoklassische Theorie dafür keine plausible Erklärung?

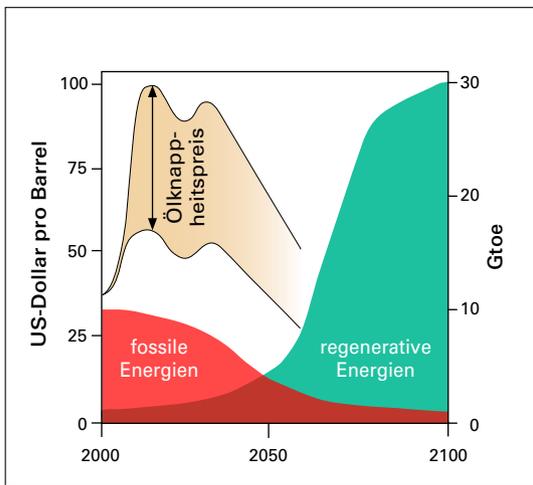
Jede Wirtschaftstheorie neigt dazu, die politischen Rahmenbedingungen, unter denen sie ausgearbeitet wird, für allgemein gültige Grundvoraussetzungen zu halten. Das gilt für die Klassiker von Adam Smith über Ricardo bis Marx, zu deren Zeiten vordemokratische Politik-, Macht- und Sozialstrukturen noch stärker

als Marktgesetze die ökonomischen Abläufe beeinflussen. Es gilt ebenso für die neoklassische Schule, die im 20. Jahrhundert unter mehr oder weniger demokratischen Rahmenbedingungen entstand. Unversehens wurden diese zur *Conditio sine qua non* aller neoklassischen Theorien: In Demokratien mit einigermaßen erfüllter Chancengleichheit für Marktakteure liegen Gleichgewichtspreise und faire Preise nah beieinander. Hier steigert die Arbeitsteilung die Effizienz und auch den Wohlstand.

Als allerdings neoklassische Ökonomen ihre Preis- und Wohlfahrtstheorien auf die wirtschaftlichen Beziehungen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern übertrugen, übersahen sie, dass die Grundvoraussetzung für die Gültigkeit ihrer Theorien, eben die Demokratie, bei vier Fünfteln der Weltbevölkerung nicht erfüllt war. Damit öffneten sie gravierenden Fehlinterpretationen Tür und Tor. So wurden dauerhaft sinkende Rohstoffpreise und Verschlechterung der Terms of Trade für Entwicklungsländer schlicht auf »sinkende Nachfrage« zurückgeführt. Ausbleibende Wohlstands- und Entwicklungseffekte in diesen Ländern wurden mit Mangel an Leistungsbereitschaft, niedriger Sparquote oder lapidar mit »Politikversagen« der Regierungen erklärt.

Dabei ist die These von der sinkenden Nachfrage definitiv falsch. Untersuchungen des Kieler Instituts für Weltwirtschaft und zahllose weitere Studien über die Entwicklung der Rohstoffpreise belegen, dass die Rohstoffnachfrage im Gleichklang mit der Verzehnfachung des Sozialprodukts in den Industrieländern ebenfalls um ein Mehrfaches stieg. Paradoxerweise herrscht selbst bei erschöpfbaren Gütern trotz steigender Nachfrage ein dauerhafter Angebotsüberhang.

Die Hauptursache dieses für Marktökonomien untypischen und ungleichgewichtigen Dauerzustands war und ist die Ungleichheit der Chancen der Akteure auf den Weltmärkten: Auf der einen Seite stehen die entwickelten Industrienationen, die ihre eigenen Märkte durch umfassende Subventionen und Schutzzölle hermetisch gegen den Wettbewerb der Entwicklungsländer abriegeln, dazu noch ihre Stellung mit Hilfe von Leitwährungen und internationalen Währungsfonds institutionell stärken und die Entwicklungsländer mittels so genannter Strukturanpassungsprogram-



◀ Szenario eines von einer Weltenergieagentur kontrollierten Übergangs von fossilen zu erneuerbaren Energien. Als Folge wachsender Weltbevölkerung und Industrialisierung in Entwicklungsländern steigt die Energienachfrage von 9 Gigatonnen-Äquivalenten (Gtoe) im Jahr 2000 bis zum Jahrhundertende auf das Dreifache (nach einem Szenario des Stockholm Environment Institute von 1993). Die Ölpreise steigen bei zunehmender Nachfrage und sukzessiver Mengenverknappung zunächst an, sinken jedoch in dem Maß, wie die Kosten erneuerbarer Energien im Zuge der technischen Entwicklung abnehmen.

▶ Erdöl ist Anlass wie Mittel zum Krieg: Bei seinem Rückzug vom verlorenen Golfkrieg ließ Saddam Hussein 1991 Ölquellen in Kuwait anzünden.

me zu steigender Rohstoffproduktion drängen. Auf der anderen Seite stehen die demokratisch nicht legitimierte Eliten der Entwicklungsländer, die nicht am Gemeinwohl ihrer Gesellschaften, sondern an der kurzfristigen Maximierung des eigenen Wohls interessiert sind und sich gerade wegen des Mangels an Demokratie bereitwillig den Interessen der Wohlstandsdemokratien an Rohstoffen zu Dumpingpreisen durch Überproduktion fügen.

Das gilt nicht nur für erschöpfbare Rohstoffe. Dumpingpreise für reproduzierbare Waren aus Entwicklungsländern resultieren vor allem daraus, dass dort auch Löhne mangels Demokratie und freier Gewerkschaften Dumpinglöhne sind. Diese allerdings dienen im Zuge der Globalisierung als wirkungsvoller Hebel, um Niedriglöhne auch in den Industrieländern durchzusetzen. Insofern sind Diktatur und Abwesenheit von freien Gewerkschaften in Entwicklungsländern verborgene Bestandteile einer neoliberalen Weltordnung.

Unfaire Preise für alle Produkte aus Entwicklungsländern sind die Hauptursache für die kontinuierlich sinkenden Terms of Trade sowie den Einkommens-transfer von Süden nach Norden. Insofern finanzieren diktatorisch regierte Länder den Wohlstand von demokratischen Gesellschaften mit.

Ricardos Theorie der komparativen Kostenvorteile und deren neoklassische Varianten sind nicht grundsätzlich falsch, wie die meisten Kritiker des Süd-Nord-Wohlstandstransfers behaupten. Es ist nur eine entscheidende Voraussetzung der Theorie, nämlich die Marktsouveränität der Anbieter, nicht erfüllt.

Es liegt auch im wohlverstandenen Interesse der Industrieländer, die Schaffung dieser Voraussetzung, sprich einer echten Demokratie, zu fördern. Denn die neoklassische Theorie verspricht allen Beteiligten an einem fairen Handel einen Wohlstandszuwachs – auch denen, die bisher von einem Demokratiemangel auf der anderen Seite profitierten und für die Zukunft um den Verlust dieser Vorteile fürchten. ◀

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



Mohssen Massarrat, geboren 1942 in Teheran, erwarb sein Ingenieurdiplom für Bergbau 1967 an der Technischen Universität Berlin, promovierte 1974 in Politikwissenschaft an der Freien Universität Berlin und habilitierte sich 1978 für Wirtschaftswissenschaften an der Universität Osnabrück, wo er heute Professor für Politik und Wirtschaft ist. Seine Forschungsschwerpunkte sind politische Ökonomie, Demokratietheorie, internationale Wirtschaftsbeziehungen sowie Friedens- und Konfliktforschung.

Über die Grundsätze der politischen Ökonomie und der Besteuerung. Von David Ricardo. 2. Auflage, Metropolis, Marburg 2006

Demokratisierung des Greater Middle East. Von M. Massarrat in: Aus Politik und Zeitgeschichte, Heft 45, 2005

Bekenntnisse eines Economic Hit Man. Unterwegs im Dienste der Wirtschaftsmafia. Von John Perkins. Riemann, München 2005

Das Ricardo-Marx-Hotelling-Theorem. Von M. Massarrat in: Das Dilemma der ökologischen Steuerreform. Metropolis, Marburg 2000

Weltenergieproduktion und Neuordnung der Weltwirtschaft. Von M. Massarrat. Campus, Frankfurt/New York 1980

Die Zeitdimension. In: Endlichkeit der Natur und Überfluß in der Marktökonomie. Schritte zum Gleichgewicht. Von M. Massarrat. Metropolis, Marburg 2000

Sustainability Through Cost Internalisation. Theoretical Rudiments for the Analysis and Reform of Global Structures. Von M. Massarrat in: Ecological Economics, Bd. 22, S. 29, 1997

The economics of resources or the resources of economics. Von Robert M. Solow in: The American Economic Review, Bd. LXIV, S. 1, 1974

The economics of exhaustible resources. Von Harold Hotelling in: The Journal of Political Economy, Bd. 39, S. 137, 1931

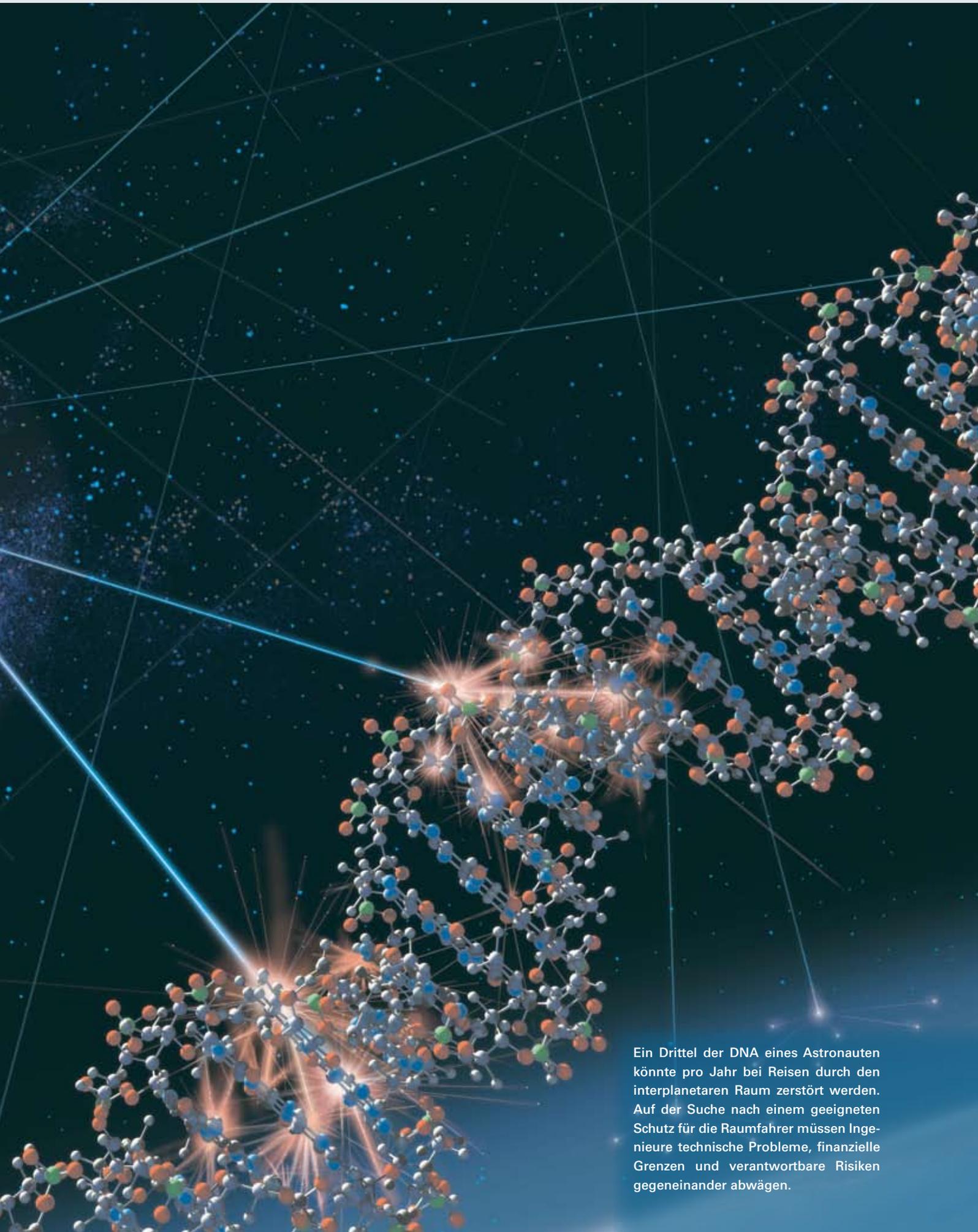
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852650.

Schutzschilde für Raumfahrer?

Wird der bemannte Flug zum Mars scheitern, weil die kosmische Strahlung das Leben der Raumfahrer bedroht? Die existierenden Schutzmaßnahmen reichen jedenfalls kaum aus.

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





Ein Drittel der DNA eines Astronauten könnte pro Jahr bei Reisen durch den interplanetaren Raum zerstört werden. Auf der Suche nach einem geeigneten Schutz für die Raumfahrer müssen Ingenieure technische Probleme, finanzielle Grenzen und verantwortbare Risiken gegeneinander abwägen.

Von Eugene N. Parker

Wer häufiger Sciencefiction-Romane liest, könnte hungrige Aliens, aus der Bahn geworfene Asteroiden und waffenstarrende Raumkreuzer für die größten Gefahren von Weltraumreisenden halten. Tatsächlich sind jedoch die schlimmsten Bedrohungen, die im All auf Menschen lauern, zugleich die kleinsten: hochenergetische Teilchen der kosmischen Strahlung, die bei Astronauten Krebs auslösen können.

Ausreichend Geld und Zeit vorausgesetzt, lassen sich die meisten technischen Probleme einer längeren Weltraumreise vermutlich lösen. Ob es jedoch gelingen wird, die Raumfahrer vor den Gefahren der kosmischen Strahlung zu schützen, bleibt vorerst ungewiss.

Physiker registrierten dieses Phänomen am Ende des 19. Jahrhunderts zunächst als kleine, aber ärgerliche Störung im Labor. Anscheinend ohne äußeren Einfluss verloren elektrisch aufgeladene Gegenstände ihre Ladung – vermutlich durch den Kontakt mit der umgebenden Luft. Irgendetwas musste die Luft ionisieren und dadurch elektrisch leitfähig gemacht haben. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts hatten viele Forscher die natürliche Radioaktivität der Erde als Ursache in Verdacht, bis der österreichische Physiker Victor Hess im Jahr 1912 auf eine völlig andere Erklärung stieß. Hess nahm eine Art Elektroskop auf Ballonflüge bis in eine Höhe von etwa 5350 Metern über der Erdoberfläche mit. Bei seinen

Flügen merkte Hess, dass sein Elektroskop die Ladung umso schneller verlor, je höher er sich befand – ein deutlicher Hinweis für das Weltall als Ursprung einer ionisierenden kosmischen Strahlung.

Bis heute halten Forscher an diesem Begriff fest, obwohl sie seit etwa 1950 wissen, dass diesem Name ein Irrtum zu Grunde liegt. Was aus dem Kosmos auf die Atmosphäre trifft und die Luft ionisiert, sind nämlich keine Strahlen, sondern Ionen, elektrisch geladene Atomkerne, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf die Hochatmosphäre treffen. Zumeist handelt es sich dabei um Protonen. Welche Prozesse sie beschleunigen, ist immer noch weit gehend rätselhaft.

War die kosmische Strahlung anfangs ein Ärgernis für Physiker, so erwies sie sich bald als nützliches Werkzeug für zahlreiche Forschungen. In den 1950er Jahren entdeckte ich gemeinsam mit

mehreren Kollegen, dass man Intensitätsschwankungen der Strahlung als Hinweis auf die Existenz eines Sonnenwinds deuten kann. Andere Wissenschaftler nutzten die im All beschleunigten Teilchen, um Atomkerne zu erforschen.

Kosmische Strahlenkaskade

Für Lebewesen ist kosmische Strahlung jedoch äußerst gefährlich. Entgegen einer verbreiteten Ansicht schützt uns auf der Erdoberfläche nicht vor allem das Magnetfeld unseres Planeten davor, sondern seine Atmosphäre. Auf jedem Quadratzentimeter der Erde lastet zirka ein Kilogramm Luft. Im Durchschnitt trifft ein Proton der kosmischen Strahlung auf den Atomkern eines Luftmoleküls, nachdem es eine Luftmenge von etwa 70 Gramm pro Quadratzentimeter passiert hat, also 1/14 der atmosphärischen Luftsäule. Die Teilchen kollidieren gewöhnlich in einer Höhe von 20 bis 25 Kilometern über der Erdoberfläche.

In den tieferen Schichten der Atmosphäre werden die Splitter dieses Zusammenstoßes absorbiert. Der Zusammenstoß schlägt ein Proton oder ein Neutron aus dem getroffenen Atomkern und löst einen Schauer hochenergetischer Gammastrahlen und π -Mesonen (Pionen) aus. Gammastrahlen dringen tiefer in die Atmosphäre ein und erzeugen schließlich Elektron-Positron-Paare, die sich nach kurzer Zeit vernichten und dabei Gammastrahlung von geringerer Energie aussenden. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis die Energie der in den Folgeaktionen entstandenen Gammastrahlen nicht mehr ausreicht, um weitere geladene Teilchen freizusetzen.



IN KÜRZE

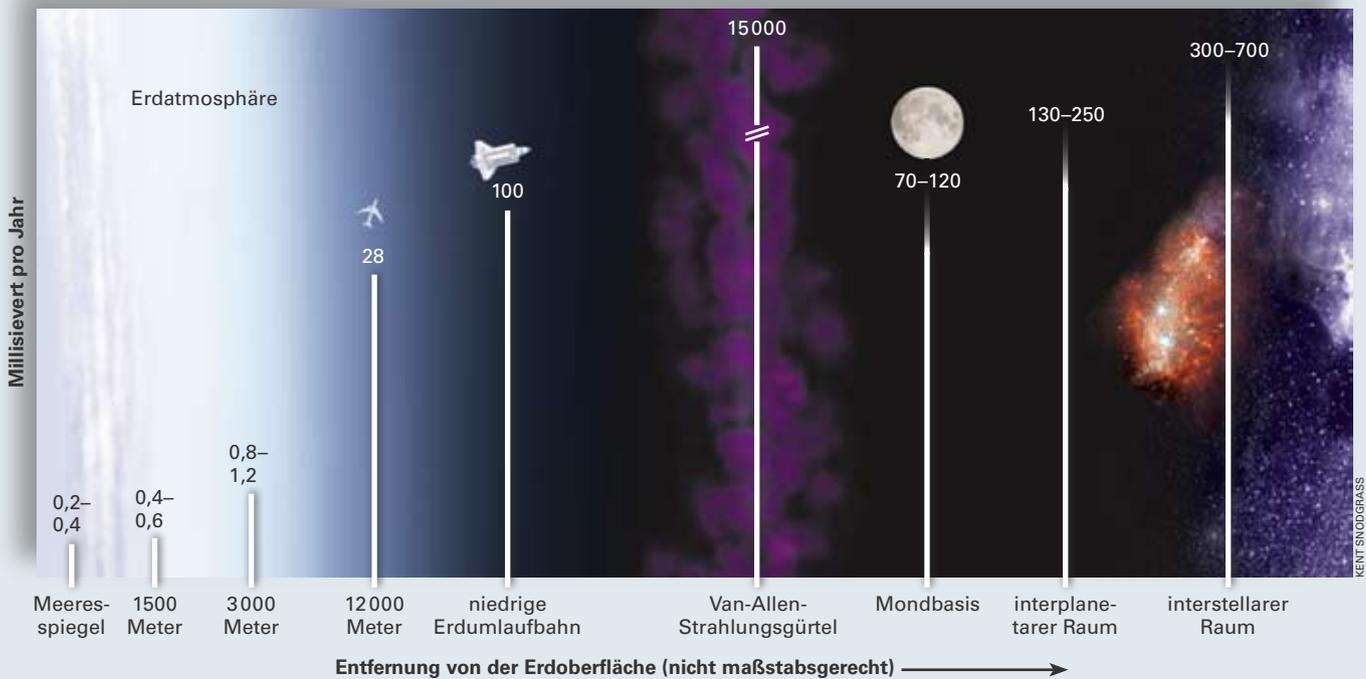
- ▶ **Energiereiche, elektrisch geladene Teilchen** durchdringen unsere ganze Galaxis. Sie können die DNA und andere Moleküle zerstören und Krebs verursachen. Auf der Erdoberfläche sind wir durch die Luftmassen der Atmosphäre vor dieser kosmischen Strahlung geschützt, und auch die Astronauten in äquatornahen Umlaufbahnen sind durch das Erdmagnetfeld abgeschirmt. Begeben sich Astronauten jedoch auf Reisen fernab der Erde, müssen sie mit schwer wiegenden gesundheitlichen Folgen rechnen.
- ▶ **Eine kugelförmige Hülle** aus Wasser oder Kunststoff könnte Raumfahrer schützen, doch mit einer Masse von 500 Tonnen wäre sie zu schwer. Ein supraleitender Magnet könnte die kosmischen Teilchen abstoßen, doch sein starkes Magnetfeld wäre selbst ein Gesundheitsrisiko.
- ▶ Nun müssen Biomediziner genauer bestimmen, **welche Strahlendosis** Menschen über einen längeren Zeitraum aushalten können, ohne zu erkranken – und ob es Substanzen gibt, die den natürlichen Reparaturmechanismus des Körpers stimulieren können.

Welche Gefahr droht den Astronauten?

Es ist zwar nicht ganz so schlimm wie ein Aufenthalt im Inneren eines Kernreaktors, doch eine Reise durchs Weltall kann trotzdem die Gesundheit eines Menschen ernsthaft gefährden.

Dieses Diagramm zeigt die jährliche Strahlungsdosis, die ein Astronaut durch die kosmische Strahlung erhalten würde. Die übliche Einheit für die Strahlungsdosis ist Sievert (Sv). Gemäß internatio-

nenal Standards sollten Arbeiter in ihrem gesamten Leben nicht mehr als 250 mSv ausgesetzt sein. Auf interplanetaren Flügen würden Astronauten diese Dosis bereits in einem Jahr empfangen und ihr Risiko, an Krebs zu erkranken, drastisch erhöhen. Sonneneruptionen oder dem Van-Allen-Strahlungsgürtel der Erde ausgesetzt zu sein, könnte Raumfahrer sogar unmittelbar töten, doch diese Gefahr ist leichter zu umgehen.



Die Pionen zerfallen unterdessen in μ -Mesonen (Myonen), die bis zum Erdboden gelangen. Zwar durchqueren auch diese Teilchen unsere Körper und können dabei Ionen bilden sowie chemische Bindungen aufbrechen, doch nicht in einem für uns gefährlichen Ausmaß. Die jährliche kosmische Strahlungsdosis in Meereshöhe beträgt etwa 0,3 Millisievert (mSv), was der Dosis von mehreren Röntgenaufnahmen des Brustkorbs entspricht.

Außerhalb der Atmosphäre ist die Intensität der kosmischen Strahlung um ein Vielfaches größer. Auf der Fläche eines Fingernagels würde ein ungeschützter Astronaut pro Sekunde von einem Proton oder einem schweren Atomkern getroffen, etwa 5000 Ionen würden in dieser kurzen Zeitspanne den Körper des Astronauten durchqueren und dabei nicht nur eine Spur zerbrochener chemischer Bindungen hinterlassen, sondern Teilchenkaskaden wie in der Atmosphäre auslösen. Die wenigen schweren Atomkerne richten dabei ge-

nauso viel Schaden an wie die Protonen, weil ihre Fähigkeit, chemische Bindungen aufzubrechen, proportional zum Quadrat der elektrischen Ladung wächst. Ein Eisenkern mit der Kernladungszahl 26 kann demzufolge 676-mal so viel Schaden anrichten wie ein Proton. Ist ein Astronaut nur eine Woche oder einen Monat lang im All unterwegs, wird er kaum geschädigt. Ein mehrjähriger Langzeitflug zum Mars ist dagegen viel gefährlicher – einer Abschätzung der Nasa zufolge könnte die kosmische Strahlung dabei pro Jahr ein Drittel der DNA eines Astronauten zerstören.

Quantitative Informationen über die biologischen Folgen hochenergetischer Strahlung haben wir bislang nur von Menschen, die bei nuklearen Explosionen oder Laborunfällen kurzen, aber intensiven Schauern von Gammastrahlen und schnellen Teilchen ausgesetzt waren. Zellschäden und ein erhöhtes Krebsrisiko waren nachweisbar die Folge. Ein Marsreisender wäre ähnlich hohen Strah-

lungsdosen ausgesetzt, allerdings verteilt über einen längeren Zeitraum. Ob diese beiden Belastungen vergleichbar sind, ist noch ungewiss. Möglich wäre, dass Reparaturmechanismen der Zellen mit den auftretenden Schäden Schritt halten.

Erhöhte Krebsrate

Wallace Friedberg vom Forschungsinstitut für zivile Luftfahrt der amerikanischen Luftfahrtbehörde (FAA) in Oklahoma City hat gemeinsam mit Kollegen versucht, die Strahlungsdosis eines zum Mars reisenden Astronauten genau abzuschätzen. In ihrem Abschlussbericht kommen sie zu dem Ergebnis, dass pro Jahr mit einer Belastung von 800 Millisievert gerechnet werden muss – dem 16-Fachen der jährlichen gesetzlichen Höchstdosis für Mitarbeiter in US-amerikanischen Kernkraftwerken. Friedberg und seine Mitarbeiter schätzen, dass jeder zehnte Astronaut und jede sechste Astronautin auf Grund ihrer Marsreise an Krebs sterben würden – Frauen sind

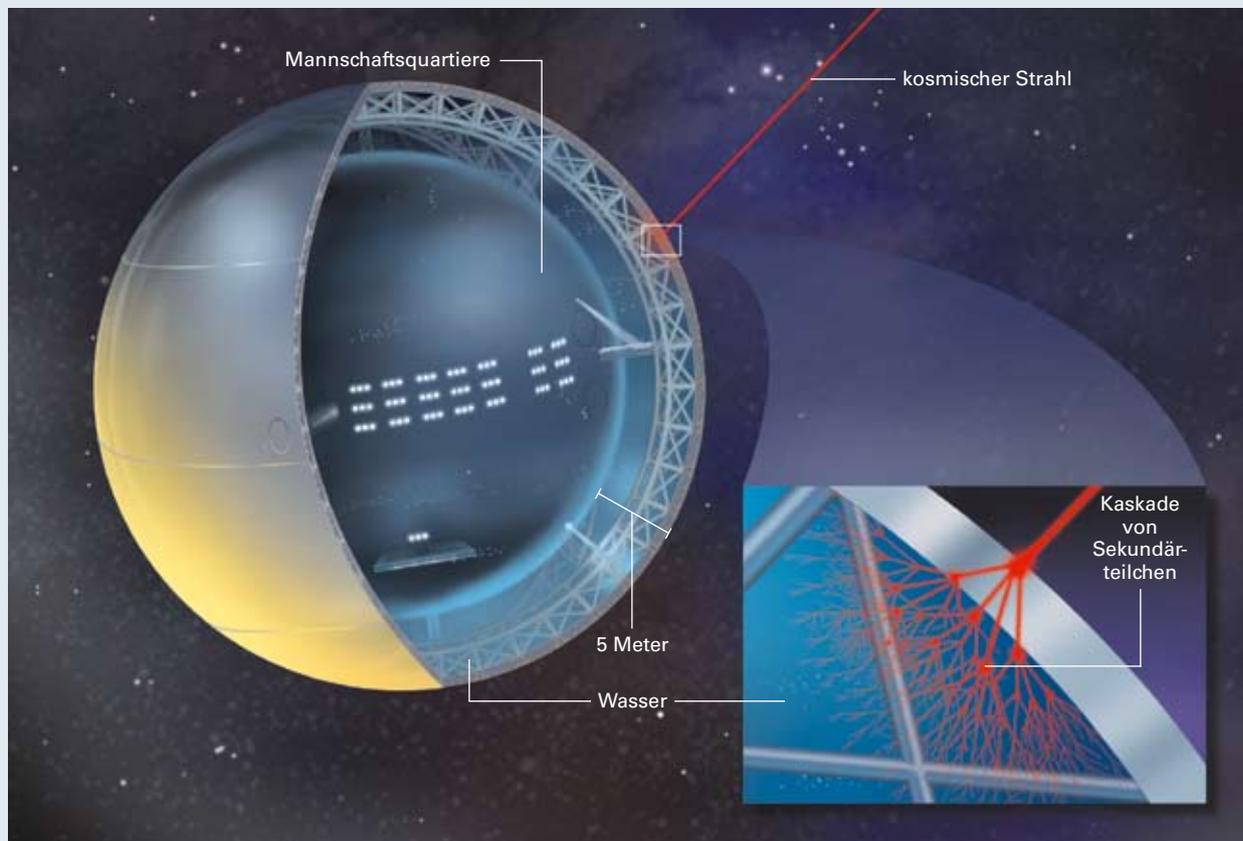
Plan 1: Materielle Abschirmung

Schichten aus Materie absorbieren die kosmische Strahlung und schützen so Astronauten. Eine kugelförmige, fünf Meter di-

cke Hülle aus Wasser würde den gleichen Schutz bieten wie die Erdatmosphäre in einer Höhe von 4500 Metern.

Vorteil: einfach, funktioniert garantiert

Nachteil: viel zu schwer (500 Tonnen)



ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: MIKE SINDGRASS

▷ wegen des Brustkrebsrisikos stärker gefährdet. Darüber hinaus könnten die schweren Atomkerne der kosmischen Strahlung Katarakte (grauen Star) und Gehirnschäden verursachen.

Raumschiffe im Wassertank

Dabei ist die aus den Tiefen des Raums stammende kosmische Strahlung für Raumfahrer nicht die einzige Strahlungsgefahr: Ausbrüche auf der Sonne katapultieren ebenfalls Protonen und schwerere Kerne mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ins All. In nur einer Stunde könnten Astronauten eine Strahlenbelastung von mehreren Sievert erleiden – für einen ungeschützten Raumfahrer eine tödliche Dosis. Die intensiven Strahlenausbrüche, die Ende 2003 auf der Sonne beobachtet wurden und auf der Erde Polarlichter und Stromausfälle auslösten, erinnern an diese Gefahr und legen nahe, eine Reise zum Mars während des Mini-

mums des elfjährigen Sonnenzyklus zu unternehmen.

Im Jahr 2002 begann die Nasa am Marshall Raumflugzentrum in Huntsville (Alabama) ein neues Programm, um Schutzvorrichtungen vor der kosmischen Strahlung weiterzuentwickeln. Anfangs wollten sich die Forscher die Erdatmosphäre zum Vorbild nehmen und die Astronauten mit einem Schild aus Materie schützen. Dafür müsste man die Oberfläche des Raumfahrzeugs mit einem Kilogramm pro Quadratmeter belegen. Vielleicht würden auch 500 Gramm pro Quadratmeter ausreichen. Ein leichter Schild würde Raumfahrer nicht behüten, sondern gefährden, da in ihm Sekundärteilchen entstünden, die abzuschirmen wären.

Anfangs erschien Wasser geeignet, weil die Astronauten ohnehin einen Wasservorrat brauchen und Wasserstoff die Strahlung besonders wirksam absor-

biert. Um ausreichend Schutz zu bieten, müsste eine Wasserschicht jedoch mindestens fünf Meter dick sein. Ein solcher kugelförmiger Wassertank um ein kleineres Raumschiff würde bereits etwa 500 Tonnen wiegen – viel mehr als die auf 30 Tonnen begrenzte Nutzlast eines Spaceshuttles. Atomkerne schwerer Elemente taugen als Material weniger, weil sich die dicht gepackten Protonen und Neutronen gegenseitig daran hindern, mit Teilchen der kosmischen Strahlung eine Wechselwirkung einzugehen.

Ethylen (C_2H_4) ist ein Material, das wasserstoffreich und transportabel ist, da es sich in Polyethylen umwandeln lässt, einen festen Stoff. So könnte man auf einen Tank verzichten. Mit 400 Tonnen wäre jedoch auch ein Ethylen-Schild zu schwer. Reiner Wasserstoff wäre zwar leichter, doch man bräuchte einen Hochdruckbehälter, um eine ausreichende Menge davon unterzubringen.

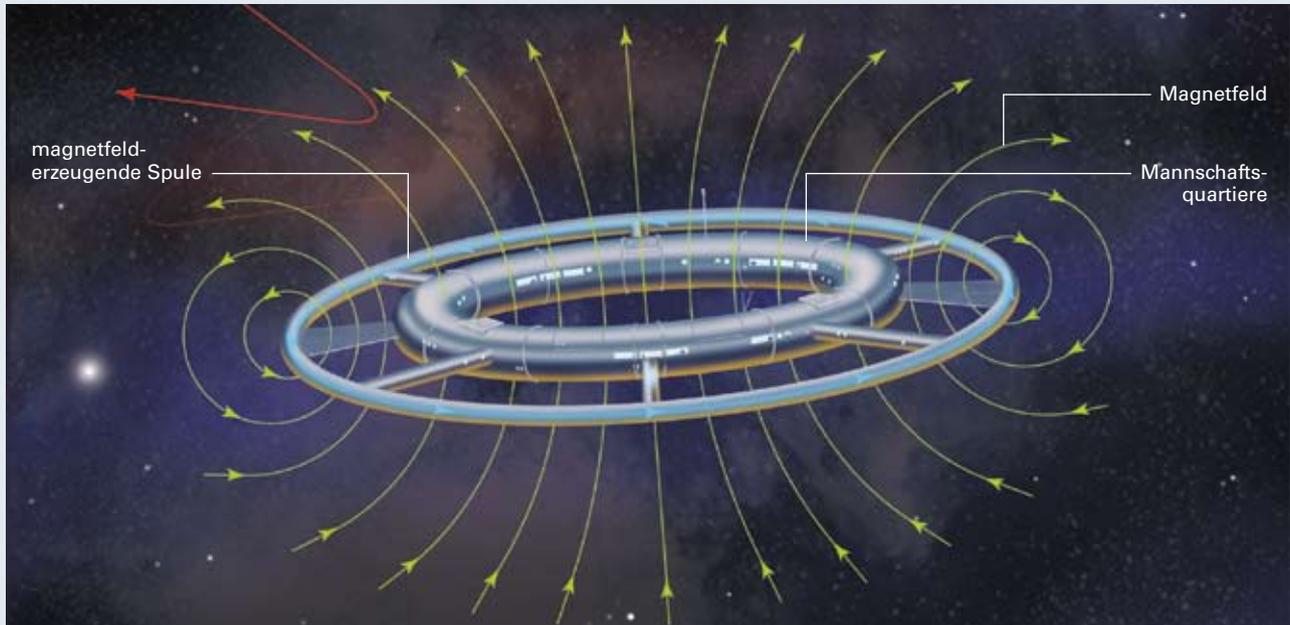
Plan 2: Magnetischer Schutzschirm

Ein Elektromagnet reflektiert die Teilchen der kosmischen Strahlung. Viele ihrer Teilchen haben Energien von bis zu zwei Giga-

elektronenvolt, was ein Magnetfeld mit der 600 000-fachen Stärke des Erdmagnetfelds erforderlich macht.

