

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SCHUTZ VOR PANDEMIEN?
Früherkennung gefährlicher Tierviren S. 54

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

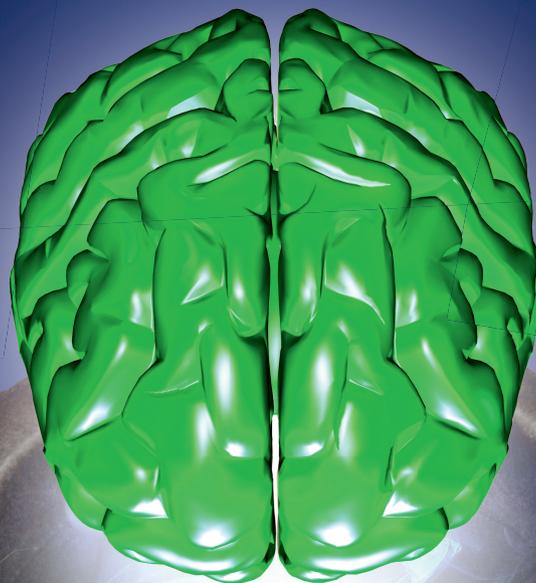
GEYSIRE AUF EISMOND
Saturnmond Enceladus
unerwartet aktiv

TROJAS SCHWESTER
Bedeutender Fund an
Kleinasiens Küste

DER IONENRECHNER
Neues Konzept für
Quantencomputer

Gehirn und Magie

Was Neurowissenschaftler
von Zauberern
lernen können



DIE ZAUBERVIDEOS ZUM TITELTHEMA AUF www.spektrum.de/zauberei

www.spektrum.de



4 194058 407402

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

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

06/09

JUNI 2009



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Bitte täuschen Sie mich!

Wer andere täuscht, ist im Allgemeinen nicht sehr beliebt. Als herauskam, dass der Finanzjongleur Bernard Madoff seine rund 5000 Kunden mit einem simplen Schneeballsystem um geschätzte 65 Milliarden Dollar erleichtert hatte, waren viele ruiniert und alle beleidigt. Dabei hatten sich dem scheinbar Widerstrebenden (genau das war Madoffs Masche) auch zahlreiche Prominente wie Steven Spielberg förmlich aufgedrängt.

Mindestens eine Ausnahme gibt es, wo sich Menschen von beruflichen Täuschern bereitwillig und mit Vergnügen hinter das Licht führen lassen: den Zauberkünstler. Und obwohl jeder weiß, dass auch ein wiedergeborener Houdini nicht die Naturgesetze außer Kraft setzen kann, sind wir doch regelmäßig geneigt, an übernatürliche Kräfte zu glauben, wenn scheinbar Unmögliches direkt vor unseren Augen passiert.

Als ich den jungen Zauberkünstler Thomas Fraps zum ersten Mal in kleinem Rahmen hautnah erlebte, da rätselte ich hinterher – Motto: Mich täuscht keiner! – über dessen Tricks so lange wie vergebens. Einen verzweifelten Moment lang erschien es mir leichter, mal eben wieder an Wunder zu glauben als an schnöden Betrug. So wirkt eben Spitzenzauberei. Doch statt neuem Wunderglauben ist klar: Bei dem Ganzen handelt sich vor allem um angewandte Neuropsychologie und -biologie. Was Profizauberer schon immer intuitiv erfassten und praktizierten, interessiert deshalb seit Kurzem auch die Hirnforschung. Sie lernt von den Zaubernern.

Die Forscher vermessen dazu beispielsweise die Gehirnaktivitäten der Zuschauer während der Vorführungen und analysieren so, was im Moment der Verblüffung und Über-

rumpelung im Kopf passiert. Das liefert grundsätzliche Erkenntnisse darüber, wie unser Hirn funktioniert und warum wir uns so leicht täuschen lassen (S. 44). Der Diplomphysiker **Thomas Fraps** hat sich den Psychologen zur Verfügung gestellt und schildert seine Sicht der Neuro-Zauber-Forschung (S. 52). Mit ihm haben wir ein »Zaubervideo« produziert, das Sie auf unserer Webseite ansehen können. Auch ohne jedes Wunder: Lassen Sie sich verzaubern!

Vor zehn Jahren wurde der »Bologna-Prozess« gestartet. Auf der Homepage des Wissenschaftsministeriums heißt es dazu, dass er »zu einer erfolgreichen Modernisierung der deutschen Hochschulen beigetragen« habe. Durch diese »größte Hochschulreform seit Jahrzehnten« sei die »Qualität von Studienangeboten« verbessert, »mehr Beschäftigungsfähigkeit« vermittelt sowie »die Studiendauer« verkürzt worden. Daran gibt es inzwischen erhebliche Zweifel, vor allem bei den Betroffenen. Das ganze Verfahren scheint seine hehren Ziele zu konterkarieren und unser Hochschulsystem an die Wand zu fahren. Auf S. 22 kommentiert **Bernhard Kempen**, Präsident des Deutschen Hochschulverbands, die Bedrohungslage für das deutsche Hochschulwesen; im Internet werden sich unsere Blogger von **www.scilogs.de** ab dem 15. Juni kritisch mit der heutigen Situation des Bologna-Prozesses auseinandersetzen.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



Der Physiker und Zauberkünstler Thomas Fraps weiß sein Publikum zu verblüffen. Über seine Illusionstechnik haben wir mit ihm einen Kurzfilm gedreht (www.spektrum.de/zauberei).

Warum wir uns täuschen lassen: Unsere Videos über die Zaubertricks finden Sie unter www.spektrum.de/zauberei

ASTRONOMIE & PHYSIK
Wasser sprühender Saturnmond



24

34



ASTRONOMIE & PHYSIK
Werden Quantencomputer auf Ionen basieren?

54



MEDIZIN & BIOLOGIE
Schutz vor Viren aus Wildtieren

AKTUELL

10 Spektrogramm

Massenkarambolage im All · Regenerierende Herzzellen · Leben unter dem Eis · Graphenbänder aus Nanoröhren u. a.

13 Bild des Monats

Garnelendämmerung

14 Wasserstoff aus Biomüll

Bestimmte Bakterien können aus pflanzlichem Abfall Wasserstoff erzeugen

16 Räuberfossil im Hunsrück

Wie der Schinderhannes postum Pate eines räuberischen Urtiers wurde

17 Ein Roboter wie du und ich

Wann kommt der mechanische Haushaltshelfer mit menschlichem Touch?

20 Immer Ärger mit PIPPO

Wie Pharmafirmen mit erfundenen Krankheiten Kasse machen

22 Jetzt umsteuern!

Die Bologna-Reform leidet unter eklatanten Schwächen

23 Springers Einwüfe

Kleine Physik der Wirtschaftskrise

ASTRONOMIE & PHYSIK

24 ► Geysire auf dem Eismond

Der Saturnmond Enceladus sprüht eisiges Wasser ins All – vielleicht aus einem verborgenen See, der außerirdisches Leben birgt

34 ► Quantencomputer mit Ionen

Schon heute existieren Geräte, in denen einzelne Atome Daten manipulieren. Die Forscher sind sicher: Aus ihnen werden einst extrem leistungsfähige Computer hervorgehen

SCHLICHTING!

42 Trübe Aussichten? Nicht nur!

Beim Blick unter Ljubljanas Brücken zeigt sich ein faszinierendes Wechselspiel diffuser und spiegelnder Reflexion

MEDIZIN & BIOLOGIE

TITEL

44 Zauberei – die Kunst der Wahrnehmungstäuschung

Zauberer manipulieren seit je Wahrnehmung und Aufmerksamkeit des Publikums. Dabei haben sie intuitiv manche Erkenntnisse der Neurowissenschaft vorweggenommen

54 ► Wie lässt sich neuen Pandemien vorbeugen?

Eine gerade etabliertes internationales Netzwerk soll potenzielle Entstehungsherde überwachen und frühzeitig Alarm schlagen, wenn ein neues Virus von Tieren auf Menschen überspringt

Titelmotiv: Hände, Stab & Hut: James Steidl / iStockphoto [M]; Hirn: Spektrum der Wissenschaft / Siganim; Composing: Spektrum der Wissenschaft, Claus Schäfer

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter:



TITEL

44

Zauberei und Gehirnfunktion



62

MENSCH & GEIST

Liman Tepe, das kleine Troja



92

TECHNIK & COMPUTER

Neuer Trend: das Internet der Dinge

MENSCH & GEIST

62 ► Liman Tepe –

Trojas unbekannte Schwester

Archäologen entdecken an der türkischen Küste immer neue Großsiedlungen der Bronzezeit. Gehörte Troja zu einem Handelsnetzwerk?

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

69 Eva Wohllebens Korpuskel

Elemente aus gleichseitigen Dreiecken lassen sich zu beweglichen Polyedern beliebiger Größe verbinden

SERIE (TEIL IX UND SCHLUSS)
DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

72 Was ist Mathematik?

Existieren Zahlen, Funktionen und hochdimensionale Räume in einer Realität außerhalb der Materie? Oder gibt es sie nur im Kopf dessen, der sie denkt, oder als formale Symbole? Neue philosophische Ideen stützen den ersten, eigentlich problematischen Standpunkt

ERDE & UMWELT

SERIE ERDE 3.0

80 Dem Wassermangel begegnen

Süßwasser wird immer knapper, denn der weltweite Bedarf wächst rapide. Mit den vorhandenen Technologien ließe sich der Notstand abwenden. Allerdings müssten die Verantwortlichen unverzüglich handeln

TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT & KARRIERE

89 »Tue Gutes und rede darüber«

Der Direktor des Deutschen Museums in München, Wolfgang Heckl, bringt Forschung in die Öffentlichkeit

92 Alles im Netz

Das »Internet der Dinge« soll künftig alle Produkte miteinander verknüpfen. Voraussetzung: eine umfassende Verbreitung von RFID-Funkchips

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

96 Noch gut oder schon im Aus?

Wenn sich die Tennisprofis in Wimbledon messen, wird Elektronik die Schiedsrichter unterstützen

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Bitte täuschen Sie mich!
- 6 Online-Angebote
- 8 Leserbrief/Impressum
- 79 Im Rückblick
- 106 Vorschau

100 Rezensionen:

- Marcus du Sautoy *Die Mondscheinsucher*
- Gerd Kempermann *Neue Zellen braucht der Mensch*
- Brigitte Röthlein *Der Mond*
- J. Klose und J. Oehler (Hg.) *Gott oder Darwin*
- Dietrich Böhlmann
- Warum die Bäume nicht in den Himmel wachsen*

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf www.spektrum.de. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

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



SPEKTRUMDIREKT Eine unterschätzte Seuche
www.spektrumdirekt.de/grippe

WISSENSLOGS »Bloggewitter«: Zehn Jahre Bologna
www.wissenslogs.de

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Eine (noch immer) unterschätzte Seuche

Jahr für Jahr schlägt die Grippe zu, in diesem Jahr auch das gefährliche H1N1-Virus. Wie bedrohlich ist die Krankheit für den Menschen? **spektrumdirekt** berichtet laufend über den Stand der Forschung

www.spektrumdirekt.de/grippe

Kommunikation bei Mensch und Tier

Kleinkinder machen's mit links: Die menschliche Sprache gehört wohl zu den herausragendsten Eigenschaften des *Homo sapiens*. Die neuesten Erkenntnisse zur Biologie des gesprochenen und des geschriebenen Worts hat **spektrumdirekt** für Sie zusammengestellt

www.spektrumdirekt.de/sprache

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Buchvorstellungen zu Geschichte, Archäologie und Kultur

Rezensionen aus der Redaktion von **epoc** finden Sie kostenfrei auch online – jüngst etwa zu »Archäologie im Vatikan. Die katholische Buchzensur«, »Persisches Feuer. Das erste Weltreich und der Kampf um den Westen« oder »Zeitalter des Irrationalen. Politik, Kultur und Okkultismus im 20. Jahrhundert«

www.epoc.de/rezensionen

Der zweite Ptolemäus

Ghyath-al-Din Jamshid al-Kashi gilt als der letzte große Mathematiker des islamischen Mittelalters. Heinz Klaus Strick stellt ihn am 1. Juni in seinem Mathematischen Monatskalender online vor

www.spektrum.de/monatskalender

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Die SciAm 10 – oder: Welche Ideen verändern die Welt?

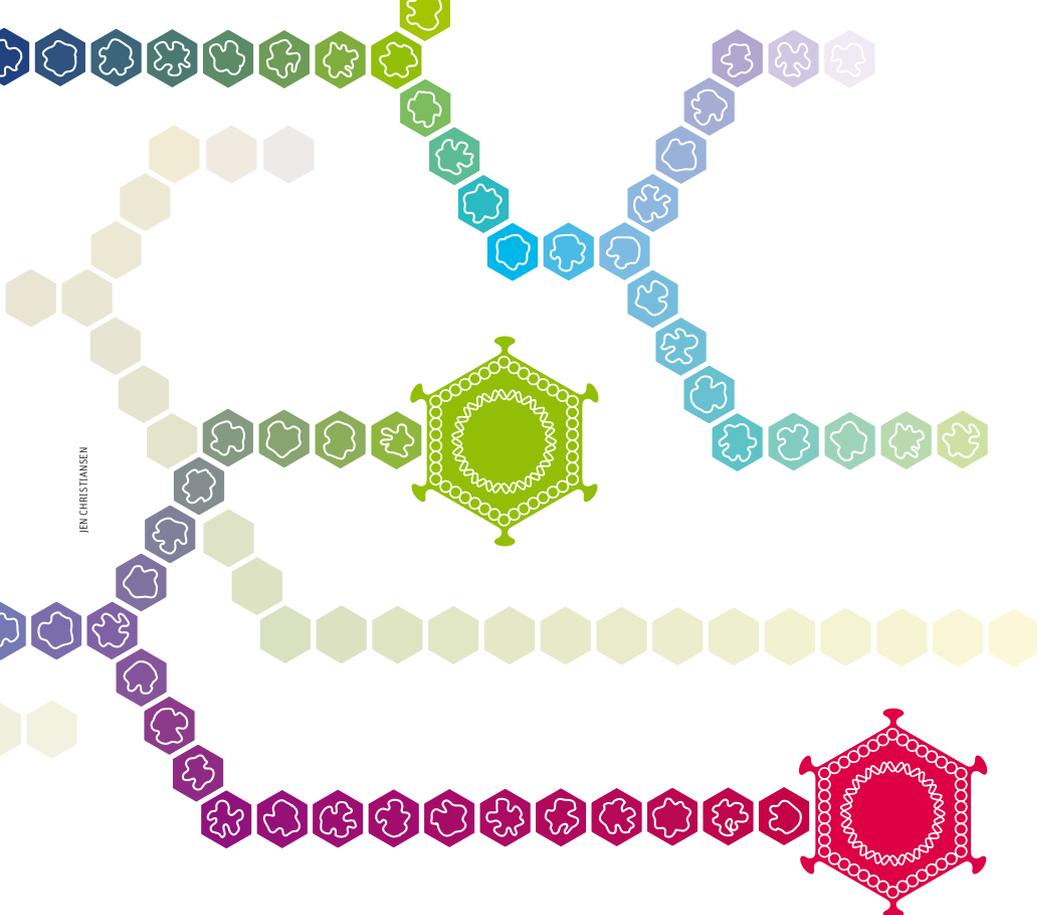
Zehn Wissenschaftler und Manager hat das Spektrum-Muttermagazin »Scientific American« ausgewählt. Den »SciAm 10« bescheinigt es außergewöhnliche Voraussicht und wegweisende Forschungsergebnisse, ob im Bereich Umweltschutz, Entwicklungshilfe oder Medizin. Wir stellen sie vor, fragen aber auch: Welche deutschen Forscher kennen Sie, deren Ideen die Welt verändern könnten?

www.spektrum.de/artikel/994056

Zauberei im Video

Thomas Fraps, Zauberkünstler und Autor des Beitrags auf S. 52 – »Neurotricks und Zaubерwissenschaft« –, können Sie auch online erleben

www.spektrum.de/zauberei



FÜR ABONNENTEN »Evolution im Alltag«

www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Evolution im Alltag«

Darwin konnte nicht ahnen, was seine Untersuchungen an Käfern und Vögeln einmal alles an technologischem Fortschritt auslösen würden, sogar außerhalb der Biologie. Vom Gesundheitswesen über die Forensik bis hin zur Informatik reicht das Spektrum bedeutender Anwendungen, die sich aus modernen evolutionsbasierten Verfahren ergeben

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Gehirn&Geist**
und **epoc** kostenlos online lesen

»Kultur existiert zwischen Gehirnen«

Die Hirnforschung zeigt: Kulturelle Einflüsse verändern die Art, wie unser Denkorgan Informationen verarbeitet. Doch diese Einsicht kann auch zu Fehlschlüssen verleiten, warnt der Psychiater und Philosoph Thomas Fuchs. Denn wir sind mehr als die Summe unserer Hirnprozesse

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

www.gehirn-und-geist.de/artikel/993812

»Als Eskimo mit den Eskimos leben«

Kultur ist nicht durch die Rasse bedingt, sondern eine Reaktion auf die Umwelt, postulierte der Begründer der modernen Anthropologie, Franz Boas, nach Expeditionen in die Arktis. Eine Erkenntnis, die Kritik erntete – nicht nur im nationalsozialistischen Deutschland

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE
LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

www.epoc.de/artikel/993830



FREIGESCHALTET

»Als Eskimo mit den Eskimos leben«

www.epoc.de/artikel/993830

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

www.spektrum.com

service@spektrum.com

Telefon 06221 9126-743

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Zehn Jahre Bologna

Ein »Bloggwitter« wird in der Woche vom 15. bis 21. Juni 2009 über den **wissenslogs** niedergehen. Zahlreiche Blogger und einige prominente Gastautoren werden sich dann genau einem Thema widmen, nämlich der »Hochschulpolitik nach Bologna«. Am 19. Juni 1999 hatten sich 29 europäische Bildungsminister auf die Schaffung eines europäischen Hochschulraums geeinigt. Was haben wir seit dem Start dieses »Bologna-Prozesses« gewonnen – und wie viel ist verloren gegangen? Wie erleben Studenten, Doktoranden, Professoren und Kommunikatoren die Lage an deutschen Universitäten? Treffen unsere schlimmsten Befürchtungen schon zu? Diskutieren Sie mit auf

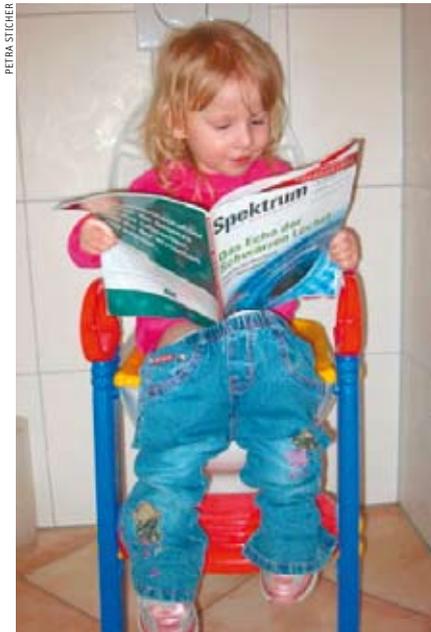
www.wissenslogs.de

www.scilogs.de

Allerjüngste Leserin

Seit zwei Jahren haben Sie eine sehr junge und begeisterte Leserin! Unsere Deborah ist sechs Jahre alt – sie verschlingt Ihre Zeitschrift und stellt Fragen, auf die wir selbst nie kommen würden. Eben diese Leserin bewegt mich dazu, Sie für einen Bericht über Hochbegabung zu gewinnen. In meiner Familie haben wir zwei hochbegabte Kinder. Mich würde nun interessieren, ob Hochbegabung erblich ist oder nicht.

Petra Sticher, Rastatt



Deborah, 6 Jahre alt, liest seit zwei Jahren Spektrum der Wissenschaft.

Früheste Brustamputation?

Fortschritte in der Brustkrebstherapie, März 2009

Die erste Brustamputation fand laut Mitteilung im »New Scientist« vom 7. März 2009 offenbar etliche Jahrzehnte früher statt als in dem Artikel angegeben. Die englische Schriftstellerin Fanny Burney wurde bereits im Jahr 1811 auf diese Weise behandelt – ohne Betäubung. Weitgehend unbekannt ist auch, dass der japanische Chirurg Seishu Hanaoka bereits am 13. Oktober 1804 bei der 60-jährigen Kan Aiya die krebserkrankte Brust entfernt und dabei ein von ihm entwickeltes, auf einheimischen Pflanzen basierendes Betäubungsmittel benutzt hat.

Jörg Michael, Hannover

Thema verfehlt

Wie aus Chaos Ordnung entsteht, April 2009

Leider beantwortet J. Miguel Rubi die eher philosophische Frage nicht, wie aus Chaos Ordnung entstehen kann – er behandelt die Frage nicht einmal. Er legt dar, dass der zweite Hauptsatz der Thermodynamik – der eigentlich nur für Systeme im Gleichgewicht gilt – auch für Systeme gilt, die sich nicht im Gleichgewicht befinden. Damit sagt der Autor aber nur, dass die (lokale) Entstehung

von Ordnung dem Entropiesatz nicht widerspricht. Ein Ereignis mit einer Theorie für vereinbar zu erklären ist jedoch etwas völlig anderes, als die ursächlichen Prinzipien aufzudecken und dieses Ereignis aus einer Theorie deduktiv abzuleiten.

Thorsten Amrhein, Hannover

Insuffizientes Schuhwerk bei *Homo erectus*?

Fußabdruck eines Frühmenschen, Bild des Monats, April 2009

Das Bild zeigt den Abdruck eines linken Vorfußes mit typischer Hammerzehe der zweiten Zehe: fixierte krallenartige Beugung der Zehe, beim modernen Menschen meist durch insuffizientes Schuhwerk ausgelöst. Aprilscherz? Oder hat es bereits vor 1,5 Mio Jahren zu enge Schuhe gegeben?

Dr. Gerhard Struhal, Wien

Antwort

von Prof. Dr. Winfried Henke, Anthropologisches Institut der Universität Mainz:

Dieser von Matthew Bennett beschriebene Fußabdruck eines *Homo erectus* ist sicherlich keine Fälschung. Es stellt sich durchaus die Frage, ob die Länge und Krümmung der Zehen unserer Anatomie schon völlig entsprechen. Aber

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hofer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistent: Eva Kahlmann
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könniker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Gabriele Herbst, Dr. Peter John, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/Sfr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 61696-145; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Josephshospitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 30 vom 01.01.2009.
Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg
 Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei

der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
 Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2009 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
 Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandene Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
 ISSN 0170-2971
SCIENTIFIC AMERICAN
 415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
 Editor in Chief: John Rennie, Chairperson: Annette Thomas, President: Steven Yee, Vice President: Frances Newburg, International Managing Director: Kevin Hause, Vice President, Finance and General Manager: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



Die Ethik des Klimawandels

April 2009

Fair bestimmter Preis

Ein fairer Maßstab zur Bestimmung vertretbarer Umweltschäden kann nur im Konsens mit den Geschädigten gefunden werden – den Preis einer Ware kann man schwerlich fair bestimmen, wenn eine Partei ihn allein festlegt. Wir können zukünftige Generationen aber nicht nach ihrer Meinung fragen. Wäre es da nicht selbstverständlich, dass wir ihnen den Planeten zumindest in dem Zustand übergeben, in dem wir ihn von unseren Eltern empfangen?

Christian Hornstein, Bonn

Ungeeignete Methode

Anders als der Titel behauptet, geht es hier nicht um die »Ethik des Klimawandels«, sondern um die Ethik von Kosten-Nutzen-Analysen. Diese sind eine etablierte Methode, die indes auf globale ökologische Probleme wie den Klimawandel oder den Biodiversitätsverlust kaum sinnvoll anwendbar ist:

► Kosten-Nutzen-Analysen rechnen einen Verlust hier gegen einen Gewinn dort auf. Die Natur funktioniert aber nicht nach dieser Logik der Substituierbarkeit.

► Kosten-Nutzen-Analysen nehmen an, dass mehr materieller Wohlstand

zu mehr Wohlergehen der Menschen führt. Bis zu einem gewissen Wohlstandsniveau ist das richtig; darüber hinaus aber geht es den Menschen nicht besser, wenn sie mehr besitzen (Easterlin-Paradox).

► Kosten-Nutzen-Analysen gehen davon aus, dass die Weltwirtschaft wächst, weshalb sie die Zukunft diskontieren. William Nordhaus etwa rechnet in seinen Szenarien bis in Jahr 2200 mit einem durchschnittlichen Wachstum von vier Prozent. Das ist eine abenteuerliche, spekulative Annahme, gibt es doch überhaupt erst seit etwa 100 Jahren ein globales Wirtschaftswachstum von mehr als einem Prozent.

► Die Notwendigkeit, den Wert eines Menschenlebens zu schätzen, führt zu ethisch nicht haltbaren Resultaten: Man misst diesen Wert beispielsweise, indem man betrachtet, für wie viel mehr Lohn jemand bereit ist, eine Arbeit anzunehmen, die seine statistische Lebenserwartung um ein Jahr senkt. Das hat 1995 zum bisher heftigsten Streit im Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) geführt, weil die Autoren im Entwurf zum IPCC-Bericht vorgeschlagen hatten, ein Menschenleben in einem Industrieland mit

1,5 Millionen Dollar, eines in einem Entwicklungsland mit 150 000 Dollar zu bewerten.

Als Alternative zu den Kosten-Nutzen-Analysen geht das Vorsorgeprinzip davon aus, dass gewisse Risiken unbedingt zu vermeiden sind. Das Vorsorgeprinzip ist im Zusammenhang mit dem Klimawandel umso mehr angebracht, als viele Risiken gar nicht abschätzbar und die Prozesse des Klimasystems irreversibel sind.

Marcel Hänggi, Zürich

Blanker Zynismus

Es ist blanker Zynismus, auszurechnen, wie viel Klimakatastrophe wir den kommenden Generationen zumuten können – abgesehen davon, dass wir uns nie auf ein Rechenverfahren und die Diskontierungsfaktoren einigen werden. Ökonomen schmeckt das verständlicherweise nicht, glauben sie doch an das immerwährende Wachstum, obwohl ihnen klar ist, dass die Rohstoffe und Märkte begrenzt und nahezu erschöpft sind. Schon vor fast 250 Jahren hat Emanuel Kant gesagt, dass der Mensch eine Würde, aber keinen Preis hat – dass man ihm sein Existenzrecht also nicht abkaufen kann.

Karl-Heinz Haid, Isny-Beuren

die Hammerzehen-Diagnose von Herrn Struhal halte ich für falsch. Dass die Abdrücke nicht optimal und interpretationsbedürftig sind, ist klar. Das aber trifft für alle Verhaltensfossilien zu.

Evolutionstheorie und Religion schließen sich nicht aus

Der Glaube ist eine Waffe im Kampf ums Dasein, April 2009

In diesem Artikel sind zwei Punkte richtigzustellen. Erstens geht es keineswegs darum, Evolutionstheorie und Religion zu verbinden, so wenig wie etwa Musiklehre und Quantenphysik miteinander verbunden werden können. Vielmehr müsste gezeigt werden, dass beide nebeneinander existieren können, beide ihre Berechtigung haben und sich nicht ausschließen. Das ist verschiedenen Verfassern in den letzten Jahren auf überzeugende Weise ge-

lungen (zum Beispiel David Sloan Wilson: »Evolution for Everyone«).

Zweitens wird Darwin mehrmals fälschlicherweise als Atheist bezeichnet, das heißt die Position des Atheismus (es gibt keinen Gott) wird mit der des Agnostizismus (wir können nicht wissen, ob es einen Gott gebe) verwechselt. Darwin war Agnostiker und kein Atheist! Er hat es abgelehnt, sich mit Fragen zu befassen, die er nicht beantworten konnte, und sich lieber mit solchen abgegeben, deren Beantwortung ihm möglich und sinnvoll erschien.

Felix Thommen, Regensdorf, Schweiz

Religion = Glaube?

Müssen wir glauben?, April 2009

Die Begriffe Religion und Glaube werden häufig synonym verwendet; dabei ist die Religion ein Spezialfall des Glaubens. So hat jedes Phänomen der Religion mit

Glauben zu tun, aber nicht umgekehrt. Atheisten haben keine Religion, wohl aber einen Glauben. Der Glaube ist ein psychologischer Instinkt vergleichbar mit einem Gefühl wie Liebe, Hass, und liegt somit in der Natur des Menschen – die Religion hingegen ist ein gesellschaftliches Phänomen.

M. Ali Sarikaya, Hamburg

Briefe an die Redaktion ...

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

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Redaktion Leserbriefe
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

MEDIZIN

Herzzellen können regenerieren

■ Durch Kernreaktionen entsteht in der oberen Atmosphäre unablässig in geringem Umfang das Kohlenstoffisotop ^{14}C , auch Radiokohlenstoff genannt. Bei Atombombentests während des Kalten Kriegs gelangten große Mengen davon zusätzlich in die Lufthülle. Die ^{14}C -Konzentration in der Atmosphäre erreichte deshalb Mitte der 1960er Jahre ein Maximum und sank danach wieder ab.