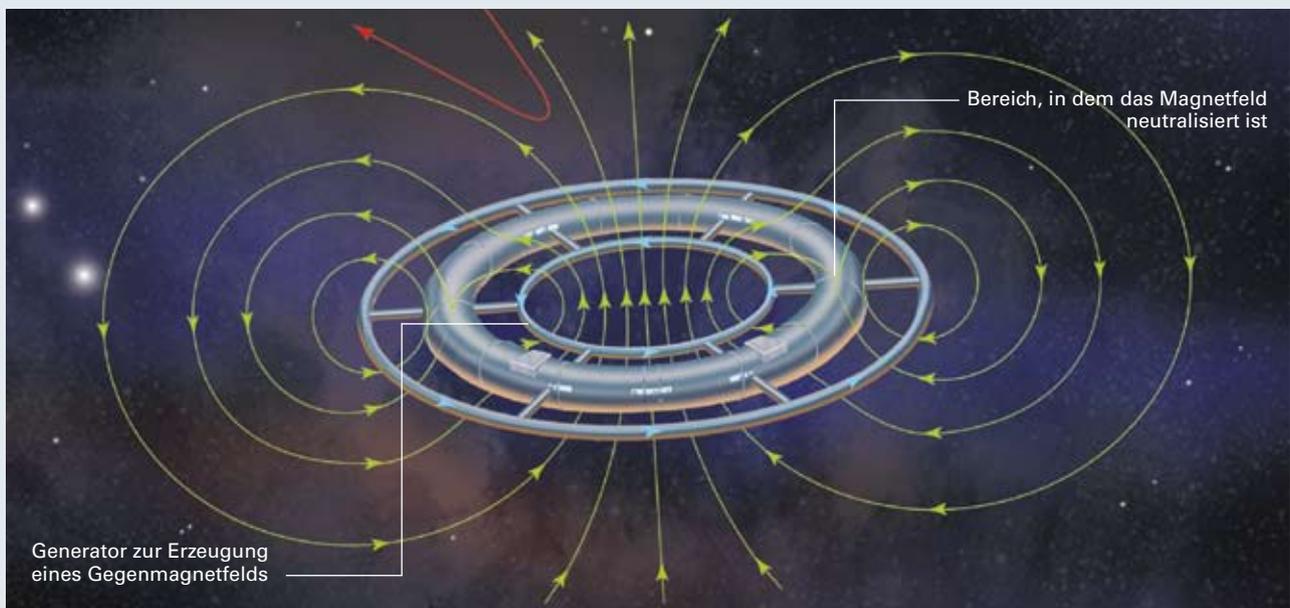
Vorteil: viel leichter als ein materieller Schild

Nachteil: kein Schutz entlang der Achse; das starke Magnetfeld ist selbst gefährlich



Um das starke Magnetfeld im Bereich der Wohnräume abzuschirmen, könnten die Ingenieure ein zweites, umgekehrt gepoltes

Magnetfeld installieren und einen magnetisch neutralen Raum schaffen. Doch dieser wäre recht klein und der Aufwand groß.



Angesichts dieser Nachteile eines materiellen Schutzschields analysierten die Nasa-Ingenieure aus Huntsville die Alternative, die kosmische Strahlung mit Hilfe von Magnetfeldern abzulenken. Schließlich schützt das irdische Magnetfeld so-

wohl die Menschen in äquatornahen Regionen als auch die Astronauten der Internationalen Raumstation vor einem Teil der Gefahr aus dem Weltraum.

Bewegt sich ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld, so wird es senkrecht

zu seiner Bewegungsrichtung abgelenkt. Ändert man den Verlauf der magnetischen Feldlinien auf geeignete Weise, dann lässt sich das Teilchen in jede beliebige Richtung ablenken und sogar in eine Kreisbewegung zwingen. Das Ma- ▷

▷ gnetfeld der Erde lenkt zumindest die relativ energiearmen, geladenen Teilchen aus dem Weltall dahin zurück (siehe Bild S. 69).

Um Astronauten auf diese Weise vor der kosmischen Strahlung zu schützen, muss man jedoch Protonen mit Energien von bis zu zwei Milliarden Elektronenvolt ablenken. Soll dies auf einer Strecke von wenigen Metern gelingen, wäre eine magnetische Feldstärke von 20 Tesla nötig – das ist das 600 000-Fache der Stärke des Erdmagnetfelds. Supraleitende Elektromagneten, wie sie bereits heute in Teilchenbeschleunigern benutzt werden, erreichen solche Feldstärken und können mit einer Masse von nur neun Tonnen recht gut ins All transportiert werden, auch wenn es unbequem ist, ein solches Gerät zum Mars und wieder zurück zu befördern.

Doch auch mit dieser Technik hätten die Ingenieure noch längst nicht alle Pro-

bleme gelöst. Zum einen bieten Magnetfelder nahe ihrer Pole keinen wirksamen Schutz, denn dort bewegen sich die eintreffenden Teilchen parallel und nicht quer zu den Feldlinien. Aus demselben Grund schützt auch das Erdmagnetfeld vor allem die Menschen in der Nähe des Äquators.

Instabiler Plasmaschirm

Der Entwurf einer Raumstation könnte dies berücksichtigen, indem er die Wohnräume der Astronauten in einem Ring vorsieht, in dem eine Feldstärke von 20 Tesla herrscht. Welche biochemischen Auswirkungen eine solche Umgebung langfristig für die Raumfahrer hätte, weiß heute jedoch niemand.

John Marshall, ein Experimentalphysiker der Universität Chicago, erzählte mir einmal, er habe seinen Kopf in das 0,5 Tesla starke Feld des Magneten eines alten Teilchenbeschleunigers gesteckt.

Bei jeder Bewegung seines Kopfes sah er kleine Lichtblitze und hatte schließlich einen sauren Geschmack im Mund – womöglich hatte das Magnetfeld in seinem Speichel elektrolytische Prozesse ausgelöst.

Wenn ein starkes Magnetfeld chemische Vorgänge in unserem Körper beeinflusst, wären zuerst genaue Untersuchungen erforderlich, bevor Astronauten ihr Leben einem solchen Schild anvertrauen könnten. Sollte sich das Feld als zu gefährlich erweisen, könnten Ingenieure ein zweites, entgegengerichtetes Feld erzeugen, welches im Aufenthaltsbereich der Raumfahrer für eine Neutralisierung sorgt. Dadurch würde der Schild jedoch komplizierter und schwerer werden.

Eine mögliche Alternative wäre, das schützende Magnetfeld über einen größeren Bereich zu erzeugen, etwa mit Hilfe eines Plasmas, einem Gas aus elektrisch geladenen Teilchen. Dies könnte ein vom

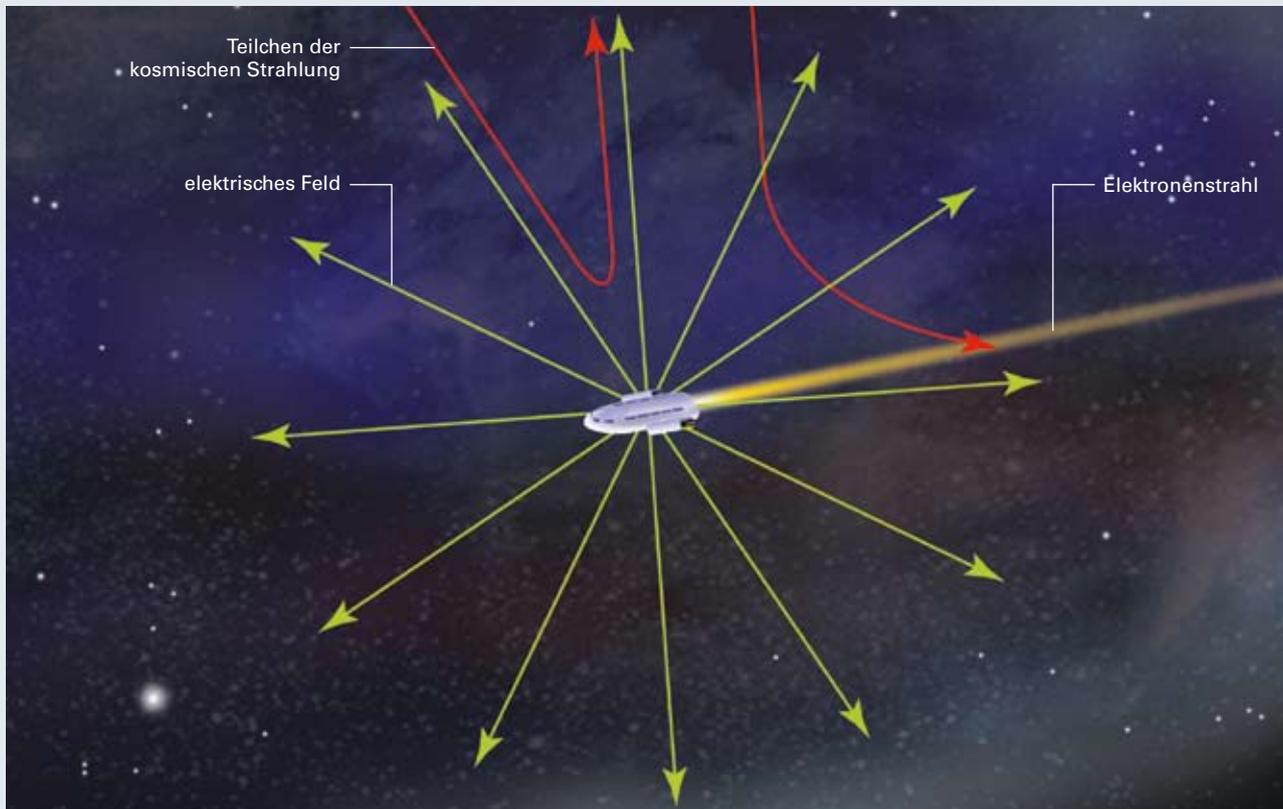
Plan 3: Elektrostatischer Schutzschirm

Feuert ein Raumschiff einen Elektronenstrahl ins All, wird das Raumschiff positiv geladen und stößt positiv geladene Teilchen der kosmischen Strahlung ab. Um Teilchen mit einer Energie

von zwei Milliarden Volt abzulenken (2 GeV), müsste man das Schiff mit zwei Milliarden Volt aufladen. Kein transportables Kraftwerk könnte die dafür notwendige Energie erzeugen.

Vorteil:
keine Löcher in der Abschirmung

Nachteil: erzeugt einen lästigen Zustrom negativ geladener Teilchen, benötigt einen gewaltigen elektrischen Strom (100 Milliarden Ampere)



KENT SNOODGRASS

Raumschiff ausgehender Strom elektrisch geladener Teilchen sein, der dem Sonnenwind ähnelt. In diesem Fall könnte bereits eine Magnetfeldstärke von einem Tesla wirksamen Schutz bieten. Leider sind Plasmen außerordentlich instabil. Wie schwierig der Umgang mit ihnen ist, zeigen die bislang vergeblichen Versuche, ein Plasma einzusperren und daraus mittels der Kernfusion Energie zu erzeugen.

Ließe sich ein Plasma nutzen, um ein ausgedehntes Magnetfeld zu schaffen, würde es die Feldlinien radial nach außen drücken und ihre Dichte verringern. Ein Proton der kosmischen Strahlung, das sich dem Raumschiff nähert, müsste demzufolge weniger Feldlinien durchqueren und das Magnetfeld wäre geschwächt, genau wie der magnetische Schild der Erde zu den Polen hin abnimmt.

Möglich wäre auch, das Raumschiff elektrisch aufzuladen, um seine Astronauten zu schützen. Besäße die Außenhülle gegenüber dem umgebenden Weltraum eine Spannung von zwei Milliarden Volt (also 2 GeV), so würden die Protonen der kosmischen Strahlung mit einer Energie von bis zu zwei Milliarden Elektronenvolt davon abgestoßen. Diese Methode wurde bereits für den Schutz einer Mondbasis vorgeschlagen.

Letzte Hoffnung Biomedizin?

Doch was sich zunächst nach einer schlaun Idee anhören mag, erweist sich als Trugschluss. Schließlich ist der Weltraum keineswegs leer, sondern enthält in Erdnähe pro Kubikzentimeter etwa fünf positiv geladene Ionen und fünf negativ geladene Elektronen. Ein positiv geladenes Raumschiff zöge diese Elektronen aus einer Entfernung von bis zu mehreren zehntausend Kilometern an, also aus dem Bereich, in dem die potenzielle Energie des elektrischen Felds die thermische Energie der Elektronen des interplanetaren Raums übersteigt.

Der Preis für diesen Schutz vor der kosmischen Strahlung ist ein intensiver Zustrom von Elektronen, die beim Aufprall auf das Raumschiff Gammastrahlen erzeugen würden. Die resultierende Strahlenbelastung wäre gewaltig und würde das ursprüngliche Problem weit übertreffen.

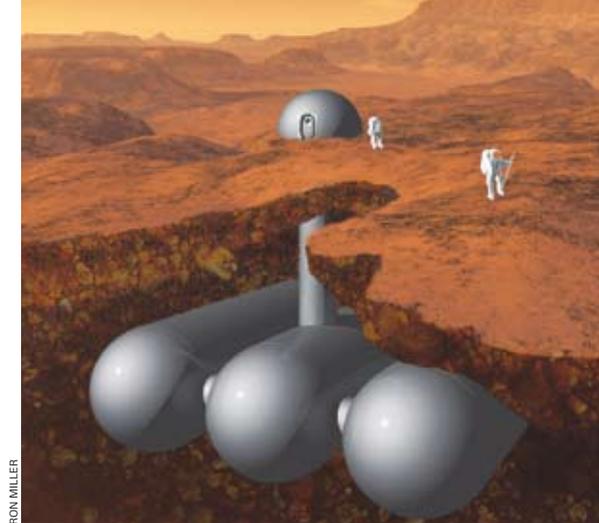
Abgesehen davon würde die notwendige Energie, um ein solches Feld aufrechtzuerhalten, unsere Vorstellungskraft sprengen. Ein Ampere Stromstärke bei einer Spannung von zwei Milliarden Volt erfordert 2000 Megawatt – das entspricht

Die dünne Atmosphäre des Mars reicht kaum aus, um Astronauten wirksam vor der kosmischen Strahlung zu schützen. Eine bemannte Basis müsste mit mehreren Tonnen Schutt und Gestein bedeckt werden. Sollte sie dauerhaft besetzt sein, müssten zuvor Medikamente erfunden werden, welche die Selbstheilung geschädigter Zellen fördern.

etwa der Leistung eines großen Elektrizitätswerks. Doch der nötige Strom betrüge über zehn Millionen Ampere, und wie die große Spannung von zwei Milliarden Volt überhaupt erzeugt werden kann, bleibt ungeklärt. Umso erstaunlicher ist, wie viel Aufmerksamkeit und Forschungsgelder eine solche Idee anziehen konnte – obwohl es keinen plausiblen Ansatz gibt, um sie zu verwirklichen.

Sind diese Pläne zum Scheitern verurteilt, bleibt uns nichts anderes übrig, als nach bodenständigeren Möglichkeiten Ausschau zu halten. So würden größere Raketen und fortschrittlichere Antriebssysteme die Reisezeit verkürzen und nebenbei die Strahlenbelastung der Astronauten verringern. Allerdings wird die optimale Reisezeit zum Mars vor allem durch die Bahnbewegung der Planeten festgelegt. Um den Zwängen einer energiearmen Flugbahn zu entkommen, wäre erheblich mehr Treibstoff nötig, was die Kosten dramatisch erhöht. Abgesehen davon besteht das Strahlenproblem auch nach Erreichen der Marsoberfläche weiter, denn die dünne Atmosphäre unseres Nachbarplaneten bietet mit ihren zehn Gramm pro Quadratmeter Planetenoberfläche kaum Schutz. Sicherlich könnte man eine Basis unter Hunderten von Tonnen aufgeschütteten Marsbodens begraben, doch dazu wäre wiederum schwere Maschinerie nötig.

Erweisen sich die physikalischen Methoden zum Strahlenschutz der Raumfahrer als unrealistisch, so hoffen manche Ingenieure der Nasa nun auf die Biomedizin. Vielleicht könnte es gelingen, ein Medikament zu entwickeln, das die von der kosmischen Strahlung verursachten Schäden repariert. Am Nationalen Weltraumstrahlungslabor, das dem Brookhaven-Nationallabor auf Long Island (New York) angegliedert ist, untersuchen Forscher zunächst, welche Bereiche der menschlichen DNA durch die kosmische



Gefahr besonders betroffen sind. Chemische Substanzen, die Ratten vermeintlich gegen Strahlenschäden widerstandsfähiger machten, erwiesen sich als giftig.

Bislang sind natürliche Heilungsprozesse der Zellen noch weitgehend unbekannt. Womöglich funktionieren körpereigene Prozesse, mit langfristig angehäuften Strahlungsdosen fertigzuwerden, bei einigen Menschen besser als bei anderen. Die existierenden Schätzungen der Krebsrate beruhen auf Erkrankungen nach kurzen, intensiven Strahlenbelastungen und könnten die Gefahren einer langfristigen Belastung überbewerten.

Es wäre natürlich enttäuschend, wenn die Zukunftsvisionen der bemannten Raumfahrt an den Gefahren der kosmischen Strahlung scheiterten. Sicherlich gäbe es einzelne Personen, die trotz dieser Gefahren aus Abenteuerlust zu einer Reise zum Mond und zum Mars bereit wären. Doch eine bemannte Eroberung des Sonnensystems oder gar eine Kolonisierung des Weltalls wäre so kaum denkbar. ◀



Eugene N. Parker ist emeritierter Professor für Physik an der Universität Chicago. Er hat bahnbrechende Arbeiten über den Sonnenwind, das Magnetfeld der Sonne und die Theorie der magnetischen Rekonnektion verfasst und für diese Arbeiten zahlreiche Preise erhalten, unter anderem den Kyoto-Preis für die Grundlagenforschung.

Kosmische Strahlung höchster Energie. Von James W. Cronin, Thomas K. Gaisser und Simon P. Swordy in: Spektrum der Wissenschaft 3/1997, S. 44

Radiation hazards in space. Von L. I. Miroshnichenko. Springer-Verlag 2003

Shielding space explorers from cosmic rays. Von Eugene N. Parker in: Space Weather, Bd. 3, Nr. 8, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852951.

Teil 2: Teure Fehlentscheidungen und wie sie der Investor vermeiden kann

Layes, Gabriel & Beck, Andreas
INSTITUT FÜR VERMÖGENSAUFBAU (IVA) GMBH

Mental Accounting

In komplexen Entscheidungssituationen sind Menschen durchaus dazu in der Lage, die verschiedenen Einflussfaktoren zu erkennen, die auf eine Sache einwirken. Sie vernachlässigen aber oftmals die Tatsache, dass zwischen diesen Faktoren wechselseitige Abhängigkeiten bestehen, die die Gesamtwirkung beeinflussen. Den Grund hierfür sehen Psychologen in einer Heuristik, die als »Mental Accounting« bezeichnet wird. Dieser Name rührt daher, dass diese Heuristik wirkt, als würden Menschen für jeden Handlungsstrang, den sie verfolgen, ein eigenes »mentales Konto« führen, das sie unabhängig von ihren anderen mentalen Konten bilanzieren.

Bei Anlageentscheidungen führt Mental Accounting dazu, dass jedes Wertpapierinvestment als eigenes Projekt angesehen wird, das separat bilanziert wird. Kommt ein neues, aussichtsreich wirkendes Wertpapier in den Blick, wird es als ein neues Einzelprojekt angegangen, und zwar unabhängig von der Frage, wie dieses neue Wertpapier mit den bisherigen Investments interagiert. Deshalb sehen Psychologen im Mental Accounting einen wesentlichen Grund dafür, dass viele Privatanleger auf der Basis von »heißen Tipps« ein strategieloses Stockpicking betreiben, ohne sich mit der Frage zu beschäftigen, wie die ausgewählten Wertpapiere zusammenwirken und welche Eigenschaften somit das Portfolio aufweist, das hieraus resultiert. Die besondere Problematik eines solchen Investitionsverhaltens besteht darin, dass das hieraus resultierende Gesamtdepot eine rein zufällige Struktur besitzt. Solche zufällig entstandenen Depotstrukturen besitzen in der Regel ein sehr hohes Risiko, da darin vielfältige vermeidbare Risiken akkumuliert werden.

Von tetralog systems durchgeführte Analysen von Privatanlegerdepots zeigen, dass das durchschnittliche Privatanlegerdepot eine Schwankungsbreite – im Fachjargon als »Volatilität« bezeichnet – aufweist, die in etwa im Bereich des MSCI World liegt, und somit im Bereich eines reinen Aktienindex. Dies ist umso bemerkenswerter, wenn man bedenkt, dass das durchschnittliche Privatanlegerdepot im Unterschied zum MSCI World risikoarme Wertpapiere wie zum Beispiel

Rentenfonds enthält. Dies rechtfertigt die Vermutung, dass sich viele Anleger durch privates Stockpicking, ohne es zu wissen, ein Depot geschaffen haben, dessen Gesamtrisiko weit oberhalb dessen liegt, was für sie auf Basis ihrer psychologischen, finanziellen und biografischen Situation empfehlenswert wäre.

Schließlich wird im Mental Accounting auch der Grund für ein anlegerpsychologisches Phänomen gesehen, das als »Einstandspreisorientierung« bezeichnet wird: Anleger neigen dazu, Verluste im Vergleich zu Gewinnen erst sehr spät zu realisieren und auf diese Weise teilweise sehr tief in die Verlustzone zu geraten. Auch hier würde die Gesamtdepotperspektive häufig bereits zu einem früheren Zeitpunkt nahelegen, aus dem Investment wieder auszusteigen, während bei einer Einzelprojektbetrachtung noch sehr lange die Hoffnung herrscht, dass man eines Tages zumindest wieder zum Einstiegskurs zurückkehren wird.

Repräsentativitätsheuristik

Während beim Mental Accounting wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Faktoren übersehen werden, die tatsächlich bestehen, gibt es auch den umgekehrten Effekt, dass Abhängigkeiten gesehen werden, die in Wirklichkeit nicht bestehen. Dieses Phänomen zeigt sich insbesondere bei der Beurteilung von Wahrscheinlichkeiten und wird in der Psychologie als die Folge der Anwendung einer »Repräsentativitätsheuristik« angesehen. Das klassische Beispiel hierfür wird ebenfalls bereits von Tversky und Kahnemann beschrieben: Sie fragten Versuchspersonen, wie hoch in einem (fairen) Roulette-spiel die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass beim nächsten Wurf »schwarz« fällt, wenn bekannt ist, dass bei den letzten zehn Würfeln bereits schwarz gefallen ist. Wie sich zeigte, glaubte eine Mehrheit der Befragten, dass unter diesen Bedingungen die Wahrscheinlichkeit für rot deutlich höher ist als die für schwarz. Dies ist allerdings falsch, da beim Roulette jeder Wurf ein Ereignis ist, dessen Wahrscheinlichkeiten immer gleich und völlig unabhängig von den bisherigen Ergebnissen sind.

Dieser Fehler wird deshalb so häufig gemacht, weil man in der Abfolge »zehnmal schwarz« ein untypisches

Muster wahrnimmt. Als typischer würde man es empfinden, irgendeine gemischte Abfolge von roten und schwarzen Zahlen zu sehen. Man erwartet daher, dass sich die Abfolge sehr schnell in Richtung eines typischen Musters verändern wird. Daher hält man es mit jedem schwarz für wahrscheinlicher, dass als Nächstes rot fällt. Diese Suche nach typischen beziehungsweise »repräsentativen« Mustern ist eine grundlegende Eigenschaft der menschlichen Wahrnehmung, die zur Komplexitätsreduktion bei der Informationsverarbeitung durchaus hilfreich ist. Sie kann aber auch dazu führen, dass Muster vermutet werden, wo faktisch keine sind.

Die Repräsentativitätsheuristik zeigt sich bei Geldanlegern in einer Art »unerschütterlichem Glauben an die Trendumkehr«: Je länger eine Aktie gefallen ist, desto stärker wird der Glaube daran, dass die Trendumkehr kurz bevor steht. Dies kann beispielsweise dazu führen, dass fallende Aktien viel zu lange gehalten oder sogar mitten im Abwärtstrend nachgekauft werden.

Praktische Konsequenzen für den Privatanleger

Wie kann der Privatanleger diese Fallen, die ihm die eigene Psyche bei der Geldanlage stellt, umgehen? Zunächst besteht die Möglichkeit, sich dieser Herausforderung autodidaktisch zu nähern, indem man sich selbst darin trainiert, den spontanen »Entscheidungsreflexen« nicht sofort nachzugeben, sondern sie immer noch einmal systematisch zu hinterfragen. Untersuchungen hierzu zeigen jedoch, dass dies nur den wenigsten Privatanlegern in der Praxis wirklich gelingt.

Vielversprechender ist es daher, sich professioneller Unterstützung bei seinen Anlageentscheidungen zu be-

diene. Denn wie empirische Studien zeigen, gelingt es im professionellen Asset Management durch systematische Investmentprozesse in der Tat, viele der Fehler zu vermeiden, die in der Behavioral Finance beschrieben werden. So spielt etwa das Mental Accounting im institutionellen Bereich kaum eine Rolle, da professionelle Asset Manager der Struktur eines Wertpapierportfolios ganz wesentliche Beachtung schenken. Zwar lassen sich auch im institutionellen Bereich suboptimale Entscheidungsheuristiken nachweisen (zum Beispiel sogenannte »Herdeneffekte«), jedoch »erkaufen« professionelle Asset Manager im langfristigen Durchschnitt ihre Renditen tatsächlich mit deutlich weniger Risiko als Privatanleger.

Der Privatanleger hat zwei grundsätzliche Möglichkeiten, hiervon zu profitieren: Er kann zum einen in »fertig strukturierte« Portfolios investieren, die ausgewiesenermaßen zum Verfolgen einer bestimmten Anlagestrategie geeignet sind. Diesen Weg unterstützt das Institut für Vermögensaufbau, eine bankenunabhängige Gesellschaft zur Förderung des Vermögensaufbaus von Privatanlegern mit Hilfe wissenschaftlich gestützter Methoden, in deren Beirat sich mit Carsten Heise auch ein Vertreter der Deutschen Schutzvereinigung für Wertpapierbesitz engagiert. Die Ergebnisse der Analysen des Instituts werden bei sehr gut strukturierten Portfolios in Form eines Zertifikats dokumentiert.

Zum ändern kann der Privatanleger versuchen, sein Portfolio mit der Unterstützung eines qualifizierten und produktneutralen Finanzexperten zu strukturieren, der ihm durch seine professionelle Unabhängigkeit und Erfahrung hilft, die Klippen des Behavioral Finance zu umschiffen. ◀

Den ersten Teil dieses Beitrags finden Sie im Internet unter: www.spektrum.com/depotcheck

Leser-Aktion: Kostenloser Depot-Check gegen »Psychofallen«

Investieren Sie überwiegend in deutsche Standardwerte wie Deutsche Telekom, Daimler Chrysler, Allianz oder Siemens? Bevorzugen Sie beim Spekulieren die Automobil- und Telekommunikationsbranche? Halten Sie lange an Aktien fest, deren Kurse in den Keller gegangen sind und noch gehen, weil Sie glauben, die Trendwende steht kurz bevor beziehungsweise sie hätten keinen Verlust gemacht, so lange Sie nicht verkaufen? Dann sitzen Sie in den häufigsten »Psychofallen« beim Geldanlagen. Beim Depot-Check von Spektrum der Wissenschaft in Zusammenarbeit mit der DAB bank AG helfen Ihnen bankenunabhängige Vermögensverwalter, Ihre Geldanlagen nach den neuesten Forschungsergebnissen des Behavioral Finance zu durchleuchten. Dabei werden Ihre gesamten Geldanlagen, also auch Immobilien, Beteiligungen, Lebensversicherungen oder Steuersparaspekte betrachtet. Mitmachen

geht ganz einfach. Einzige Bedingung: Sie verfügen über ein Vermögen von mindestens 25 000 Euro oder wollen eine entsprechende Summe anlegen. Die Beratung ist kostenlos und unverbindlich und umfasst ein bis zu zweistündiges, persönliches Gespräch. Ein Anspruch auf eine mehrseitige schriftliche Analyse besteht nicht.

Wo anmelden?

Unter der Telefonnummer 0800 3223002 können Sie sich täglich zwischen 10 und 20 Uhr anmelden oder informieren. Bitte geben Sie dabei das Stichwort »Spektrum der Wissenschaft« an. Der Anruf ist kostenlos aus dem Festnetz der Deutschen Telekom. Ebenso kann die Anmeldung schnell und unkompliziert im Internet erfolgen unter: www.spektrum.com/depotcheck

Anmeldeschluss: 15. Dezember 2006

Vertraulichkeit:

Die Teilnehmer können sich darauf verlassen, dass ihre Informationen von einer Bank und damit absolut vertraulich behandelt werden. Diese werden von der DAB bank lediglich an einen bankenunabhängigen Vermögensverwalter in Ihrer Nähe weitergeleitet und über den Depot-Check hinaus nicht weiter verwendet. Vermögensverwalter sind unabhängige Experten, die bei der Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht zugelassen sind.

Neue Angriffsziele für Medikamente

Eine altbekannte Klasse von Rezeptoren auf Zellen birgt vielfältige, noch kaum genutzte Möglichkeiten der pharmakologischen Beeinflussung – und damit neue Ansatzpunkte zur potenziellen Behandlung verschiedenartiger Krankheiten von HIV-Infektionen bis Fettsucht.

Von Terry Kenakin

Erstaunlich viele – etwa die Hälfte – aller heute verordneten Medikamente besitzen eine auffällige Gemeinsamkeit. Sie zielen allesamt auf dieselbe Großfamilie molekularer Rezeptoren ab. Typisch für deren Mitglieder ist eine gewundene Protein-

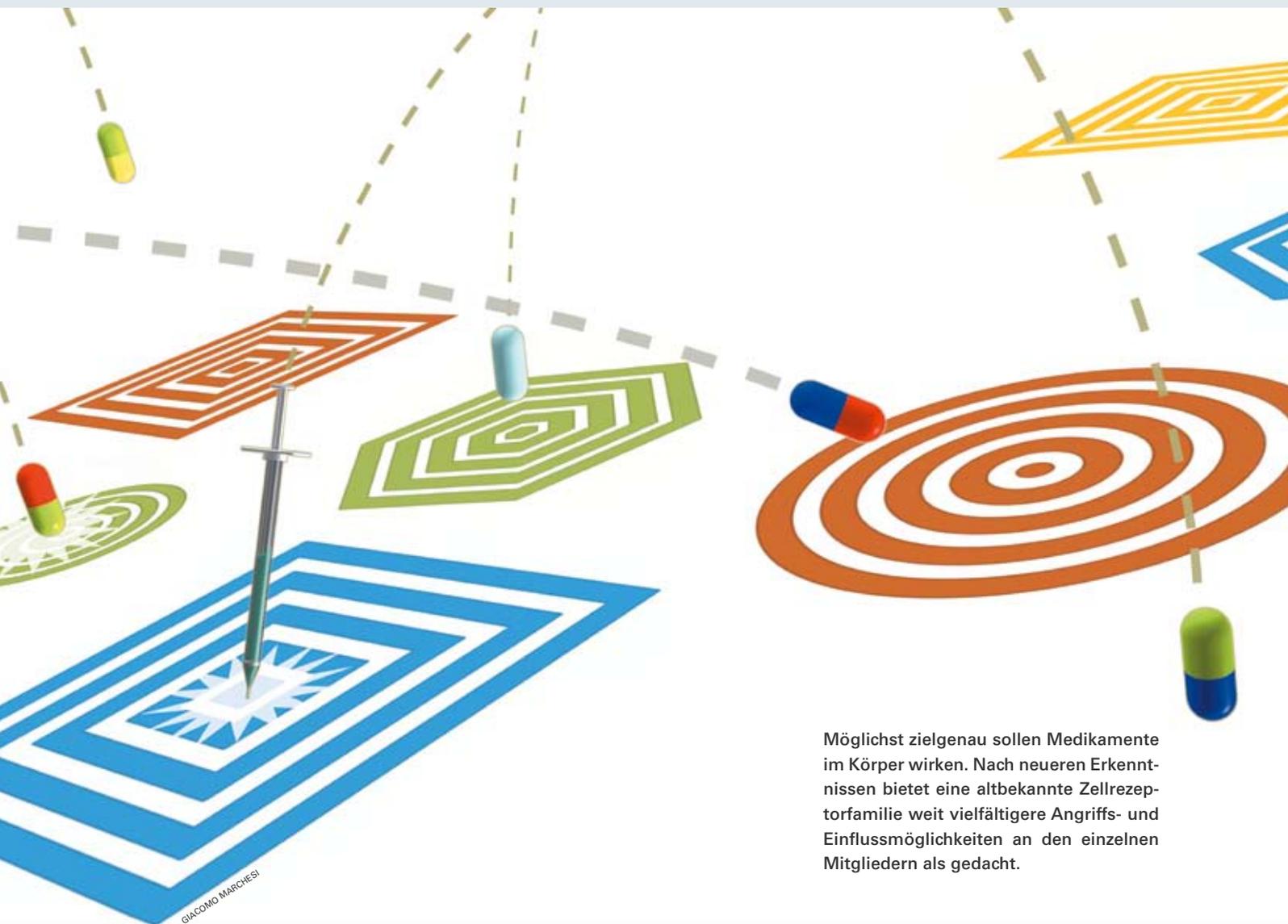
kette, die sich siebenmal durch die Membranhülle einer Zelle schlängelt. Von außen zugängliche Abschnitte dienen als Antenne für dort einlaufende Botenmoleküle. Ins Zellinnere weisende Teile setzen dagegen die Reaktionen der Zelle auf die eingetroffene Nachricht in Gang. Dazu aktivieren sie ein signalverarbeitendes mehrteiliges Eiweißmolekül,

ein so genanntes G-Protein, direkt an der Innenseite der Zellmembran. Nach ihm hat die ganze Großfamilie ihren Namen: »G-Protein gekoppelte Rezeptoren« – oder, so ihr englisches Kürzel, GPCRs.