MATTIAS KARLEN / SCIENCE

Anhand dieses Faktums konnten Forscher um Olaf Bergmann vom Karolinska Institut in Stockholm nun zeigen, dass sich Herzmuskelzellen beim Menschen stetig erneuern. Sie fanden in der Erbsubstanz während der Atomtests geborener Personen nicht die zu erwartende hohe ^{14}C -Konzentration. Demnach waren Herzzellen ausgetauscht worden, nachdem sich der ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre wieder verringert hatte. Bei vor den Tests geborenen Probanden lag die ^{14}C -Konzentration dagegen über dem Erwartungswert: Hier bauten die später gebildeten Herzzellen das nach den Atomtests in größerer Menge vorhandene ^{14}C vermehrt in ihre DNA ein.

Bergmann und seine Kollegen errechneten aus ihren Daten eine mit dem Alter abnehmende Erneuerungsrate zwischen 0,45 und 1 Prozent pro Jahr. Bisher gab es keinen Hinweis auf eine solche Regeneration. Bei einem Herzinfarkt werden die verlorenen Herzzellen nicht nachgebildet, sondern durch Bindegewebszellen ersetzt.

Science, Bd. 324, S. 98

Bei überirdischen Atombombentests wurde Radiokohlenstoff in großen Mengen frei und vermehrt auch vom Herzen aufgenommen – was für eine kontinuierliche Regeneration dieses Organs spricht.

HIRNFORSCHUNG

Egoshoooter fördern Kontrastsehen

■ Die Öffentlichkeit lässt derzeit kein gutes Haar an gewaltdominierten Videospiele – stehen sie doch im Verdacht, Mitschuld an einer Reihe schrecklicher Amokläufe von Jugendlichen zu tragen. Doch nach neuen Erkenntnissen haben sie auch positive Auswirkungen: Egoshoooter verbessern die Fähigkeit, unter schlechten Sichtverhältnissen feine Grautöne zu unterscheiden. Ob das die negativen Effekte aufwiegt, ist allerdings fraglich.

Neurobiologen um Daphne Bavelier an der University of Rochester (US-Bundesstaat New York) ließen Probanden über neun Wochen hinweg 50 Stunden lang Egoshoooter spielen und untersuchten dann ihre Sehfähigkeit. Für die Mitglieder der Vergleichsgruppe gab es ein grafisch genauso aufwändiges Strategiespiel. Bei den Versuchspersonen, die sich mit dem Egoshoooter vergnügten, erhöhte sich die Kontrastsensitivität um durchschnittlich 43 Prozent. Bei der Vergleichsgruppe trat dagegen kein solcher Effekt auf.

Kontrastsensitivität ist wichtig für das Sehen unter schlechten Lichtverhältnissen wie beim nächtlichen Autofahren. Eine Verbesserung durch Training galt bisher als unmöglich.

Nature Neuroscience, Bd. 12, S. 549

ASTRONOMIE

Massenkarambolage im All

■ Im System MACSJ0717, einem gigantischen Himmelsobjekt in rund 5,4 Milliarden Lichtjahren Entfernung von der Erde, konnten Cheng-Jiun Ma von der University of Hawaii und Kollegen erstmals eine Art kosmische Massenkarambolage beobachten. Dort rasen gleich mehrere Galaxienhaufen ineinander. Solche Haufen bestehen jeweils aus mehreren Milchstraßensystemen und sind die größten gravitativ zusammengehaltenen Gebilde im Universum.

Die Wissenschaftler nutzten optische Bilder des Hubble-Weltraumteleskops sowie des Keck-Observatoriums auf Hawaii und bezogen Röntgenaufnahmen des Chandra-Observatoriums in die Analyse mit ein. Aus den Daten konnten sie die dreidimensionale Geometrie und die

Bewegungen in dem System rekonstruieren. Demnach sind vier separate Galaxienhaufen an der Kollision beteiligt. Einen kosmischen Crash von diesem Ausmaß hatte bisher noch niemand entdeckt.

Tatsächlich ähnelt die Situation derjenigen bei einem Auffahrunfall. Die Galaxienhaufen liegen aufgereiht in einem Band – oder Filament – mit einer Länge von 13 Millionen Lichtjahren, das mit Gas und Dunkler Materie vollgepackt ist. Sie bewegen sich, als seien sie in dieser gigantischen Ansammlung von Masse sukzessive aufeinandergeprallt. Dabei ballte sich das intergalaktische Gas zusammen, während sich die Galaxien in den Haufen fast ungebremst weiterbewegten. Die bei diesen Kollisionen freigesetzten enor-



MASA, STACEY / KECK / IFA HAWAII, CHENG-JIUN MA ET AL.

In der aus optischen und Röntgendaten zusammengesetzten Falschfarbenaufnahme von MACSJ0717 erscheinen heiße Gebiete blau und kalte rötlich.

men Wärmemengen heizten MACSJ0717 derart auf, dass es sogar im Röntgenbereich strahlt.

The Astrophysical Journal, Bd. 693, L56



BEIDE FOTOS: BENJAMIN URMSTON FÜR JILL A. MIKUCKI ET AL.



Am »Blutwasserfall« im McMurdo-Tal in der Ostantarktis tritt durch Eisenverbindungen rot gefärbtes Wasser aus dem Untergrund des Taylorgletschers aus.

ÖKOLOGIE

Leben unter dem Gletscher

■ Bakterien sind höchst anpassungsfähig. Manche leben in siedend heißen Quellen, andere in extrem kalten Gegenden wie der Antarktis. Dort hat ein Forscherteam um Jill Mikucki von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) nun Mikroorganismen entdeckt, wo sie niemand vermutete: in einem Salzwasserreservoir, eingeschlossen zwischen 400 Meter dicken Eismassen und dem Felsboden.

An diesem wahrhaft ungemütlichen, stockfinsternen Ort liegt die Temperatur bei minus zehn Grad Celsius. Es gibt dort keinen Sauerstoff, und das Wasser ist viermal so salzig wie im Meer, weshalb es nicht gefriert. Wie gewinnen die Bakterien die Energie zum Leben? Die Wissenschaftler entdeckten in ihren Proben auch Eisen- und Schwefelverbindungen. Auf deren Basis haben die Einzeller offenbar einen Energiestoffwechsel entwickelt.

Mikucki und ihre Kollegen schätzen das Alter des neu entdeckten Ökosystems auf 1,5 Millionen Jahre. Damals sank der Meeresspiegel und hinterließ isolierte Meerwasserbecken. Über eines schob sich im östlichen Teil der Antarktis der Taylorgletscher. In den Überbleibseln des eingeschlossenen Meerwassers leben bis heute die nun entdeckten Bakterien.

Die Wissenschaftler stießen auf das neue Ökosystem, als sie die so genannten Blutwasserfälle untersuchten, die aus dem Taylorgletscher herausprudeln. Sie tragen diesen Namen, weil sie mit ihrem eisenhaltigen Wasser den Untergrund rötlich färben. Dass Bakterien unter so extremen Lebensbedingungen mehr als eine Jahrmillion überdauern konnten, werten die Forscher als Indiz für die mögliche Existenz von Leben auch auf anderen Planeten.

Science, Bd. 324, S. 397

VERHALTENSBIOLOGIE

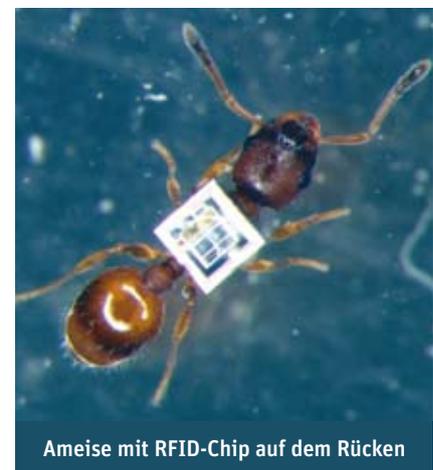
Ameisen auf Wohnungssuche

■ Ein Umzug ist immer eine logistische Herausforderung. Das Problem beginnt schon mit der Wahl des neuen Domizils. Ameisenkolonien haben sehr viele Mitglieder. Schon allein deshalb können sie es schlecht wie wir Menschen machen und die in Frage kommenden neuen Nestplätze von jedem künftigen Bewohner begutachten lassen, bevor schließlich nach eingehender kollektiver Meinungsbildung abgestimmt wird. Daher haben die Insekten, wie Forscher um Nigel R. Franks von der University of Bristol (England) nun herausfanden, ein weniger aufwändiges Verfahren entwickelt, das aber mindestens genauso erfolgreich und nicht minder demokratisch ist.

Im Experiment stellten die Wissenschaftler einer Kolonie von Schmalbrust-

ameisen der Art *Temnothorax albipennis* für den Umzug einen eher ungünstigen Nestplatz in nächster Nähe und einen gut geeigneten in der neunfachen Entfernung zur Verfügung. Um die Tiere bei der Suche zu beobachten, statteten sie einige Individuen mit winzigen »Radio Frequency Identification Tags« (RFID-Tags) aus.

Wie sich zeigte, fahnden zunächst »Pfadfinder« nach möglichen Orten. Wenn sie einen Platz gefunden haben, der ihnen zusagt, führen sie andere Kolonienmitglieder dorthin. Sobald sich eine Mindestanzahl von Ameisen an einer Stelle versammelt hat, signalisiert das: Hier lässt es sich gut leben. Dann beginnt die gesamte Kolonie an diesen Ort umzuziehen. Obwohl nur sehr wenige Tiere einen direkten Vergleich



Ameise mit RFID-Chip auf dem Rücken

NIGEL FRANKS, UNIVERSITY OF BRISTOL

zwischen den potenziellen Nestplätzen angestellt haben, wird am Ende der beste gewählt – auch wenn dieser, wie bei dem Experiment, viel weiter entfernt ist.

Proceedings of the Royal Society B, Online-Vorabpublikation

ARCHÄOLOGIE

Kultstätten mit Sohlenform

■ Genau 39-mal taucht das hebräische Wort »gigal« in der Bibel auf. Es beschreibt ein Bauwerk aus Stein, das bislang aber keinem archäologischen Fund zugeordnet werden konnte. Forscher um Adam Zertal von der Universität Haifa (Israel) glauben, das Rätsel nun gelöst zu haben.

Bei Ausgrabungen im Jordantal und auf Hügeln westlich davon legten sie in den Jahren 1990 bis 2008 fünf Steinstrukturen frei, die bis zu 200 Meter lang und 80 Meter breit sind und deren Umrise allesamt an eine riesige Schuhsohle erinnern. Der Grund für diese seltsame Form ist wohl, dass die Israeliten damit ihren Besitzanspruch geltend machen wollten; denn der menschliche Fuß wird in der Bibel als Symbol für Besitz gebraucht.

Nach Vermutung der Archäologen wurden die Steinmauern während der Eisenzeit gegen Ende des 13. Jahrhunderts v. Chr. errichtet. Folglich zählen sie zu den ältesten Bauwerken der Israeliten nach der Rück-



Wie eine Schuhsohle war diese 200 Meter lange Anlage im Jordantal geformt, von der nur noch die Umrise erhalten sind. Bei dem 3300 Jahre alten Bauwerk handelt es sich vermutlich um ein bislang rätselhaftes »gigal« aus der Bibel.

kehr ins »gelobte Land« Kanaan. Genutzt wurden die »gigal« laut Bibel für Versammlungen, zur Vorbereitung von Kämpfen und für Zeremonien. Bei zwei der riesigen »Schuhsohlen« entdeckten die Forscher einen etwa zwei Meter breiten, gepflasterten Weg, der um die Steinstruktur herumführte. Zertal vermutet, dass er für Prozessionen um das Bauwerk während ritueller Anlässe diene.

Pressemitteilung der Universität Haifa

CHEMIE

Riesenmoleküle mit neuer Bindungsart

■ Vor wenigen Jahren entdeckten Theoretiker bei Computersimulationen überraschend eine mögliche neue Art von chemischer Bindung. Jetzt haben Forscher um Tilman Pfau von der Universität Stuttgart die experimentelle Bestätigung geliefert.

Die entscheidende Rolle bei dem neuen Bindungsmechanismus spielt ein »Ryd-

berg-Elektron«. Es ist extrem hoch angeregt und hält sich deshalb im Mittel sehr weit vom zugehörigen Atomkern entfernt auf. Bei Annäherung an ein anderes Atom polarisiert es dieses mit Hilfe seines elektrischen Felds. Von diesem induzierten Dipol wird es dann seinerseits angezogen.

Zwei so verbundene Atome können tausendmal weiter voneinander entfernt sein als in allen bislang bekannten normalen zweiatomigen Molekülen. Mit Abmessungen von 100 Nanometern erreicht das Paar sogar die Größenordnung von Viren.

Allerdings ist die Bindung sehr schwach. Um solche Riesenmoleküle zu erzeugen, mussten die Stuttgarter Forscher deshalb die als Partner ausgewählten Rubidiumatome auf extrem tiefe Temperaturen abkühlen. Anschließend beschossen sie dieses ultrakalte Gas mit Laserlicht und hoben dadurch das äußerste Elektron auf die Rydbergbahn. Dass tatsächlich Moleküle entstanden, zeigte sich in einer Erniedrigung der zum Anheben benötigten Energie um einen Betrag, welcher der Bindungsenergie des Atompaars entspricht.

Nature, Bd. 458, S. 1005

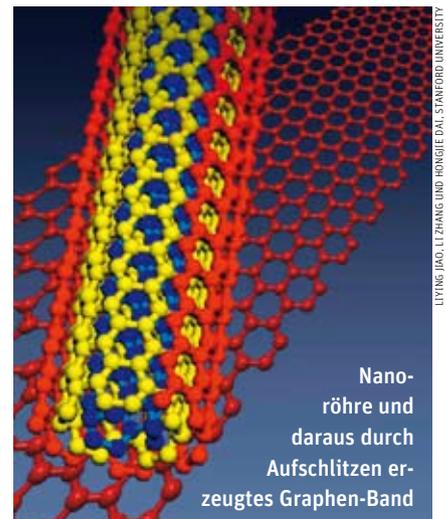
ELEKTRONIK

Graphenbänder aus Nanoröhren

■ Ideal geeignet als Komponenten künftiger elektronischer Schaltkreise wären Graphen-Nanobänder, die je nach Breite metallisch oder halbleitend sein können. Sie bestehen im günstigsten Fall aus einer einzigen Schicht von wabenartig angeordneten Kohlenstoffatomen.

Bisher waren sie allerdings nur mühsam herstellbar. Zwei Forschergruppen haben nun Wege zur möglichen Massenfertigung gefunden: Sie nehmen die schon länger bekannten Nanoröhren, die sich leicht produzieren lassen und mittlerweile in Gramm-mengen kommerziell erhältlich sind, und schneiden sie einfach der Länge nach auf.