Keine andere Klasse von Oberflächenrezeptoren ist so vielseitig wie diese. Beispielsweise überspannen die Botenmoleküle, auf die sie anspricht, einen weiten Größenbereich: von niedermolekularen Überträgerstoffen im Nervensystem, die kaum die Ausmaße von ein paar Kohlenstoffatomen überschreiten, bis hin zu Proteinen, die 75-mal größer sind. Überdies beteiligen sich GPCRs an fast jeder lebenswichtigen Körperfunktion: an Herzschlag und Verdauung ebenso wie an Atmung und Gehirntätigkeit. Entsprechend vielfältig sind auch die bekannten Arzneistoffe, die an solchen Rezeptoren ansetzen. Sie umfassen beispielsweise Blutdrucksenker wie Propra-

IN KÜRZE

- ▶ **G-Protein gekoppelte Rezeptoren** (GPCRs) stecken in der äußeren Zellmembran und übermitteln Signale von Botenstoffen, etwa bestimmten Hormonen, ins Zellinnere. Dazu aktivieren sie G-Proteine, die als Prozessoreinheiten direkt unter der Zellmembran sitzen.
- ▶ **Etwa die Hälfte aller Pharmaka** auf dem Markt wirkt über GPCRs, indem sie deren Bindungsstelle für körpereigene Signalmoleküle besetzen.
- ▶ Dass sich die Aktivität von GPCRs auch durch Substanzen modifizieren lässt, die an andere Regionen der Rezeptoren andocken, wurde erst in den letzten zehn Jahren entdeckt. Dies eröffnet **neue Ansatzmöglichkeiten für die Behandlung** von Krebs und weiteren schweren Erkrankungen.



Möglichst zielgenau sollen Medikamente im Körper wirken. Nach neueren Erkenntnissen bietet eine altbekannte Zellrezeptorfamilie weit vielfältigere Angriffs- und Einflussmöglichkeiten an den einzelnen Mitgliedern als gedacht.

nolol, Magensäurehemmer wie Ranitidin, Asthmamittel wie Albuterol und Antidepressiva wie Paroxetin. Zu dem breiten Repertoire an behandelbaren Krankheiten zählen unter anderem Herzinsuffizienz, Allergien, Angstzustände, Migräne, Krebs und Parkinson.

Angesichts dieser Fülle scheint es unglaublich – aber alle herkömmlichen Arzneimittel, die an GPCRs angreifen, wirken ausschließlich auf eine von zwei Weisen: Entweder heften sie sich an die »Antennenregion« des Rezeptors – fachlich aktives Zentrum genannt – und ahmen die Effekte des natürlichen Signalmoleküls nach, sei es ein Neurotransmitter, Hormon oder anderer Botenstoff. Oder aber sie hindern den Signalstoff daran, Kontakt zur Rezeptorantenne aufzunehmen. Dank revolutionärer technologischer Fortschritte der letzten 15 Jahre haben sich inzwischen ganz neue Einblicke in die Arbeitsweise von GPCRs

ergeben – und damit auch andere, unkonventionelle Wege, die Tätigkeit dieser Rezeptoren zu beeinflussen. In Zukunft sind also wahrscheinlich noch wesentlich mehr GPCR-Arzneimittel zu erwarten. Die Suche nach unkonventionellen Wirkstoffen befindet sich zwar zu meist erst im Anfangsstadium; jedoch durchlaufen einige bereits Studien am Menschen – etwa solche zur Behandlung von HIV-Infektionen, der Ursache der Immunschwächekrankheit Aids.

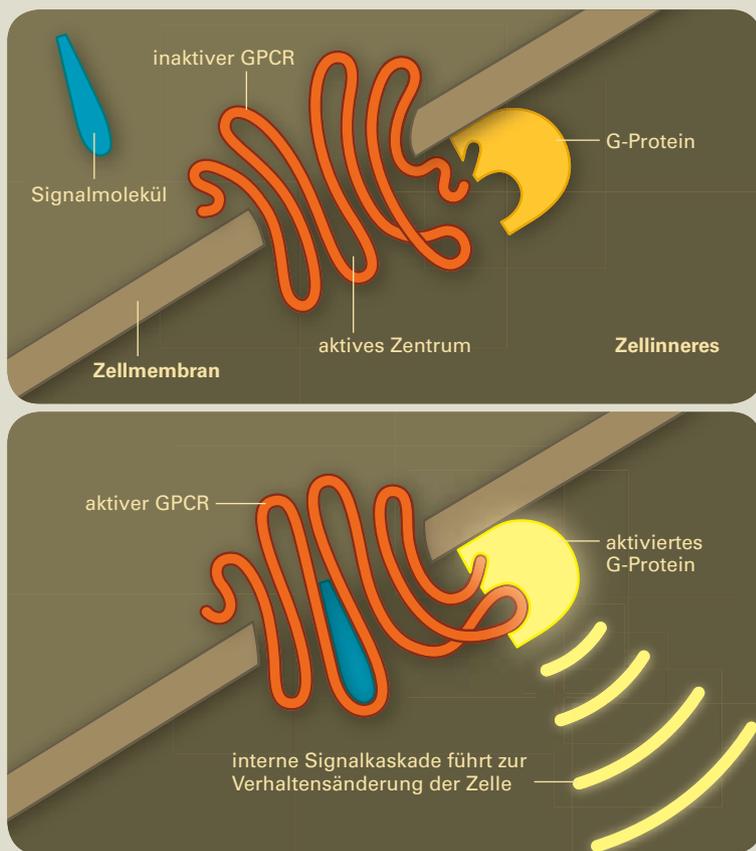
Nur ins Schwarze treffen?

Bis vor rund zehn Jahren dachten Pharmaforscher, sie müssten am aktiven Zentrum von GPCRs ansetzen, um deren Aktivität zu beeinflussen. Denn genau dort spielen sich auch die Vorgänge unter normalen Bedingungen ab: Ein passendes körpereigenes Botenmolekül fügt sich im Prinzip wie ein Schlüssel in das vom aktiven Zentrum gebildete Schloss,

und der Rezeptor meldet das Entriegeln dann auf der Innenseite der Zelle (siehe Kasten S. 76). Eine Substanz, die das Schlüsselloch blockiert, kann folglich als Inhibitor agieren. Umgekehrt vermag eine Art chemischer Nachschlüssel das natürliche Vorbild zu vertreten, falls es im Körper fehlt.

Um möglichst zielgenau die gewünschte physiologische Reaktion hervorzurufen, sollte man – so die überkommene Vorstellung – eine Substanz wählen, die unter den verschiedenen Varianten eines Rezeptors nur die jeweils spezifische »anspricht«. Der Neurotransmitter Noradrenalin beispielsweise aktiviert zwei Typen von GPCRs, nämlich so genannte alpha- und beta-adrenerge Rezeptoren, die sich ihrerseits in vier beziehungsweise drei Subtypen untergliedern. Die Varianten steuern unterschiedliche biologische Prozesse. So beschleunigen beta1-adrenerge Rezeptoren im

Signalmelder in der Zellmembran



Ein **G-Protein gekoppelter Rezeptor** (GPCR) ist ein charakteristisch gefaltetes Eiweiß-molekül, das siebenmal durch die Zellmembran mäandriert (oben). Normalerweise stumm, wird er erst tätig, wenn ein passendes Signalmolekül wie ein Hormon oder Neurotransmitter an eine bestimmte Stelle – das aktive Zentrum – andockt (unten). Er aktiviert dann ein Mitglied der so genannten G-Proteine, das eine intrazelluläre Reaktionskaskade einleitet und damit letztlich eine Verhaltensänderung der Zelle herbeiführt. Für wenig voluminöse Botenstoffe, wie im Schema, liegt die Bindungsstelle eher tief im Rezeptor. Sie stellt aber nach neueren Erkenntnissen nicht den einzigen Hebel dar, an dem Pharmaka am Rezeptor ansetzen könnten.

▷ Herz die Kontraktionsfrequenz und steigern die Kraft der einzelnen Schläge. Beta2-Rezeptoren in der Lunge erweitern die Bronchien. Ein Arzneimittel, das verengte Atemwege erweitern soll, ohne unerwünschte Nebenwirkungen am Herz hervorzurufen, müsste demnach wie Noradrenalin beta2-adrenerge Rezeptoren stimulieren, ohne aber auch an Beta1-Rezeptoren anzudocken.

Flexible Moleküle statt starrer Gestalten

Tatsächlich wirken viele der heutigen Medikamente entweder als Rezeptor-Inhibitoren (fachlich: Antagonisten) oder als Imitatoren des natürlichen Signalstoffs (fachlich: Agonisten), indem sie mit dem aktiven Zentrum eines bestimmten GPCRs in entsprechender Weise interagieren. Eine neue Strategie zur Entwicklung von Arzneimitteln versucht dagegen, so genannte allosterische Effekte bei GPCRs auszunutzen. Im speziellen Fall bedeutet dieser Effekt: Wenn ein Teil des Rezeptors seine Form ändert,

so kann dies die Gesamtgestalt (Konformation) eines entfernt liegenden Bereichs beeinflussen – und somit auch dessen Aktivität.

GPCRs nehmen ständig etwas unterschiedliche Formen an und verfügen deshalb über ein großes Sortiment möglicher Konformationen. Dockt nun ein natürliches Signalmolekül an das aktive Zentrum an, so stabilisiert es dadurch eine Konformation des Rezeptors, die G-Proteine zu aktivieren vermag. Andere Moleküle – so genannte allosterische Modulatoren – können sich allerdings anderswo an den Rezeptor heften und auf diese Weise seine Gestalt und Aktivität beeinflussen. Einige davon stabilisieren Arrangements, die eine Signalweiterleitung begünstigen. Andere dagegen halten ihn in einer Konformation, die beispielsweise das aktive Zentrum so verbirgt, dass es für das natürliche Signalmolekül nicht mehr zugänglich ist.

Die Existenz solcher Modulationsmöglichkeiten hat weit reichende Konsequenzen. Theoretisch bietet nun der gan-

ze Rezeptor und nicht nur sein aktives Zentrum pharmakologische Ansatzpunkte: nämlich überall dort, wo eine geeignete niedermolekulare Substanz anzudocken und ihn in einer Konformation zu »versteifen« vermag, die sich biologisch auswirkt. Damit vergrößert sich die Aussicht auf eine therapeutische Modifikation von GPCR-Funktionen erheblich.

Beispiel Aidsforschung: Dort sucht man nach allosterischen Modulatoren, die das Human-Immunschwäche-Virus (HIV) daran hindern können, neue Zellen zu infizieren. Bekanntlich befällt der Erreger bestimmte Immunzellen – so genannte T-Helferlymphocyten. Dazu heftet er sich, wie schon lange bekannt ist, zunächst an ein Membranprotein namens CD4. Zum Eintritt in die Zelle braucht er, wie Forscher dann Mitte der 1990er Jahre entdeckten, eine weitere Dockstation: einen G-Protein gekoppelten Rezeptor namens CCR5 (in späteren Infektionsstadien auch einen namens CXCR4). Normalerweise reagiert dieser

auf drei verschiedene Chemokine – natürliche Signalstoffe, die Immunzellen an den Ort einer Infektion locken. Leider kann sich aber auch das Hüllprotein gp120 von HIV an diesen Rezeptor binden (siehe erste Reihe im Kasten S. 80). Nach heutiger Erkenntnis spielt er sogar eine offenbar zentrale Rolle bei der Infektion: Gewöhnlich sind Menschen, die auf Grund ihrer genetischen Ausstattung über keine funktionstüchtige Version des Rezeptors verfügen, außerordentlich resistent gegen das Immunschwächevirus.

Allosterische Modulatoren, die den CCR5-Rezeptor in einer für das Virusprotein ungeeigneten Form halten, durchlaufen bereits klinische Studien am Menschen. Liefße sich durch diese kleinen, niedermolekularen Wirkstoffe ein erfolgreicher Kontakt von gp120 mit CCR5 verhindern, entspräche das »irdisch« betrachtet einer Größenordnung, als würde eine Südseeinsel zwei Kontinente von der Größe Australiens davon abhalten, aufeinander zu prallen.

Mehr Antennen außen, lauterer Empfang innen

Nun hängt es aber nicht allein von der Art der andockenden extrazellulären Moleküle ab, welche Effekte GPCRs hervorrufen. Es kommt auch darauf an, wie viele Kopien des fraglichen Rezeptors auf der Zelloberfläche dafür bereitstehen. Mit mehr Antennen empfängt die Zelle eine »lautere« Nachricht und zeigt eine deutlichere Verhaltensänderung als bei geringerer Zahl. Zugleich kann die Anzahl aber auch Einfluss darauf haben, welcher der verschiedenen

G-Protein-Typen aktiviert wird – und damit welche der molekularen Weiterleitungskaskaden im Innern einer Zelle.

Es gibt vier Haupttypen von G-Proteinen, mit jeweils wiederum mehreren Subtypen. Jeder ist unterschiedlich geneigt, mit einem bestimmten GPCR zusammenzuarbeiten, und umgekehrt mag ein GPCR die einzelnen unterschiedlich stark stimulieren. Ein knappes Angebot eines bestimmten Rezeptors könnte folglich bewirken, dass nur das für ihn empfindlichste G-Protein aktiviert wird. Dagegen dürfte ein größerer Bestand zu Reaktionen mehrerer G-Proteine und somit womöglich zu einem anderen Zellverhalten führen.

Demnach darf man einen GPCR nicht einfach nur als einen simplen Schalter betrachten, den ein Hormon oder Neurotransmitter anknüpft und der wieder abgeschaltet wird, wenn der Signalstoff seine Andockstelle verlässt. Er stellt ein wesentlich komplizierteres Instrument zur Verarbeitung von Informationen dar.

Die Vielfalt an Reaktionsmustern, die ein GPCR erzeugen kann, hängt theoretisch von zwei Dingen ab: vom Spektrum der Botenmoleküle, die er erkennt, und von den G-Protein-Sorten, die er zu aktivieren vermag. Erfasst er zum Beispiel wahlweise eines von drei unterschiedlichen Signalen und aktiviert er mehrere oder gar alle vier Hauptklassen von G-Proteinen (wie es etwa der GPCR vermag, der auf Thyreotropin anspricht – das Hypophysenhormon, das die Schilddrüsenfunktion steuert), dann ermöglicht ihm das rein rechnerisch Dutzende Verhaltensweisen, die alle von Zeit

zu Zeit auftreten. Wäre er nur ein einfacher Schalter, hätte er dagegen bloß zwei in seinem Repertoire.

Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass sich diese funktionelle Komplexität der GPCRs mit geeigneten Wirkstoffen therapeutisch ausnutzen ließe. Unterschiedliche Substanzen dürften einen Rezeptor in jeweils anderen biologisch aktiven Konformationen halten, wobei jede Form mit einem anderen G-Protein oder einer anderen G-Protein-Kombination interagieren und somit unterschiedliche Signalkaskaden in der Zelle anstoßen könnte. Ebenso nützlich sollten Mittel sein, die – statt die GPCR-Aktivität an sich zu verändern – Zellen dazu veranlassen würden, die Menge eines Rezeptors auf ihrer Oberfläche zu steigern oder zu verringern.

Rezeptoren auf Tauchstation

Diese letzte Strategie ist wieder zur Bekämpfung von HIV interessant. Mit allosterischen Modulatoren lässt sich zwar vielleicht zunächst verhindern, dass das Virus-Hüllprotein seine Verankerungsstelle an CCR5 findet. Doch ein schwer wiegendes Problem bleibt: Der Erreger mutiert extrem schnell, und dabei könnte ein Hüllprotein entstehen, das sich recht gut an einen allosterisch veränderten CCR5-Rezeptor heftet. Ein Ausweg aus diesem Dilemma wäre, den Rezeptor von der Zelloberfläche verschwinden zu lassen und so dem Virus seinen Angriffspunkt zu entziehen.

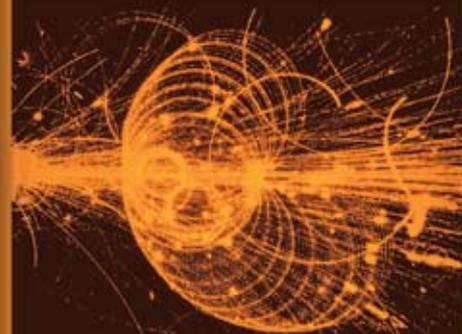
Wie alle GPCRs wird auch CCR5 kontinuierlich in der Zelle hergestellt, an die Oberfläche transportiert und schließlich wieder eingeholt, zum Abbau oder ▷

»Der derzeit bedeutendste theoretische Physiker ist blond, drahtig, ziemlich klein und – weiblich.« Der Spiegel

Die Jagd nach der Weltformel

Eine Harvard-Physikerin sorgt mit einer völlig neuartigen Theorie für Furore: Die beobachtbare Welt, so ihre Hypothese, ist nur eine von vielen Inseln inmitten eines höherdimensionalen Raums. Nur ein paar Zentimeter weiter könnte es ein anderes Universum geben, das für uns unerreichbar bleibt, da wir in unseren drei Dimensionen gefangen sind ...

LISA RANDALL
VERBORGENE
UNIVERSEN



Eine Reise in den extradimensionalen Raum

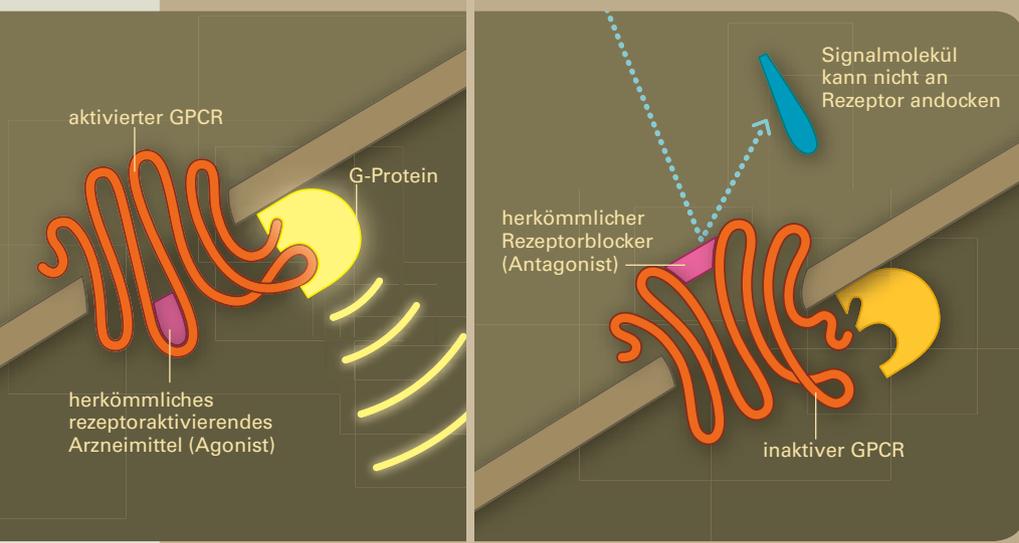
S. FISCHER

Viele Angriffsmöglichkeiten

Die meisten Medikamente auf dem Markt setzen am aktiven Zentrum eines Zelloberflächen-Rezeptors an, viele davon bei einem GPCR (unten). Jedoch können auch Moleküle, die auf Bereiche außerhalb des Zentrums einwirken, die GPCR-Aktivität beeinflussen (Serie rechts daneben). Neuere Untersuchungen las-

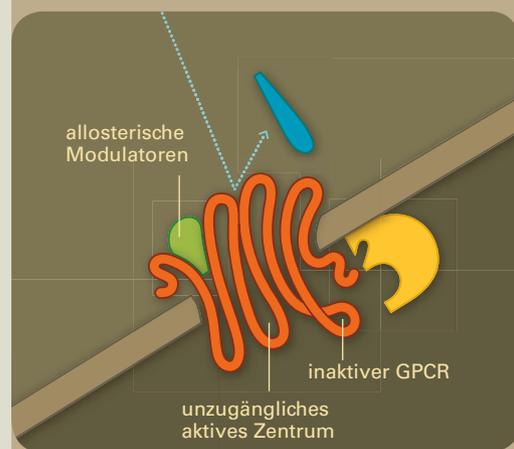
sen hoffen, dass niedermolekulare Substanzen, die diese zusätzlichen Angriffspunkte ansteuern, sich als Arzneistoffe eignen. Sie könnten dann auf unkonventionelle Weise GPCRs aktivieren oder ruhigstellen, die bei verschiedenen Krankheiten eine Rolle spielen.

Standardmedikamente



Heutige Pharmaka, die an GPCRs ansetzen, passen gewöhnlich in deren aktives Zentrum. Entweder imitieren sie die Wirkung des natürlichen Signalmoleküls (links) oder sie hindern es daran, sich an den Rezeptor zu heften (rechts).

allosterische Modulatoren



Diese Mittel stabilisieren unter den etwas verschiedenen Gestalten (Konformationen) eines GPCRs eine, die entweder die Rezeptoraktivität verstärkt (nicht gezeigt) – oder sie abschwächt (oben), weil etwa das aktive Zentrum verborgen wird.

▷ **Recycling.** Bestimmte Chemokine beschleunigen sein Entfernen von der Zelloberfläche. Wenn natürliche Signalstoffe dazu fähig sind, ließen sich vielleicht auch Pharmaka mit einer ähnlichen Wirkung finden. Keine noch so raffinierte Abwandlung seiner viralen Enterhaken würde dem Erreger ermöglichen, sich weiterhin an CCR5 zu heften, wenn ein Medikament den Rezeptor rechtzeitig von der Zelloberfläche entfernt hätte (siehe Kasten S. 80, untere Reihe).

Fiese Falschmeldung

Gewöhnlich aktiviert ein GPCR nur dann G-Proteine, wenn er von außen den Befehl erhält. Manchmal kann er das aber ohne ein angedocktes Botenmolekül tun, er ist – wie Biochemiker sagen – konstitutiv aktiv. Auch dieses Verhalten beruht auf einer bestimmten Gestalt des Rezeptors, die er im Allgemeinen jedoch nur selten annimmt. Die Zahl der Moleküle mit dieser Konformation ist

daher normalerweise gering und wirkt sich kaum auf das Gesamtverhalten der Zelle aus. Mehrten sich jedoch solche konstitutiv aktiven Rezeptoren zu sehr, kann ihr gemeinschaftliches Fehlsignal starken Einfluss gewinnen.

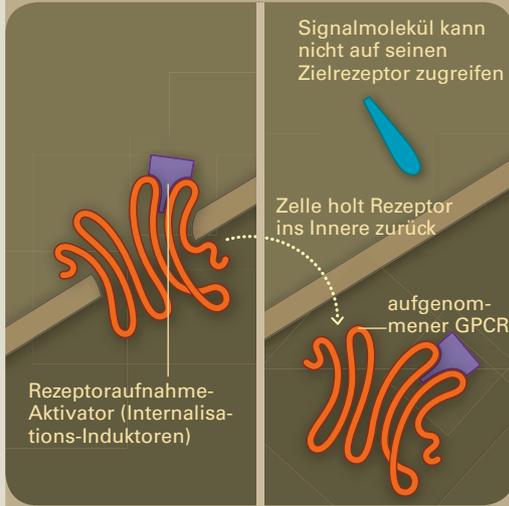
Besonders dramatische Auswirkungen zeigt dieses Phänomen bei Erkrankungen wie Virusinfektionen oder Krebs, die schneller voranschreiten können, wenn irgendein Rezeptor sich so verhält, dass er das Krankheitsgeschehen fördert. Bei einer bestimmten Art von Bauchspeicheldrüsenkrebs beispielsweise dürfte der Rezeptor für ein Hormon namens VIP – vasoaktives Intestinal-Polypeptid – ein solcher Übeltäter sein. Normale Pankreaszellen tragen auf ihrer Oberfläche eine gewisse Menge dieses GPCRs, der im Zusammenspiel mit VIP die Zellteilung fördert. Bei den Patienten tritt jedoch der Rezeptor in Überzahl auf – und damit auch jene Version (oder Versionen), die eigenmächtig – ohne Sti-

mulierung durch VIP – Signale in die Zelle sendet. Mit fatalen Folgen: Die gemeinsame Aktivität treibt Tumorzellen zur unbegrenzten Teilung an.

Onkologen ist ein solch zerstörerisches Treiben schon länger von bestimmten anderen konstitutiv aktiven Rezeptoren bekannt, die nicht zu den GPCRs gehören – wie beispielsweise das Ras-Protein. In diesen Fällen sind jedoch Mutationen im zugehörigen Gen und nicht eine abnorme Häufigkeit der Rezeptoren für das krankhafte Zellverhalten verantwortlich.

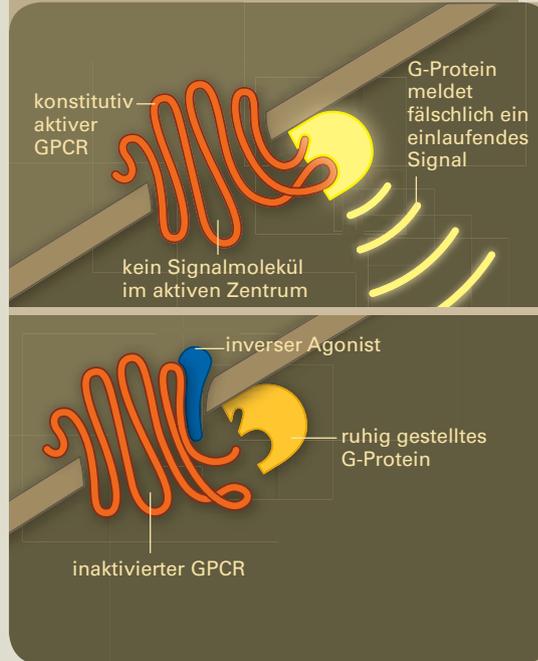
Mit Standardarzneimitteln lässt sich ein Fehlverhalten infolge konstitutiv aktiver Rezeptoren nicht unterdrücken. Ein herkömmlicher Blocker könnte zwar natürliche Signalmoleküle davon abhalten, ihren Rezeptor zu stimulieren, bliebe jedoch wirkungslos gegen Versionen, die ohnehin keinen Antrieb von außen benötigen, um tätig zu werden. Und ein herkömmlicher Stimulator, ein Agonist,

Rezeptoraufnahme-Aktivatoren



Solche Induktoren bewirken, dass Rezeptoren von der Zelloberfläche verschwinden. Auf diese Weise verhindern sie eine Signalübermittlung ins Zellinnere.

inverse Agonisten



Inverse Agonisten sind gegen »konstitutiv aktive« GPCRs gedacht. Solche Rezeptoren verhalten sich so, als hielte ein stimulierendes Signalmolekül sie besetzt – auch wenn dies nicht der Fall ist (oben). Das Andocken eines inversen Agonisten schaltet die Signalgebung ab (unten). Krebszellen tragen auf ihrer Oberfläche oft eine große Anzahl konstitutiv aktiver Rezeptoren, die sie zu unkontrollierter Zellteilung treiben könnten. Vielleicht erwächst aus inversen Agonisten eines Tages eine neue Form der Krebstherapie.

wäre schlicht kontraproduktiv, weil er noch mehr Rezeptoren in die aktive Form bringt. Wir brauchen also eine neue Klasse von Medikamenten, die konstitutiv aktive GPCRs in eine inaktive Form zwingt.

Solche Mittel, inverse Agonisten genannt, könnten eines Tages eine neuartige Form der Krebstherapie begründen. Auch zur Behandlung von Fettsucht kämen sie in Frage: Zu den angepeilten Zielstrukturen zählen hier etwa der Rezeptor für Ghrelin (ein kürzlich entdecktes Hormon, das hauptsächlich im Magen hergestellt wird) und der H3-Rezeptor (ein Subtyp des Rezeptors für Histamin); beide sind anscheinend im Gehirn an der Regulation des Appetits beteiligt (siehe Tabelle S. 82).

Mindestens noch eine weitere Eigenschaft von GPCRs bleibt ein lohnendes Feld für die Suche nach neuen Wirkstoffen. Gelegentlich kombinieren Zellen unterschiedliche Proteine zu zusammen-

gesetzten Rezeptoren, die anders reagieren als die Einzelkomponenten. Im Extremfall versetzt solch ein Kombi-Rezeptor die Zelle in die Lage, auf ein Signal anzusprechen, das sie ohne ihn nicht wahrnehmen könnte.

Zweisprachige Zwitter

Teils handelt es sich dabei um einen Komplex aus zwei oder mehr GPCRs, teils um eine Kombination aus einem GPCR und einem Koprotein, das selbst zwar kein Rezeptor ist, dem GPCR jedoch veränderte Eigenschaften verleiht. Zu dieser letzten Art Gespann gehört offenbar der Rezeptor für ein Hormon namens Amylin. Es wird von denselben Zellen der Bauchspeicheldrüse ausgeschüttet, die auch Insulin abgeben, und wandelt dessen Wirkungen auf Zellen ab. Alle Versuche jedoch, ein einzelnes Protein zu finden, das als Amylin-Rezeptor fungiert, scheiterten. Auch in der entzifferten Sequenz des menschlichen

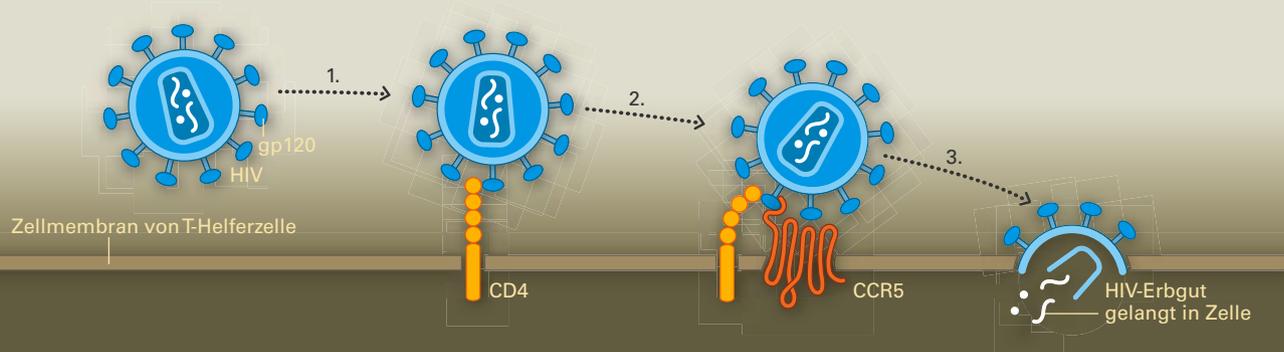
Erbguts fand sich kein Gen mit einer solchen Alleinstellung. Dagegen reagiert ein Komplex aus dem GPCR für das Schilddrüsenhormon Calcitonin und ein Protein namens RAMP stark und selektiv auf Amylin. Das Kürzel steht für »die Rezeptoraktivität modifizierendes Protein«. Offensichtlich wird der Calcitonin-Rezeptor durch den Eiweißstoff sozusagen zweisprachig: In Abwesenheit von RAMP spricht er auf Calcitonin an, in dessen Gegenwart jedoch auf Amylin.

Dreisprachig wird er durch ein anderes Koprotein namens RCP (nach englisch für Rezeptorkomponentenprotein). Der Calcitonin-Rezeptor erkennt dann ein weiteres Signalmolekül: CGRP (für englisch »dem Calcitonin-Gen verwandtes Peptid«). Dieser Miniatur-Eiweißstoff ist die wirkungsvollste bekannte Körpersubstanz zur Erweiterung von Blutgefäßen. Sein Umfunktionieren gewinnt während der Schwangerschaft an Bedeutung: Da dann der Blutspiegel des gefäß-

HI-Viren am Eintritt hindern – ein Szenario

Das Aidsvirus HIV infiziert T-Helferzellen des Immunsystems (obere Reihe). Um in die Zellen zu gelangen, heftet sich der Erreger zunächst an ein Oberflächenmolekül namens CD4 (1). Dadurch kann das Virusprotein gp120 nun leichter an CCR5, einen G-Protein gekoppelten Rezeptor, andocken (2). Diese Schlüsselkombination veranlasst die Zelle, das anhaftende Virus aufzunehmen (3) – mit fatalen Folgen: Der Erreger setzt sein Erbgut frei und verwandelt die Zelle in eine Produktionsstätte für neue Viren, die dann weitere Zellen befallen.

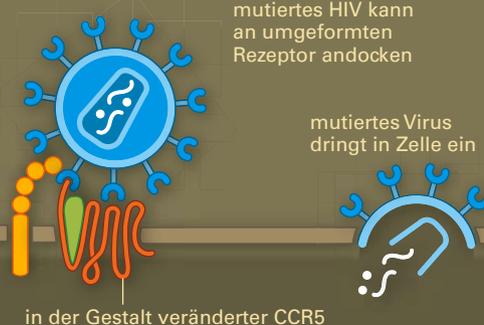
Allosterische Modulatoren, welche die Form von CCR5 verändern und den Rezeptor auf diese Weise für gp120 unkenntlich machen (mittlere Reihe links), werden bereits an Patienten geprüft. Leider können Mutationen das gp120 des Virus schließlich derartig abwandeln, dass es fähig würde, sich an den allosterisch veränderten CCR5 zu heften und in weitere T-Helferzellen einzudringen (Mitte rechts). Ein Rezeptoraufnahme-Aktivator könnte theoretisch CCR5 von der Zelloberfläche entfernen und den Ko-Rezeptor damit den mutierten Viren entziehen (untere Reihe).



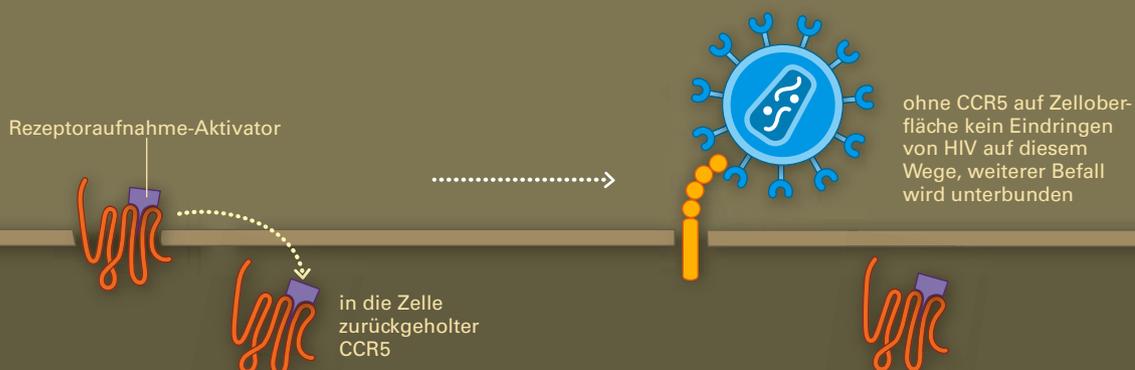
wirksamer allosterischer Modulator



ausgetrickster Modulator



Rezeptoraufnahme-Aktivator (Internalisation-Induktor)



1/1 Seite Anzeige
Süddeutsche Zeitung

Neue Medikamente: ein Blick in die Zukunft

An **Arzneistoffen**, die GPCRs über neuartige Mechanismen beeinflussen, wird meist erst gearbeitet. In den kommenden Jahren, so die Erwartung, dürften jedoch viele solcher Substanzen in die Pipelines der Pharmaindustrie einfließen.

Krankheit	Wirkstofftyp	Wirkstoffname (Hersteller)	Ziel-GPCR	Entwicklungsstand
HIV-Infektion	allosterischer Modulator	Vicriviroc (Schering-Plough); Maraviroc (Pfizer)	CCR5 (Anheftung daran hilft dem HI-Virus, in Zellen einzudringen)	klinische Studien
	allosterischer Modulator	AMD070 (AnorMed)	CXCR4 (Chemokin- Rezeptor)	klinische Studien
	Rezeptoraufnahme-Aktivator (Internalisations-Induktor)	PSC-RANTES (mehrere Institutionen)	CCR5	theoretisch
Diabetes	Substanz, die sich an einen aus zwei Molekülen zusammengesetzten Rezeptor heftet	Symlyn (Amylin Pharmaceuticals)	Komplex aus einem Protein namens RAMP und dem GPCR für das Schilddrüsenhormon Calcitonin	in den USA seit März 2005 zugelassen
	inverser Agonist	noch keiner	konstitutiv aktiver Ghrelin-Rezeptor im Zentralnervensystem	theoretisch
Fettleibigkeit	inverser Agonist	noch keiner	konstitutiv aktiver H3-Rezeptor für Histamin im Zentralnervensystem	theoretisch
	inverser Agonist	noch keiner	verschiedene konstitutiv aktive GPCRs	theoretisch
Krebs direkt	inverser Agonist	noch keiner	verschiedene konstitutiv aktive GPCRs	theoretisch
Krebs indirekt (zur Mobilisierung von Blutstammzellen für eine Transplantation nach der Therapie)	allosterischer Modulator	AMD3100 (AnorMed)	CXCR4 (Chemokin- Rezeptor)	klinische Studien

▷ erweiternden Peptids stark steigt und die RCP-Konzentration in der Gebärmutterwand wächst, erhöht sich die Anzahl der Calcitonin-Rezeptoren, die auf CGRP ansprechen – dadurch werden die wichtigen Gewebe besser durchblutet.

Somit könnten auch Koproteine wertvolle therapeutische Angriffsziele abgeben. Eines davon ist Modulin, das einen Komplex mit dem Rezeptor für Serotonin bildet. Im Gehirn betätigt sich Serotonin vor allem als stimmungsaufhellender Neurotransmitter (Antidepressiva wie Fluoxetin erhöhen dort seinen Gehalt). Außerhalb des Gehirns übermittelt es dagegen Botschaften an Zellen der Eingeweide und Blutgefäße.

Wie eigentlich nicht anders zu erwarten, existieren vom Serotonin-Rezeptor diverse Subtypen. Modulin stimmt die Effekte des Botenstoffs noch feiner auf bestimmte Zellen ab, indem es die Empfindlichkeit eines Subtyps modifiziert. Ein Arzneimittel, das dieses Koprotein nachahmt oder hemmt, könnte theoretisch bestimmte Serotonin-Rezeptoren

spezifischer Zelltypen mehr oder weniger ansprechbar machen und auf diese Weise vielleicht nützlich gegen Krankheiten von Schizophrenie bis zu Störungen der Magen-Darm-Funktion erweisen.

Fachleute gehen davon aus, dass von den schätzungsweise 650 menschlichen GPCR-Genen ungefähr die Hälfte Bauanweisungen für Rezeptoren trägt, die ein durchaus lohnendes Ziel für Medikamente abgeben dürften. Früher hätte sich die Pharmaforschung strikt darauf beschränkt, herkömmliche Inhibitoren und Agonisten zu entwickeln, die am aktiven Zentrum dieser Rezeptoren ansetzen. Wenn nun viele GPCRs aber nicht nur diesen einen, sondern gleich mehrere Angriffspunkte bieten, vervielfachen sich die Möglichkeiten, neue therapeutische Wirkstoffe zu konzipieren.

Allerdings kann es 15 bis 20 Jahre dauern, einen Arzneistoff zu entdecken, seine Wirkungsweisen zu erforschen, seine Sicherheit zu überprüfen und ihn schließlich als Medikament auf den Markt zu bringen. Eines machen die

neuen Einblicke in die natürliche Regulation von GPCRs jedenfalls recht deutlich: Wir Pharmaforscher können von diesen alten Bekannten noch viel Verblüffendes lernen. ◁

Terry Kenakin wendet seit fast drei Jahrzehnten Konzepte der Rezeptor-Pharmakologie bei der Suche nach Wirkstoffen an, in letzter Zeit als leitender Wissenschaftler beim Pharmaunternehmen GlaxoSmithKline. Er hat mehrere Bücher über Pharmakologie verfasst und ist Ko-Chefredakteur des »Journal of Receptors and Signal Transduction«.

A pharmacology primer: theory, application, and methods. Von Terry Kenakin. Academic Press (Elsevier), 2003

G-protein-coupled receptor interacting proteins: emerging roles in localization and signal transduction. Von A. E. Brady und L. E. Limbird in: Cellular Signalling, Bd. 14, Nr. 4, S. 297, April 2002

Drug discovery: a historical perspective. Von J. Drews in: Science, Bd. 287, S. 1960, 17. März 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852728.

Jagd im Magdalénien

Die Menschen, die Westeuropa am Ende der letzten Eiszeit bewohnten, waren geschickte Jäger, wie nicht allein der Nachbau ihrer Waffen zeigt.



BENOIT CLADYS

Von Jean-Marc Pétilion

Auf den ersten Blick wirkte der kleine Knochen keineswegs spektakulär. Dergleichen hatte der Prähistoriker Edouard Lartet schon dutzende Male aus dem Boden der Höhle von Les Eyzies-de-Tayac ausgegraben. Doch als das Objekt gereinigt war, avancierte es schnell zur Berühmtheit in der sich formierenden Urgeschichtsforschung: In dem Wirbel eines jungen Rentiers steckte eine Feuersteinklinge. Offenbar hatte Lartet bei seiner Grabung im Jahr 1863 das Zeugnis einer erfolgreichen Jagd entdeckt.

Das Tier war vor mehr als 10 000 Jahren vermutlich durch einen Speerwurf erlegt worden. Damals neigte sich das Eiszeitalter dem Ende zu und die Menschen des Magdalénien hatten sich in fast ganz Westeuropa verbreitet.

Ihren Namen verdankt diese Kultur einem der ersten Fundplätze, dem vor Wind und Wetter schützenden Felsdach, fachlich Abri, von La Madeleine in der Dordogne, einer Landschaft im Südwesten Frankreichs. Gabriel de Mortillet (1821–1898), einer der Väter der Urgeschichtsforschung, gab dieser Kultur ihren Namen. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts war sie das Ziel vieler Ausgrabungen. Dadurch wissen wir zwar recht viel über das Magdalénien, leider gingen aber auch Informationen unwiederbringlich verloren, vernichtet durch die noch unzureichenden Grabungstechniken. Vor allem fehlte seinerzeit der Blick für den Fundkontext, der dementsprechend nicht sorgfältig dokumentiert wurde.

Als Lartet in Les Eyzies-de-Tayac arbeitete, hatte die Erforschung der Urgeschichte gerade ihre ersten Schritte ge-

macht. Einer der Pioniere, Jacques Boucher de Perthes (1788–1868), widerlegte in den 1840er Jahren die Lehrmeinung, der Mensch sei erst nach der Sintflut auf den Plan getreten. Er hatte nämlich einen alten Siedlungsplatz entdeckt, der auch Knochen ausgestorbener Tierarten barg. Damit war das hohe Alter der menschlichen Spezies bewiesen und der Begriff des »Urmenschen« kam auf. Die Forscher sprachen von der Urzeit. Heute heißt diese Phase Paläolithikum beziehungsweise Altsteinzeit; sie endete in Europa vor etwa 11 500 Jahren (alle Zeitangaben in diesem Artikel entsprechen der kalibrierten Radiokarbonmessung). Schnell war klar, dass jene Vorfahren als Wildbeuter lebten; die Geschossspitze von Les Eyzies war dafür ein direkter Beweis.

Doch während sich die Prähistoriker des 19. Jahrhunderts das Leben in jener ▶



Rentiere und Pferde waren die wichtigsten Beutetiere im Magdalénien. Um das schnelle Wild zu erlegen, ersannen die Jäger eine Speerschleuder: Die Waffe wurde darauf angelegt, von einem Haken fixiert und dann abgeschossen. Der Hebelarm der Schleuder vergrößerte die Reichweite beziehungsweise die Durchschlagskraft des Geschosses.

▷ Vorzeit nur als ständigen Kampf mit eher unzureichenden Mitteln gegen die Unbilden der Natur vorstellen konnten, wissen wir heute, dass die Menschen des Magdalénien (20 500–13 000 vor heute) hervorragend an ihre Umwelt angepasst waren und deren Ressourcen wohl zu nutzen wussten.

Den gefundenen Knochen nach waren sie 1,60 bis 1,75 Meter groß und sehr muskulös. Hunderte von Fundstellen von der Iberischen Halbinsel bis zu den polnischen Tiefebene suggerieren im Vergleich zu früheren Zeiten eine »Bevölkerungsexplosion«. Freilich fiel sie deutlich geringer aus als in der nachfolgenden Jungsteinzeit, in der die Landwirtschaft auch größeren Gruppen ein Überleben ermöglichte.

Prärien in Europa

Die Magdalénien-Kultur existierte am Ende der letzten großen Vereisung, nämlich in der so genannten Weichsel- beziehungsweise Würm-Eiszeit. Dieses »Spätglazial« setzte vor etwa 15 000 Jahren ein und dauerte mit vielen raschen Klimaschwankungen bis vor etwa 11 500 Jahren. Für einige Fundstellen in der Schweiz wurden die damaligen Maximaltemperaturen geschätzt: zehn bis zwölf Grad Celsius im Juli. In diesem kalten

und auch trockenen Klima prägten Tundren, Steppen und Prärien das Landschaftsbild in Europa. Durch die offenen Landschaften zogen Rentiere, Pferde, Auerochsen, Bisons, Saigaantilopen, aber auch noch Mammuts, Riesenhirsche und Wollnashörner. Steinböcke und Gämsen bevölkerten die Gebirgszonen.

Die Menschen richteten ihr Leben dementsprechend ein und zogen in kleinen Gruppen von Lagerplatz zu Lagerplatz. Manche nutzten sie nur für eine Jahreszeit, wie etwa die Fundplätze Pincent und Verberie im Pariser Becken, vermutlich Stützpunkte einer Massenjagd auf Rentiere. Aber es gibt auch viele andere Orte, wo Menschen offenbar zu allen Jahreszeiten lebten; die Funde erlauben allerdings nicht, zwischen ständiger und regelmäßiger Besiedlung zu unterscheiden.

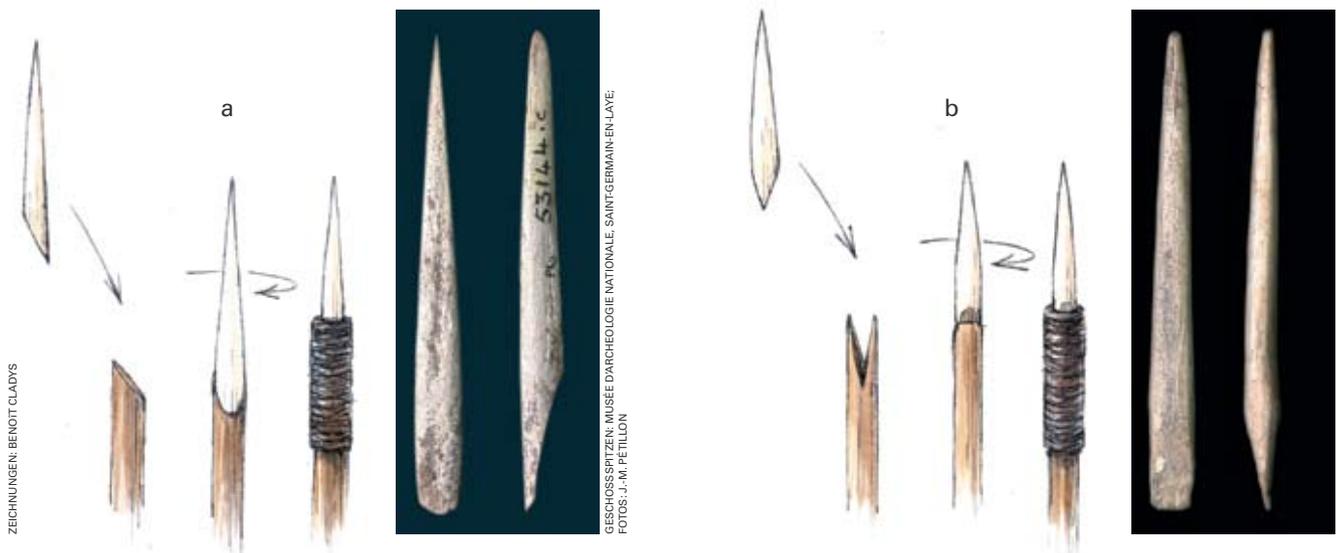
Rentier, Pferd, Bison und Auerochse waren die wichtigsten Beutetiere der Magdalénien-Menschen. Auf manchen Lagerplätzen standen auch Dohlen, Schneehühner und -eulen auf dem Speiseplan, häufig Kaninchen und Hase oder Lachs und Forelle. Dass auch Meerestiere erbeutet wurde, ist wahrscheinlich, lässt sich aber nicht nachweisen, denn mit der Klimaerwärmung stieg der Meeresspiegel und verschlang die Lagerplätze

▶ Im der Zeit des Magdalénien (vor 20 500 bis 13 000 Jahren) stieg der Meeresspiegel mit dem Zurückweichen der Gletscher von minus 120 Metern etwa auf das heutige Niveau an. Zunächst entwickelte sich diese Kultur im Norden Spaniens und im Südwesten Frankreichs, bevor sie sich allmählich nach Norden ausbreitete.

an den Küsten. Im Übrigen lieferten die Tiere nicht nur Fleisch, sondern auch Häute, Felle, Fett, Sehnen und Knochen.

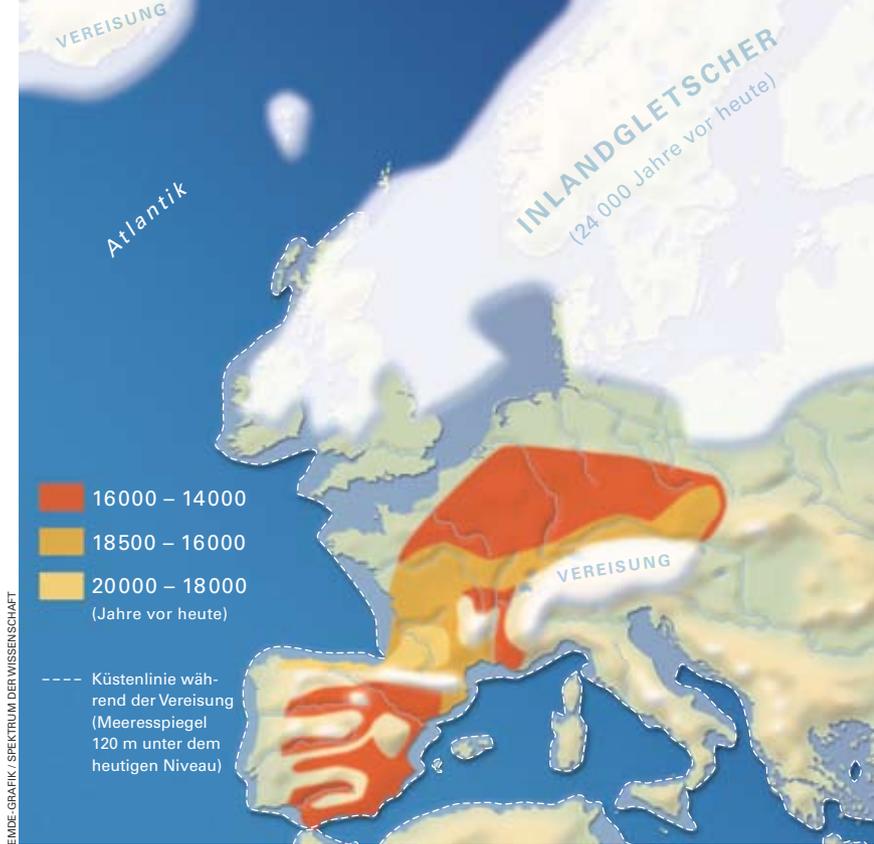
Gestützt auf Beobachtungen heutiger Jägersellschaften und auf historische Beschreibungen hat der Anthropologe Alain Testart vorgeschlagen, einige Grundstrategien der Jagd zu unterscheiden. So wird die Beute bei der Hetzjagd bis zu ihrer Erschöpfung verfolgt, bei der Treibjagd aufgescheucht und auf die wartenden Jäger zugetrieben beziehungsweise beim Kesseltreiben von einem enger werdenden, tödlichen Ring umschlossen; bei der Pirsch durchstreift der Jäger das Revier, während er bei der Sitzjagd dem Wild geduldig auflauert. Bei der Lockjagd werden Tiere zudem durch Futter oder Imitation ihrer Laute angelockt, die Fangjagd bedient sich Fallen. Alle diese Methoden sind für das Magdalénien prinzipiell denkbar, doch nur selten hinterlassen sie archäologisch nachweisbare Spuren. Einige durchbohrte Röhrenknochen könnten Pfeifen gewesen sein, die Wild anlockten oder Signale gaben. Auch wurden Knochenreste von Hunden entdeckt, vielleicht halfen die Tiere damals schon bei der Hetzjagd.

▼ Geschosspitzen aus Rengeweih waren wichtige Waffen der Magdalénien-Jäger. Dank ihrer Formen haben die Prähistoriker vier Schäftungstechniken rekonstruiert. Meist wurde die Basis der Spitzen abgeschrägt (a), dazu passend der Schaft bearbeitet, dann beide verklebt und umwickelt. Mitunter hat man die Basis beidseitig abgeschrägt und in einen symmetrischen Spalt geklebt (b). Seltener waren Doppelspitzen (c) oder Gabelungen von Spitze und Schaft (d).



ZEICHNUNGEN: BENOTT CLADYS

GESCHOSSPITZEN: MUSEE D'ARCHÉOLOGIE NATIONALE, SAINT-GERMAIN-EN-LAYE. FOTOS: J.-M. PÉTIILLON



Manche kleine Knochenspitze erinnert an einen Angelhaken, also an eine spezielle Form der Sitzjagd. Die erwähnten Fundplätze Pincevent und Verberie im Pariser Becken lassen an Treibjagden großer Gruppen auf Rentierherden denken. Alles in allem sind solche Funde aber selten und ihre Deutung ist oft umstritten.

Auch sonst weist das Waffenarsenal große Lücken auf. Fallen, Netze, Spieße, Wurfhölzer und Bumerangs, dergleichen ist denkbar und plausibel, lässt sich jedoch nicht nachweisen, da solche Jagdmittel aus pflanzlichen Materialien gefertigt worden wären und somit vergangen sind (der älteste Fund eines als Reuse ge-

deuteten Geflechts stammt aus der Jungsteinzeit und ist 6000 bis 7000 Jahre alt). Handfestere Aussagen liefern deshalb nur die aus Feuerstein, Knochen, Elfenbein oder Geweih gefertigten Spitzen von Speeren und Pfeilen.

Steinzeitjagd im Experiment

Hölzerne Schäfte, Befederungen und Umwicklungen sowie die benutzten Klebstoffe sind natürlich ebenso wie die Bögen längst verfallen (die ältesten erhaltenen Exemplare stammen aus dem dänischen Holmegaard-Moor und sind etwa 8000 Jahre alt), Speerschleudern blieben vereinzelt und in Fragmenten erhalten (siehe S. 89). Deshalb stützen

sich Prähistoriker vor allem auf die Geschosspitzen, um die Jagdpraktiken im Magdalénien zu rekonstruieren.

Bis vor etwa zwanzig Jahren wurden sie meist anhand ihrer Form klassifiziert, um dann die zeitliche und räumliche Verbreitung jedes Typs näher zu bestimmen. Inzwischen versucht man zudem, die Herstellungs- und Gebrauchstechniken durch Rekonstruktion zu erkunden. Manch ein Student holte sich schon blutige Finger beim Versuch, aus einer Feuersteinknolle eine Klinge abzuschlagen, die den Fundstücken in den typischen Merkmalen ähnelt, doch mittlerweile verstehen Prähistoriker die Techniken recht gut. Im nächsten Schritt fertigen sie komplette Speere und Pfeile, dann folgen Wurf- und Schusstests. In jeder Phase hinterlässt das Experiment Spuren an Werkstoffen beziehungsweise Geschossen, die mit denen auf den Originalen verglichen werden.

In keiner anderen Epoche der Altsteinzeit wurden so viele Geschosspitzen aus Rentiergeweih, seltener aus Hirschgeweih, Knochen oder Mammutelfenbein gefertigt; sie sind charakteristisch für das Magdalénien. Französische Archäologen bringen manchmal aus einer einzigen Siedlungsschicht hunderte zu Tage. Offenbar war es den Jägern gelungen, mit neuen Techniken aus einer einzigen Geweihstange bis zu zwanzig Spitzen zu fertigen. Der Grund dieser Innovation liegt auf der Hand: Organische Hartstoffe wie Knochen und das ebenfalls aus Knochen-substanz gebildete Geweih brechen nicht so leicht wie Feuerstein. Ethnologen haben festgestellt, dass manche von australischen Aborigenes verwendete steinerne





Ein Spitzenfragment aus Rengeweih (oben) belegt, dass die Magdalénien-Menschen ihre Geschosse mit Feuersteinlamellen versahen, die entweder in einen Spalt eingesetzt oder direkt auf den Spitzenkörper geklebt wurden. Ein solches Projektil verwundet die Beute weitaus stärker. Widerhaken (rechts) wurden vermutlich bei Harpunenköpfen für den Fischfang oder die Vogeljagd verwendet.

CENTRE ARCHÉOLOGIQUE DE PINCEVENT, FOTOS: MARIAN VANHIEREN

MUSÉE D'ARCHÉOLOGIE NATIONALE, SAINT-GERMAIN-EN-LAYE; FOTOS: J.-M. PÉTILOUX

▷ Speerspitzen bei einem Aufprall fast immer brechen; bei den gleichfalls steinernen Pfeilspitzen der Inuit reicht dazu bei großer Kälte schon aus, dass sie im Köcher aneinanderstoßen.

Geweihspitzen maßen fünf bis mehr als dreißig Zentimeter Länge und waren acht bis zwölf Millimeter dick. Ihre Basis wurde entsprechend der beabsichtigten Schäftung geformt (siehe vorige Doppelseite). Zahlreiche Jägergruppen der Gegenwart verwenden ähnliche Spitzen und kleben sie mit Haut-, Knochen- oder Fischleim oder einem Harz an den Schaft, eine Umwicklung aus pflanzlichen Fasern oder Sehnen fixiert sie.

Feuerstein und Rengeweih – eine tödliche Kombination

Aufrauungen an der Basis vieler Spitzen des Magdalénien verraten, dass Klebung auch damals schon bekannt war, denn eine aufgeraute Klebefläche ist größer, die Haftung somit verbessert. In der Tat erwiesen sich derartige Rekonstruktionen im Experiment als äußerst wirksam: Mit dem Bogen oder der Speerschleuder abgefeuert, dringen sie 15 bis 30 Zentimeter tief in den Brustkorb eines Rentiers ein.

An Magdalénien-Fundplätzen wurden darüber hinaus so genannte Feuersteinlamellen ausgegraben, also sehr dün-

ne und schmale Klingen, meist nur 0,1 bis 0,3 Zentimeter dick, 0,3 bis 0,8 Zentimeter breit und zwei bis vier Zentimeter lang. Mit einem weichen Stein, Geweih oder Knochen hatte man ihre Rücken abgeflacht (fachlich: retuschiert). Bruchformen verrieten, dass einige als Geschosseinsätze gedient hatten. Zwei französische Funde von Geschosspitzen aus Rengeweih, an deren Seiten noch Reste von Feuersteinlamellen erhalten waren (siehe Bild oben), bestätigen den Verdacht: Diese Feuersteinklingen waren auf ihrer gesamten Länge an die eigentlichen Spitzen angeklebt worden. Sie sollten wahrscheinlich deren zerstörerische Wirkung erhöhen – eine größere Wunde steigerte den Blutverlust des Opfers. Das erhöhte die Chance auf einen tödlichen Schuss und verhinderte, dass das getroffene Tier noch weit flüchten konnte. Außerdem vereinte die Kombination von Geweih- beziehungsweise Knochenspitzen mit dem Feuerstein die Vorteile beider Werkstoffe: die Elastizität und Festigkeit des organischen Materials mit den scharfen Schneiden. Freilich waren auch weiterhin – wie in den Kulturen zuvor – reine Feuersteinspitzen üblich.

Vor etwa 16000 Jahren kamen zudem Geweihspitzen in Gebrauch, die mit einer oder zwei Reihen von Widerhaken versehen wurden (siehe Bild

oben). Dergleichen finden Prähistoriker fast im gesamten Verbreitungsgebiet des Magdalénien, sie sind damit charakteristisch für die jüngere Phase dieser Epoche. Ein weiteres Merkmal verrät ihren Zweck: Die Mehrzahl dieser Spitzen hatte eine konische Basis, über der eine Durchlochung, ein kleiner Vorsprung oder sonst eine Vorrichtung lag, um eine Leine anzubringen: Diese Geschosse sollten in der Wunde stecken bleiben, offenbar hatten die Jäger jener Zeit die Harpune erfunden. Sie hindert die verwundete Beute an der Flucht oder hilft, erlegter Tiere leichter habhaft zu werden. Diese Waffen wären vor allem im Fischfang an den Meeresküsten eine große Hilfe gewesen. Allerdings stammt die mit fast 300 Objekten größte Sammlung von Harpunen aus der Höhle von La Vache in den Pyrenäen, in der Nahrungsresten zufolge kaum Fisch verzehrt wurde, dafür aber Tausende von Vögeln. Vermutlich halfen Harpunen auch bei der Jagd auf Kleinwild.

Die hölzernen Schäfte der Speere waren vermutlich meist über zwei Meter lang und einige hundert Gramm schwer, denn sie mussten mit großer Wucht auftreffen. Jäger etwa in Australien und der Arktis verwenden überdies die Speerschleuder, also einen Stab oder ein Brett mit einem Haken, in dem die Waffe an-



GESICHT: KITZ: HYÄNE: MUSÉE D'ARCHÉOLOGIE NATIONALE SAINT-GERMAIN EN LAYE; MAMMUT: BRITISH MUSEUM LONDON; FOTOS: P. CATELAIN / CEDARC

Kunstvoll verzierten die Jäger manche Speerschleuder, vielleicht als magisches Mittel, um die Treffsicherheit zu steigern: So stellt das oben links abgebildete Objekt ein Mammut dar, die Schleuder darunter ein Kitz. Die Hyäne (rechts) gehört zu dem einzigen bekannten Fragment einer Speerschleuder aus Mammutelfenbein. Ebenfalls einzigartig ist die Schleuder links außen: Sie ziert ein Menschenkopf.

gelegt wird. Wie ein Hebelarm verbessert eine solche Schleuder die Geschwindigkeit, Reichweite oder Durchschlagskraft eines Wurfs, sofern das Gelände offen ist. Etwa hundert Widerhaken aus Geweih, die meisten aus Südwestfrankreich, dürften diesen Zweck gehabt haben. Im jüngeren Magdalénien kamen Speerschleudern wohl außer Gebrauch.

Organisierte Jagdgesellschaften

Auch auf kurze Distanzen wirken Pfeil und Bogen, die deshalb in fast allen Regionen und Landschaften der Erde genutzt worden sind. Leider sind wir hier auf Vermutungen angewiesen. Den ethnografischen Vergleichen entsprechend dürften die Pfeile des Magdalénien zwischen 60 und 150 Zentimeter lang gewesen sein; sie wogen nur wenige Gramm. Nicht die Wucht des Aufpralls war von Bedeutung, sondern die Möglichkeit, genauer zu treffen und rasch nachlegen zu können. Ein Pfeil fliegt überdies schneller als ein Speer, die Beute kann schlechter ausweichen.

Hat der Bogen die Speerschleuder am Ende des Magdalénien ersetzt oder existierten beide Waffen gleichzeitig, wie zum Beispiel bei den Azteken oder den Inuit? Um diese Frage zu beantworten, untersuchen Prähistoriker die Bruchformen an den Spitzen im Experiment, denn allein

anhand der jeweiligen Größe oder Masse lassen sich die Artefakte leider nicht dem Gebrauch als Speer- oder Pfeilspitze zuordnen. Bislang haben aber auch die Schusseperimente noch keine eindeutigen Unterscheidungsmerkmale ergeben.

So weist unser Bild von der Jagd im Magdalénien noch große Lücken auf. Klar ist aber schon jetzt, dass diese Menschen an ihr Ökosystem hervorragend angepasst waren. Sie wussten alle Materialien geschickt zu nutzen. Ihre Jagdwaffen, die nachweisbaren Verletzungen der Beutetiere wie auch die Spuren ihrer Weiterverarbeitung zeugen von gut organisierten Verbänden mit entwickelten Sozialstrukturen. Im Herbst wurden zum Beispiel Rentiere auf der Wanderung in großer Zahl erlegt. Das erforderte viele Menschen; Frauen und Kinder halfen vermutlich beim Treiben der Tiere und bei der Verarbeitung der Beute. Dass verschiedene Gruppen bei der gemeinsamen Jagd kooperieren, kennen wir auch von den Inuit. Im Winterlager lebten dann wieder kleinere Grüppchen, die einzelne Tiere erbeuteten und die Zeit nutzten, um Schmuck und Kunst zu fertigen.

Die Fertigkeiten, die für die Herstellung und den Gebrauch der Waffen notwendig waren, wurden über Tausende von Jahren mündlich von einer Generation an die nächste weitergegeben – auch

das wäre nicht ohne ein weit entwickeltes soziales Gerüst denkbar gewesen. Diese Kontinuität lässt sich auch an der Kohärenz und der suggestiven Kraft der Bilderhöhlen wie Lascaux oder Altamira ablesen: Weit entfernt vom Klischee der »primitiven Horde« bietet uns das Magdalénien das Beispiel einer reichen und beständigen Kultur. Als die Temperaturen allmählich kletterten und die Feuchtigkeit zunahm, verdrängten Wälder mit dichtem Unterholz die Tundren und Steppen. Rentiere und Pferde zogen sich zurück, die Zeit der Waldbewohner brach an. Nach und nach, regional unterschiedlich, ersetzten auch andere Kulturen die des Magdalénien. Welche Rolle dabei das Klima spielte, ist eine der offenen Fragen der Forschung. ◀



Der Prähistoriker **Jean-Marc Pétilion** arbeitet an der Universität Paris 1. Er untersucht am Laboratoire archéologies et sciences de l'Antiquité des Forschungszentrums CNRS die Jagdwaffen des Magdalénien.