Wissenschaftler um Liying Jiao von der Stanford University (Kalifornien) benutzen dazu ein Argonplasma. Damit ätzen sie die



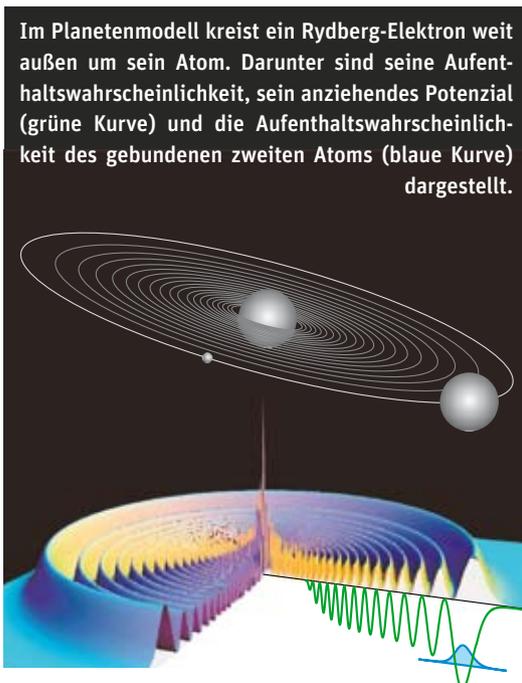
Nanoröhre und daraus durch Aufschlitzen erzeugtes Graphen-Band

LIYING JIAO, LI ZHANG UND HONGJIE DAI, STANFORD UNIVERSITY

Nanoröhren, die sie vorher in einen Polymerfilm eingebettet haben, an einer Seite an. Der Kunststoff lässt sich anschließend mit Lösungsmitteldampf und durch Erhitzen auf 300 Grad Celsius entfernen. Die so erhaltenen Nanobänder sind nur 20 Nanometer breit und halbleitend. Sie bestehen aus ein bis drei Graphenschichten.

Dmitry V. Kosynkin von der Rice University in Houston (Texas) versetzt die Nanoröhren mit konzentrierter Schwefelsäure und Kaliumpermanganat. Beim Erhitzen auf 55 bis 70 Grad Celsius bilden sich so vier Mikrometer lange und 100 bis 500 Nanometer breite Bänder. Allerdings bestehen sie aus nichtleitendem Graphenoxid. Daher muss der Sauerstoff nachträglich wieder entfernt werden. Danach sind die Bänder wegen ihrer Breite metallisch leitend.

Nature, Bd. 458, S. 872 und 877



Im Planetenmodell kreist ein Rydberg-Elektron weit außen um sein Atom. Darunter sind seine Aufenthaltswahrscheinlichkeit, sein anziehendes Potenzial (grüne Kurve) und die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des gebundenen zweiten Atoms (blaue Kurve) dargestellt.

UNIVERSITÄT STUTTGART

Garnelendämmerung

»Darf ich bitten zum Tango am Meeresgrund«, scheint diese Eismeergarnele zu sagen, während sie tänzelnd auf ihren sechs Hinterbeinen balanciert. Dabei sollte sie eigentlich deprimiert sein. Droht ihr doch nicht nur der Kochtopf, weil Grönland-Schrimps, wie die possi-lichen Tierchen meist auf Speisekarten heißen, heute auch außerhalb von Fein-schmeckerkreisen als Deli-katesse geschätzt werden. Vielmehr könnte der Klima-wandel sogar die ganze Art ins Verderben stürzen. Wie

sich nun zeigte, stimmen die Eismeergarnelen ihre Brut-phase derart auf die alljähr-liche Frühjahrsalgenblüte ab, dass für die frisch ge-schlüpften Jungtiere der Tisch reichlich gedeckt ist. Dabei orientieren sich die Weib-chen an der Wassertempera-tur. Die aber steigt durch die globale Erwärmung. Dadurch gerät das Timing durcheinan-der, und der Nachwuchs droht zu verhungern. Das wäre auch für die Fischerei-Industrie fatal, die jährlich 350 000 Tonnen der Zehnfuß-krebse aus dem Meer holt.

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

Wasserstoff aus Biomüll

Spezielle Bakterien können aus pflanzlichem Material durch Gärung Wasserstoff erzeugen. Bioabfälle wären so eine umweltfreundliche und preiswerte Quelle für den Energieträger der Zukunft.

Von Lars Fischer

Auf kaum einem anderen Stoff ruhen so viele Hoffnungen wie auf dem Wasserstoff. Als künftiger Energieträger soll er Elektromotoren ebenso zuverlässig antreiben wie Raketen; zurück bleibt nur harmloser Wasserdampf. Woher das Gas in den nötigen Mengen kommen soll, ist allerdings noch fraglich. Als Option gilt etwa die Elektrolyse von Wasser mit Strom aus riesigen Solaranlagen in sonnenreichen Ländern.

Eine verlockende Alternative hat nun Luca Alibardi von der Universität Padua vorgeschlagen. Man könne Wasserstoff auch aus Bioabfällen gewinnen, berichtete er jüngst auf der Copenmind-Technologiekonferenz in Kopenhagen. Und zwar direkt durch Gärung.

Derzeit wird Wasserstoff technisch aus Erdgas erzeugt: durch Dampfreformierung von dessen Hauptbestandteil Methan. Auch das Biogas, das 3000 Anlagen allein in Deutschland inzwischen durch Vergärung von Biomasse produzieren, besteht großenteils aus Methan. Meist wird es zur Stromerzeugung und Gewinnung von Wärme verbrannt. Genauso gut ließe sich daraus ebenfalls Wasserstoff produzieren. Die von Alibardi vorgeschlagene biologische Lösung ist allerdings viel eleganter: Man spart sich den Umweg über Methan und erzeugt den Wasserstoff direkt aus der Biomasse-Vergärung. Man braucht dazu nur spezielle Mikroorganismen.

Deutsche Forscher arbeiten bereits seit 2004 daran, Energiepflanzen wie Mais für die Wasserstoffwirtschaft nutz-

bar zu machen. Rainer Stegmann von der Technischen Universität Hamburg-Harburg hat früher mit Alibardi kooperiert. »Unser Verfahren entspricht im Prinzip der Erzeugung von Biogas, wir steuern den Prozess aber so, dass in der ersten Stufe ausschließlich Wasserstoff entsteht«, erklärt er.

Der wesentliche Unterschied liegt in den Bakterien, die im Fermenter leben. Statt methanogener Mikroben kommen Arten von *Thermoacetobacter* und *Thermotoga* oder Clostridien zum Einsatz. Sie verwerten das Substrat bei erhöhter Temperatur und in saurem Milieu. Aus einem Molekül Glukose entstehen dabei je zwei Moleküle Essigsäure und Kohlendioxid sowie vier Moleküle Wasserstoff – zumindest theoretisch. »In der Realität sind es weniger, weil unter realen Bedingungen auch Propionsäure und Buttersäure anfallen«, erklärt Stegmann. Das reduziert die Ausbeute.

Die nötigen Mikroorganismen sind leicht zu beschaffen. Man findet sie fast überall: in Komposthaufen, Abwässern von Zuckerfabriken oder im Klärschlamm. Sogar an Hydrothermalquellen in der Tiefsee kommen sie vor. Zwar muss man sie zunächst von den gleichfalls allgegenwärtigen Methanbildnern befreien. Doch dazu genügt es, die Probe für eine halbe Stunde auf 80 Grad zu erhitzen. Das ist normalen Fäulnisbakterien zu warm, für die Wasserstoffbildner aber gerade richtig.

Da während der Vergärung kontinuierlich Säure entsteht, setzt man dem Substrat Kalziumkarbonat als Puffer zu, der den pH-Wert im günstigen Bereich zwischen fünf und sechs hält. Wie viel

Aus Maiskörnern gewonnene Stärke kann als Ausgangsmaterial zur Gewinnung von Wasserstoff in einem mikrobiologischen Fermentationsprozess dienen.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG-HARBURG

In diesem Versuchsfermenter, der zur Minimierung von Wärmeverlusten mit Aluminiumfolie umwickelt ist, vergären spezielle Bakterien Kohlehydrate zu Wasserstoff.

Wasserstoff in dieser ersten Stufe des Verfahrens entsteht, hängt davon ab, wie viel Zucker das Substrat enthält. Reine Glukose ergibt 280 Milliliter pro Gramm, bei Zuckerrüben sind es immerhin noch 188.

Zum Animpfen der Wasserstoffstufe verwendet Stegmann wärmebehandelten Klärschlamm, der eine Mischkultur verschiedener wasserstoffbildender Mikroorganismen enthält. Das ist nicht nur einfacher, als eine definierte Bakterienkultur einzusetzen, sondern überraschenderweise auch effektiver. Stämme wasserstoffbildender Mikroben, die der Forscher zusammen mit einem Harburger Kollegen isolierte, boten letztlich keinen Vorteil: Selbst wenn sie in der Petrischale überdurchschnittlich viel Wasserstoff produzierten, waren sie in der Praxis der Mischkultur nicht überlegen.

Mehr Energie in zwei Stufen

Weil die Wasserstoffbildner energiereiche Moleküle als Abfallprodukte ausscheiden, gewinnt man in Form von Wasserstoff weniger Energie, als im Methan aus der gleichen Biomasse enthalten wäre, räumt Stegmann ein. Wasserstoff ist wegen seiner Vielseitigkeit allerdings das höherwertige Produkt. Außerdem lässt sich aus den Abfällen der Vergärung, die große Mengen Essig- und Propionsäure enthalten, in einer weiteren Stufe auf herkömmliche Weise Methan gewinnen. Dadurch ist die Energieausbeute insgesamt im Idealfall ungefähr genauso hoch wie bei der normalen Biogasproduktion. Die Wasserstoffstufe, so der Plan, soll bestehenden Biogasanlagen vorgeschaltet werden, um den Aufwand zur Umrüstung möglichst klein zu halten.

Funktioniert das Verfahren tatsächlich so gut wie erhofft, droht es sich allerdings mit seinem Erfolg selbst in Frage zu stellen; denn Energiepflanzen wie Mais oder Zuckerrübe konkurrieren direkt mit der Lebensmittelproduktion um Dünger und Ackerland. So trieb die Nachfrage nach Bioethanol aus Mais im Januar 2007 die



Lebensmittelpreise derart in die Höhe, dass es zum Beispiel in Mexiko zu Protesten und Krawallen kam.

Deshalb schlägt Alibardi vor, langfristig auf Abfälle zurückzugreifen, die sonst weggeworfen würden. Der geringe Preis des Rohstoffs wiegt dann die niedrigere Ausbeute an Wasserstoff mehr als auf. Sogar den Biomüll von Haushalten will der Forscher auf diese Weise verwerten.

Die Vergärung von Küchenabfällen liefert, wie er festgestellt hat, noch etwa fünf Gramm Wasserstoff pro Kilo. Aus Deutschlands Biomüll ließen sich so jährlich immerhin etwa 60000 Tonnen Wasserstoff herstellen – genug für den Betrieb von einer halben Million Autos.

Lars Fischer ist Chemiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

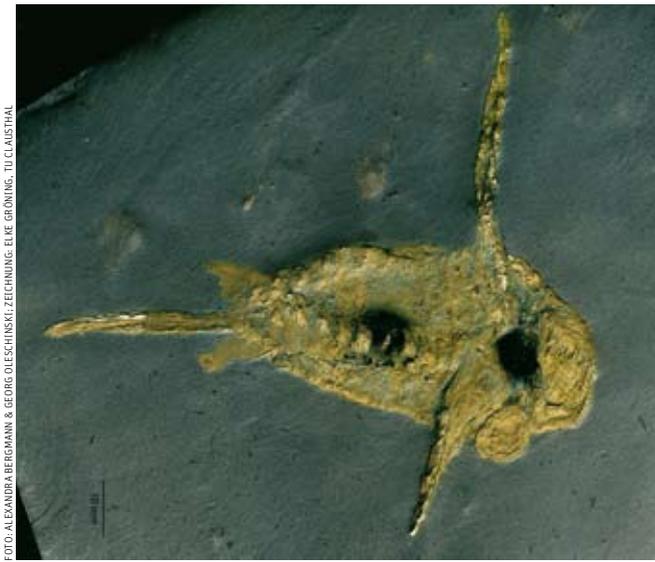
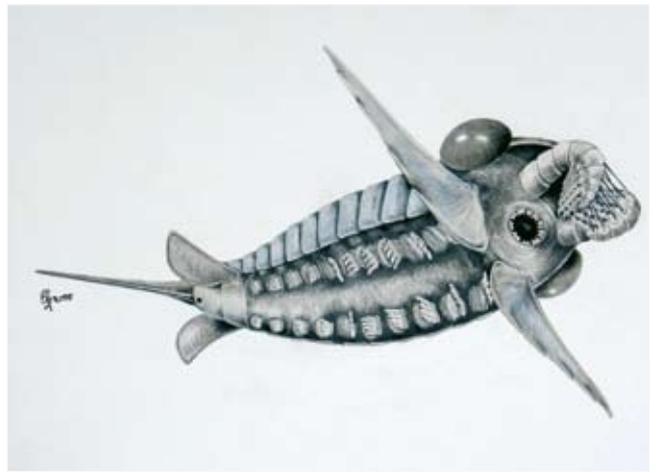


FOTO: ALEXANDRA BERGMANN & GERICH OLESCHINSKI; ZEICHNUNG: ELKE GRÖNING, TU CLAUSTHAL



Das links abgebildete Fossil aus dem Hunsrück gehörte zu einem ausgefallenen Urzeittier, dessen Rekonstruktion rechts gezeigt ist.

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

Exotischer Fossilfund im Hunsrück

Wie der Schinderhannes postum Pate eines uralten Räubers wurde.

Von Michael Groß

Der Hunsrück ist ein dünn besiedelter Landstrich zwischen Mosel, Nahe und Rhein, der dem Wanderer eine abwechslungsreiche Landschaft mit Hügeln und Wäldern bietet. Grandiose Burgruinen wie etwa die Schmidburg deuten auf eine bewegte Vergangenheit hin. Seit Simmern, damals die Hauptstadt eines unabhängigen Staats, im Pfälzischen Erbfolgekrieg 1689 dem Erdboden gleichgemacht wurde, tendiert die politische Bedeutung der Gegend jedoch gegen null.

Der berühmteste Hunsrücker ist vermutlich Johannes Bückler (1779–1803), besser bekannt als der Schinderhannes. Wie sein Vater und dessen Vorfahren hatte er das Handwerk des Abdeckers gelernt; heute würde man Tierkadaververwertungsexperte sagen. Schon früh entschied er sich allerdings für eine kriminelle Laufbahn. In weniger als zehn Jahren soll er mit über 90 Kumpanen in wechselnden Banden mehr als 130 Straftaten begangen haben, vor allem Diebstähle und Raubüberfälle. Dann wurde er hingerichtet.

Warum das hier interessiert? Nun, Paläontologen haben jetzt einen spektakulären Fossilfund aus dem Hunsrück nach dem berüchtigten »Lumpenhund« benannt und so zu seinem Nachruhm auch in Kreisen beigetragen, die mit Carl Zuckmayers Theaterstück über ihn nicht

unbedingt vertraut sind (*Science*, Bd. 323, S. 771).

Die Namenswahl scheint insofern passend, als *Schinderhannes bartelsi* mit seinen bedrohlichen Klauen, die direkt vor dem kreisrunden Maul angeordnet sind, sicher ebenfalls ein übler Räuber war. Er gehört zu jenen merkwürdigen Urzeittierchen, die massenhaft im etwa 505 Millionen Jahre alten Burgess-Schiefer in Kanada gefunden wurden und mit ihren ausgefallenen, ja exotischen Körperbauplänen die Evolutionsforscher faszinieren.

Mehr als eine Laune der Natur

Bisher galt diese seltsame Tierwelt als eine vorübergehende Laune der Natur. Das Schinderhannesfossil aus dem Schieferbergwerk in Bundenbach liefert nun jedoch den sensationellen Gegenbeweis; denn der Hunsrücker Schiefer ist nachweislich 100 Millionen Jahre jünger als die Burgess-Formation. Die ungewöhnlichen Tiere sind also keineswegs sofort wieder vom Erdboden verschwunden, sondern konnten sich – jedenfalls in Deutschland – mindestens bis zum Zeitalter des Devon (vor 416 bis 359 Millionen Jahren) halten.

Nachdem nun klar ist, dass die Burgess-Fauna auch im Hunsrück vorkam, erhebt sich die Frage, wo die Artgenossen und entfernteren Verwandten des urzeitlichen Schinderhannes geblieben sind. Gut möglich, dass sie unentdeckt

auf Dächern herumliegen oder auf Gartenpfaden mit Füßen getreten werden. Denn im Hunsrück sind viele Häuser mit Schiefer gedeckt, und die Schieferplatten werden auch sonst für alle möglichen Zwecke genutzt. Für Hausbesitzer könnte es sich also lohnen, ihre Dächer einmal genauer zu inspizieren. Reichtümer gäbe es dabei nicht zu erwerben, wohl aber wissenschaftlichen Ruhm oder eine Namenspatenschaft, wie sie Christoph Bartels zuteil wurde. Der Mitarbeiter des Bergbaumuseums in Bochum entdeckte das Schinderhannesfossil und präparierte es aus der Schieferplatte heraus, ohne allerdings seine Bedeutung zu erkennen. Das blieb der Bonner Doktorandin Gabriele Kühl vorbehalten, die das Fundstück im Naturhistorischen Museum in Mainz aufstöberte.

Da es im Hunsrück auch zahlreiche Amateure gibt, die Schieferplatten aufspalten und die auftauchenden Fossilien sammeln, wäre sogar vorstellbar, dass der eine oder andere *Schinderhannes* irgendwo unerkannt im Regal verstaubt. Seinerzeit durchkämmte die Polizei die Gegend Haus für Haus nach dem Räuber. Heute könnte man, wenn man die Dörfer abklapperte, womöglich weitere Kumpane seines Patenkindes finden. Vielleicht sollte man zumindest an den Rathäusern einen Steckbrief aushängen.

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

KÜNSTLICHE WESEN » Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Ein Roboter wie du und ich

Forscher weltweit basteln an mechanischen Helfern für den Haushalt. Von Zeit zu Zeit stellen sie ihre Entwicklungen der Öffentlichkeit vor – so kürzlich der CoTeSys-Exzellenzcluster an der Technischen Universität München. Dort legt man besonderen Wert auf den menschlichen Touch.

Von Jochen Steiner

» Wir schicken die Roboter in den Ruhestand.« So wirbt ein Mobilfunkanbieter dafür, dass nun »echte« Menschen die Fragen der Kunden am Telefon beantworten. »Wir schicken die Roboter zu Ihnen nach Hause, und sie werden Ihnen in der Küche zur Hand gehen«, könnte hingegen der Slogan lauten, mit dem die Wissenschaftler des CoTeSys-Exzellenzclusters an der Technischen Universität München ihre Forschung bewerben. Dort führte unlängst eine Gruppe aus Informatikern, Mathematikern, Neurologen, Biologen, Psy-

chologen und Maschinenbauern ihre neuesten Roboterentwicklungen vor.

Der Star unter ihnen heißt Eddie und gehört zu einer simulierten Wohngemeinschaft in den Räumlichkeiten des Exzellenzclusters in der Münchener Innenstadt. Der Roboter ist menschengroß, hat zwei Greifarme und einen Kopf mit beweglichen Augen sowie einen roten, ebenfalls beweglichen Mund. Dank Rädern ist das klobige Gerät recht mobil.

Bei allem Streben nach Menschenähnlichkeit hat Eddies Aussehen allerdings noch wenig mit dem seiner Erschaffer gemein. Das Menschlichste an ihm ist seine Mimik; denn die Forscher haben ihm

Gefühlsäußerungen wie zum Beispiel Freude einprogrammiert: Lächelt ihn sein Gegenüber also an, lächelt Eddie zurück. Das ist nett, aber eben nur Beiwerk. Beweisen muss sich der stählerne Butler durch seine Tüchtigkeit im Haushalt.

Bei der Pressevorführung kommt ein Bewohner der Wohngemeinschaft nach Hause. Kameras an der Decke registrieren das und geben die Information an Eddie weiter. Dieser sollte nun eigentlich auf den Neuankömmling zurollen und ihn begrüßen. Sollte, denn beim ersten Versuch rührt er sich nicht vom Fleck.

Beim zweiten Mal klappt es dann, und der Roboter blickt den Menschen

ANZEIGE

Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.

Die täglichen Aufgaben im Beruf und privat stellen mit den Jahren wachsende Anforderungen an die Konzentration und Gehirnleistung. Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit kommt es darauf an, die Kraftwerke der Gehirnzellen zu aktivieren. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion in den Gehirnzellen. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.



Tebonin®

* Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. Wirkstoff: Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. Anwendungsgebiete: Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnanorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt besonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe

Stand: April 2009 T/04/09/1



Tebonin®
stärkt
Gedächtnisleistung
und Konzentration.*

Ginkgo-Spezialextrakt
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG

www.tebonin.de

WÄHLEN SIE AUS UNSEREN VORTEILSABOS:

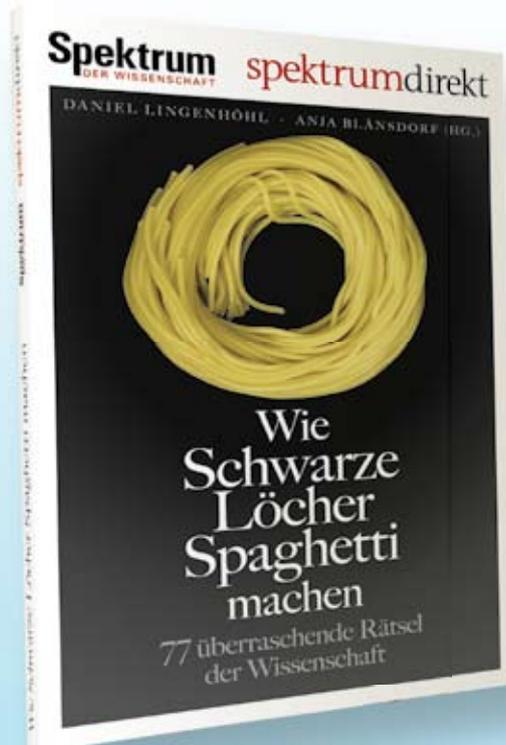
JAHRESABO:

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



Es bedarf nur direktes Sonnen- oder Halogenlicht und das kleinste Solarauto der Welt fährt los! Mit seinen Maßen von L 3,3 cm x B 2,2 cm x H 1,4 cm passt es dabei bequem in jede Jackentasche.

Weitere
Präsente unter
spektrum.de/juni



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



EIN ABO – VIELE VORTEILE

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

Ihr Zugang zu den Onlinevorteilen:

www.spektrum.de/plus

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

MINIABO:

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

Mit diesem USB-Stick können Sie 2-GB-Dateien in Sekundenschnelle speichern.



35%
PREIS
VORTEIL



Das T-Shirt »Pioneer« (100 % Baumwolle, XL) mit der berühmten Grußbotschaft der Menschheit von der Raumsonde Pioneer 10; diese geht auf eine Idee des Wissenschaftlers Carl Sagan zurück.

SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751



E-MAIL: service@spektrum.com

www.spektrum.de/juni

SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR
LESEVERGNÜGEN

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

www.spektrum.de/juni

LESER WERBEN LESER

SIE MÖCHTEN UNS EINEN
NEUEN ABONNENTEN VERMITTELN?

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

www.spektrum.de/juni

PRODUKT DES MONATS

Die legendäre Starklichtlampe »Petromax HK 500« erzeugt ca. 400 Watt, fasst ca. 1 Liter Petroleum (bis zu 8 Stunden Brenndauer) und ist 40 cm hoch. Geliefert wird sie in einer praktischen Transport- und Aufbewahrungstasche mit zahlreichem Zubehör.

Preis für
Abonnenten:

€ 166,- inkl. Versand
Inland (statt € 186,-)

www.spektrum.de/plus



10%
PREIS
VORTEIL

mit seinen Kameraaugen treuherzig an. Der Gast bittet um Kaffee. Die Spracherkennung von Eddie verarbeitet den Wunsch, und schon eilt der maschinelle Diener zum Tisch, wo eine Tasse steht. Er ergreift sie und rollt wieder Richtung Mensch. Unterwegs bleibt er allerdings an einem Tischchen hängen. Seine Konstrukteure müssen ihn befreien.

Dabei kippt Eddie bedrohlich zur Seite, was er mit den Worten kommentiert: »Ich glaube, ich bin ausgerutscht!« Immerhin scheint der kleine Tollpatsch so etwas wie Humor zu haben – programmierten Humor, versteht sich. Doch bis zu einem Gehilfen, der sich problemlos im Haushalt zurechtfindet und sich wirklich nützlich macht, fehlt noch einiges.

Ziel der Wissenschaftler von CoTeSys ist es, die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter durch möglichst natürliche Interaktionen zu optimieren. So soll man irgendwann nicht mehr den Eindruck haben, mit einer dummen Blechkiste zu reden, sondern mit einem intelligenten Wesen, das lernfähig und freundlich ist. Deshalb brauchen Serviceroboter auch die

GLOSSE

Immer Ärger mit PIPPO

Wie Pharmafirmen mit erfundenen Krankheiten Kasse machen.

Würden Sie auf die Idee kommen, den Arzt Ihres Vertrauens zu fragen, ob er Evidenzbasierte Medizin betreibt? Was soll er denn sonst tun, werden Sie vermutlich denken. Doch als vor fünf Jahren Wissenschaftler des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein 900 Ärzte zur Evidenzbasierten Medizin (EbM) befragten, gab fast ein Viertel an, den Begriff noch nie gehört zu haben; etwa 30 Prozent kannten ihn zwar, wendeten das Prinzip in der Praxis aber nicht an.

Dabei lautet die Grundforderung der EbM ebenso schlicht wie einleuchtend: Mediziner sollen für ihre therapeutischen Entscheidungen die Ergebnisse wissenschaftlicher Studien zu Rate ziehen. Das ist keineswegs trivial; denn um zuverlässige Informationen, etwa über die Wirksamkeit eines Medikaments zu erhalten, genügt es nicht, ein paar physiologische Zusammenhänge im Labor aufzuklären. Ob ein Medikament wirkt, weiß man erst dann sicher, wenn es am Patienten getestet wurde und zwar randomisiert, verblindet, kontrolliert und in ausreichender Stichprobenzahl.

So selbstverständlich diese Vorgehensweise klingt, hat sie in der Medizin noch keine lange Tradition. Das Ergebnis der ersten klinischen Studie nach heute gängigen Kriterien erschien 1948, was angesichts der langen Medizingeschichte als spät anzusehen ist. Der Begriff EbM selbst ist noch viel jünger: Gordon Guyatt von der McMaster University in Hamilton (kanadische Provinz Ontario) prägte ihn Anfang der 1990er Jahre. Seither hat sich die EbM zwar stark verbreitet, aber nicht überall Anklang gefunden. Viele Ärzte kri-

tisieren das strikte Vorgehen nach Studienergebnissen als »Kochbuchmedizin« oder Medizin nach Zahlen. Ganz von der Hand weisen lässt sich der Vorwurf nicht, immerhin ist jeder Patient ein Individuum, mit eigener Krankheitsgeschichte und eigenen Prädispositionen, die nicht ohne Weiteres in eine Statistik passen.

Aber auf welches Wissen greifen Mediziner dann zurück, wenn nicht auf wissenschaftlich gesicherte Fakten? Erfahrung? Überlieferung? Bauchgefühl? Zu den eher fragwürdigen Quellen zählen auch mit großem Aufwand verbreitete Informationen der Pharmaindustrie. Die hat natürlich ein Interesse daran, dass möglichst viele Ärzte ihre Produkte verschreiben. Da wird dann auch gerne die Krankheit zum passenden Medikament erfunden. Besonders offensichtliche Fälle wie das 1998 von der Firma Smith-Kline Beecham (heute GlaxoSmithKline) lancierte depressive Leiden namens »Sissi-Syndrom« sind durch die Presse gegangen.

Vom Großteil der Pharma-PR bemerkt die Öffentlichkeit aber gar nichts. Denn diese Kampagnen zielen vor allem auf die praktizierenden Ärzte, welche in anzeigenfinanzierten Fachzeitschriften, gesponserten Vorträgen, gekauften Symposien und Fortbildungen mit Informationen über neue Gefahren geradezu bombardiert werden. Wer da nicht gewappnet ist, fällt leicht selbst einer neuen Epidemie zum Opfer, die Norbert Donner-Banzhoff jüngst auf einer EbM-Tagung in Berlin beschrieb. Ganz nach Pharmamanier verpasste ihr der Tagungspräsident und

Professor für Allgemeinmedizin an der Universität Marburg auch gleich ein medizinisches Etikett: das PIPPO-Syndrom.