Des Magdaléniens en armes. Technologie des armatures de projectiles en bois de Cervid du Magdalénien supérieur de la grotte d'Isturitz. Von Jean-Marc Pétilion. Doktorarbeit von 2004, Druck in Vorbereitung bei der éditions CEDARC.



Nie wieder Reste im Getränkekarton

Originelle Ideen in praxistaugliche Modelle umsetzen – dieser Aufgabe stellten sich die Teilnehmer des 16. BundesUmweltWettbewerbs mit viel Fantasie.

Von Susanne Gellweiler

Verglichen mit dem großen Bruder »Jugend forscht« blüht der »Bundes-UmweltWettbewerb« eher im Verborgenen. Das Konzept ist das gleiche: Jugendliche und junge Erwachsene bearbeiten ein selbst gesetztes Thema und stellen sich mit ihrer Ausarbeitung einer fachkundigen Jury. Der Forschungsbereich »Umwelt« ist nicht gerade klein, zumal das Thema sich nicht auf das Ökosystem des Heimatdorfs beschränken muss, sondern auch überregional Gesundheit, Technik oder Politik umfassen darf.

Trotzdem sind bundesweit gerade 141 Arbeiten von 489 Teilnehmern eingereicht worden. Die Außenwirkung hält sich in Grenzen: In den Wettbewerbs-

statuten ist eine öffentliche Präsentation der Arbeiten nicht vorgesehen. Auch der Erfahrungsaustausch unter den Teilnehmern findet eher nebenher im Anschluss an die Preisverleihung statt.

Dabei kann die Qualität der Arbeiten sich durchaus mit dem großen Vorbild messen; und die zu Grunde liegende Idee, das Umweltbewusstsein der heranwachsenden Generation durch die Förderung nach Eigeninitiative zu stärken, ist in jedem Fall unterstützenswert.

Zur Preisverleihung am 22. September im Umweltforschungszentrum Halle-Leipzig (UFZ) sind nur noch die Nachwuchswissenschaftler geladen, deren Arbeiten auch eine Auszeichnung erhalten sollen. Insgesamt werden in Leipzig 17 Arbeiten von 51 Teilnehmern mit Geld-

preisen im Wert zwischen 250 Euro und 1500 Euro ausgezeichnet. Aber nicht die Preise sollen bei dem Wettbewerb im Vordergrund stehen, sie dienen vielmehr als »Anerkennung für die geleisteten Anstrengungen und vielleicht als Ansporn für weitere Ideen«, kommentiert Ulrich Schüller vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.

In diesem Jahr wurde der Wettbewerb zum ersten Mal in zwei Altersgruppen – 13 bis 16 Jahre (BUWI) und 17 bis 21 Jahre (BUWII) – unterteilt. »Durch die Trennung ist es uns möglich, die Arbeiten sach- und altersgerecht zu bewerten«, erklärt Professor Gerrit Schüürmann, Abteilungsleiter für Ökotoxikologie im UFZ und Vorsitzender der Wettbewerbsjury für den BUW II. Darüber hinaus erhofft sich der Veranstalter, das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Universität Kiel, mehr jüngere Teilnehmer, da sich für sie die Chance auf ein erfolgreiches Ergebnis erheblich erhöht. Immerhin hat die Zahl der eingereichten Arbeiten mit der Änderung einen Sprung von 100 bis 120 auf 141 gemacht.

Bei den Wettbewerbsbeiträgen werden keine perfekten, hochwissenschaftlichen Leistungen erwartet. Die gewählten Fragestellungen sollen Alltägliches aufgreifen. Es geht um das Erklären und Aufklären an Beispielen, die vor der Tür liegen.

Buchstäblich vor der Tür liegt der Rohstoff, mit dem Constantin Klein (18) und Manuel Henrich (18) den höchstdotierten Hauptpreis des BUW II gewonnen haben. Jedes Jahr im Herbst fallen tausende Kubikmeter Laub von

BundesUmweltWettbewerb

Der bundesweite Wettbewerb wird jährlich

unter dem Motto »Vom Wissen zum nachhaltigen Handeln« ausgeschrieben, mit dem Ziel, das Umweltwissen von jungen Menschen zu fördern und gleichzeitig deren Selbstständigkeit, Kreativität und Eigeninitiative zu wecken. Teilnehmern können Jugendliche und junge Erwachsene im Alter von 13 bis 21 Jahren; auch Auszubildende und Studenten sind aufgerufen mitzumachen. Die Bewertung der Projekte erfolgt in zwei nach Alter getrennten Gruppen. Eingereicht werden können Arbeiten, die eine selbst gewählte umweltbezogene Fragestellung umfassend untersuchen. Eine Betreuung durch Lehrer, Eltern, Ausbil-

der oder Experten ist erlaubt. Einsendeschluss ist immer der 15. März eines Jahres. Träger ist das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel. Ausführliche Informationen und die Teilnahmeunterlagen gibt es zum Download im Internet unter www.buw-home.de.

Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel
Olshausenstraße 62
24098 Kiel
Telefon: 0431 549700
Fax: 0431 8803142
E-Mail: buw-sekr@ipn.uni-kiel.de

w i s

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 »Stern und Weltraum« kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.

www.wissenschaft-schulen.de



IPN KIEL



SUSANNE GELLWEILER

◀ Erleichtert nach der Preisverleihung: die Preisträger des BundesUmweltWettbewerbs 2006 (links). Vorne, zweite von rechts: Jana Böker. Oben: die Hauptpreisträger Constantin Klein (links) und Manuel Henrich vor dem Poster ihrer Arbeit zum Öl bindenden Laub

den Bäumen. Doch der Kompost, den man daraus machen könnte, findet kaum Abnehmer. Gibt es eine Möglichkeit, den biologischen Rohstoff sinnvoller zu verwerten?

Die beiden Gymnasiasten aus Metzingen in Baden-Württemberg haben einen umweltfreundlichen Ölbinder auf Laubbasis entwickelt. In ihren Versuchen stellten sie fest, dass trockenes Laub in der Lage ist, Öl zu binden. Unbehandeltes Laub eignet sich allerdings nicht als Ölbinder. Nachdem das tote Laub durch einen Regenguss einmal richtig durchnässt wurde, bleiben die Spaltöffnungen auf der Blattunterseite unwiderrufflich geöffnet. Das bedeutet, das Laub saugt Wasser fortan lieber auf als Öl, was es für den Ölfleck in der Pfütze ungeeignet machen würde.

Durch ausgiebige Recherchen stießen Constantin Klein und Manuel Henrich auf den Stoff Methylhydroxyethylcellulose (MHEC), der das verhindert. Vermengt man trockenes Laub mit MHEC im Verhältnis 30:1 und mit Wasser, ergibt sich nach erneutem Trocknen ein Gemisch, das als saugfähiger Ölbinder sowohl zu Land als auch zu Wasser eingesetzt werden kann.

Ganz im Sinn der Nachhaltigkeit war an dieser Stelle für die Schüler noch nicht Schluss. Die beiden Preisträger haben ein kostengünstiges Herstellungsverfahren entwickelt und stehen zurzeit mit Bauhöfen und Feuerwehren in Kontakt, die den Ölbinder selbst herstellen und erproben. »Der nächste Herbst steht vor der Tür, und wir sind bereit«, sagt ganz selbstbewusst Constantin Klein, nachdem er den Preis entgegengenommen hat.

Aber nicht nur Jungs haben sich den Herausforderungen des Wettbewerbs gestellt. Stolze 48 Prozent der diesjährigen Jungwissenschaftler sind weiblich. Jana Böker ist mit 13 Jahren eine der jüngsten Teilnehmerinnen und gehört zu den Hauptpreisträgern im BUW I. Beim Wegbringen des Hausmülls ist sie »so ganz nebenbei« auf die Idee ihres Projekts gekommen. In jedem Haushalt landen täglich Getränkeverpackungen im Müll, die noch erhebliche Mengen an Restflüssigkeit enthalten. Die Schülerin aus Kleinmachnow (Kreis Potsdam) erkannte bald, dass die Art des Verschlusses dafür verantwortlich ist, wie viel Flüssigkeit im Karton verbleibt.

Eigenständigkeit begeistert

Auf der Grundlage ihrer Ergebnisse entwickelte sie eine Gebrauchsanweisung zur optimalen Entleerung von Getränkekartons abhängig vom jeweiligen Verschluss. Die Resultate leitete sie unter anderem an das Umweltbundesamt weiter, das künftig bei der Bewertung von Getränkekartons die Parameter berücksichtigen will.

Mit dieser Idee hatte Jana 2005 bereits beim Bundeswettbewerb »Jugend forscht« teilgenommen. Für eine Auszeichnung hat es damals nicht gereicht (SdW 7/2005, S. 66). Doch Jana ist von ihrer Idee überzeugt und hat sie weiterentwickelt. So darf sie sich seit diesem Jahr wohl zu den jüngsten Menschen mit einem eigenen Patent zählen.

In Fortführung ihrer Arbeit hat sie einen Getränkekarton mit einem optimierten Verschluss entwickelt und bereits einigen Verpackungsherstellern vorgestellt. Ganz im unternehmerischen Sinn verrät

die Schülerin: »In den Ferien, wenn ich mehr Zeit habe, werde ich zu den Herstellern fahren und meinen Prototyp persönlich vorstellen.«

Auch weniger wirtschaftlich orientierte Arbeiten finden sich im Spektrum der eingereichten Beiträge. Eine Projektgruppe erhielt einen BUW-I-Hauptpreis für die Planung und Errichtung eines Bienenlehrpfads, der die Bewohner und Besucher ihrer Heimatgemeinde Renchen in Baden-Württemberg über die Physiologie, die Ökologie und das Verhalten von Bienen informiert. In der Region um Renchen hat der Obstanbau eine große Bedeutung. Welche Rolle die Bienen in diesem Ökosystem spielen, war bisher jedoch weitgehend unbekannt. Ein Abschluss des Projekts ist auch hier noch nicht in Sicht. Die Jugendlichen wollen den Pfad um weitere Elemente bereichern und die begonnene Aufklärungsarbeit weiterführen.

Die Souveränität und Eigenständigkeit sowie die Fortführung der Projekte sind Grund zu besonderer Freude für Susanne Bögeholz, Professorin am IPN und Vorsitzende der Wettbewerbsjury für den BUWI. »Die Begeisterung an der Arbeit war bei allen Teilnehmern deutlich zu spüren. Wir, die Jury, haben es sehr genossen, in die Projekte einzutauchen und sie zu begutachten.« ◀



Susanne Gellweiler ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Wiesbaden.

AUTORIN

Schlaue Lösungen sind Programm

Angehende Informatiker ergrübeln, wie man übersichtliche U-Bahn-Pläne zeichnet oder als Nachtportier Energie sparend durch das Gebäude geht.

Von Michael Springer

Sowie eine Technik erst allgegenwärtig ist, wird sie als solche unsichtbar. Trinkwasser und Kanalisation, Auto und Zug, Strom und Telefon, Radio und Fernsehen gehören so selbstverständlich zum modernen Alltag, dass die Technologien nur noch auffallen, wenn sie ausfallen. Mit Computer und Internet ist es auch schon fast so weit: Die meisten von uns nutzen sie täglich, ohne dass wir uns den Kopf über die Programme zerbrechen, die da hinter der Benutzeroberfläche ablaufen.

Dennoch bleibt es eine spannende intellektuelle Herausforderung, unterschiedlichste Aufgaben so zu formalisieren, dass ein Automat sie zu bewältigen vermag. Wissenschaft und Wirtschaft haben weiterhin unersättlichen Hunger nach Programmmentwicklern; darum ist es wohl kein Zufall, dass die Firma Microsoft die Endrunde des 24. Bundeswettbewerbs Informatik gesponsert hat, die Ende September in Aachen stattfand (Kasten rechts unten).

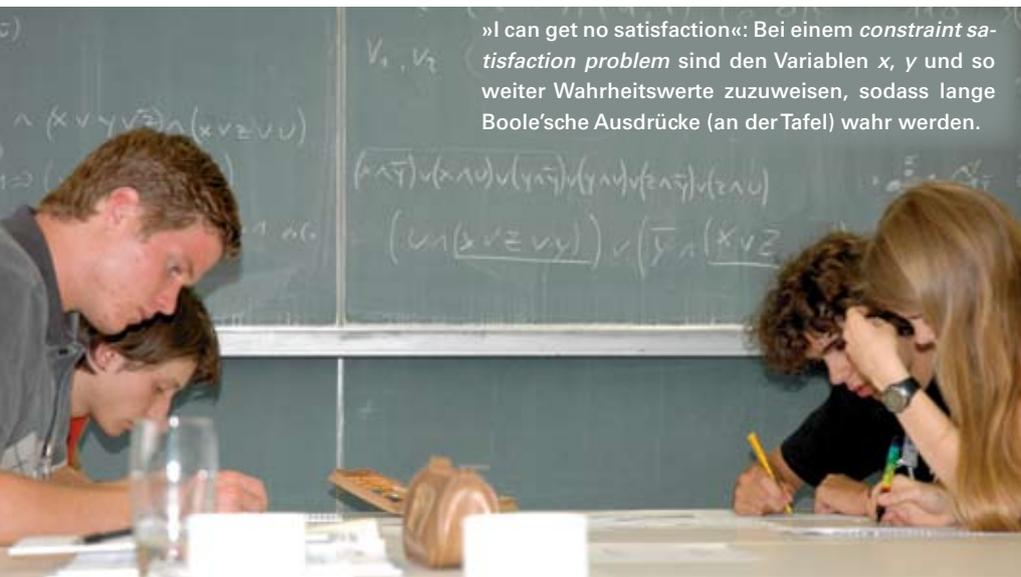
Der edle Wettstreit begann schon im Herbst des Vorjahrs mit einer Reihe von Hausaufgaben, die interessierte Teilnehmer – nur unter 19 Jahre alt mussten sie sein – über ihre Schule und das Internet beziehen konnten. Diesmal haben sich rund 700 Jugendliche beteiligt. Bewertet wurden ihre Arbeiten von einem Aufgabenausschuss aus Informatik-Studenten.

Trimm dich mit Zeichenfolgen

Für rund 150 Auserlesene folgte eine zweite Runde mit schwierigeren Hausaufgaben, aus der schließlich die 28 Finalisten hervorgingen:

- ▶ Programmiere den Weg des Nachtwächters (Kasten links);
- ▶ Bestimme die Anzahl der verschiedenen Zeichenfolgen, die man unter Einhaltung der Reihenfolge aus einem sehr langen Text extrahieren kann (notdürftig verpackt als Problem mit einem Trimm-dich-Pfad);
- ▶ Simuliere unter plausiblen Annahmen mögliche Verläufe der Fußballweltmeisterschaft.

Die Aachener Endrunde, eine Kombination von schriftlichen und mündlichen Phasen, erstreckte sich über zwei



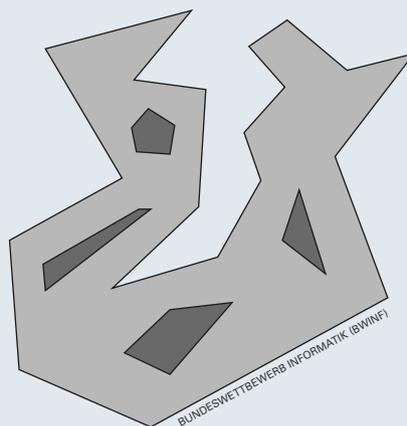
»I can get no satisfaction«: Bei einem *constraint satisfaction problem* sind den Variablen x , y und so weiter Wahrheitswerte zuzuweisen, sodass lange Boole'sche Ausdrücke (an der Tafel) wahr werden.

HANS-CHRISTIAN EBKE

Eine Aufgabe aus der zweiten Runde

Das Museum für moderne Kunst besteht nicht etwa altmodisch-langweilig aus vielen rechteckigen Sälen, sondern seine äußere Form ist ein kompliziertes Polygon, und es gibt keine inneren Wände, außer dass Bereiche wie Garderobe und Restaurant, die auch im Polygon untergebracht sind, vom Ausstellungsraum abgetrennt sind (das Polygon hat »Löcher«). Zum Bedauern des Architekten hat die Baubehörde aber durchgesetzt, dass die Wände vertikal und der Boden und das Dach horizontal sind. Ein Nachtwächter hat die Aufgabe, gelegentlich eine Runde durch den Ausstellungsraum zu drehen.

- ▶ 1. Erstelle ein Programm, mit dem man die Form des Museums einlesen und visualisieren kann. Das Programm muss mit der rechts gezeigten Beispielform, aber auch mit anderen Formen zu recht kommen.
- ▶ 2. Erweitere dein Programm so, dass zusätzlich ein Rundgang des Nachtwächters eingelesen und visualisiert werden kann.



- ▶ 3. Erweitere dein Programm so, dass es die Teile des Ausstellungsraums anzeigt, die der Nachtwächter auf seinem Rundgang mindestens einmal sehen kann. Die Ausstellungsgegenstände sind so klein, dass sie die Sicht nicht behindern; aber der Nachtwächter kann natürlich nicht durch Wände sehen.

ganze Tage. Die Teilnehmer bewährten sich zunächst in Einzelgesprächen und bildeten dann kleine Gruppen, denen je zwei Juroren gegenüber saßen. Schließlich stellten sie ihre Ergebnisse im Plenum vor.

Eher schwer taten sich die Junginformatiker mit der am ersten Tag vorgegebenen Gruppenarbeit, die gegenüber früheren Aufgaben ein hohes Abstraktionsniveau aufwies. Thema waren *constraint satisfaction problems* (CSP): Die Variablen eines Algorithmus dürfen nur Werte annehmen, die durch einschränkende Bedingungen (*constraints*) begrenzt sind. Das als CSP formulierbare Problem kann die Erfüllbarkeit einer Boole'schen Formel (Variablenverknüpfung mit UND, ODER, NICHT) sein, die Färbbarkeit eines Graphen oder die Erstellung eines Stundenplans.

Nach dem schweren Einstieg fiel den Endrundenkämpfern die zweite Gruppenarbeit leichter. Sie sollten Programme entwerfen, die nach bestimmten Kriterien »gute« Graphen zeichnen – etwa einen übersichtlichen Stammbaum oder ein kompliziertes und doch lesbares Verkehrsnetz aus Bus-, U- und S-Bahnlinien.

Ein guter Lehrer ist wichtig – vor allem, wenn man keinen hat

Zur Siegerehrung im Ballsaal des Alten Aachener Kurhauses wurden nicht nur die sechs Bundessieger aufs Podium gerufen und gehörig beklatscht, sondern auch sechs Gewinner von Sonderpreisen für herausragende Originalität, rhetorische Vortragsgestaltung oder kooperatives Verhalten in der Gruppe. Außerdem sollen 15 Endrundenteilnehmer die Bundesrepublik beim internationalen Informatik-Wettbewerb IOI, den International Olympics of Informatics, vertreten.

Im privaten Gespräch nach der Siegesfeier meinten mehrere der Geehrten, gerade der Wettbewerb habe ihnen einen wichtigen Anreiz geliefert, sich mit Informatik eingehender zu beschäftigen. Die Zeit der ersten Personal Computer, die praktisch automatisch jeden reizten, sich – ähnlich wie Radiobastler in der Pionierzeit des Funkverkehrs – mit dem Computer-Innenleben zu beschäftigen und kleine Programme zu schreiben, ist wohl vorbei. Allerdings begannen zwei

Informatikaufgaben laufen häufig auf inverse Probleme hinaus: Gegeben ist die Antwort, zum Beispiel 42, gesucht ist die Frage. »Don't panic ...«



HANS-CHRISTIAN EBKE

Preisträger mit dem Programmieren und Aufrüsten ihrer ersten Spielrechner, weil sie deren geringes Rechen tempo nervte. Die Schule selbst gibt offenbar keineswegs immer den entscheidenden Anstoß, obwohl die Bedeutung eines guten Lehrers stets betont wird – aber nur zu häufig als Defizit.

Uwe Schöning, Professor für theoretische Informatik an der Universität Ulm und Leiter des Beirats, der den Wettbewerb gestaltet und die Sieger auswählt, zeigte sich auch diesmal äußerst angenehm überrascht vom Niveau der Beiträge und deren Kreativität.

Inzwischen hat der Beirat bereits die erste Runde des 25. Bundeswettbewerbs ausgerufen. Zu diesem Jubiläum gibt es übrigens ein besonderes Lockangebot für Mädchen – keine schlechte Idee. Unter den Aachener Preisträgern war nur eine(r) weiblich. ◁



Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR

Bundeswettbewerb Informatik

Der Wettbewerb findet seit 1980 statt, wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert und von den Landes-Kultusministerien unterstützt. Träger des Wettbewerbs sind die Gesellschaft für Informatik (GI) und die Gruppe Informations- und Kommunikationstechnik der Fraunhofer-Gesellschaft. Ziel ist es, Spitztalente herauszufordern und zu fördern, die Computer nicht nur bedienen, sondern beherrschen wol-

len. Unter den ehemaligen Siegern sind sowohl Professoren als auch Firmengründer.

Bundeswettbewerb Informatik
Verantwortlich: Dr. Wolfgang Pohl
Ahrstr. 45, 53175 Bonn
Telefon: 0228 302197
Fax: 0228 3729000
www.bwinf.de

Das Aufgabenblatt ist an Schulen oder per E-Mail an bwinf@bwinf.de erhältlich.

Hybride auf der Überholspur

Hybridfahrzeuge, die sowohl mit Benzin als auch mit elektrischem Strom fahren, gibt es erst seit wenigen Jahren. Jetzt kündigt sich eine neue Generation umweltschonender Automobile an.



Von Joseph J. Romm,
Andrew A. Frank und Reinhard Löser

Während Energiesparen in Europa schon lange populär ist, erfasst das Nachdenken über Energieverschwendung und Umweltschutz nun endlich auch die USA, bislang größter Energieverbraucher und Kohlendioxidproduzent der Welt. Europäische Autohersteller entwickeln seit Jahren verbrauchs- und emissionsärmere Motoren. Sie setzen dabei auf Leichtbau, verbessern mit Direkteinspritzung und Aufladung den Verbrennungsmotor und erproben regenerative Kraftstoffe sowie alternative Antriebe. Das Brennstoffzellenfahrzeug von DaimlerChrysler aus dem Jahr 1994 markierte dabei den ersten technologischen Meilenstein.

Doch die Euphorie der ersten Jahre ist inzwischen der Ernüchterung gewichen. Vor 2010 rechnet keiner mehr mit dem breiten Durchbruch der Brennstoffzellentechnologie. Stattdessen wird dem klassischen Verbrennungsmotor noch so manche Innovation zugetraut. Drei-Liter-Autos sind machbar, wissen die Ingenieure, scheitern aber an den Anforderungen der Autofahrer an Komfort, Sicherheit und Dynamik zu vertretbaren

Preisen. Lieber entscheiden sich die Europäer für den verbrauchsgünstigen Dieselmotor, der in den USA und Japan noch als behäbig, laut, stinkig und Rußschleuder gebrandmarkt wird.

Als 1995 in den USA der Benzinpreis die magische Drei-Dollar-per-Gallone-Grenze überschritt (gerade mal ein Euro pro Liter), setzte dort der Run auf eine neue alternative Antriebstechnik ein – das Hybridauto. Seine Kombination aus Verbrennungsmotor und batteriegestütztem Elektromotor hat Charme: Es offeriert sowohl günstigeren Verbrauch als auch mehr Fahrspaß; und umweltfreundlich ist es obendrein.

Noch bremst der Diesel die Verkäufe

Der Benzinverbrauch eines US-Fahrzeugs beträgt im Mittel zehn bis zwölf Liter pro 100 Kilometer, der eines europäischen Fahrzeugs liegt immerhin noch bei rund acht Litern. Dagegen begnügt sich das Vorbild eines Hybriden – der inzwischen flügge gewordene Toyota Prius, an dem sich alle anderen messen – mit knapp vier Litern. Dabei ist die Anschaffung nicht einmal kostspielig.

So verwundert es nicht, dass sich die Verkaufszahlen von Hybridautos, auch Hybride oder HEVs für *Hybrid Electrical Vehicles* genannt, in den USA von 2004

auf 2005 auf einen Schlag verdoppelten. Auch in Japan, dem Geburtsland der heutigen Hybridgeneration, gehen sie weg wie warme Semmeln. In Europa dämpfte der populäre Dieselantrieb einen raschen Schwenk in Richtung Hybride. Denn über 50 Prozent aller neu zugelassenen Autos in Europa tankten Diesel, Tendenz noch immer steigend.

Dennoch: Weltweit arbeiten inzwischen alle größeren Hersteller fieberhaft an HEVs, um den technologischen Vorsprung von Toyota, Honda & Co. aufzuholen. So haben BMW, DaimlerChrysler und General Motors 2005 eine Allianz geschlossen, um spätestens 2007 – wie auch Volkswagen – mit Hybridautos glänzen zu können. Renault und Fiat sitzen ebenfalls längst in den Startlöchern. Spätestens 2010 – so eine Studie der Unternehmensberatung Frost & Sullivan – werden alle Hersteller damit auf dem Markt sein. Es wird erwartet, dass die HEVs an den europäischen Pkw-Verkäufen einen Anteil von rund drei Prozent erreichen werden. Bereits 2015, so schätzt Julia Reuter, Analytikerin bei Frost & Sullivan, könnte die Marktsättigung bei acht bis zehn Prozent erreicht werden, wobei sich der Großteil aus »milden« Systemen (siehe Kasten S. 97) zusammensetzt. 2020 soll sogar von allen neuen



KENN BROWN

▲ So genannte Plug-in-Hybride können einfach an der Steckdose aufgeladen werden – etwa über Nacht, wenn der Strom billiger ist. Sie fahren mit Benzin- und Elektromotor.

Modellen immer auch eine Variante mit Hybridantrieb angeboten werden.

Während Autokäufer also noch die ersten benzin-elektrischen Hybridfahrzeuge beäugen, denken Forscher bereits über eine neue Generation von noch umweltfreundlicheren HEVs, so genannte Plug-in-Hybride, nach. Außer einem geringeren Kraftstoffverbrauch bieten sie dem Fahrer einen weiteren Vorteil: Ihre leistungsstarke und preiswerte Batterie wird am normalen Stromnetz aufladbar sein – mit billigem Strom über Nacht, aber auch tagsüber. Ein regulärer Tankstopp wäre nur noch hin und wieder nötig. Denkbar ist sogar, dass in der Autobatterie angesammelte überschüssige Elektroenergie gegen Vergütung ins Netz eingespeist wird, beispielsweise dann, wenn das Auto längere Zeit nicht gebraucht wird.

Zu den Vorteilen für den Verbraucher gesellten sich die volkswirtschaftlichen Effekte: geringerer Energieverbrauch für

Mobilität und Verkehr sowie insgesamt reduzierte Mengen an Treibhausgasen. Denn wenige, hocheffektive Kraftwerke emittieren derzeit zusammen weniger Treibhausgase als die Millionen von Fahrzeugen. Außerdem: Heute verfeuern die Kraftwerke überwiegend fossile Energieträger – Kohle, Öl oder Erdgas, doch im Trend liegen umweltfreundlichere Energiequellen, beispielsweise Wind-, Solar- oder Biogasenergie. Regenerative Energiequellen könnten die Kohlendioxid-Bilanz also weiter entlasten. Schließlich ließe sich das bei Kraftwerken anfallende CO₂ womöglich unterirdisch speichern (siehe SdW 3/2006, S. 72, »Können wir das Klimaproblem begraben?«).

Autos als Schluckspechte

Will man wissen, welche Entwicklung HEVs nehmen werden, lohnt ein Blick zurück in der Geschichte des Automobils. Seit über hundert Jahren dominiert der interne Verbrennungsmotor, mit Benzin oder Diesel als Kraftstoff. Immer wieder versuchten sich Ingenieure auch an Hybridantrieben, doch stets sprachen Kosten und Gewicht dagegen. Die Motorleistung konnte günstiger und technologisch einfacher mit größerem Hubraum gesteigert werden. Zudem war Benzin stets billig und überall verfügbar.

Also entwickelten sich die Autos zu Schluckspechten, vor allem in den USA.

In der ersten Ölkrise Anfang der 1970er Jahre wurde den Autofahrern bewusst, dass Größe, Gewicht und Leistung ihres mobilen Untersatzes etwas mit Verbrauch und Kosten zu tun haben. Hubraumverkleinerung war das Gebot der Stunde – also die Beschränkung auf kleinere, leistungsschwächere und demzufolge verbrauchsärmere Pkws. Während in Europa das wachsende Umweltbewusstsein sparsamere Antriebe forderte, kehrte in den USA mit dem Absinken des Ölpreises die Lust am verbrauchsfreudigen Fahren zurück. Die Autos bekamen wieder größere Hubräume und verschlangen mehr und mehr Kraftstoff. Erst die jüngste und derzeit anhaltende Energieverteuerung zwingt die Autofahrer auch dort erneut zum Spritsparen. Deswegen kämpfen die amerikanischen Hersteller mit ihren großen, schweren Pick-ups und Geländewagen, die auf 100 Kilometer bis zu 20 Liter schlucken, gerade mit massiven Absatzproblemen.

Um sowohl Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu senken als auch gleichzeitig exzellente Beschleunigungswerte sowie ausreichende Reichweiten mit einer Tankfüllung zu erzielen, sind die Antriebe moderner Hybridfahrzeuge mit al- ▷

▷ lerneueter Computersteuerung und Leistungselektronik ausgerüstet. Sie sorgen dafür, dass der von der Batterie gespeiste E-Motor nur dann eingeschaltet wird, wenn seine Zusatzleistung wirklich gebraucht wird, beispielsweise beim Anfahren, beim kräftigen Beschleunigen oder an Steigungen. Sonst genügt ein gering dimensionierter Verbrennungsmotor.

Toyota Prius als Vorreiter

Jede Benzin sparende Technologie kann im Prinzip auch leistungssteigernd eingesetzt werden. Ebenso verbessern Hybridantriebe die Kraftstoffausnutzung, und die Elektromotoren liefern so beeindruckende Beschleunigungswerte, dass die Autohersteller sie sowohl zum Spritsparen als auch zur Leistungssteigerung verwenden. Beispielsweise verbraucht der Ford Escape Hybrid bei gleicher Fahrzeugleistung deutlich weniger Benzin. Selbst Fahrzeuge wie der Toyota Highlander Hybrid 4x4 SUV verbrauchen weniger und bieten dennoch eine höhere Leistung.

Ein größerer Speicher für Elektroenergie, der zusätzliche E-Motor und die notwendige Leistungselektronik schlagen sich unvermeidlich in einem höheren Preis für ein Hybridauto nieder. Die Zusatzkosten liegen im Bereich von 2500 bis 6000 Euro, im Mittel kostet ein HEV über 3000 Euro mehr als ein vergleichbares Benzinauto. Außerdem bringt das Paket von Elektromotor und Batterie mehr Gewicht auf die Räder; für den Honda Accord beträgt das ungefähr fünf Prozent mehr Last. Dieser Nachteil erhöht den Spritverbrauch wieder etwas.

Das gegenwärtige Paradebeispiel des Hybridautos – der Toyota Prius – ver-

braucht im EPA-Zyklus (Einstufung durch die amerikanische Umweltschutzbehörde EPA, die *Environment Protection Agency*) über 50 Prozent weniger Kraftstoff gegenüber einem Vergleichsfahrzeug mit klassischem Benzinmotor derselben Größenklasse und Leistung. Selbst wenn in Rechnung gestellt wird, dass von Land zu Land unterschiedliche Normzyklen für die Feststellung des Verbrauchs gelten, so Uwe Möhrstädt vom Automobilzulieferer Continental Automotive Systems, sind 25 bis 30 Prozent Benzineinsparung durchaus realistisch.

Angenommen, durch den kombinierten Antrieb sinkt der Benzinverbrauch von zehn auf fünf Liter pro 100 Kilometer, dann können bei einer jährlichen Fahrleistung von 15000 Kilometern und einem Benzinpreis von 1,50 Euro pro Liter über 1000 Euro gespart werden. In der Praxis dürften eher nur 500 Euro übrig bleiben. In den USA fällt der Effekt durch den geringeren Treibstoffpreis, den geringeren Anteil Stadtverkehr und die in der Regel größeren Kilometerleistungen pro Jahr etwas geringer aus. Doch auch dort bleiben im Jahr 400 bis 800 Dollar im Portmonnee. Bis zu 30 Prozent kann das Sparergebnis noch vom individuellen Fahrstil beeinflusst werden; vorausschauendes Fahren wird honoriert, Kavaliertests werden bestraft.

Die Europäer sparen vor allem mit dem Diesel. Auch dessen Kraftstoffeffizienz – neben anderen ökologischen Vorteilen, wie verringertem CO₂-Ausstoß – ist deutlich besser als der eines Benziners. Der Verbrauch liegt rund 5 bis 15 Prozent, die CO₂-Emissionen 10 bis 25 Prozent unter den Werten eines entsprechenden Benziners. Doch der Vergleich

hinkt, denn Dieselmotoren treiben meist PS- und hubraumstärkere Fahrzeuge mit größerem Gewicht an.