Ein solcher PIPPO besteht immer aus den gleichen Symptomen:

P wie Panik vor einer neuen oder alten Krankheit, die auf jeden Fall immer schlimmer wird

I wie Industrienähe, denn wo dieses Syndrom auftritt, ist auch ein neues Medikament nicht weit

P wie Pathophysiologie, insbesondere in Form bunter Schaubilder, die ein mechanistisches Verständnis der Krankheitsvorgänge suggerieren

P wie Pseudolösungen; denn Pillen gegen Blutfett, Zucker oder Übergewicht gehen an der Ursache der Probleme, dem ungesunden Lebensstil, vorbei

O wie ohne Grenzen; denn der Drang des Syndromverursachers, die Menschheit mit seinen Mitteln zu beglücken, kennt keine Grenzen

»Von rüpelhaften Kindern und Schwierigkeiten beim Sex über Aufstoßen bis zu Unglück im Allgemeinen – das alles kann man mit medizinischen Etiketten versehen«, erklärt Donner-Banzhoff. Als probatestes Mittel gegen diese Epidemie empfiehlt er, unbequeme Fragen nach wissenschaftlichen Belegen zu stellen. Gab es klinische Studien und wie war ihr Design? Wie verhält sich der Nutzen zu einem möglichen Schaden? Und wer hat welche Untersuchungen bezahlt?

So manches Mittelchen, das dem einen oder anderen Praxisbesucher vielleicht lieb geworden, aber nutzlos ist, wird dann sicher nicht mehr verschrieben. Doch profitiert von mehr EbM in der Medizin am Ende das Gesundheitssystem und damit auch der Patient.

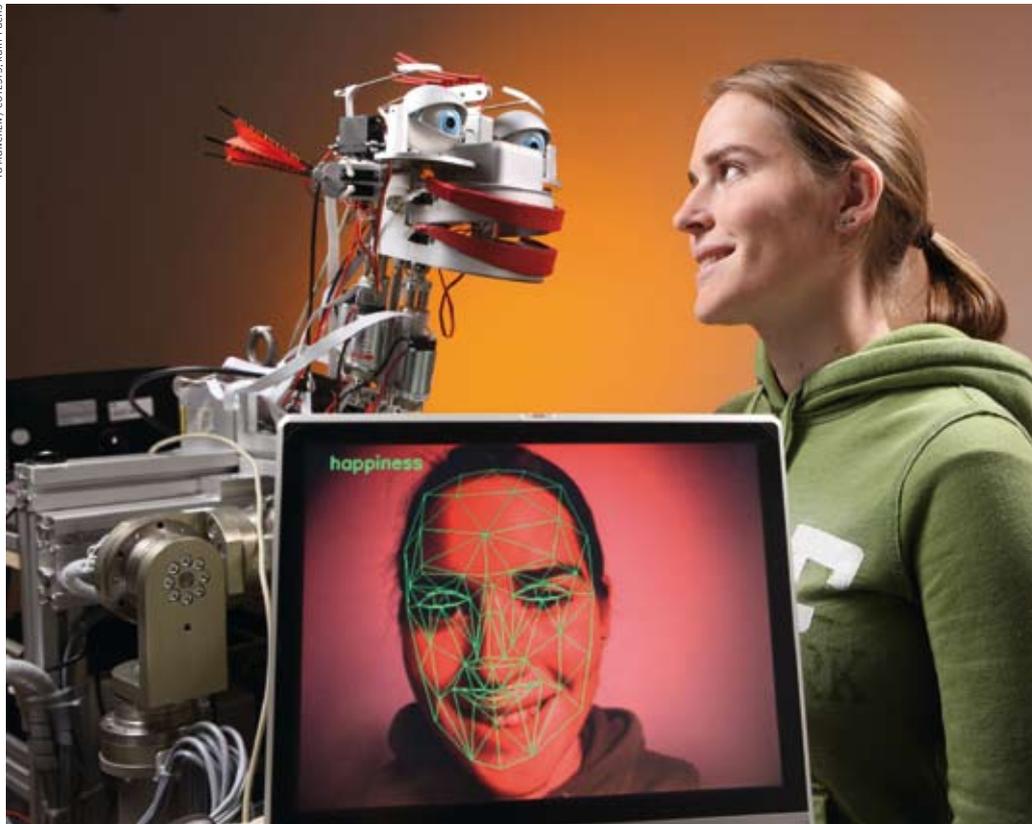
Miriam Ruhenstroth ist freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Fähigkeit, Emotionen zu zeigen; denn das kommt, wie Studien ergaben, ausgesprochen gut an. Doch zu sehr dürfen sie dem Menschen auch nicht gleichen, sonst würde ihre Akzeptanz wieder schwinden. Ein nützlicher Helfer – ja, ein uns ebenbürtiges Wesen – nein. Dazulernen soll der Helfer aber schon können; denn es wäre ausgesprochen lästig, ihm zum Beispiel immer wieder zeigen zu müssen, wo die Kaffeemaschine steht. Auch daran arbeiten die Münchener Forscher.

Um das Jahr 2020 dürften Roboter und Mensch dann gedeihlich zusammenleben können, prophezeit Martin Buss von CoTeSys. Doch wer will das überhaupt? Bislang gibt es in Deutschland noch keine aussagekräftigen Untersuchungen darüber, wie hoch die Akzeptanz gegenüber den elektronischen Hel-

Serviceroboter Eddie erkennt durch Vergleich mit einer Schablone für einen glücklichen Gesichtsausdruck, dass sein Gegenüber ihn anlächelt, und reagiert mit einer freundlichen Grimasse.

MÜNCHEN / COOTESYS, KURT FUCHS



9. MÜNCHNER WISSENSCHAFTSTAGE

18.-21. Juli



Ideen für die Zukunft

an über 50 verschiedenen Orten im Großraum München

Führungen, Vorträge & Workshops für Jedermann
spezielles Programm für Schüler und Kinder
alle Veranstaltungen kostenlos

gefördert von



Landeshauptstadt
München

Medienpartner

Spektrum
muenchen@de

www.muenchner-wissenschaftstage.de

Die 9. Münchner Wissenschaftstage bieten allen Interessierten vom 18.-21. Juli 2009 Einblick in „Ideen für die Zukunft“ – und zwar in neuem Gewand: Erstmals finden in diesem Jahr fast alle Veranstaltungen wie Führungen, Vorträge, Tage der offenen Tür und Workshops direkt in den Räumen der beteiligten wissenschaftlichen Institutionen und forschenden Unternehmen statt.

Im Großraum München präsentieren Spitzenwissenschaftler über 50 verschiedene Veranstaltungen. Im Mittelpunkt stehen die zentralen Herausforderungen unserer Gesellschaft: die Erhaltung der Lebensgrundlagen, die demografische Entwicklung, die Verknappung der Rohstoffe, die Energienutzung, der Klimawandel, die Globalisierung der Märkte, Intensivierung der weltweiten Kommunikation und des Verkehrs. Wie stark all diese Themen miteinander verbunden sind, zeigt der Eröffnungsabend. Er trägt den Titel „Der Klimawandel – Herausforderung für die Zukunft“. Der Abschlussabend steht, aus Anlass des vierzigsten Jahrestages der Mondlandung, unter dem Motto „Zum Mond und bis ans Ende der Welt. Reisen ins Ungewisse – das Abenteuer Raumfahrt“.

Jetzt umsteuern!

Die Bologna-Reform leidet unter eklatanten Schwächen.

Von *Bernhard Kempen*

**Professor Dr. Bernhard Kempen
ist Präsident des Deutschen
Hochschulverbandes, Bonn**



Zehn Jahre nach der »Bologna-Erklärung«, in der sich 30 europäische Staaten am 19. Juni 1999 zu dem Ziel eines einheitlichen europäischen Hochschulraums bekannten, hat sich an deutschen Universitäten statt Euphorie Ernüchterung breitgemacht. Selbst vehemente Befürworter der Hochschulreformen müssen eingestehen, dass Kernziele des Bologna-Prozesses bislang nicht erreicht wurden. So ist mit der Einführung von Bachelor- und Masterstudiengängen ein Studienortwechsel im In- wie Ausland nicht erleichtert, sondern deutlich erschwert worden. Der erhoffte Automatismus bei der Anerkennung von Studienleistungen blieb aus. Und die Zahl der Studienabbrecher hat sich insbesondere in den Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften erhöht statt verringert.

Verantwortlich für diese Fehlentwicklungen ist die bürokratische Umsetzung der Reformen in Deutschland, bei der die angestrebte Vereinheitlichung mit Gleichmacherei verwechselt wurde. Die unterschiedlichen Wissenschafts- und Ausbildungstraditionen der inzwischen 46 Bologna-Signatarstaaten lassen sich jedoch nicht über einen Kamm scheren. Sach- und fachgemessen muss entschieden werden, ob die neuen Abschlüsse für die jeweilige Disziplin taugen oder nicht. Wer eine dem Wettbewerb verpflichtete, autonome Hochschule will, sollte nicht gleichzeitig von oben herab Studienstrukturen verordnen.

Nicht jedes Fach lässt sich in ein sechssemestriges Korsett pressen. Betätigungsfelder unterhalb der klassischen ärztlichen und juristischen Berufe würde ein dreijähriges grundständiges Bachelorstudium in Medizin und Jura nicht eröffnen. Vergleichbares gilt für die Lehramtsstudiengänge sowie die Ingenieurwissenschaften: Gerade in den Ingenieurwissenschaften war das Diplom made in Germany eine international anerkannte Marke, die ihren Trägern weltweit Zugang zum Arbeitsmarkt eröffnete. Diese Marke jetzt aufzugeben war kein Gebot der Bologna-Vereinbarungen, sondern eine mehr als unvernünftige Forderung deutscher Kulturpolitik.

Ebenso wenig ist den Konferenzdokumenten zu entnehmen, dass der Master nur einer Hand voll Auserlesener vorbehalten bleiben sollte. Darauf läuft es aber in Deutschland hinaus: Die Hochschulen werden per Zielvereinbarung dazu gebracht, bei der Masterausbildung zu knausern und ihre Mittel bis zu 80 Prozent in Bachelorprogrammen einzusetzen. In vielen Studienfächern können sich daher nur 20 Prozent der Bachelorabsol-

venten in einem Masterstudiengang weiterqualifizieren. Viele der Bachelorabsolventen, die von der Wirtschaft allen Werbekampagnen zum Trotz eben doch nicht immer mit Kuschhand genommen werden, klopfen jetzt vergeblich an die Tür zum Masterstudium. Es passt einfach nicht zusammen: Für Handwerksmeister werden die Zugangshürden zum Bachelorstudium beseitigt, während sich beim Masterstudium durch Noten und Quoten neue Hürden auftürmen.

Das unerfüllte Versprechen, den deutlich erhöhten Prüfungs- und Lehraufwand der modularisierten Studiengänge mit zusätzlichem Personal aufzufangen und zusätzliche Masterstudienplätze zu schaffen, droht im Zuge der Finanz- und Wirtschaftskrise in Vergessenheit zu geraten. Die vom Wissenschaftsrat zuletzt angemahnten 1,1 Milliarden Euro für eine Verbesserung der Studiensituation sind im Hochschulpakt II nicht enthalten. Dabei liegt das Kapital moderner Wissensgesellschaften vor allem in einer hochwertigen Ausbildung, die die Studierenden auch wollen. Wenn im 10. Studierendensurvey, der im Auftrag des Bundesforschungsministeriums herausgegeben wird, die Hälfte der Befragten dem Bachelorstudium die wissenschaftliche Qualität abspricht, muss das alarmieren. Gerade an Universitäten haben die neuen Studiengänge dem Anspruch einer universitären Ausbildung durch Wissenschaft gerecht zu werden. Nicht der Bachelor, sondern der Master sollte deshalb der Regelabschluss sein. Wer in Krisenzeiten in die Zukunft investieren will, darf bei der Bildung nicht sparen. Volkswirtschaftlich ergibt es wenig Sinn, dass eine große Wissenschaftsnation diejenigen, die ihr altes Auto entsorgen, mit einer Abwrackprämie ködert, aber diejenigen, die mit ihren Köpfen etwas aufbauen wollen, den Berufszugang versperrt.

Kostenneutral werden sich die Bologna-Reformen nicht umsetzen lassen. Für die Bologna-Ziele, mehr Mobilität und bessere Vergleichbarkeit von Abschlüssen in einem gemeinsamen europäischen Hochschulraum, lohnt aber jede Mühe. Um mehr Mobilität zu ermöglichen, sind finanzielle Anreize erforderlich. Mobilitätsverbünde, bei denen Hochschulen im In- wie Ausland ihre Curricula aufeinander abstimmen, sollten prämiert werden. Auch praxisnahe Studiengänge gilt es längerfristig mit Geld zu fördern – durch Belohnung von Hochschulen, deren Absolventen unmittelbar nach dem Studium einen fachnahen Arbeitsplatz erhalten haben.

Damit der Bologna-Zug an Fahrt gewinnt, hat der Deutsche Hochschulverband die eklatanten Schwächen der Reform beim Namen benannt. Seine Verbesserungsvorschläge liegen auf dem Tisch. Die Hochschulpolitik muss unverzüglich handeln, wenn der Bologna-Zug nicht bald in einem Sackbahnhof stehen bleiben soll: Mit Beschwichtigung und betulicher »Nachbesserungsrhetorik« dürfen wir uns nicht länger aufhalten. Die Losung heißt: Jetzt umsteuern!

Eine Aktionswoche von
Spektrum der Wissenschaft
und dem Blogportal SciLogs.de
vom 15. bis 21. Juni 2009:
www.scilogs.de/bologna



10 JAHRE BOLOGNA
Die Zukunft unserer Hochschulen

fern sein könnte. Deren Zielgruppe ist ganz klar die ältere Generation. In einer vergreisenden Gesellschaft sind schon jetzt die Wartezeiten für Pflegeheime lang und die Pflegekräfte rar. Da wären Serviceroboter willkommene Helfer. Aber eben nur das: Sie könnten den Pfleger entlasten, jedoch nicht ersetzen. Zu dessen wesentlichen Aufgaben gehören schließlich auch die persönliche Zuwendung mit echten Emotionen und das einfühlsame Gespräch. Damit wäre selbst der beste Roboter überfordert. Aber er könnte beispielsweise bei pflegebedürftigen Menschen mit anpacken, ihnen etwas zu trinken reichen oder Alarm schlagen, wenn Hilfe benötigt wird. In Japan werden Roboter bereits im Pflegebereich eingesetzt. Dort stoßen sie auf breite Akzeptanz, weil die Japaner quasi mit Elektronikvehikeln wie mechanischen Hunden aufwachsen und schon die Kleinen begeistert damit spielen.

Alternative zum Seniorenheim

Doch vermutlich werden sich auch die Deutschen irgendwann an elektronische Gefährten in ihrem Umfeld gewöhnt haben. Die heute junge Generation ist die Roboter-Zielgruppe von morgen. Und wenn man beobachtet, wie schnell Kinder den Umgang mit Computern, Handys und Co. lernen und diese technischen Geräte ganz selbstverständlich in ihr tägliches Leben integrieren, ist kaum zu erwarten, dass sie es eines Tages seltsam oder gar ethisch bedenklich finden, wenn ihnen ein Serviceroboter zur Seite steht.

Nicht alle älteren Menschen werden dereinst in Mehrgenerationenhäusern oder in Rentnerwohngemeinschaften zusammenleben wollen oder können. Wer allein und dennoch selbstständig bleiben und sein vertrautes Zuhause nicht verlassen möchte, der greift dann vielleicht gerne zum mechanischen Butler und schiebt so das Seniorenheim noch etwas hinaus.

Der intelligente Serviceroboter wird also auf längere Sicht auch in Deutschland Abnehmer finden. Dann dürfte Eddie hoffentlich so weit sein, statt zu rollen auf zwei Beinen zu laufen und freundlich lächelnd, ohne zu stolpern, seinem Mitbewohner eine Tasse Kaffee servieren zu können.

Jochen Steiner ist freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.

Springers Einwürfe

Kleine Physik der Wirtschaftskrise

Gibt es ein Hebelgesetz für Finanzmärkte?

Im Januarheft ereiferte ich mich an dieser Stelle ein wenig über Physiker, die lieber an der Wallstreet spekuliert haben, als in weiser Voraussicht der kommenden Krise mathematische Modelle für instabile – »wilde« – Märkte zu entwerfen. Das trug mir mehrere Leserbriefe ein, die übereinstimmend bezweifelten, dass moderne Finanzmärkte überhaupt berechenbar seien. Es handle sich nun einmal um ein chaotisches Aufschaukeln positiver Rückkopplungen, und daran müsse jede Theorie scheitern, die nach dem Vorbild der Physik Erhaltungsgrößen und Gleichgewichte definiert.

Tatsächlich hat sich in der Krise die herkömmliche Idee des Marktgleichgewichts blamiert, der zufolge umfassend informierte Akteure nur ihrem Eigeninteresse folgend Angebot und Nachfrage so auspendeln, dass Güter und Dienstleistungen sich ganz von selbst optimal verteilen. Das ähnelt der statistischen Thermodynamik, in der das mikroskopische Zufallsverhalten der einzelnen Atome zu Gesetzen für makroskopische Kenngrößen wie Druck, Temperatur und Entropie führt. Jetzt aber schlägt die Stunde der Nichtgleichgewichtstheoretiker, die seit Jahren das dicke Ende kommen sahen. Dieses *fat tail*, wie es in den Modellen der *Econophysicists* heißt, meint den Umstand, dass starke Abweichungen vom Gleichgewicht viel häufiger vorkommen als gemäß der herkömmlichen Glockenkurve mit ihren schmalen Enden.

Ein prominenter Ökonophysiker ist Stefan Thurner, Leiter der Forschungsgruppe für komplexe Systeme der Medizinischen Universität Wien. Dort erforschte der theoretische Physiker und Wirtschaftswissenschaftler zunächst die Genetik der Zuckerkrankheit, wandte sich dann aber den internationalen Finanzmärkten zu. Zuletzt entwickelte er ein aufwändiges Modell der Finanzspekulation, das er auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Dresden vorstellte.

In diesem Computermodell treten virtuelle Akteure in Wechselwirkung – insbesondere Banken, die Geld verleihen, und Hedgefonds, die damit spekulieren. Daneben gibt es kleine Spekulanten, die für ein gewisses Hintergrundrauschen im System sorgen, sowie Großinvestoren, die etwa der staatlichen Rentenkasse entsprechen. Doch als entscheidend für das Systemverhalten erweist sich in diesem komplexen Geschehen überraschenderweise ein einziger Parameter, der Leveragefaktor oder Hebeleffekt.

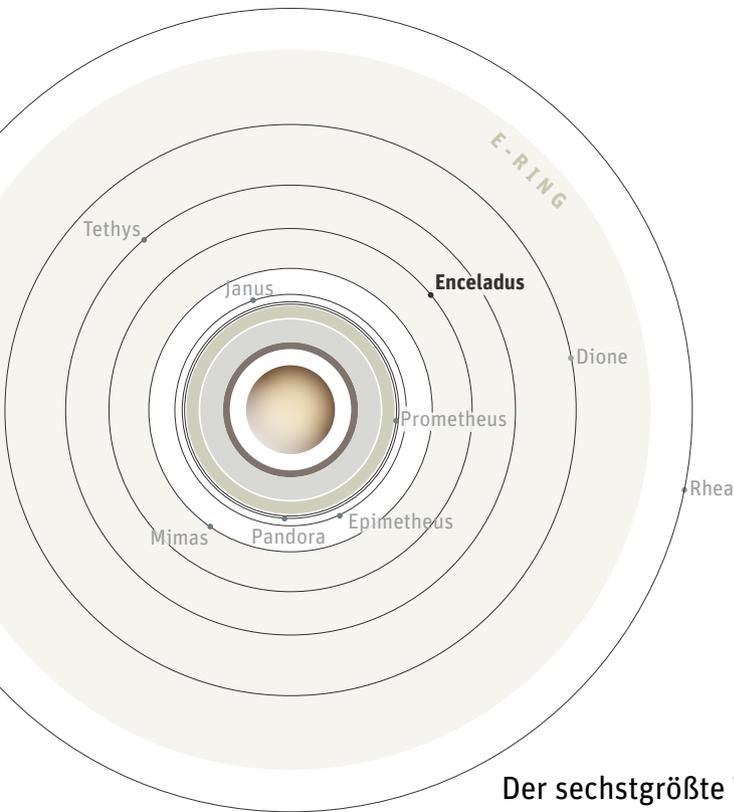
Ein Hedgefonds vervielfacht seinen Spekulationsgewinn per Leverage, indem er das eingesetzte Eigenkapital mit geliehenem Geld um das Fünffache aufstockt. Das funktioniert natürlich nur, falls die Spekulation überhaupt etwas abwirft und sofern der Spekulationsgewinn die Zinsen für das Geldleihen übersteigt. Andernfalls stürzt der Hedgefonds besonders tief.

Ohne Leverage verhält sich Thurners Modell brav und »klassisch«. Doch je stärker am Hebel gedreht wird, desto volatil – unruhiger – wird das System. Und oberhalb eines Leveragefaktors von fünf gerät es völlig außer Rand und Band. Dann kann die kleinste Schwankung des Hintergrundrauschens, ausgelöst von einem normalerweise für das Systemverhalten ganz unbedeutenden Einzelhändler, den ganzen virtuellen Markt zum Crash bringen.

Nun werden Sie vielleicht sagen: Dass Hedgefonds verboten gehören, war mir immer klar. Aber aufwändig gewonnene Aussagen über komplexe Systeme muten meist trivial an – oft so banal wie ihr Gegenteil. Wenn sich das Resultat bewährt, wäre es zumindest ein starkes Argument für Maßnahmen gegen Hebefaktoren über fünf, beziehungsweise für eine entsprechende Obergrenze, bis zu der Banken an Hedgefonds Geld verleihen dürfen.



Michael Springer



ENCELADUS

rätselhafter Saturnmond

Der sechstgrößte Trabant des Ringplaneten steckt voller Überraschungen. Gewaltige Geysire versprühen eisiges Wasser ins All – vielleicht aus einem See im Inneren, der außerirdisches Leben birgt.

In Kürze

- ▶ Auf dem Saturnmond Enceladus geben **warme Spalten – »Tigerstreifen«** – feinen Schnee und Wasserdampf frei. Wie vermag ein Himmelskörper mit nur 500 Kilometer Durchmesser derart aktiv zu bleiben?
- ▶ Vermutlich verbirgt sich **ein See in der Tiefe** des Mondes; dafür sprechen die Resultate der Cassini-Mission. Flüssiges Wasser erhöht die Wärmewirkung der von Saturn ausgeübten Gezeiteneffekte.
- ▶ Wenn Enceladus in seinem Inneren Wasser trägt, ist er mit Mars und dem Jupitermond Europa der dritte Kandidat für die intensive **Suche nach außerirdischem Leben**.

Von Carolyn Porco

Als die Raumsonde Voyager 2 vor gut einem Vierteljahrhundert durch das Saturnsystem raste, näherte sie sich dem Mond Enceladus bis auf 90 000 Kilometer. Binnen weniger Stunden lieferten ihre Kameras mehrere Bilder, die unter Planetenforschern jahrelang für Verwirrung sorgten. Sogar unter den vielgestaltigen Saturnmonden war Enceladus offenbar der seltsamste. Seine eisige Oberfläche strahlte weiß wie frischer Schnee, und während die anderen Monde mangels Atmosphäre von Kratern übersät waren, zeigte Enceladus weite Ebenen mit glattem, kraterlosem Terrain – ein klares Anzeichen für einstige geologische Aktivität. Doch mit nur 500 Kilometern Durchmesser schien der Mond viel zu klein zu sein, um selbst genügend Wärme zu erzeugen. Ganz offenbar war etwas höchst Ungewöhnliches geschehen, das die Kraternarben großflächig ausgelöscht hatte.

Der rasche Vorbeiflug der Voyager-Sonde erlaubte nur einen flüchtigen Blick, und im Nachhinein war, was er wiedergab, schrecklich unvollständig: ein paar Aufnahmen der Nordhalbkugel mit mittlerer Auflösung, eini-

ge schlecht aufgelöste Bilder vom Süden, und vom Südpol gar nichts. Wir hatten keine Ahnung, was uns entging.

Durch das Interesse, das Voyagers Kurzbesuch weckte, erhielt die umfassende Erforschung des kleinen Mondes oberste Priorität im Rahmen der Cassini-Mission zum Saturn. Nach dem Start 1997 durchquerte Cassini sieben Jahre lang den interplanetaren Raum mit den raffiniertesten Instrumenten, die je in das äußere Sonnensystem vorgedrungen waren. Im Sommer 2004 erreichte die Mission endlich den Ringplaneten (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 48). Im Dezember desselben Jahres warf Cassini eine Sonde in die Atmosphäre des größten Saturnmondes Titan ab und begann dann eine Tour durch das übrige Saturnsystem – nicht zuletzt zu Enceladus, um ihn genauer zu untersuchen als je zuvor.

Die Ergebnisse sind der Traum jedes Planetenforschers. Enceladus birgt nicht nur genug Wärme, um damit geologische Veränderungen der Oberfläche anzutreiben, sondern auch organische Verbindungen sowie möglicherweise unterirdische Kanäle oder gar Seen mit flüssigem Wasser. Energie, Kohlenstoffverbindungen, Wasser: die drei Voraussetzungen für Leben, wie wir es kennen. Unsere



Aus tiefen Rissen in der Südpolregion von Enceladus schießen Dampf- und Eisfontänen empor. Damit ist der kleine Saturnmond einer von nur vier Orten im Sonnensystem, die heute geologisch aktiv sind. Die Astronauten in dieser fiktiven Darstellung dienen dem Größenvergleich.



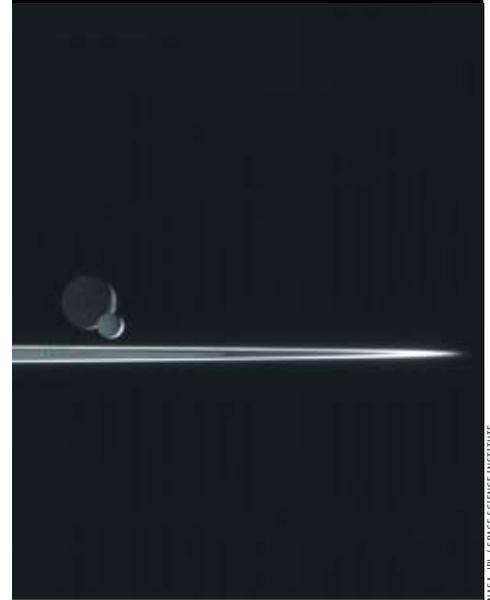
100 Kilometer

Als Voyager 2 im Jahr 1981 erstmals Enceladus passierte, bildete die Sonde nur Teile der Oberfläche mit bescheidener Auflösung ab. Die glatten Gebiete zeigten jüngere geologische Aktivitäten an.



1000 km

Enceladus (oben links) ist zehnmal kleiner als der größte Saturnmond Titan. Himmelskörper seiner Größe verlieren ihre innere Wärme schnell; außer Enceladus sind sie alle geologisch tot. Wodurch bleibt der kleine Mond aktiv?



MASA, JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

Diese Aufnahme der Cassini-Sonde zeigt Enceladus vor Dione, einem größeren und weiter entfernten Mond, dessen Schwerkraft indirekt zur geologischen Aktivität auf Enceladus beiträgt. Der äußere Rand der Saturnringe beherrscht den Vordergrund.

Erforschung dieses fremdartigen und fernen Orts bringt uns eine Umwelt nahe, die sich vielleicht für lebende Organismen eignet. Was will man mehr?

Ein früher – zunächst umstrittener – Hinweis, dass wir einer großen Sache auf der Spur waren, kam sogar noch vor Cassinis erster enger Begegnung mit Enceladus. Im Januar 2005 schossen unsere Kameras die ersten Bilder des Mondes mit der Sonne dahinter; die Planetenforscher nennen diesen Blickwinkel hohe Solarphase.

Eine Fahne im Gegenlicht

So wie der Staub auf der Windschutzscheibe buchstäblich ins Auge sticht, wenn man gegen die tief stehende Sonne fährt, werden auch die feinen Partikel, die über das ganze Sonnensystem verteilt sind, besonders deutlich sichtbar, wenn man durch sie zur Sonne blickt. Diese Perspektive hatte während der Voyager-Mission höchst erfolgreich kaum sichtbare Strukturen in Ringen und Atmosphären der äußeren Planeten und ihrer Monde enthüllt, und sie war entscheidend für die Erforschung von Enceladus.

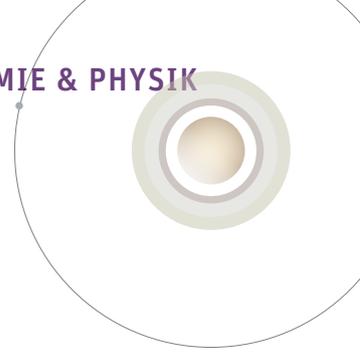
Die Januarbilder zeigten eine Eruptionsfahne, die am Südpol aus der Mondsilhouette ragte. Uns Voyager-Veteranen erinnerte das sofort an die Vulkanwolken, die sich über dem Jupitermond Io erheben, und an die feinen Dunstschleier in der Atmosphäre des Neptunmondes Triton. Einige aus dem Kamerateam waren darum überzeugt: Die Eruption beweist, dass der Südpol Material aus-

speit. Andere warnten, wahrscheinlich sehe man eines dieser lästigen Artefakte, welche Kameras bei Gegenlicht nun einmal gern produzieren.