Die HEVs müssen sich in Europa auch mit Erdgasautos messen, die entweder Erdgas pur (»monovalent« wie beim Opel Combo CNG) oder mit Benzin in Kombination (»bivalent« wie beim Volvo Bi-Fuel) verbrennen können. Der günstige Preis und die Ausweitung des Tankstellennetzes haben in den letzten Jahren entscheidend zu ihrer steigenden Akzeptanz beigetragen. So kostet beispielsweise ein Kilogramm Erdgas derzeit rund 85 Cent, Flüssiggas sogar nur 55 Cent. Finanziell attraktiv ist Gas als Treibstoff zudem, weil örtliche Energieversorger diesen alternativen Kraftstoff fördern und bis 2020 eine Steuerbegünstigung festgeschrieben ist. Wie bei HEVs machen den Erdgasautos jedoch noch der Anschaffungspreis und die mangelnde Reichweite zu schaffen. Für 2000 bis 2500 Euro kann fast jedes Fahrzeug mit einer Gasanlage nachrüstet werden. Sie amortisiert sich ab zirka 30000 Kilometern im Jahr.

Batteriepreis mehr als halbiert

Natürlich brauchen Hybridautos einige Jahre, bis der höhere Anschaffungspreis durch geringere Ausgaben beim Tanken sowie steuerliche Vorteile für emissionsarme Fahrzeuge wettgemacht ist. Sollte der Ölpreis jedoch weiter steigen, wird sich auch der Kauf eines HEV schneller amortisieren. Sollten neuartige Produktions- und Batterietechnologien die Preise weiter senken, wird der Hybrid seine Vorteile schnell ausspielen. Immerhin hat sich der Preis für Nickel-Metallhydrid-Batterien, die bislang in HEVs eingebaut werden, von 1997 bis 2004 schon halbiert, ebenso ihr Gewicht. Dennoch: Die Batterien machen immer noch mehr als 50 Prozent der Extrakosten der heutigen Fahrzeuge aus. Allein weil Toyota in der nächsten Dekade weltweit eine Million Hybridfahrzeuge pro Jahr absetzen will, ziehen die anderen Hersteller nach. Mit einem weiteren Preisverfall durch die »economy of scale« kann somit gerechnet werden.

Hybridfahrzeuge unterscheiden sich vor allem hinsichtlich Größe und Einsatzziel der elektrischen Antriebskomponente. Ein Vollhybrid (fachlich »Full Hybrid«) nutzt ein ganzes Bündel unterschiedlicher Technologien, um den Verbrauch zu reduzieren. Eine abgespeckte Variante, der so genannte moderate oder ▷

IN KÜRZE

- ▶ Hybridfahrzeuge werden von einer **Kombination aus konventionellem Benzinmotor und Elektromotor** angetrieben. Weil die Technologie Kraftstoff spart, setzt weltweit eine stürmische Entwicklung ein.
- ▶ Noch sind Hybridantriebe **um einige tausend Euro teurer** als vergleichbare normale Autos. Ein Halter muss deswegen sein Fahrzeug einige Jahre fahren, bis sich der Zusatzaufwand amortisiert hat. Doch mit besserer Batterietechnik und größerer Stückzahl werden die Mehrkosten für einen Hybriden schnell sinken.
- ▶ **Bessere Batterietechniken** könnten sogar zur Entwicklung solcher Hybridautos führen, die sich an der Steckdose aufladen lassen (»Plug-in-Hybride«) – etwa über Nacht, um von den niedrigen Nachtstrompreisen zu profitieren.
- ▶ Weil Kraftwerke elektrischen Strom überwiegend aus heimischen Energiequellen wie Kohle, Kernenergie oder Wasserkraft erzeugen, würde die Verlagerung **von Benzin zu Elektroenergie** im Verkehr die Abhängigkeit von Ölimporten reduzieren.

Warum Hybridautos umweltfreundlich sind

Um Energie zu sparen, setzen Autoingenieure in Fahrzeugen mit Verbrennungs- und Elektromotor ganz unterschiedliche Technologien ein. Vollhybride erreichen Kraftstoffeinsparungen von

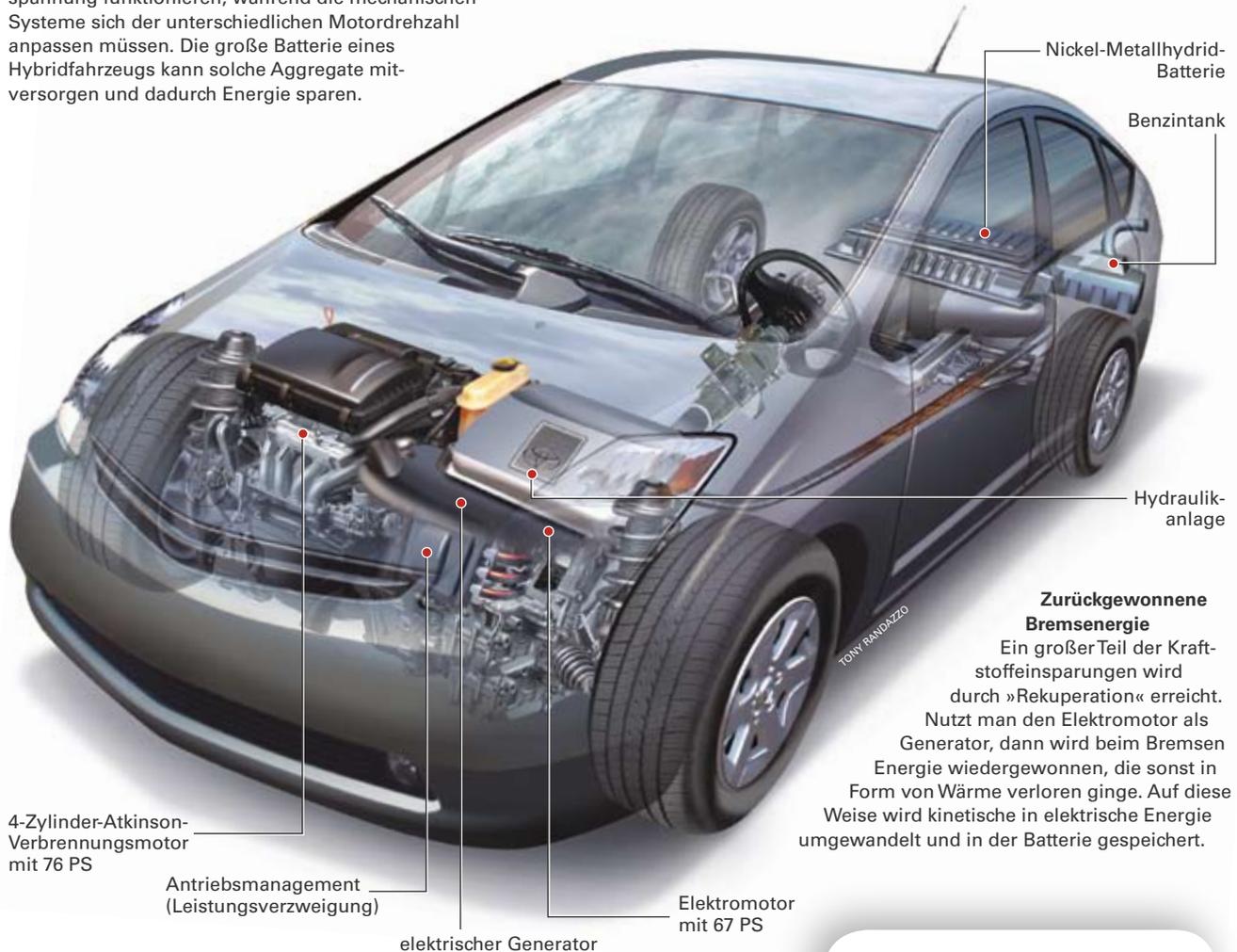
über 60 Prozent, moderate (»milde«) Hybride sparen noch 35 Prozent und bei Mikrohybriden mit Start-Stopp-Funktion liegt die Einsparung immerhin noch bei 10 Prozent.

Elektrokomponenten, die Energie sparen

In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden bestimmte Aggregate – wie Klimaanlage, Lenkhilfe, Wasser- und Ölpumpe oder Gebläse – über einen Generator versorgt, der mechanisch über Riemen direkt vom Motor angetrieben wird. Sie würden am besten bei einer festen Batteriespannung funktionieren, während die mechanischen Systeme sich der unterschiedlichen Motordrehzahl anpassen müssen. Die große Batterie eines Hybridfahrzeugs kann solche Aggregate mitversorgen und dadurch Energie sparen.

Motoren, die beim Stopp abschalten

Konventionelle Fahrzeuge verbrauchen auch im Leerlauf Energie, etwa beim Halt vor Ampeln. Hybridautos verringern den Verbrauch, indem sie bei Stopps den Motor abschalten und die Verbraucher allein mit der Batterie versorgen. Auch angefahren wird mit dem batteriebetriebenen Elektromotor.



Zurückgewonnene Bremsenergie

Ein großer Teil der Kraftstoffeinsparungen wird durch »Rekuperation« erreicht. Nutzt man den Elektromotor als Generator, dann wird beim Bremsen Energie wiedergewonnen, die sonst in Form von Wärme verloren ginge. Auf diese Weise wird kinetische in elektrische Energie umgewandelt und in der Batterie gespeichert.

Anderer Motortyp

Einige Autobauer ersetzen den Ottomotor durch einen Motorentyp, der nach dem so genannten Atkinson-Zyklus arbeitet. Er hat einen höheren Wirkungsgrad, was den Kraftstoffverbrauch senkt – allerdings auf Kosten der Motorleistung. Das ist der Grund, weswegen dieser Typ nicht sehr verbreitet ist. Der Elektromotor eines Hybridautos könnte diesen Nachteil wieder ausgleichen.

Kleinerer Hubraum

Ein Verbrennungsmotor erreicht seinen optimalen Wirkungsgrad bei höheren Geschwindigkeiten und unter einer bestimmten Last. Doch im Alltag werden diese Optimalwerte nur selten erreicht. Demgegenüber spielen gerade Elektromotoren ihre Vorzüge beim Anfahren und Beschleunigen sowie bei großem Drehmomentbedarf aus, etwa am Berg. Die Kombination beider Typen erlaubt es bei gleicher oder größerer Leistung mit weniger Hubraum auszukommen, was den Verbrauch reduziert.

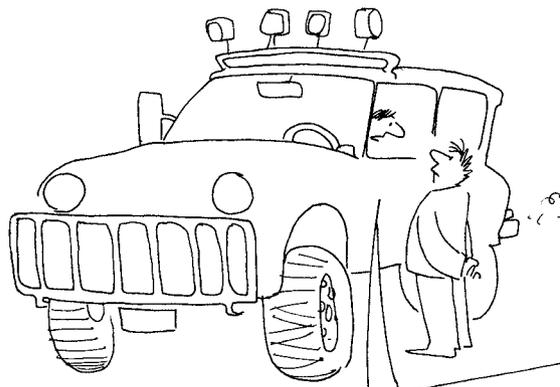
Die Zukunft: Hybride an der Steckdose

Die nächste Generation von Hybriden wird über eine größere, leichtere und bessere Batterie verfügen. Diese lässt sich etwa nachts aufladen, wenn Strom billiger ist. Mehr als die Hälfte der Leistungen beim Fahren, wie Antrieb oder Klimaanlage, könnte so günstiger und umweltfreundlicher per Elektroenergie erbracht werden.

▷ milde Hybrid (»Mild Hybrid«), sucht den Kompromiss zwischen Benzinsparen und den dadurch entstehenden Mehrkosten des Systems. Schließlich erreicht die kleine Starter-Generator-Variante (»Micro Hybrid«) eine gewisse, wenn auch nur bescheidene Verbesserung der Kraftstoffausnutzung. Sie schaltet während kurzzeitiger Stopps einfach den Verbrennungsmotor ab und fährt mit elektrischer Unterstützung wieder an. Hier kommen statt der üblichen Akkumulatoren vor allem neuartige Superkondensatoren zum Einsatz, die kurzzeitig große Energiemengen speichern und abgeben können.

Ein Vollhybrid wie der Toyota Prius kann den Benzinverbrauch um 60 Prozent oder mehr senken. Am meisten Kraftstoff wird durch so genannte Rekuperation beim Bremsen und bei Talfahrten eingespart: Normalerweise wird die kinetische Energie beim Bremsen in nutzlose Wärme umgewandelt. Doch diese Technologie nutzt anstelle der üblichen mechanischen Bremse die elektromotorische Bremse (»Generatorbremse« oder »Rekuperationsbremse«). Beim Bremsen arbeitet der sonst antreibende Elektromotor als Generator und erzeugt Strom, der den Antriebsakku nachlädt. Im Stadtverkehr mit seinem Stop-and-go lässt sich Bremsenergie damit am besten wiedergewinnen. Das gilt auch für Touren mit häufigem Wechsel zwischen Berg- und Talfahrt. Rund die Hälfte der Bremsenergie von Hybridautos lässt sich mit der heutigen Technik so schon zurückgewinnen. Der Prozentsatz wird weiter steigen, wenn noch bessere Batterien und weiter ausgereifte Technologien zur Verfügung stehen. Zum Beispiel können neue organische Materialien, wie Natriumalginat aus Braunalgen, die Energiedichte von Superkondensatoren noch um den Faktor drei steigern.

Bei Verbrennungsmotoren, wie sie in konventionellen Fahrzeugen eingebaut



werden, liegt der maximale Wirkungsgrad nur in einem sehr engen Bereich von Drehzahl und Drehmomenten. Außerhalb dieses Optimums steht im HEV als zweiter Antrieb der batteriegetriebene Elektromotor zur Verfügung. Er besitzt über einen breiten Bereich einen großen dynamischen Wirkungsgrad – als ideale Ergänzung zum Verbrennungsmotor. Den können die Ingenieure dann verkleinern und so optimieren, dass er möglichst oft mit hohem Wirkungsgrad läuft und weniger Kraftstoff verbraucht.

Sparsamer Atkinsonmotor

Hersteller wie Toyota und Ford haben den Benzinmotor, der üblicherweise nach dem Otto-Prinzip funktioniert, im HEV durch den sparsameren Atkinsonmotor ersetzt. Mit Hilfe einer elektronischen Ventilsteuerung erreicht dieser im Zylinder eine bessere Ausdehnung des Luft-Kraftstoff-Gemisches während der Verbrennung. Früher kam der Atkinson-Antrieb kaum zum Einsatz, weil der sparsame Verbrauch auch die Leistung minderte. Beim Hybrid kompensiert der Elektromotor diesen Leistungsverlust. Auf der Autobahn verbraucht ein Atkinson-Hybrid zusammen mit der zurückgewonnenen Bremsenergie sogar weniger

als ein moderner Diesel, der gemeinhin als effizientester Verbrennungsmotor gilt.

HEVs besitzen darüber hinaus einen weiteren Vorteil: Einige Aggregate an Bord herkömmlicher Autos – Klimaanlage, Lenkkraftverstärker, Wasser- und Ölpumpe oder Gebläse – werden normalerweise über Riemen direkt durch den Motor angetrieben. Das kostet Kraftstoff. Im Hybridfahrzeug könnte die große Batterie den Betrieb dieser Aggregate vollständig übernehmen und so Kraftstoff sparen. Eine elektrisch betriebene Klimaanlage verbraucht an heißen Sommertagen 20 Prozent weniger Energie als ihr motorgetriebenes Pendant.

Mit groß dimensionierter Batterie kann ein Vollhybrid sogar ausschließlich mit Elektromotor fahren und den Verbrennungsmotor völlig abschalten. Das Hybridauto mutiert so zum Elektrofahrzeug, das im Leerlauf keine und beim Rollen in niedrigen Geschwindigkeiten kaum Energie benötigt. Der gesamte Energiebedarf reduziert sich so auf ein Minimum. Eine große Bordbatterie ist nicht nur Voraussetzung für den rein elektrischen Antrieb (englisch »eDrive«), sondern ermöglicht auch das Fahren nach dem »x-by-wire« genannten Prinzip, nach dem möglichst viele Aggregate, ▷



◀ Diesel-elektrische Hybridautos, wie diese Studie »Reflex« von Ford, erreichen einen viel geringeren Benzinverbrauch als ein benzin-elektrischer Hybrid. Das Fahrzeug nutzt auch Solarflächen in den Frontscheinwerfern und Rückleuchten, um zusätzlich Bordenergie für Aggregate und Batterie zu erzeugen.

Einige Hybrid-Modelle auf dem internationalen Markt

Weltweit wird inzwischen eine ganze Palette von Fahrzeugen mit Hybridantrieb angeboten, vor allem in Japan und den USA. Vollhybrid-Fahrzeuge sparen Sprit, moderate oder »milde« Hybride bieten viel Leistung bei moderatem Verbrauch. Mikrohybride gewinnen Bremsenergie durch den Start-Stopp-Generator zurück.

Wegen der starken Diesel-Konkurrenz sind **in Europa** erst wenige Hybridfahrzeuge auf der Straße: drei Vollhybride von To-

yota sowie ein moderater Hybrid von Honda. Bald werden neue Modelle, die heute noch erprobt werden, den Marktzugang finden.

In Europa wird sich die Lage **schon 2007/08** ändern, wenn Mercedes & Co. ihre Serien-Hybride herausbringen. Dann kann man zwischen Dutzenden Modellen wählen, darunter auch Sportwagen, Minivans, Lieferautos oder sogar Motorrollern.



Marke Modell	Antrieb Besonderheiten	Leistung*	Drehmoment*	Beschleunigung	Verbrauch**	CO ₂ -Emission Abgasnorm	Preis
		kW (PS)	Nm	sec bis 100 km/h	l/100 km	mg CO ₂ /km	Euro
Toyota Prius	Vollhybrid mit 1,3-l-4-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderachs-antrieb, »Europas umweltfreundlichstes Auto«	57 (78)	115	10,9	4,3	104 EURO 4 (»5-Liter-Auto«)	24 250
Lexus RX 400h	Vollhybrid mit 3,3-l-6-Zylinder-Atkinsonmotor und je einem Elektromotor pro Achse, stufenlose Automatik, Allradantrieb	155 + 123 + 50 = 200 gesamt* (211 + 165 + 67 = 272 gesamt)	288 + 333 + 130	7,6	8,1	192 EURO 4	38 448
Lexus GS 450h	Vollhybrid mit 3,5-l-6-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe	218 (296)	368	5,9	7,9	186 EURO 4	49 655
Honda Civic IMA	Milder Hybrid mit 1,3-l-4-Zylinder-Ottomotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderachs-antrieb	70 + 15 (95 + 20)	119 + 103	12,1	4,6	109 EURO 4 (»5-Liter-Auto«)	22 900

In den USA sind noch weitere Modelle zu haben. Nachstehende Tabelle beruht auf amerikanischen Marktdaten.



Marke Modell Type	Antrieb Besonderheiten	Leistung*	Drehmoment	Beschleunigung	Verbrauch	CO ₂ -Emission (spez. Jahrestonnen CO ₂ *** Sonstiges)	Preis
		kW (PS)	Nm	sec bis 100 km/h	l/100 km	mg CO ₂ /km (t CO ₂ /a)	US-Dollar
Honda Insight	Milder Hybrid mit 1,0-l-3-Zylinder-Ottomotor, manuelles oder stufenloses Automatikgetriebe, Vorderradantrieb, »erstes (1999) serienreifes Hybridfahrzeug in den USA«, »energieökonomischstes Auto der USA«	53 (71)	50 x	11t	4,1	85 (3,5) SULEV****	19 330
Honda Accord Hybrid	Milder Hybrid mit 3,0-l-6-Zylinder-Ottomotor, 5-Gang-Automatik, Vorderradantrieb	188 (253)	316	6,5	7,9	160 (6,6) PZEV	30 990
Toyota Camry Hybrid	Vollhybrid mit 2,4-l-4-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenlose Automatik, Vorderradantrieb	110 + 105 = 143 (147 + 141 = 192)	188 + 270	8,9	6,4	k. A. PZEV	25 900
Toyota Highlander Hybrid	Vollhybrid mit 3,3-l-6-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderrad-/Allradantrieb	155 + 123 + 50 (208 + 165 + 67)	288 + 336 + 130	7,3	8,1	160 (6,6)	34 610
Ford Escape Hybrid	Vollhybrid mit 2,3-l-4-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderrad-/Allradantrieb	100 + 70 = 116 (133 + 94 = 155)	167	9	7,6	151 (6,2)	26 240
Chevrolet Silverado Hybrid	Milder Hybrid mit 5,3-l-8-Zylinder-Ottomotor, manuelle Schaltung oder Automatik, Vorderrad-/Allradantrieb, zusätzlicher 120V-Generator mit 4 Steckdosen	220 (295)	456	k. A.	12,4	240 (9,9)	29 900

ALLE MODELLE: HERSTELLERFOTOS

* Leistung und Drehmoment werden vom Hersteller oft für Verbrennungsmotor und den bzw. die E-Motoren einzeln angegeben, eine simple Addition der Werte ist jedoch wegen der unterschiedlichen Leistungsentfaltung nicht zulässig, manchmal aber mitgeteilt
 ** nach dem Neuen Europäischen Fahrzeugzyklus NEFZ. Das standardisierte festfahrogramm zur Ermittlung der Abgas- und Verbrauchsdaten erfolgt. Er besteht aus vier aneinanderreihenden Stadtfahrten (ECE) und einer Überlandfahrt (UDC) auf dem Rollenprüfstand. Nach Kaltstart und Warmlaufphase (40 sec) durchläuft der ECE vier Konstantfahrten mit einer Geschwindigkeit von 15, 32, 40 und 50 km/h zu je 195 sec. Ampelphasen mit großen Stopp-Anteilen werden ebenfalls berücksichtigt. Verschiedene konstante Geschwindigkeitsbereiche liegen dem ECUC zu Grunde – sowohl Landstraßen- als auch Autobahnanteile mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h. Insgesamt werden 1200 Sekunden gemessen.
 *** In den USA dient die genormte CO₂-Jahrestonnen CO₂-Emission der ökologischen Typisierung von Fahrzeugen. Sie legt eine Jahresstrecke von 15000 Meilen (entsprechend 24000 km) zu Grunde, die zu 45 % aus Autobahn- und zu 55 % aus Stadtverkehr besteht. Die derzeitigen besten Fahrzeuge geben 2,9 Jahrestonnen CO₂ ab, die schlechtesten 14,9 t.
 **** genügt den kalifornischen Grenzen für Super-Ultra-Low-Emission Vehicle (SULEV) beziehungsweise Partial Zero-Emissions Vehicle (PZEV).

Hybride in der Realität

Die neuen benzin-elektrischen Hybridautos erreichen nicht die Verbrauchswerte, die vom amerikanischen Umweltbundesamt EPA (Environment Protection Agency) ermittelt wurden. Die Werte sind in den USA üblicherweise als Sticker an der Windschutzscheibe neuer Autos in den Verkaufsalons zu finden. Hier die Ursachen und Hintergründe.

Die neuen Benzinhybridfahrzeuge fallen durch deutlich niedrige Zahlen im Verbrauch auf. Doch einige Autokäufer beschwerten sich, dass sie die von der amerikanischen EPA gemachten Angaben zum Benzinverbrauch nicht erreichen.

Wie bei vielen anderen Fahrzeugen auch liegt der Verbrauch von Hybridfahrzeugen meist merklich höher als die EPA-Norm. Einige wesentliche Faktoren sind für diese Abweichungen verantwortlich:

- ▶ Unvollständige Testzyklen der EPA. Der Fahrzyklus, den die Fahrzeuge während der amtlichen Verbrauchsfeststellung durchlaufen, spiegelt weder die Fahrweise der individuellen Fahrer noch die jeweiligen Straßen- und Wetterbedingungen wider.
- ▶ Abhängigkeit von der Jahreszeit. Im Winter erfordert die Fahrzeugheizung, dass der Verbrennungsmotor öfter eingeschaltet werden muss, als es gemäß dem optimal gesteuerten Antriebsmanagement notwendig wäre. Das erhöht den Verbrauch.
- ▶ Besonderheiten des Hybrids. Weil Hybridfahrzeuge Bremsenergie zurückgewinnen können, hängt ihr Verbrauch entscheidend von der Fahrweise des Fahrers ab. Vorausschauende Fahrer, die ihre Fahrweise speziell dem Hybridauto anpassen, können die EPA-Verbrauchsnorm bestätigen. Aggressives Fahrverhalten kann den Verbrauch über 30 Prozent steigern.

▷ Geräte und Funktionen elektrisch-elektronisch betrieben werden. Elektronische Motor- und Ventilsteuerung entsprechen inzwischen gängiger Praxis, elektrische Bremse und elektrische Lenkung bahnen sich den Weg. Wie weit Ingenieure inzwischen vorausdenken, zeigt die Studie »eCorner« von Siemens VDO. Lenkung, Dämpfung, Bremse sowie Elektroantrieb sind darin als komplettes Paket direkt in die Räder integriert. Die Radnabenmotoren senken den Verbrauch und bieten mehr Komfort, beispielsweise durch direktes Quereinparken, und mehr Sicherheit. Am wichtigsten ist für Klaus Egger, zuständiger Bereichsvorstand von Siemens VDO Automotive, jedoch der Elektroantrieb, den er für die tatsächlich langfristige Antriebslösung hält, »mit der auch strengste zukünftige Emissionsvorschriften erfüllt werden können«. Den Hybridantrieb sieht er dabei als eine wichtige Zwischenlösung.

Moderate, »milde« Hybride, wie der für 2008 geplanten VW Touran, die Mercedes-S-Klasse oder der seit Jahren auf deutschen Straßen zu sehende Honda Civic, reduzieren mit dem in den Antriebsstrang integrierten Elektrosystem je nach Messzyklus den Kraftstoffverbrauch um etwa 35 Prozent. Hier stellt der E-Motor Antriebsleistung für Beschleunigungsphasen zur Verfügung und gewinnt Bremsenergie zurück. Er verfügt auch über die Start-Stopp-Funktion. Allein auf diese Funktion beschränkt sich der Mikrohybrid, der deswegen auch Start-Stopp-Hybrid genannt wird. Dabei schaltet sich der Verbrennungsmotor aus, wenn das Auto anhält. Ein integ-

rierter elektrischer Starter-Generator – meist von einem Superkondensator gespeist – setzt das Fahrzeug wieder in Bewegung, wenn der Fahrer aufs Gaspedal tritt. Diese Art des Hybridantriebs findet sich derzeit im Citroen C3 »Stop & Start«. Der Golf Ecomatic von 1995 besaß bereits diese Antriebsart, wurde aber nicht nachgefragt. Die Fahrzeuge, die Elektromotoren nutzen, um nur die Zusatzaggregate, nicht aber die Räder anzutreiben, erreichen immerhin noch eine zehnpromtente Senkung des Energieverbrauchs. Das gilt aber vor allem für den Stadtverkehr; auf der Autobahn verwindet dieser Vorteil.

Weniger Kohlendioxid

HEVs bieten einen wesentlichen Vorteil, der in Zukunft noch wichtiger wird: Durch ihren geringeren Benzinverbrauch stoßen sie weniger Kohlendioxid aus. Künftige Verkehrspolitik wird sich zunehmend am Klimaschutz orientieren; viele Industrieländer haben bereits strenge Obergrenzen für den Kraftstoffverbrauch vorgegeben, um solche Emissionen zu reduzieren. Die Selbstverpflichtung des Verbands der europäischen Automobilbauer ACEA etwa sieht vor, für den Zeitraum 1995 bis 2008 den Durchschnittsverbrauch und damit die Emissionen der Neufahrzeuge um 25 Prozent auf 140 Gramm CO₂ pro Kilometer zu reduzieren. Ein entsprechendes Gesetz in Kalifornien verlangt, bis 2016 bei neuen Fahrzeugen die Emission von Treibhausgasen um 30 Prozent zu verringern; eine weitere Senkung der Emissionsziele wird bereits diskutiert. Automobilbauer sehen

das kritisch: Die Forderung gilt als technisch äußerst anspruchsvoll und hängt nicht unwesentlich vom Kundenverhalten ab. Fahrer wollen nämlich auf Sicherheit, Leistung und Komfort nicht verzichten; das aber erhöht das Fahrzeuggewicht und damit den Verbrauch. Politisch flankierende Maßnahmen, etwa Steuernachlässe, Gutschriften oder Prämien würden hingegen zusätzliche Kaufanreize bieten.

Eine Lösung würden da so genannte Plug-in-Hybride bieten. Sie können wie ein normales HEV bei Bedarf längere Strecken mit Benzin fahren und schnell aufgetankt werden. Aber sie setzen vor allem auf den E-Antrieb: Sie verfügen über einen sehr großen Elektrospeicher und sind an jeder Steckdose aufladbar. Voll funktionsfähig sowohl im reinen Elektro- als auch im Hybridmodus erlauben sie die größtmögliche Einsparung von Energie und Emissionen. Weil sie Strom aus heimischen Kraftwerken tanken, bieten sie Autofahrern eine umweltfreundliche und sehr preisgünstige Antriebsenergie.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht würde das die Abhängigkeit der Staaten vom Erdöl verringern. Für diese Entwicklung

BEIDE FOTOS: DAIMLERCHRYSLER



spricht, dass die Forscher die Kapazität der Akkumulatoren weiter steigern können, während die Kosten für Batterien und elektronische Komponenten sinken. In dem Maß, wie der E-Antrieb mehr Leistung bietet, kann der Verbrennungsmotor schrumpfen. Im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Benzinmotor lassen sich mit einem Plug-in-HEV, dessen Batterie für 30 Kilometer reicht, bei einer täglichen Fahrtstrecke von 40 km rund 75 Prozent des flüssigen Kraftstoffs sparen. Bei den Kosten – auf der einen Seite angenommene 8 Liter/100 Kilometer zu einem Preis von 1,50 Euro/Liter Benzin (12 ct/km) und auf der anderen 30 Kilowattstunden/100 Kilometer zu einem Preis von 15 ct/kWh (4,5 ct/km) – wären für die Fahrtstrecke theoretisch statt 4,80 nur noch 2,55 Euro aufzubringen: eine Ersparnis von 50 Prozent.

Sogar Pendler, die Tag für Tag größere Strecken zurücklegen, würden sparen, indem sie täglich ihre Batterie sowohl am Arbeitsplatz als auch daheim an eine normale Steckdose hängen, am besten über Nacht, damit sie vom günstigen Nachtstromtarif profitieren. Diese Tarife gelten nicht nur nachts, sondern auch am Wochenende in den verbrauchsarmen Zeiten. Denkbar wäre sogar, dass Plug-in-HEVs nachts Strom aus dem Netz in der Autobatterie speichern und in Spitzenzeiten wieder dorthin einspeisen. Von den Elektrizitätswerken könnten Autobesitzer ähnlich wie private Betreiber von Windkraftanlagen dafür eine Einspeisungsvergütung, Rabatt oder eine Gewinnbeteiligung erhalten. Glaubt man den Wissenschaftlern der Universität Delaware, würden Autobesitzer damit mehr als 2500 Euro pro Jahr verdienen.

Mit diesem Betrag erscheint der höhere Preis des Hybridfahrzeugs und seiner Antriebsbatterie nicht mehr ganz so dramatisch. Man könnte sogar eine Geschäftsidee entwickeln, indem Elektrizitätswerke Plug-in-Hybride an Konsumenten oder Unternehmen vermieten, die das Auto am Netz lassen, wenn sie es

nicht brauchen. Das E-Werk hätte dann die Möglichkeit, die Vielzahl der Hybridautos als Puffer für Spitzenlasten und Überkapazitäten einzusetzen.

Dass die leistungsfähige Batterie des aufladbaren HEV in Verbindung mit einem leistungsstärkeren E-Motor einen kleineren Hubraum des Benzinmotors und aller anderen mechanisch betriebenen Aggregate erlaubt, demonstrieren Wissenschaftler der Universität von Kalifornien in Davis. Sie haben Prototypen von Plug-in-Hybriden aufgebaut, die im reinen Elektromodus nahezu 100 Kilometer schaffen. Den Verbrennungsmotor haben sie nur halb so groß wie normal ausgelegt. Acht Limousinen und Geländewagen absolvieren derzeit Tests unter praxisnahen Einsatzbedingungen.

Reichweite bis zu 1500 Kilometer?

Als erster der großen Automobilbauer brachte im letzten Jahr DaimlerChrysler ein Plug-in-Hybridfahrzeug heraus – einen Mercedes-Benz-Transporter vom Typ Sprinter (Bild unten). Der umgebaute Sprinter besitzt einen 143-PS-Ottomotor und einen 120-PS-Elektromotor mit 14-kWh-Batterie. Allein mit Letzterem schafft er über 30 Kilometer. Gegenüber einem normalen Sprinter benötigt er 40 Prozent weniger Benzin und verfügt auch noch über eine bessere Fahrdynamik. Allerdings verliert er durch das Mehrgewicht auch Transportkapazität und ist in der Anschaffung teurer.

Alles hängt also am Fortschritt der Batterietechnik. Wenn es gelänge, leichte, billige Elektrospeicher mit großer Kapazität zu produzieren, könnten Autos auf den Markt kommen, die im innerstädtischen Verkehr mit einer vollgeladenen Batterie und vollem Benzintank 1000 bis 1500 Kilometer fahren. Die Auslegung des Antriebssystems könnte sich nach den jeweiligen Anforderungen des Autokäufers richten: Langstreckenfahrer würden zu einem aufladbaren HEV mit sehr großer und teurer Batterie greifen, während die Masse sich ▷



◀ Den ersten am Netz aufladbaren Hybriden stellte Mercedes-Benz 2005 mit seinem Transporter vom Typ Sprinter vor. Hinter einer Klappe verbirgt sich der Elektroanschluss, über den die Batterie in der Nacht mit einer Stromquelle verbunden werden kann.

▷ wahrscheinlich mit einem Fahrzeug begnügt, das rein elektrisch nur 30 Kilometer weit kommt.

Die geringeren Tankkosten eines aufladbaren HEV würden seinen zweifellos höheren Preis kompensieren, wenn der stete Preisverfall bei Batterien weiter anhält. Großdimensionierte elektrochemische Akkus kosten derzeit schon deutlich unter 8000 Euro. US-Forscher erwarten, dass Nickel-Metallhydrid- oder Lithiumbatterien bald unter einen Preis von 2500 Euro fallen und genügend Energie speichern, um damit 30 Kilometer oder mehr zu fahren. Gleichzeitig dürfte die Lebensdauer einer solchen Batterie auf 15 Jahre und ihre Laufleistung auf 250 000 Kilometer gesteigert werden.

Beimischung von Biosprit

Potenzial hat auch der Verbrennungsmotor: Zum einen gilt es, den Dieselmotor mit seinen energieökonomischen Vorteilen vielfältiger einzusetzen. Nach den europäischen Herstellern reanimiert jetzt endlich in den USA auch Ford als erster der Big Three diesen sparsamen Antrieb. Zum anderen setzen die Hersteller zusätzlich zu innermotorischen Verbesserungen auf regenerative und optimierte Kraftstoffe. Ein Gemisch aus Benzin und Bioethanol kann durch leicht veränderte Motoren verbrannt werden. Spezielle Motoren benötigt hingegen der bei uns weit verbreitete Biodiesel, der vollständig aus Rapsanbau stammt und in der CO₂-Bilanz neutral ist. Weil er jedoch eine Reihe technisch-ökologischer Probleme mit sich bringt, wird er langfristig nicht mehr gefördert. Stattdessen setzt die EU auf beigemischte Biokraftstoffe, vor allem Bioethanol. Dieser wird vor allem aus Zucker- und Stärkequellen gewonnen, die nicht für die Ernährung vorgesehen sind, aber auch aus Landwirtschaftsabfällen oder speziellen Pflanzen.

Regenerative Kraftstoffe sollen bis 2010 einen Marktanteil von 5,7 Prozent an der Kraftstoffversorgung des europäischen Binnenmarkts erreichen. Die Mineralölproduzenten wurden gesetzlich verpflichtet, ihren Produkten einen wachsenden Anteil Biosprit beizumischen; derzeit sind es 4,4 Prozent. Motoren können sogar so ausgelegt werden, dass sie mit einem 15:85-Gemisch aus Benzin und Biokraftstoff klarkommen. Dann bräuchte ein Fahrzeug auf 800 Kilometer nur 25 Liter Verschnitt – 20 Liter Bioalkohol und nur vier Liter Normalbenzin.

Fahrzeug- und Mineralölindustrie untersuchen daneben auch maßgeschneiderte Kraftstoffe für weiter optimierte Motoren, um die Fahrzeugemissionen zu minimieren. Dazu gehören BTL (»biomass to liquid«), GTL (»gas to liquid«) oder CTL (»coal to liquid«) genannte synthetische Kraftstoffe. Unter der Marke »SunDiesel« wurde in Deutschland von Volkswagen, DaimlerChrysler und Choren Industries ein praktisch CO₂-neutraler BTL-Kraftstoff entwickelt und erprobt. Er vermindert den CO₂-Ausstoß im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen um rund 90 Prozent. Ein Marktanteil von 20 Prozent, erläutert Herbert Kohler, Umweltbevollmächtigter und Leiter der Fahrzeugforschung von DaimlerChrysler, würde die gesamten CO₂-Emissionen des Verkehrs in Europa um 18 Prozent reduzieren. Synthetische und Biokraftstoffe sind also entscheidende strategische Schritte, um die schwindenden Erdölressourcen zu kompensieren.

Am Netz aufladbare HEVs entwickeln für Politiker, die etwas gegen die globale Erwärmung unternehmen wollen, einen ganz besonderen Charme. Plug-in-Hybride geben deutlich weniger Kohlendioxid ab, weil die andere alternative Antriebsform über Wasserstoff durch dessen Herstellung, Speicherung und Verteilung teuer und ineffizient ist. Jede halbwegs effiziente Wasserstoffwirtschaft würde eine Infrastruktur erfordern, die CO₂-freien Strom erfordert, um über Elektrolyse aus Wasser überhaupt erst einmal Wasserstoff zu produzieren.

Das flüchtige Gas muss dann transportiert, unter hohem Druck in Tanks gefüllt und dort gespeichert werden, nur um daraus in der Brennstoffzelle wieder Elektroenergie zurückzugewinnen und den Elektromotor anzutreiben. Von der gesamten regenerativen, also CO₂-frei gewonnenen Energie würden nach Elektrolyse, Transport, Füllvorgang, Speicherung und Rückumwandlung gerade noch 20 bis 25 Prozent für den Antrieb übrig bleiben. Bei Plug-in-Hybriden stünden hingegen nach dem gesamten Prozess der Übertragung von Elektroenergie, der Auf- und Entladung der Autobatterie noch knapp 80 Prozent der Ausgangsenergie zur Verfügung. Auf diese Weise kann ein Plug-in-HEV mit derselben Elektroenergie drei- bis viermal so weit fahren wie ein Brennstoffzellenauto.

Wenn sich die Verteuerung des Treibstoffs fortsetzt und die Sorgen um den

Klimawandel zunehmen, erwarten amerikanische Wissenschaftler um das Jahr 2020 herum eine Marktverschiebung hin zu den Hybridautos. Dazu meint Bernd-Robert Höhn, Maschinenbauer an der TU München: »Das Konzept der Zukunft verbindet Fahrspaß mit Sparsamkeit. Der beste Ansatz dafür ist die Hybrid-Technologie.« Fahrzeugforscher ziehen den Schluss, dass es dann nicht mehr lange dauert, bis am Netz aufladbare Hybride die alternativen Fahrzeuge dominieren. Wie rasch das geht, wird neben dem technischen Fortschritt vor allem vom Ölpreis bestimmt sowie von der staatlichen Umwelt- und Energiepolitik.

Sobald Erdöl als Primärenergie für die weltweite Mobilität zur Neige geht, wird sich als Fahrzeug der Zukunft wohl der Plug-in-Hybrid durchsetzen. Dieser Fahrzeugtyp wird einen Energiemix aus regenerativ gewonnener Elektroenergie und flüssigen Biokraftstoffen nutzen. »Angenommen, es gelingt, Leistung und Wirkungsgrad von Batterien um den Faktor fünf bis zehn zu erhöhen und diese dann auch noch einfach aufladbar zu machen«, prophezeit Siegfried Dais, Forschungschef von Bosch, »dann werden Elektrofahrzeuge sehr attraktiv.« ◀



Joseph J. Romm (links) hat am Massachusetts Institute of Technology in Physik promoviert. Zuletzt erschien sein Buch »The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate« (Island Press, 2004). **Andrew A. Frank** (Mitte) promovierte an der Universität von Südkalifornien. Heute ist er Professor für Mechanik und Luftfahrttechnik an der Universität von Kalifornien in Davis. **Reinhard Löser** (rechts) studierte Physik in Eriwan/Armenien, St. Petersburg/Russland sowie an der Humboldt-Universität Berlin, wo er auch promovierte. Nach seiner Habilitation in Volkswirtschaft an der TU Ilmenau arbeitete er als Technikjournalist, zuletzt bei DaimlerChrysler, dessen Brennstoffzellen- und Hybridtechnologie er so direkt mitverfolgen konnte. Heute lebt er als freier Technikjournalist in Stuttgart.

The Car and Fuel of the Future. Joseph Romm. Bericht der National Commission on Energy Policy, 2004. Unter: www.energyandclimate.org

Driving the Solution: The Plug-In Hybrid Vehicle. Von Lucy Sanna in EPRI Journal; Herbst 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852735.

Kepler III bringt alles auf die Reihen

Nach den Trojanern im letzten Monat betrachten wir nun zahlreiche andere Objekte im Sonnensystem und die »leeren Plätze« zwischen ihnen. Aufgetragen im doppeltlogarithmischen Diagramm zeigen sich unerwartete Zusammenhänge.

Von Norbert Treitz

Wie klein kann die Umlaufbahn sein, auf der sich Satelliten eines bestimmten Planeten befinden können? Bestimmt nicht kleiner als der Radius des Zentralkörpers, für die Erde also 6370 Kilometer. Ein etwas größerer Bahnradius wäre besser, damit der Satellit durch die Atmosphäre nicht abgebremst wird, von Hindernissen wie dem Himalaya ganz zu schweigen. Das entspricht einer Umlaufzeit von 84 Minuten; wir erinnern uns an die innerirdischen U-Bahnen aus Heft 12/2005,

S. 110, bei denen wir in Gedankenexperimenten die Einschränkung durch den Erdradius ignoriert haben.

Der Mond kreist rund achtmal langsamer um die Erde und darum in einem etwa 8²-mal so großen Abstand und mit einer rund 8³-fachen Umlaufzeit (die siderischer Monat genannt wird).

Ich habe die Bahnradien und die Umlaufzeiten zahlreicher Objekte des Sonnensystems in ein großes Diagramm eingetragen (Kasten nächste Doppelseite) und für jeden Planeten dessen eigenen Radius als unterste Grenze eines Umlaufbahnradius eingezeichnet. Zu meinem

Erstaunen waren die zugehörigen Umlaufzeiten beinahe gleich! Könnte ein Satellit die Sonne dicht über ihrer Oberfläche umkreisen, würde er einen Umlauf in der gleichen Zeit vollenden wie sein Kollege, der den weitaus kleineren Jupiter oberflächennah umrundet.

Eine kurze Rechnung bestätigt den Zusammenhang: Ein etwa kugelförmiges Objekt der Dichte ρ mit einem Radius R hat die Masse $(4\pi/3)\rho R^3$. Die Umlaufzeit für eine Kreisbahn mit dem Radius R um den Planeten berechnen wir nach dem III. Kepler'schen Gesetz zu $T = \sqrt{R^3 4\pi^2 / (MG)}$. Sie hängt nur von der Dichte $M/(4\pi R^3/3)$ des zentralen Objekts ab. (G ist die allgemeine Gravitationskonstante.)

Der kleine Prinz trifft im Kapitel XIV des gleichnamigen Buchs von Antoine de Saint-Exupéry einen Freund, dessen Heimatplanet sich neuerdings einmal pro Minute dreht, sodass er zwischen dem Löschen und Anzünden seiner Laterne keine Zeit mehr zum Schlafen findet. Auf diesem Planeten – egal wie klein er ist! – kann man höchstens an den Polen von der Schwerkraft gehalten werden. Dort sind Laternen zwar überflüssig, aber vielleicht ist der Planet ja so klein, wie der Autor ihn gemalt hat, sodass man mit ausgestrecktem Arm von einem Pol aus eine Laterne am Äquator ein- und ausschalten kann. Andernfalls sollte man, um nicht davonzufiegen, magnetische Schuhe tragen und einen eisernen Reif als Trottoir um den Äquator legen (Bild rechts oben).

Keplers III. Gesetz

»Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die Kuben der großen Halbachsen ihrer Umlaufbahnen.« Dieses Gesetz, das Kepler 1619 in seinem Buch »Harmonices Mundi« beschrieb, können wir für den wichtigen Spezialfall der Kreisbahn eines sehr leichten Planeten um die Sonne herleiten.

Wir verwenden ein Bezugssystem, in dem der gemeinsame Schwerpunkt beider ruht und wegen des großen Massenverhältnisses fast genau im Mittelpunkt der Sonne liegt. Die Masse der Sonne sei M ; der Bahnradius R des Planeten ist zugleich sein Abstand vom Mittelpunkt der Sonne. Das Gravitationsgesetz liefert für den Planeten eine Beschleunigung vom Betrag $a_{gr} = MG/R^2$, stets zur Sonne gerichtet.

Wird irgendein Objekt einer Beschleunigung a_{zp} rechtwinklig zu seiner Geschwindigkeit v unterworfen, so bekommt seine Bahn dadurch einen Krümmungsradius $r = v^2/a_{zp}$ (Gesetz von der Zentripetalbeschleunigung). Falls a_{zp}

und v ständig in einer Ebene und rechtwinklig zueinander bleiben, gibt das einen gleichmäßig durchlaufenen Kreis mit diesem r als Radius.

Startet »man« nun einen Planeten in einem Abstand $R=r$ von der Sonne mit einer passend gewählten Anfangsgeschwindigkeit v rechtwinklig zum Abstandsvektor, so ist auch $a_{gr} = a_{zp} = MG/R^2 = v^2/R$.

Bei konstanter Geschwindigkeit v hat der Planet einen Umlauf $2\pi R$ in der Zeit $T = 2\pi R/v$ zurückgelegt. Setzt man $v = 2\pi R/T$ in obige Gleichung ein, so ergibt sich $T^2 = R^3 4\pi^2 / (MG)$.

Das Gesetz gilt auch für Ellipsenbahnen, wenn man statt R die Hälfte der großen Ellipsenachse einsetzt, was aber etwas weniger einfach zu zeigen ist. Es gilt auch für leichte Satelliten, die einen schweren Planeten der Masse M umlaufen, wenn sich niemand einmischte und die Schwerkraft der Sonne als nahezu konstant angesehen werden kann und daher aus der Rechnung herausfällt.

Roche-Grenze

Wir betrachten zwei Steinchen der Dichte ρ_s , beide mit dem Radius r , die in losem Kontakt mit den Bahnradien $R-r$ und $R+r$ um einen Planeten der Masse M kreisen. Ihre Massen m sind bei Kugelform $(4\pi/3)\rho_s r^3$. Sie ziehen sich gegenseitig mit der Schwerkraft $m^2 G / (4r^2)$ an und werden vom Planeten um $a_{diff} = 4rmMG/R^3$ verschieden stark angezogen. (Wir nehmen dazu an, dass r klein gegen R ist, und können bei der Herleitung den Nenner zu R^4 vereinfachen und ein R kürzen.) Ist die gegenseitige Anziehung stärker als diese Differenz, rücken die Steinchen zusammen: So entstehen aus Staub Satelliten. Ist sie aber schwächer, laufen die Steinchen auseinander, und ein loser Steinchenhaufen zerbröckelt – durch Gezeitenkräfte – in lauter einzelne Objekte. So entstandene



EMDE-GRAFIK /
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Wenn der Nachtwächter aus dem »Kleinen Prinzen« von Saint-Exupéry seinem Planeten nicht abhandeln kommen soll, muss er sich irgendwie befestigen; die Schwerkraft allein hilft nicht.

Ringe kennt man seit 400 Jahren vom Saturn und seit wenigen Jahren von Jupiter, Uranus und Neptun, den anderen drei großen Gasplaneten der Sonne.

Der kritische – 1848 von Édouard Roche (1820–1883) gefundene – Bahnradius zeichnet sich nun dadurch aus, dass die gegenseitige Anziehung etwa so stark ist wie die Differenz der Anziehung zum Planeten: $4rmMG/R^3 = m^2G/(4r^2)$. In dieser Gleichung setzen wir für die Massen der Beteiligten ihre Dichte mal ihr Volumen ein und finden für den kritischen Radius $R_{\text{Roche}} = r_p(16\rho_p/\rho_s)^{1/3}$ (r_p ist der Radius des Planeten).

Sind also die Dichten von Staub und Planet gleich, ergibt das etwa den 2,5-fachen Radius des Planeten. Im anderen Fall geht das Verhältnis der Dichten mit der dritten Wurzel ein. Innerhalb des Roche-Radius gibt es – grob gesagt – nur Ringe und künstliche oder eingewanderte Satelliten.

Wenn man nun mit bekannten Daten der Planeten und jeweils einer geschätzten Dichte der Satelliten beziehungsweise des Staubs die Roche-Grenzen an die Kepler-III-Geraden zeichnet, kommt etwas Seltsames heraus, was wir aber leicht mit den bisherigen Betrachtungen nachrechnen können: Die zur Roche-Grenze gehörende Umlaufzeit ist nur von der Dichte des Staub- beziehungsweise Satellitenmaterials abhängig, nicht aber von dessen Dichte oder Radius. Es kürzt sich mal wieder einiges weg, und am Ende bleibt die merkwürdige Gleichung $T^2 = 48\pi/(G\rho_s)$ übrig. Im Diagramm kann man für die Dichten des \triangleright

Symposium 6. - 7. November 2006

im Deutschen Technikmuseum Berlin

Ist das Universum ein Computer?

Beim Bau der ersten Computer hatte Konrad Zuse die Vision eines "Rechnenden Raumes". Auf dem Symposium diskutieren erstmalig international renommierte Informatiker, Quantenphysiker und Philosophen gemeinsam die Frage, ob das Universum ein natürlicher Quantencomputer ist.



Deutsches Technikmuseum Berlin
Trebbiner Straße 9, 10963 Berlin
www.dtmb.de

Unter der Schirmherrschaft von Dr. Annette Schavan,
Bundesministerin für Bildung und Forschung



Deutsches
Technikmuseum
Berlin



Wissenschaftsjahr 2006

www.informatikjahr.de

▷ umlaufenden Materials waagerechte Linien einzeichnen.

Wenn es für die Satelliten eines Planeten einen minimalen Bahnradius gibt, gibt es auch einen maximalen? Immerhin reicht die Schwerkraft unendlich weit, aber die Störungen durch andere auch.

Hill-Sphäre

Eine ziemlich gute Abschätzung bekommt man mit der Betrachtung eines Satelliten, der pausenlos in Vollmondstellung läuft, also auf $R+r$ mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit ω um die Sonne wie der Planet. Dann ist $\omega = \sqrt{MG/R^3}$. Für seine Bahn mit dem Radius $R+r$ braucht er für ω die Beschleunigung $\omega^2(R+r)$, sein Planet zieht ihn mit mGr^2 , und die Sonne in die gleiche Richtung mit $MG/(R+r)^2$. Einsetzen gibt $Mr^3(3R^2+3Rr+r^2) = mR^3(R+r)^2$. Mit r klein gegen R vereinfacht sich das zu $r = R(m/(3M))^{1/3}$. Das ist – auch bei genauerer Rechnung – die Grenze des Bereichs für stabile Satellitenbahnen um einen Planeten, der nach George William Hill (1838–1914) benannt wurde. Bei größerem r droht der Satellit auszuwandern, während er bei kleinerem seinem Planeten sozusagen die Treue hält.

Ein gerade noch treuer Satellit braucht für einen Umlauf größenordnungsmäßig so lange wie sein Planet für einen Umlauf um die Sonne: Ein Monat und ein Jahr sind dasselbe.

Da für die Massen von Erde und Sonne $m_{\text{Erde}}/(3M_{\text{Sonne}}) = 10^6$ gilt, kann ein Satellit (gerade noch) in einem Abstand von 1/100 des Erdbahnradius langfristig bei der Erde bleiben, das ist etwa das Vierfache des Mondbahnradius.

Neptun hat den 30-fachen Bahnradius der Erde und die 165-fache Umlaufzeit, seine Masse ist 17 Erdmassen, und da die 3. Wurzel aus 17 etwa 2,5 ist, hat seine Hill-Sphäre den Radius von etwa 0,8 Erdbahnradien, ist also größer als die Venusbahn. Und auch wirklich gehören die größten bekannten Satellitenbahnen im Sonnensystem zum Neptun.

Titius-Folge mit Lücken

Johann Daniel Titius (eigentlich Tietz, 1729–1796) rundete 1766 die Bahnradien der seinerzeit bekannten Planeten auf Zehntel des Erdbahnradius und stellte fest, dass sie – mit etwas Anpassung – in eine Folge passen, deren Differenzenfolge eine geometrische Folge mit dem Faktor 2 ist (Kasten unten). Wenn man

den Merkur weglässt und der Venus die Nummer 1 gibt, hat der n -te Planet den Bahnradius $R_n = R_1 + (2^n - 2) \cdot 0,15$ Astronomische Einheiten. (Merkur müsste die Nummer $-\infty$ bekommen.) Zwischen Mars und Jupiter blieb zu Titius' Zeiten eine Nummer unbesetzt; nach seiner Entdeckung 1801 konnte der Kleinplanet Ceres die Lücke hervorragend füllen.

Später hat Johann Elert Bode (1747–1826) die Folge zunächst unter seinem Namen verbreitet und damit die doppelt falsche Bezeichnung »Titius-Bode-Reihe« statt »Titius-Folge« verursacht. Noch falscher ist der Name »Bode law«, denn es ist auch kein Naturgesetz. Neptun passt gar nicht in die Folge und Pluto nur dann, wenn Neptun nicht zählt.

Immerhin hat diese Beziehung ohne Gesetzeskraft in den 1840er Jahren beim Suchen geholfen. Störungen der Uranusbahn ließen auf einen weiter außen kreisenden Planeten schließen. Urbain Le Verrier (1811–1877) und John Couch Adams (1819–1892) lokalisierten den unbekannt Störer entsprechend der Titius-Folge, statt gänzlich im Dunkeln zu tappen; durch ihre (voneinander unabhängigen) Berechnungen wurde schließlich der Neptun gefunden. ◁

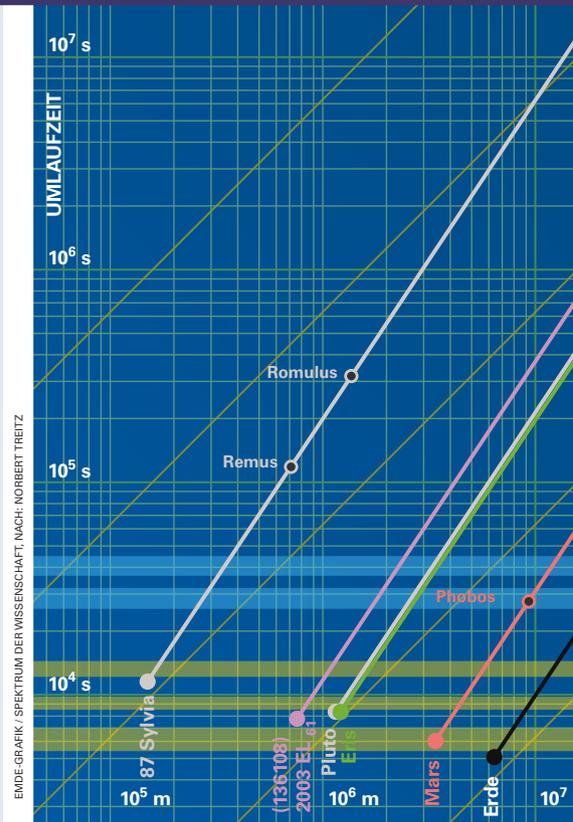
Große und kleine Objekte des Sonnensystems

Zusammenhänge mit der Form von Potenzgesetzen, wie das III. Kepler'sche Gesetz, finden in doppellogarithmischen Diagrammen ihre adäquate Darstellung. Objekte, die den gleichen Zentralkörper umkreisen, liegen nach diesem Gesetz auf Geraden mit der Steigung 3/2. Die Masse des Zentralkörpers bestimmt die Position der Geraden: Mit zunehmender Masse wandert die Gerade nach rechts unten. Wir setzen dabei voraus, dass die Massen von umlaufendem und umlaufenem Objekt stark verschieden sind.

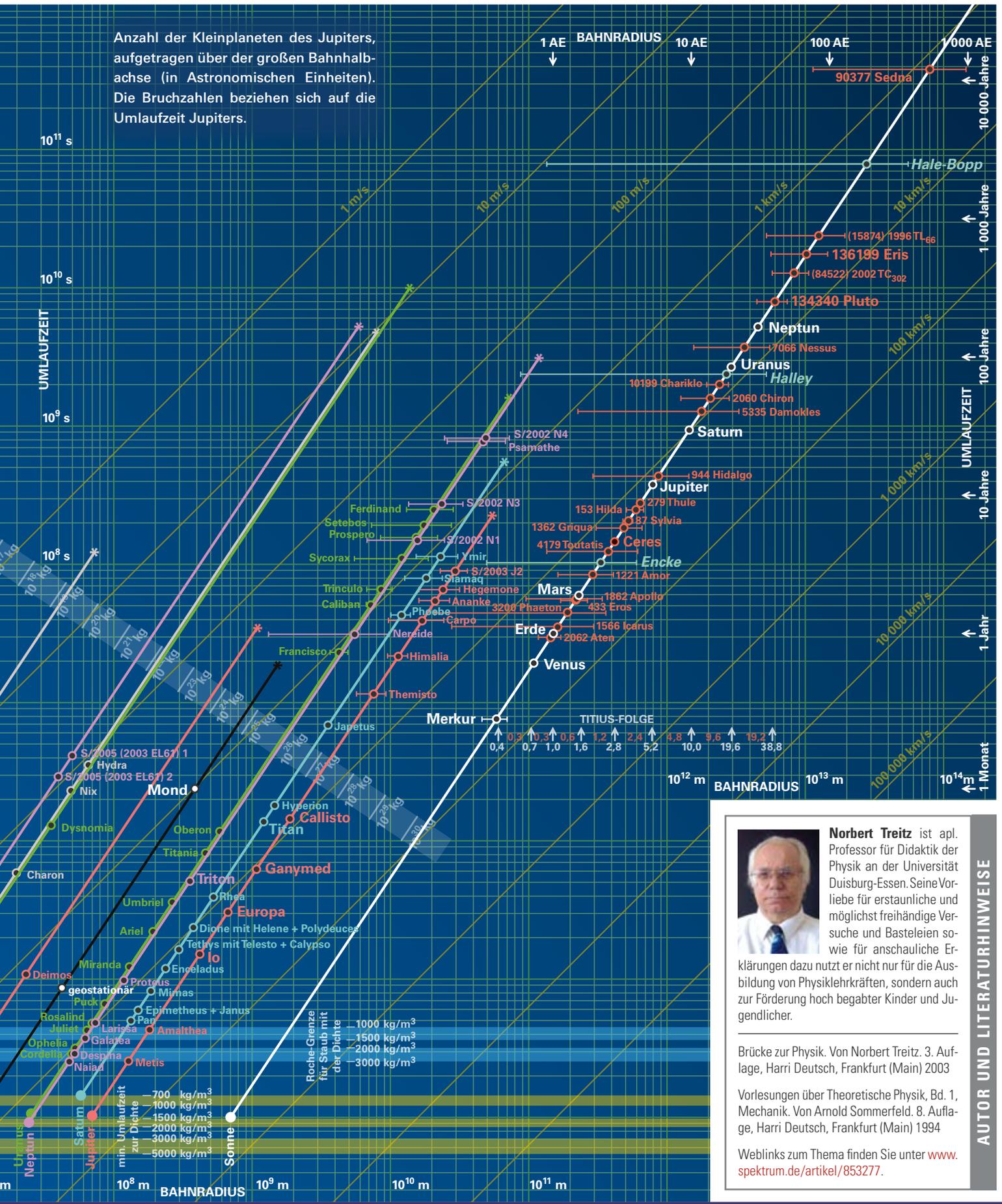
In der Realität sind die Geraden zu jedem Zentralkörper begrenzt: Sie beginnen auf dessen Oberfläche und reichen näherungsweise bis zur Hill-Grenze (Sternchen). Die mittleren Bahngeschwindigkeiten nehmen diagonal nach rechts unten zu; olivgrün eingezeichnet sind Linien konstanter Bahngeschwindigkeit.

Im Diagramm erscheint eine Kreisbahn als (umkringelter) Punkt, eine Ellipsenbahn als waagerechte Strecke, die vom kleinsten bis zum größten Abstand vom Zentralkörper reicht. Man sieht dann zum Beispiel sehr deutlich, welche Kleinplaneten der Sonne näher kommen als Venus oder sich weiter von ihr entfernen als Mars.

Planeten (schwarz) und Zwergplaneten (rot) sind in großer Schrift eingetragen, drei besonders bekannte Kometen kursiv. Außer vielen Satelliten der Planeten sind auch die bisher bekannten der Zwergplaneten Pluto und Eris aufgeführt. Eris, die größer als Pluto und damit unser größter Zwergplanet ist, hat erst vor wenigen Wochen ihren endgültigen Namen bekommen. Ihre Benennung nach der Göttin der Zwietracht (und der eigentlichen Verursacherin des Trojanischen Kriegs) ist angesichts des Streits auf der Prager IAU-Konferenz über die Definition der Planeten im August 2006 nicht ohne feinsinnigen Humor. Zu allem Überflus heißt ihr Satellit nun »Dysnomia« (»Gesetzlosigkeit«). Pluto ist vom Status des neunten Großplaneten zu einem Objekt mit der sechsstelligen Nummer 134340 degradiert worden.



Anzahl der Kleinplaneten des Jupiters, aufgetragen über der großen Bahnhalbachse (in Astronomischen Einheiten). Die Bruchzahlen beziehen sich auf die Umlaufzeit Jupiters.



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.

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Vorlesungen über Theoretische Physik, Bd. 1, Mechanik. Von Arnold Sommerfeld. 8. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1994

Weblinks zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/853277.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

PREISRÄTSEL

Ein Hotelier in Schwierigkeiten

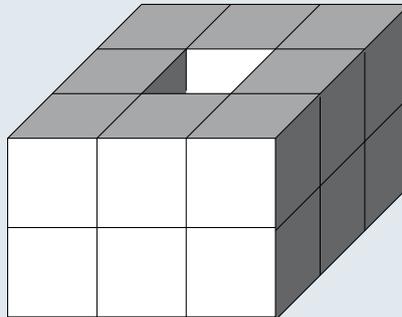
Von Pierre Tougne

Ein Hotel mit quadratischer Grundfläche hat 16 Zimmer, die wie in der Abbildung angeordnet sind. Darin sollen die Teilnehmer eines Mathematikkongresses unter Berücksichtigung folgender Regeln untergebracht werden:

1. Alle 16 Zimmer werden belegt.
2. In jedem Zimmer werden höchstens drei Mathematiker untergebracht.
3. In den sechs Zimmern entlang jeder Fassade des Hotels wohnen zusammen je elf Mathematiker.
4. Im Obergeschoss wohnen doppelt so viele Mathematiker wie im Erdgeschoss.

Nach kurzem Nachdenken findet der Hotelier eine Lösung für die Unterbrin-

gung der Teilnehmer. Am Anreisetag kommen allerdings drei Mathematiker weniger an als geplant. Dennoch gelingt es dem Hotelier, sie nach den obenstehenden Regeln auf die Zimmer zu verteilen.

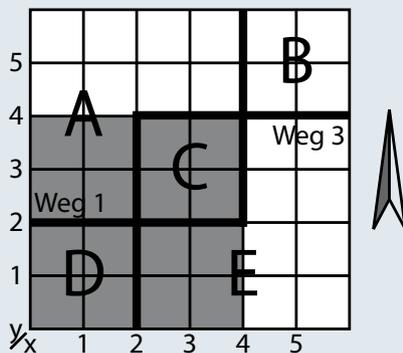


Wie viele Mathematiker waren angemeldet, und wie war die geplante Zimmerbelegung? Wie viele kamen tatsächlich an, und wie war die endgültige Zimmerverteilung?

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 Rucksäcke mit Fraktalmotiv »Elefant«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 14.11. 2006, eingehen.

Lösung zu »Das Lykeion des Aristoteles« (September 2006)

Die drei Wege sind jeweils durch die Koordinaten ihres Abknickpunkts festgelegt. Damit insgesamt acht Teilflächen entstehen, muss jeder Weg jeden Weg kreuzen. Zeichnen wir zunächst die Wege 1 (von der West- zur Nordseite) und 3 (von der Ost- zur Südseite) ein, so muss der Abknickpunkt des zweiten Wegs, der die Nord- mit der Ostseite verbindet, also im schattierten Bereich liegen.



Da die Teilflächen einen Flächeninhalt von 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8 Quadratstadien haben sollen und die Teilfläche B nicht vom Weg 2 durchlaufen wird, darf B nicht größer als 8 Quadratstadien sein und jede der Flächen A, C, D oder E nicht

größer als $8 + 7 = 15$ Quadratstadien. Um diese Bedingungen zu erfüllen, dürfen die Wege 1 und 3 nur in den folgenden Punkten abknicken:

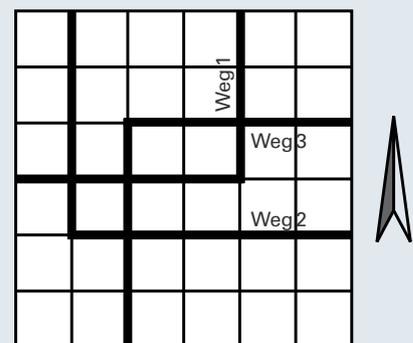
Weg 1 knickt ab bei		Weg 3 knickt ab bei	
x	y	x	y
3	1	1	4
3	1, 2, 3	2	4
4	1	1	3, 4, 5
4	1	2	4, 5
4	2	1	3, 4
4	2	2, 3	3, 4, 5
4	3	2, 3	4
4	3, 4	3	5
5	1	1	4
5	1	2	5
5	2	1, 2	4
5	2	1, 2, 3	5
5	3	2, 3, 4	4, 5
5	4	3	5

Jetzt suchen wir für jeden Fall die möglichen Abknickpunkte des zweiten Wegs. Dabei entstehen in den meisten Fällen eine zu große oder mehrere gleich große Teilflächen. Nur in den folgenden Fällen erhalten wir eine Zerle-

gung in acht Teilflächen mit den Flächeninhalten 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8:

- W1: (4/2), W3: (3/4), W2: (2/1);
- W1: (4/3), W3: (2/4), W2: (1/2);
- W1: (4/3), W3: (3/4), W2: (1/2) oder (2/1);
- W1: (5/3), W3: (3/5), W2: (1/2) oder (2/1).

Nur im zweiten dieser Fälle ist ein anderer Weg kürzer als Weg 3, wie dies gefordert war. Damit haben wir die folgende eindeutige Lösung gefunden:



Die Gewinner der drei Blechschilder »Kamel« sind Sigrun Luhn, München; Lutz Käser, Reutlingen; und Manfred Müller-Späth, Ahrensburg.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung **spektrumdirekt** (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

UMWELT

Al Gore – Eine unbequeme Wahrheit (An Inconvenient Truth)

Dokumentarfilm, Kinostart: 12. Oktober 2006
Regie: Davis Guggenheim
Dauer: 94 Minuten
Participant Productions, USA 2006

Gleichnamiges Buch zum Film:



Aus dem Amerikanischen von Richard Barth und Thomas Pfeiffer. Riemann, München 2006. 328 Seiten, € 19,95



Beinahe wäre Albert Gore im Jahr 2000 Präsident der Vereinigten Staaten geworden. Ihm fehlten nur wenige Wählerstimmen in Florida. Doch Gore ist nicht nur Politiker, sondern auch Umweltschützer, dem die globale Erwärmung ganz besonders am Herzen liegt. Seit Jahren versucht er die Menschen durch Vorträge in aller Welt davon zu überzeugen, dass es sich um ein dramatisches Problem handelt. Davis Guggenheim hat ihn dabei gefilmt.

Die Mutmaßung liegt nahe, dass es sich um den größten Wahlkampfspot aller Zeiten handelt. Erwägt Gore etwa nicht, erneut für das Präsidentenamt zu kandidieren? Doch in dem Film scheint die Werbung für seine Person Nebensache zu sein. Hauptsächlich geht es um das riesige »geophysikalische Experiment«, das die Menschheit mit der Erde anstellt. Diese Worte stammen von Roger Revelle, einem Klimaforscher, bei dem der Held des Films studiert hat. Nur wenige Politiker dürften vom Klimawandel mehr Ahnung haben als Gore.

Gore schildert die wissenschaftlichen Grundlagen des Treibhauseffekts anschaulich und unterhaltsam, zuweilen gar witzig. Grafikanimationen und ein Cartoon im Stil der Trickfilmserie »Die Simpsons« lockern seinen Vortrag auf. Seit Jahren steigt der Gehalt von Kohlendioxid, aber er schwankt im Jahrestakt, denn die Ve-

getation der Nordhemisphäre atmet das CO₂ ein und aus – Gore macht das effektivvoll auf der Bühne nach.

Dann taucht er in die Vergangenheit des Klimas ein, die Forscher mit Eisbohrkernen erkunden. Aus Gasisotopen, die im Eis gefangen sind, rekonstruieren sie die Temperatur. Gore zeigt diese Rekonstruktion zusammen mit dem CO₂-Gehalt für die vergangenen 650 000 Jahre. In diesem Zeitraum schwankte der Wert zwischen 180 und 290 ppm (parts per million). Das Auf und Ab der Temperatur in den Warm- und Eiszeiten scheint dem CO₂-Gehalt getreulich zu folgen; Gore räumt allerdings ein, dass der Zusammenhang komplizierter ist. In Wirklichkeit ging die Temperatur dem CO₂ voraus. Paläoklimatologen nehmen an, dass das Treibhausgas die Temperaturschwankungen nur verstärkte. In den letzten Jahrzehnten ist der CO₂-Wert jedenfalls auf 380 ppm hochgeschwollen und die Lufttemperatur im globalen Mittel angestiegen.

Um zu illustrieren, was der Klimawandel anrichten kann, setzt der Politiker auf bewährte Bilder: Da kalben die Gletscher, Wirbelsturm »Katrina« überschwemmt New Orleans, der schmelzende Permafrostboden macht Bäume »betrunken« und lässt Häuser einstürzen, mangels Eisschollen ertrinken die Eisbären, und der Tschadsee trocknet

aus. Gore zeigt Landkarten der Zukunft, auf denen Teile Floridas, der Niederlande und Bangladeschs im Wasser verschwinden, weil die Gletscher Grönlands oder der Westantarktis tauen. Dass es Jahrhunderte dauern wird, bis das Eis geschmolzen ist, geht in den Bilderfluten unter.

Die Ausschnitte aus dem Vortrag dominieren den Film aber nicht. Zwischendurch erfahren die Zuschauer rührselig aufbereitete Episoden aus dem Privatleben: Gores kleiner Sohn wäre beinahe bei einem Autounfall ums Leben gekommen, Gores Schwester ist an Lungenkrebs gestorben – da sie Raucherin war, lässt sich anschließend prima der Kampf gegen die Tabaklobby mit dem Kampf gegen Treibhausleugner vergleichen.

Damit wären wir beim Thema Politik. Phil Cooney, Umweltbeamter im Weißen Haus, tilgte 2002 und 2003 in einem Regierungsdokument missliebige Passagen über die Folgen des Klimawandels, ohne seine Manipulation wissenschaftlich begründen zu können. Nachdem sein Verhalten 2005 publik wurde, heuerte Cooney bei Exxon Mobil an. An dieser Stelle im Film bekommt die aktuelle US-Regierung ihr Fett weg; ansonsten sind Seitenhiebe gegen die Republikaner selten.

Zum Ende seines Vortrags schwingt sich Gore zu einem pathetischen Appell auf. Eine friedliche Revolution sei an der ▶

▷ Zeit. Bilder von Gandhi, Martin Luther King und vom Fall der Mauer werden gezeigt. Zuvor hatte Gore die Herausforderung mit den 1930er Jahren verglichen, als Churchill davor warnte, die von den Nazis ausgehende Gefahr zu unterschätzen.

Die »unbequeme Wahrheit«, die der US-Politiker transportieren möchte, lautet: Die Menschheit heizt den Planeten auf. Guggenheim hat einen Propagandafilm dazu gedreht, der wie jeder Film dieses Genres mit Übertreibungen arbeitet. Doch es ist ihm etwas Erstaunliches gelungen – einem Massenpublikum das komplexe Thema der globalen Erwärmung so nahe zu bringen, dass es die Grundzüge des Problems und seine Größenordnung erfassen kann.

Der Film oszilliert zwischen Wissenschaft und Politik. Wer ihn beurteilen

möchte, darf das Dilemma der Klimaaktivisten nicht übersehen. Bis die Folgen der CO₂-Emissionen eindeutig sichtbar werden, vergehen vermutlich noch Jahrzehnte. Darum pflegen Umweltschützer aktuelle Wetterkapriolen gerne als Folgen der Erwärmung zu bezeichnen. Unter Fachleuten ist diese Behauptung höchst umstritten. Klimaaktivisten entschuldigen sie als Notlüge in der öffentlichen Auseinandersetzung; bloß keine Zeit mit Überzeugungsarbeit verlieren.

Alternative Argumente dafür, den Verbrauch fossiler Treibstoffe zu drosseln, fehlen in dem Film leider. Ist es sinnvoll, despotischen Staaten Unsummen zu bezahlen, damit sie Erdöl und Erdgas liefern? Handelt die Menschheit klug, wenn sie Rohstofflager, die in Jahr-millionsen entstanden sind, innerhalb weniger Jahrzehnte plündert? Nähern

wir uns einem Kampf um knapper werdende Ressourcen oder nicht? Diese Fragen müssen auch diejenigen beantworten, die daran zweifeln, dass etwas gegen den anthropogenen Klimawandel getan werden muss.

Eines zeigt der Film aber gewiss: Die USA sind nicht verloren für die Sache des Klimaschutzes. »Der politische Wille ist eine erneuerbare Ressource«, sagt Gore. Ohne auf Bush zu warten, haben sich viele Städte und ein paar US-Bundesstaaten an der Ost- und Westküste dafür ausgesprochen, ihre Treibhausgasemissionen zu senken. All denen, die sich um das Klima Sorgen machen, gibt der Film am Ende Hoffnung. Und Gore schadet er mit Sicherheit nicht.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

MEDIZIN

Dietrich Grönemeyer Der kleine Medicus

Rowohlt, Reinbek 2005. 360 Seiten, € 22,90



Gehilfe Scherge schleimt sich bei ihm ein, weil er mit dabei sein will, wenn von Schlotter die Weltherrschaft an sich reißt. Nur seine ehemalige Doktorandin Micro Minitec hat sich rechtzeitig auf die Seite der Guten geschlagen.

Dramatisch wird es, als von Schlotter Nanos Großvater kidnappt, um an ihm sein neues Gehirnmanipulationsgerät zu erproben. Doch bevor der schurkische Professor über die Karrierestufen Dorfbürgermeister, Landeschef und so weiter zum Weltherrscher aufsteigt, legen ihm Nano und die Guten das Handwerk, weil sie mit der »guten« Technik ausgestattet sind. Eine weitere Reise durch den Menschen, diesmal unter anderem durch Großvaters Gehirn und Nervensystem, gibt dem Autor Gelegenheit, aufklärende Worte über die verschiedensten Körperteile, Krankheiten und zugehörigen Hausmittelchen unterzubringen.

Die Geräte, die der Fantasie Grönemeyers entsprungen sind, erinnern den Leser eher an einen Sciencefictionroman als an eine Medizinlektüre. Die Sprache ist das Neudeutsch, das der Autor für Jugendsprache hält; wahrscheinlich wäre der Text leichter ernst zu nehmen, wenn er in Erwachsenendeutsch geschrieben wäre. Insgesamt ist die Geschichte kein Erich Kästner, aber dennoch in sich abgerundet und spannend aufbereitet.

Immer wenn von einem medizinischen Gerät, einer Krankheit oder einem Körperteil die Rede ist, gibt ein eigener ▷

Jeder Mensch ist ein Juwel!« – so Dietrich Grönemeyer, Professor für Radiologie und Mikrotherapie der Universität Witten-Herdecke und Leiter eines eigenen Instituts für Mikrotherapie in Bochum. Vielleicht hat er »faszinierend und höchst wertvoll« gemeint.

Der Held des Buchs, ein Fünftklässler namens Nano, begibt sich mit ein paar Fragen zum Arzt (Bild links, mit Sportlehrer). Unter den zahlreichen technischen Geräten in dessen Praxis ist ein Verkleinerer. Fortan reist Nano in einem mikroskopischen U-Boot durch den Verdauungskanal einer »tollen und ungewöhnlichen Frau« namens Micro Minitec, der flippigen und erfindungsreichen Assistentin des Arztes (Bild nächste Seite), und erlebt die wildesten Abenteuer.

Wie in jeder Abenteuergeschichte gibt es die Guten, die dem Menschen wohlwollen und dem Autor vor allem dazu dienen, Nanos Fragen zu beantworten, und die Bösen. Allen voran Professor von Schlotter – natürlich hat er sich seinen Professorentitel erschlichen –, der das Licht der Sonne nicht mehr verträgt, seit er jahrelang in finsternen Kellergewölben seinen üblen Machenschaften nachging. Sein vertrottelter, kettenrauchender



ganzseitige Anzeige
SdW »Sonderhefte«

▷ Kasten weitere Erklärungen, allerdings sehr anspruchsvoll geschrieben und eventuell etwas zu kurz. Nanos Altersgenossen werden die Geschichte wohl genießen und mit den Erläuterungen ihre Schwierigkeiten haben. Gelungen sind die in den Text eingestreuten doppelseitigen Bilder von vergrößerten Teilen des Körpers. Was es darauf zu sehen gibt, steht leider erst ganz am Ende des Buchs.

Nachdem die Geschichte das Interesse der »jungen Leser« geweckt hat, geht Grönemeyer auf den letzten 60 Seiten noch einmal gezielt, mit schönen Bildern und Erläuterungen, auf den Körper, des-

sen Aufbau und Funktionen ein. Außerdem behandelt er die für Kinder interessanten Krankheiten und deren Therapien in hilfreichen Erklärungen. Eindrucksvoll beschreibt er eine gesunde Lebensweise und verdeutlicht die Folgen von falscher Ernährung, Schlafmangel und anderen Standardfehlern. Dieser Teil des Buchs ist eher ein Nachschlagewerk für alle möglichen Fragen, denn auf kreative Weise ist es dem Verfasser gelungen, das ganze Gebiet »Medizin« abzudecken.

Dietrich Grönemeyer plädiert für einen natürlichen Umgang mit dem eigenen Körper und dessen Funktionen. So

berichtet er durchgehend von Hausmitteln, die man ohne Arzt anwenden kann, oder gesund-erhaltenden Maßnahmen.

Obwohl dieses Buch in der Geschichte nicht klar genug zwischen Fantasie und Realität unterscheidet, ist es für Kinder, die schon etwas anspruchsvollere Texte auffassen können, sehr zu empfehlen!

Esther Klingenberg

Die Rezensentin geht in die 11. Klasse der Heidelberger Waldorfschule.



GEDÄCHTNISFORSCHUNG

Hans J. Markowitsch, Harald Welzer

Das autobiographische Gedächtnis

Hirnorganische Grundlagen und biosoziale Entwicklung

Klett-Cotta, Stuttgart 2005. 302 Seiten, € 29,50

Mein Vater erzählte oft vom Krieg. Obwohl ich ein Kind war, verstand ich, dass er das tat, weil er froh war, einer großen Gefahr entronnen zu sein. Als mein erster Italienurlaub zu Ende ging, nahm ich mir vor, mich mein Leben lang an ihn zu erinnern. Mein Gedächtnis stellte ich mir vor wie unseren Dachboden: eine Rumpelkammer voll interessanter Lebensspuren.

Wie dieses private Oberstübchen allmählich in jedem von uns reift und sich füllt, untersuchen der Bielefelder Neuropsychologe Hans Markowitsch und der Sozialpsychologe Harald Welzer vom Essener Kulturwissenschaftlichen Institut seit mehreren Jahren mit ihrem interdisziplinären Forschungsprojekt »Erinnerung und Gedächtnis«.

Das autobiographische Gedächtnis ist Dreh- und Angelpunkt unseres Menschseins. Es ermöglicht uns, eine selbstbewusste Persönlichkeit auszubilden, die Goethe als »höchstes Glück der Erdenkinder« pries. Das Wesen dieses Schatzes erschließt sich aber erst, wenn die hirnphysiologische Betrachtung des einzelnen Gehirns um die soziale Dimension erweitert wird: Der kindliche Kopf wächst in Gesellschaft heran.

Mit ihrem »biosozialen« Ansatz wollen die Autoren sich von vornherein über die leidige Kluft zwischen Geistes- und Naturwissenschaften hinwegsetzen. Wer erst das fertig ausgereifte erwachsene Ge-

hirn untersucht, argumentieren sie, der kommt zu spät und landet vor der notorischen Erklärungslücke – vor dem Problem, wie aus hirnphysiologischen Daten der sinnliche Reichtum unserer Erfahrungen und Erinnerungen hervorgehen soll. Wer hingegen der Entwicklung des Menschenhirns vom Fötus bis zur Adoleszenz nachspürt, erforscht einen biologischen Prozess in seinem sozialen, kulturellen, historischen Kontext.

Überspitzt gesagt: Ob eine einzelne Synapse sprießt und eine Verbindung zu anderen Neuronen schafft oder nicht, hängt beim Menschen mit überindividuellen Faktoren zusammen, die allein hirnphysiologisch gar nicht zu fassen sind. Schon der Fötus lebt mit – sogar in – einem anderen Organismus, und das menschliche Neugeborene ist von der Mutter-Kind-Symbiose abhängiger als jedes Tierbaby. Mit neun Monaten erschließt sich dem Kind ein gefühlsbetonter sozialer Raum aus anderen Personen und Objekten, der von Anfang an auch sprachliche Kommunikation umfasst. Von einer individuell vorprogrammierten Sprachkompetenz (Noam Chomsky) oder einem angeborenen Sprachinstinkt (Steven Pinker) halten Markowitsch und Welzer wenig, sondern meinen: »Die soziale Praxis stellt also selbst eine Struktur bereit, in der das Erlernen einer Symbolsprache organisiert werden kann.«

Dieser biosoziale Ansatz greift eine Tradition auf, die bis zur so genannten kulturhistorischen Schule der sowjetischen Psychologie um Lew Wygotski zurückreicht und das Individuum von Anfang an als soziales Wesen begreift. Jetzt wird diese Tradition mit aktuellen Befunden der Hirnforschung angereichert und daraus eine überzeugende Zusammenschau entwickelt.

Im Detail mag die Forschung noch manches in diesem Gesamtbild zurecht-rücken. So scheinen die Autoren in ihrem Eifer, das spezifisch Menschliche am Ursprung des autobiographischen Gedächtnisses herauszuarbeiten, doch die Kluft zwischen Mensch und Tier zu überzeichnen. Ihre Behauptung, Tiere seien Solip-sisten und unfähig zum Lernen durch Imitieren, ist bereits heute widerlegt: Unter Menschenaffen gibt es regional unterschiedliche »Kulturen« primitiven Werkzeuggebrauchs. Auch bei niedrigeren Tieren treten durchaus belehrende Mutter-Kind-Interaktionen auf.

Von dort bis zu einem Wesen, das auf sein vergangenes Leben zurückzuschauen und seinen Nachkommen davon zu erzählen vermag, ist freilich noch ein weiter Weg. Davon berichtet dieses Buch, indem es mutig die Grenzen der Disziplinen überschreitet.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

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

Filmkonzert Weltpremiere

mit dem Berlin Jazz Orchestra unter Jiggs Whigham



Raumpatrouille Orion

Tickets unter
0180-5001812 (12 ct/min)
und an allen bekannten
Vorverkaufsstellen

Rücksturz ins Konzert!

Sa. 18. November, 20 Uhr
T-Mobile Forum Bonn

„Es ist wunderbar. Es ist Kult!“ (Süddeutsche Zeitung)

Pünktlich zum 40jährigen Jubiläum der Kultserie landet die „Raumpatrouille Orion“ in Bonn. Im Gepäck eine Weltpremiere: Das Berlin Jazz Orchestra unter der Leitung des international renommierten Bandleaders Jiggs Whigham spielt live und synchron zur Kinofassung von 2003. Die Originalfilmmusik von Peter Thomas wurde für Big Band neu arrangiert und garantiert in Kombination mit dem filmischen Weltraumabenteuer auf Europas größter Indoor LED-Wand (62qm) ein einzigartiges Filmkonzertenerlebnis!

Weitere Informationen auf: www.riverlounge.de

ICM

BONNICKET

FILMHARMONIE

BAVARIA FILM

T-Mobile

Wo klemmt es wirklich bei wissenschaftlichen Berechnungen ?

Forscher wären gut beraten, sich einiger Arbeitsmethoden zu bedienen, die in der Software-Industrie üblich sind.

Von Gregory V. Wilson

»Mein Freund wusste nicht, was Versionskontrolle war«

Als ich mich 1986 erstmals mit Computerwissenschaft befasste, wurde gerade eine neue Generation von schnellen und billigen Chips eingeführt, welche die Ära der Low-Cost-Supercomputer einläutete. Diese Rechner bestanden aus einer Vielzahl von Prozessoren, die ein vorgegebenes Problem parallel durcharbeiteten. Und plötzlich begann natürlich jeder, der sich mit komplexen Computerproblemen befasste, seine Programme so umzuschreiben, dass sie die Vorteile dieser neuen Rechner auch nutzen konnten. Das war mühsam. Denn die Compiler, welche die Programme auf Parallelcomputern lauffähig machen sollten, spielten oft verrückt. Es gab keine »Debugging«-Werkzeuge zur Fehlersuche; und der Versuch, eine Lösung anzugehen, glich oft dem, tausend Kreuzworträtsel gleichzeitig lösen zu wollen. Doch die Ergebnisse schienen viel versprechend. Die meisten Forscher waren überzeugt, dass mit Parallelrechnern einmal Computersimulationen möglich würden. Damit ließe sich ein ganzes Spektrum von Prozessen berechnen, die sich mit herkömmlichen Labormitteln oder gar mit Papier und Bleistift nicht lösen ließen; entweder weil sie zu umfassend, klein, schnell, langsam, gefährlich oder einfach zu kompliziert waren.

Dennoch hatte ich Mitte der 1990er Jahre das Gefühl, dass irgendetwas nicht stimmte. Auf jede Gruppe mit einer erfolgreichen Simulation des globalen Klimas kamen ein Dut-

zend andere, die nur damit kämpften, ihre Programme zum Laufen zu bringen. Niemals war die Software schon genügend ausgereift, um auf Konferenzen präsentiert oder auch nur auf der Titelseite des Newsletters ihres Supercomputer-Centers erwähnt zu werden. Monate und Jahre plagten sich viele Forscher damit, ihre Codes umzuschreiben oder zu verbessern, bis die Software etwas Besseres machte, als nur stehen zu bleiben oder bei einer Division durch Null den Dienst zu quittieren. Aus irgendeinem Grund ließ der Erfolg stets viel länger auf sich warten als gedacht.

Ich befragte daher diese Wissenschaftler, wie sie denn ihre Programme schreiben würden. Die Antworten waren ernüchternd: Nur wenige hatten etwas mehr Ahnung als die meisten Programmierer kommerzieller Software, mit denen ich zusammengearbeitet hatte. Die Mehrheit benutzte dagegen noch antiquierte Texteditoren wie »Vi« oder »Notepad«, tauschte Codes mit Kollegen per E-Mail aus und absolvierte praktisch keine systematischen Tests der Programme.

Suche nach dem »Rückgängig«-Knopf

Schließlich fragte ich einen Freund, der in Teilchenphysik promovierte, warum er darauf bestand, alles »auf die harte Tour« zu machen. Warum benutzte er nicht eine integrierte Software-Entwicklungsumgebung mit einem symbolischen Debugger? Warum schrieb er keine Tests für Module? Warum nutzte er kein System zur Kontrolle der Programmversionen? Seine Gegenfrage: »Was ist ein System zur

Kontrolle von Programmversionen?« Eine solches System, erklärte ich ihm, sei eine Software, die Änderungen an Dokumenten, Programmen, Webseiten, Förderungsanträgen und so ziemlich allem anderen überwacht.

Es funktioniert wie der »Rückgängig«-Knopf in deinem Lieblingsprogrammeditor. Du kannst jederzeit eine ältere Version reaktivieren und sehen, welche Unterschiede es im Vergleich zur aktuellen gibt. Du kannst außerdem feststellen, wer zwischenzeitlich das Dokument editiert hat, und Konflikte aufspüren zwischen einzelnen Veränderungen durch andere und denen, die du gerade selbst anbringst. Die Programmversionskontrolle ist für das Programmieren ähnlich wichtig wie penible Notizen über Laborabläufe in der experimentellen Wissenschaft. Sie ist das Werkzeug, bei dessen Nutzung man sagen kann: »Auf diese Weise bin ich zu diesen Ergebnissen gekommen« statt »Hm, also ich glaube, für diesen Graph benutzen wir den neuen Algorithmus, äh, ich meine den alten neuen Algorithmus, nicht den neuen neuen Algorithmus.«

Mein Freund ist intelligent und mit den Problemen beim Schreiben großer Programme bestens vertraut – er hatte ein Programm mit 100 000 Zeilen übernommen und selbst weitere 20 000 Zeilen hinzugefügt. Als ich bemerkte, dass er gar nicht wusste, was Versionskontrolle ist, kam er mir vor wie ein Chemiker, dem nicht klar ist, dass man die Reagenzgläser zwischen den Versuchen spülen sollte. Auch er war über unser Gespräch nicht sehr erfreut. Er seufzte und sagte: »Hättest du mir das nicht schon vor drei Jahren erzählen können?«

Als ich wusste, wonach ich zu suchen hatte, fiel mir dieser »programmtechnische Analphabetismus« fast überall auf. Die meisten Wissenschaftler hatten einfach niemals gelernt, wie man effektiv programmiert. Nach einem Einführungskurs für Studienanfänger in C oder Java und vielleicht einem Kurs in Statistik oder Numerik im weiteren Studium wurde erwartet, dass sie alles andere allein hinkriegten. Das ist etwa so, als würde man jemandem zwar zeigen, wie man Polynome differenziert, aber dann von ihm verlangen, die Tensorrechnung zu beherrschen.

Ja, im Internet stehen dazu alle nötigen Informationen, aber verteilt über Hunderte



von Webseiten. Noch hinderlicher ist, dass die Forscher sich monate- oder jahrelang Hintergrundwissen aneignen müssten, bis die im Internet verstreuten Infos für sie verständlich würden. Als ich einem anderen Physiker (etwas älter und zynischer als mein Freund) sagte, er solle sich doch ein paar Wochen freinehmen und endlich mal »Perl« lernen, antwortete er mir: »Gern, wenn Sie einige Wochen Zeit übrig haben, um sich mit Quantenchromodynamik zu befassen, damit Sie auch meine Arbeit machen können.«

»Vorsicht, ich bin Computerwissenschaftler und möchte Ihnen helfen!«

Im Gespräch mit ihm stieß ich noch auf einen weiteren Grund, warum viele Forscher sich keine besseren Arbeitsmethoden aneigneten. Von ständig neuen Programmierkonzepten und -ideen überrollt, reagieren diese Forscher vernünftigerweise erst einmal skeptisch, wenn ihnen jemand sagt: »Ich bin Computerwissenschaftler und komme, um Ihnen zu helfen.« Von objektorientierten Sprachen bis hin zum heute hoch gelobten Agilen Programmieren mussten sich die Wissenschaftler von einer Programmiermarotte zur nächsten durchkämpfen, ohne dass ihr Berufsleben dadurch merklich erleichtert worden wäre.

Forscher sind oft auch frustriert von der »zufälligen Komplexität«, mit denen sie die Informatik konfrontiert. So gehört zum Beispiel zu jeder modernen Programmiersprache ein Verzeichnis häufiger Ausdrücke – Mustervorlagen, mit denen in Textdokumenten bestimmte Daten gefunden werden können. Doch die Regeln der einzelnen Sprachen, wie diese Muster anzuwenden sind, unterscheiden sich leicht. Wenn allein schon das weit ver- ▷

»Selbst der schnellste Rechner kann die Zeit bis zur Publikation höchstens halbieren«

▷ breitete Betriebssystem Unix drei oder vier unterschiedliche Notationen für ein und dasselbe Konzept kennt, ist es kein Wunder, dass viele Forscher verzweifeln und sich nur auf den kleinsten gemeinsamen Nenner einlassen.

Welche Folgen hat das mangelnde Programmierwissen aber für die Wissenschaftler? Um Ihnen eine Vorstellung zu geben, bitte ich Sie, kurz eine der grundlegenden Regeln der Computerwissenschaft zu betrachten, das so genannte Amdahl-Gesetz. Nehmen wir an, es dauert sechs Monate, um ein Programm zu schreiben und von Fehlern zu reinigen; dieses läuft dann weitere sechs Monate auf aktueller Hardware, bis Resultate zur Veröffentlichung vorliegen.

Selbst ein beliebig schneller Computer (vielleicht einer, den Physiker einer fernen Zukunft bei einem missglückten Experiment zurück in unsere Gegenwart befördern) könnte die durchschnittliche Dauer bis zur Veröffentlichung höchstens auf die Hälfte verkürzen, da die Hardware nur eines von mehreren zeitintensiven Gliedern in der ganzen Prozesskette darstellt. Daher besteht der wichtigste Zeitfaktor für Wissenschaftler, die mit Computern arbeiten, zunehmend darin, wie schnell und zuverlässig sie ihre Ideen in funktionierenden Code umsetzen können.

Weniger Zeit für den Kampf mit dem Code

Im Jahr 1998 begannen Brent Gorda (heute am Lawrence Livermore National Laboratory) und ich damit, dieses Problem in Angriff zu nehmen. Wir gaben im Los Alamos National Laboratory (LANL) kleinere Kurse für Wissenschaftler, mit denen sie ihre Fähigkeiten in der Software-Entwicklung verbessern konnten. Wir hatten gar nicht das Ziel, aus LANL-Physikern oder Metallurgen Computerwissenschaftler zu machen. Vielmehr wollten wir ihnen lediglich die zehn Prozent an modernen Software-Entwicklungstechniken beibringen, mit denen sie 90 Prozent ihrer Aufgaben bewältigen konnten.

Die ersten Kurse hatten Höhen und Tiefen. Doch danach zu urteilen, was die Teilnehmer uns sagten und was sie taten, nachdem sie den Kurs absolviert hatten, war klar, dass wir uns auf dem richtigen Weg befanden. Bereits einige wenige grundlegende Techniken und eine Einführung in die Werkzeuge, die man dafür benötigte, ersparte vielen Forschern beträchtliche Frustrationen. Wir bemerkten weiterhin: Die meisten Wissenschaftler standen diesen Ideen sehr offen gegenüber – was uns, gemessen am praktischen Nutzen, eigentlich nicht so sehr überrascht haben sollte. Denn schließlich wurde ihnen die Wichtigkeit methodischen Vorgehens be-

reits in den ersten Studiensemestern eingebläut.

Sechs Jahre und einen Dotcom-Boom später erhielt ich Fördermittel von der Python Software Foundation, um diesen Kurs auf den neuesten Stand zu bringen und ihn zur freien Verfügung ins Internet zu stellen, sodass jeder, der ihn nutzen wollte, dies auch gratis tun konnte. Der Kurs liefert Tools und umfasst Arbeitsmethoden, die sowohl die Qualität wissenschaftlicher Programme erhöhen als auch deren Fertigstellung beschleunigen. Damit vergeuden Forscher weniger Zeit für den »Kampf mit dem Code« und gewinnen mehr Zeit für ihre wissenschaftliche Arbeit.

Zu den Kursthemen zählen weiterhin Versionskontrolle, die Automatisierung sich wiederholender Aufgaben, systematisches Testen, Programmierstile und Code-Lesen, einige Grundlagen für die Verarbeitung großer Datenmengen, Webprogrammierung – und ein Überblick, wie man Software-Entwicklung in kleinen, an (geografisch) verschiedenen Orten tätigen Teams koordiniert. Das ist alles kein bahnbrechend neues Wissen, sondern lediglich die computerwissenschaftliche Entsprechung von Routine-Laborarbeiten wie der Titration einer Lösung oder der Kalibrierung eines Oszillografen.

Wissenschaft ist viel mehr als nur eine Ansammlung von Fakten. Sie ermöglicht Menschen, die durch Ozeane voneinander getrennt sind, in unterschiedlichen Dekaden leben, verschiedene Sprachen sprechen oder anderen Ideologien unterliegen, wechselseitig auf den Entdeckungen der jeweils anderen aufzubauen. Computer spielen dabei von Jahr zu Jahr eine größere Rolle. Dennoch erfüllen nur wenige Forschungsprogramme die methodischen Standards, die Pioniere wie Lavoisier oder Faraday vor über 200 Jahren bei ihren experimentellen Studien gesetzt hatten.

Natürlich kann diese Lücke vor allem durch eine bessere Ausbildung während des Studiums geschlossen werden, doch das allein wird nicht reichen. Auch Fachzeitschriften müssen allmählich darauf bestehen, dass die Software der Wissenschaftler den gleichen Ansprüchen an Qualität und Reproduzierbarkeit genügt wie ihre Laborarbeiten. Außerdem brauchen wir dringend mehr Fachjournale, die gewillt sind, Beschreibungen zu veröffentlichen, nach welchen Methoden Forscher ihre Software entwickeln und wie diese Programme funktionieren. Schnellere Chips und anspruchsvollere Algorithmen sind nicht genug. Wenn wir uns Computerwissenschaft wirklich zu eigen machen wollen, müssen wir den Engpass zwischen unseren Ohren beseitigen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gregory V. Wilson ist Professor für Computerwissenschaft an der University of Toronto. Sein Kurs ist erhältlich unter www.swc.scipy.org/. Seine E-Mail-Adresse: gwwilson@cs.utoronto.ca.

© American Scientist
www.americanscientist.org

How to break web software. Von M. Andrews and J. A. Whittaker, Addison-Wesley, 2006

Debugging. Von D. J. Agans. American Management Association, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852747.



Wie wird man zum Genie?

Untersuchungen an Schachgroßmeistern zeigen: Für Staunen erregende Leistungen braucht es keine Ausnahmefähigkeit, sondern nur genügend effizientes Training

WEITERE THEMEN IM DEZEMBER

Extrasolare Planeten

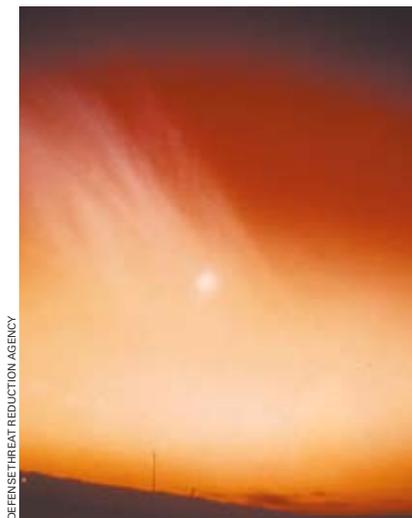
Die Entdeckung von immer mehr Planeten außerhalb des Sonnensystems enthüllt inzwischen, wie solche Systeme entstehen und sich entwickeln

Lachse düngen Wälder

Bären, die Lachse fressen, sorgen für ungeahnte ökologische Kreisläufe. Sie tragen die Fische weit an Land, wo Tiere und Pflanzen deren Reste verwerten



WILD THINGS PHOTOGRAPHY, JOHN HYDE

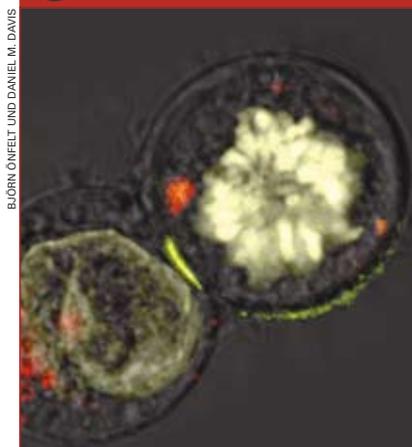


DEFENSE THREAT REDUCTION AGENCY

Kernexplosionen im All

Eine nukleare Explosion in der Ionosphäre würde tausende Satelliten ausschalten. Die zunehmende Verbreitung von Kernwaffen und ballistischen Raketen könnte manche Staaten verlocken, eine solche auszulösen

IHR WUNSCHARTIKEL



Immunzellen im Kontakt

Um Krankheiten zu bekämpfen, scheinen die Abwehrzellen ähnlich wie Nervenzellen ein Informationsnetzwerk aufzubauen

BLJORN ÖNFELT UND DANIEL M. DAVIS