Zum Glück mussten wir nicht lange warten. Im Februar und im März zog die Sonde endlich längs des Äquators nahe an Enceladus vorbei, beide Male mit spektakulären Resultaten. Die glatten Ebenen, die Voyager gesehen hatte, sind gar nicht glatt, sondern bei Auflösung unterhalb eines Kilometers von unzähligen feinen Rissen und Gräben durchzogen, manche gerade, manche krumm. Andernorts klaffen 500 Meter tiefe Abgründe. Bei noch feinerer Auflösung splittert ein Spinnwebgewebe von fast parallelen engen Spalten das Gelände in Schollen auf. Enceladus hat offenbar mehrere Phasen heftiger tektonischer Aktivität durchgemacht; davon zeugen seine Narben.

Der Februar-Vorbeiflug lieferte eine weitere Aufnahme mit hoher Solarphase, die eine noch größere Eruptionsfahne zeigte. Außerdem offenbarte das Magnetometer, dass die magnetischen Feldlinien des Saturns, wenn sie infolge der Saturnrotation über Enceladus hinwegstrichen, verzerrt wurden – anscheinend durch schwere Ionen am Südpol des kleinen Mondes. Immer mehr Indizien besagten: Die Eruptionen sind echt.

Die Cassini-Forscher setzten durch, dass die Höhe des nächsten Vorbeiflugs von 1000 auf 168 Kilometer gesenkt wurde. Am 14. Juli 2005 überflog die Sonde die Südhalbkugel, lieferte erstmals eine deutliche Ansicht des



Südpols – und enthüllte eine Landschaft, die im Sonnensystem nicht ihresgleichen hat.

Den Südpol umgibt ein ungefähr kreisförmiges Gebiet, das keinerlei Krater aufweist und von einigen tiefen, parallelen Gräben durchzogen wird. Diese so genannten Tigerstreifen erstrecken sich über 130 Kilometer und enden in hakenförmigen Biegungen. Zwischen den Streifen liegen hellere, feiner gekerbte Ebenen, und das ganze Gebiet wird bei 55 Grad südlicher Breite scharf durch einen zusammenhängenden, geschwungenen Ring konzentrischer Berge und Täler umgrenzt. Die Biegungen dieses Grenzwalls folgen einander im Abstand von 45 Längengraden, wobei sich von einigen Mäandern lange Risse durch fast kraterfreies Terrain zum Äquator erstrecken.

Paul Helfenstein von der Cornell University in Ithaka (New York) schloss daraus, dass die Grenze – ähnlich dem Himalaja – entstand, als die Oberfläche in Nordsüdrichtung gestaucht wurde, und dass das gesamte umschlossene Gebiet dem mittelatlantischen Rücken auf der Erde entspricht: Es ist eine Spreizungszone, in der neue Oberfläche gebildet wird und nach außen drückt.

Offensichtlich kündigt das Aussehen des kleinen Mondes von dramatischen Vorgängen in seiner Vergangenheit, aber seine Gegenwart erwies sich als noch viel erstaunlicher. Bei Cassinis Wanderung über die Südpolregion fing der Staubanalysator winzige Partikel auf, die offenbar aus der Region der Tigerstreifen stammten. Zwei andere Instrumente entdeckten Wasserdampf sowie Anzeichen für Kohlendioxid, Stickstoff und Methan. Cassini hatte eine dünne Wolke durchquert.

Außerdem spürte die Infrarotkamera längs der Risse Temperaturen bis zu 180 Kelvin auf – weit mehr als die 70 Kelvin, die durch bloße Sonneneinstrahlung zu erwarten wären. Diese Orte geben erstaunliche 60 Watt pro Quadratmeter ab. Zum Vergleich: Im Erdwärmegebiet des Yellowstone Park entstehen nur 2,5 Watt pro Quadratmeter. Kleinere Flecken, die das Infrarotinstrument nicht aufzulösen vermag, könnten sogar noch heißer sein.

Daraufhin plante das Team für November 2005 eine spezielle Serie von Aufnahmen des

Südpols mit hoher Auflösung und bei sehr hoher Solarphase. Inzwischen besaßen wir genügend viele Bilder anderer Monde bei ebenso hoher Solarphase, mit denen ich den Skeptikern in unserem Team beweisen konnte, dass darauf keinerlei Eruptionsfahnen auftauchten und somit unser Fund auf Enceladus sicher kein Artefakt war. Wir sahen hier wirklich eine gewaltige Wolke kleiner Partikel, die sich um mehrere hundert Kilometer über den Südpol erhob.

Das Geheimnis der Geysire

Am 27. November kam unsere Serie von Schwarz-Weiß-Bildern des Enceladus im Gegenlicht endlich an. Sie zeigte klar und deutlich mehr als ein Dutzend schmaler Jets aus feinen Eispartikeln, die in den Weltraum emporschossen und sich zu einer schwachen, aber riesigen flammenförmigen Wolke über der Südpolregion vereinten. Wie Joseph Spitale vom Kamerateam und ich später zeigten, stimmen die Quellen der Jets mit den heißesten Orten auf den Tigerstreifen überein – ein erster Beweis für den Zusammenhang zwischen Wärme und Eruption. Die meisten Partikel fallen zurück zur Oberfläche, aber einige sind schnell genug, um in eine Bahn um Saturn einzuschwenken; sie erzeugen tatsächlich den äußersten Saturnring, den so genannten E-Ring.

Seither hat die Cassini-Sonde mehrere Vorbeiflüge an Enceladus absolviert und ist in nur 25 Kilometer Höhe in dichtere Regionen der Eruptionsfahne vorgedrungen. Bei einer besonders engen Passage im März 2008 entdeckte Cassini zusätzlich zu Wasserdampf, Stickstoff, Kohlendioxid und Methan kleine Beimengungen anderer Kohlenstoffverbindungen wie Azetylen und Zyanwasserstoff sowie Spuren von Ethan, Propan, Benzol, Formaldehyd und anderen organischen Verbindungen.

STECKBRIEF

Masse:

1,08 × 10²⁰ Kilogramm

Durchmesser: 504 Kilometer

Dichte:

1,61 Gramm pro Kubikzentimeter

mittlerer Abstand von Saturn:

238 037 Kilometer

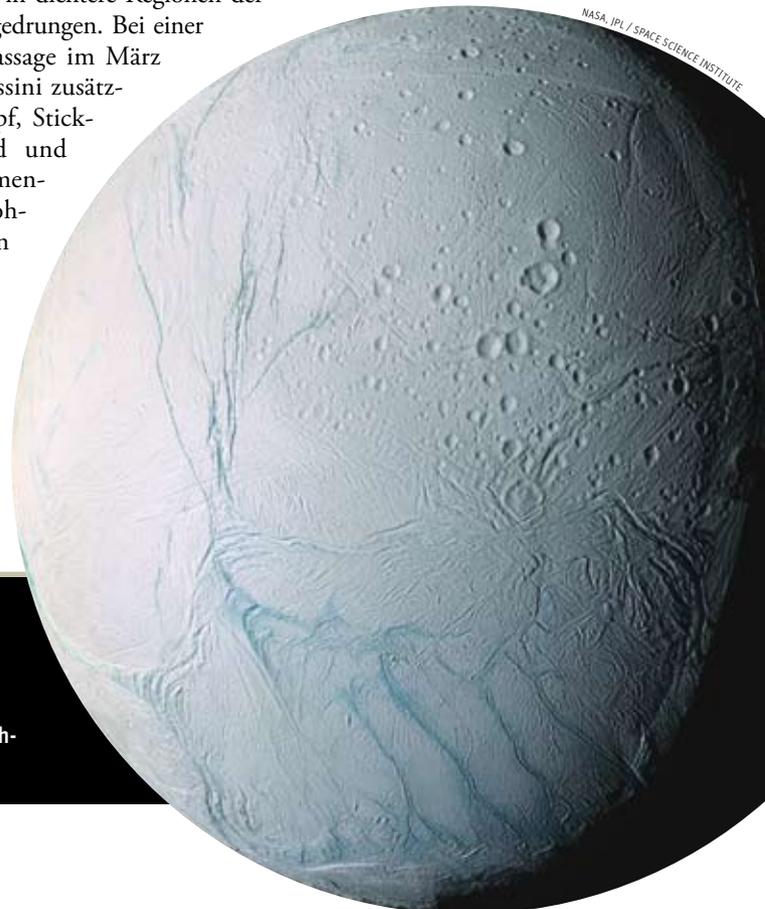
Bahnperiode: 1,37 Tage

Exzentrizität: 0,0047

Neigung zur Saturn-

äquatorebene: 0,0083 Grad

Die Südhalbkugel von Enceladus wurde 2005 zum ersten Mal von Cassini aufgenommen. Dieses Bildmosaik zeigt die Oberfläche im Infrarot- und Ultraviolettbereich; für unser Auge würde sie gleichförmig weiß aussehen. Die »Tigerstreifen« im unteren Bereich sind warme, geologisch aktive Einschnitte in der Südpolregion. Ihre bläuliche Farbe stammt von überdurchschnittlich großen Eiskörnern, die Infrarot absorbieren.

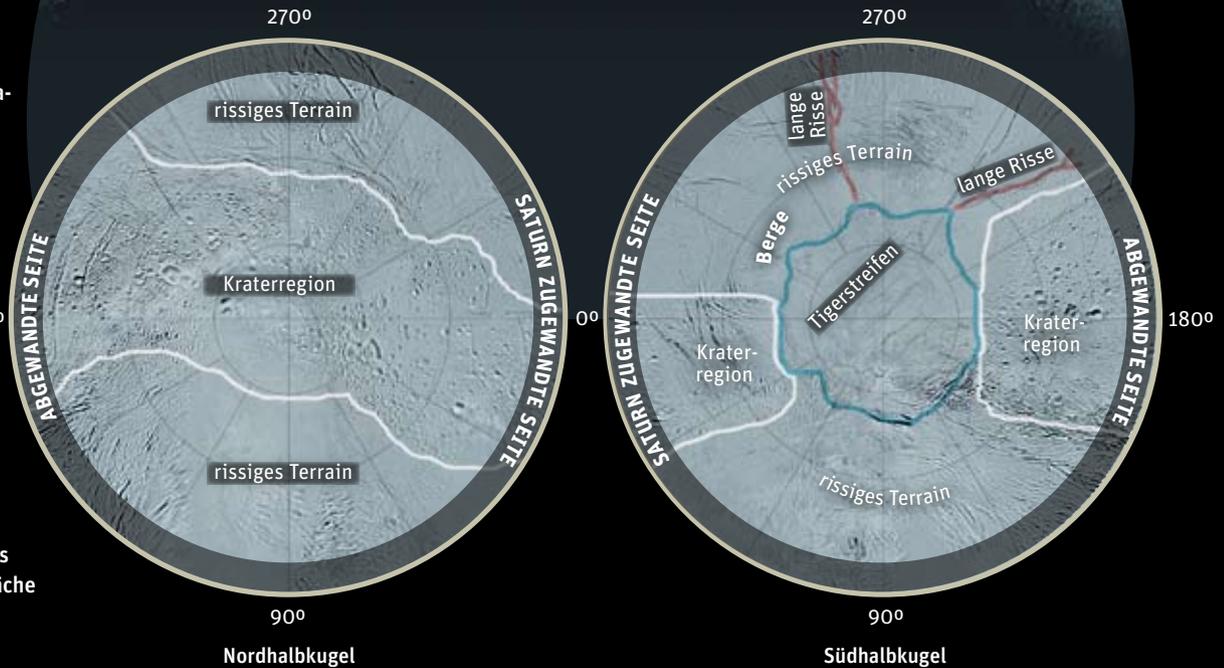


NASA, JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

EIN KLEINER MOND MIT VIELEN GESICHTERN

Die Vielfalt der geologischen Formen auf Enceladus überraschte die Planetenforscher. Große Teile der Nordhalbkugel wurden von den Kameras der Cassini-Sonde sechsmal schärfer aufgelöst (oben) als früher von Voyager 2. Wegen der zahlreichen Krater muss das Terrain älter sein als die kraterlose Südpolregion. Risse, Falten, Rücken und Senken zeigen an, dass beide Hemisphären regelrecht durchgeknetet wurden.

Wie der Erdmond kehrt Enceladus seinem Planeten stets dieselbe Seite zu; die Richtung zu Saturn definiert den Längengrad null. Die Kraterregionen liegen längs dieser Verbindungsachse – bei 0 und 180 Grad –, das von Rissen übersäte Terrain rechtwinklig dazu bei 90 und 270 Grad. Die Tigerstreifenregion bedeckt den Südpol und ist von einer Bergkette umgeben. Diese speziellen Orientierungen lassen vermuten, dass Saturns Schwerkraft die Oberfläche mitgeformt hat.



Bei einem weiteren sehr nahen Vorbeiflug im August 2008 konzentrierten sich unsere Kameras auf die Quellen der Ausbrüche. Das Tempo des Tiefflugs war so groß, dass eine spezielle Schwenktechnik eingesetzt werden musste, damit die Aufnahmen nicht verschmierten. Wie die Bildsequenz enthüllte, sind die Tigerstreifen bis zu 300 Meter tief, mit v-förmigem Querschnitt und über die Flanken verstreuten hausgroßen Eisblöcken. Die Gebiete längs der Flanken sehen besonders glatt aus – wahrscheinlich frisch gefallene Schneedecken.

Die unmittelbare Nachbarschaft der einzelnen Eruptionsschote unterscheidet sich nicht vom übrigen Gelände längs der Risse. Wir vermuten daher, dass ein Schlot nicht lange aktiv bleibt, weil kondensierender Dampf Eispropfen bildet, die den Stollen bald verstopfen. Dann bahnt sich der Dampfdruck an einer anderen Stelle des Bruchs einen neuen Schlot, bis auch dieser verstopft wird, und so weiter. Im Zeitraffer würde man wahrscheinlich die Jets in den Streifen hin und her wandern sehen.

Die Bilder ermöglichten auch präzise Messungen von Größe und Form des Mondes. Zusammen mit seiner Masse, die aus der Bahnkrümmung der Sonde hervorging, ergab sich, dass Enceladus der felsigste aller größeren Saturnmonde ist. Seiner mittleren Dichte von 1,6 Gramm pro Kubikzentimeter zufolge besteht der Mond zu 60 Prozent aus Gestein; vermutlich konzentriert es sich in einem felsigen Kern, den ein kilometerdicker Mantel aus gefrorenem Wasser umhüllt.

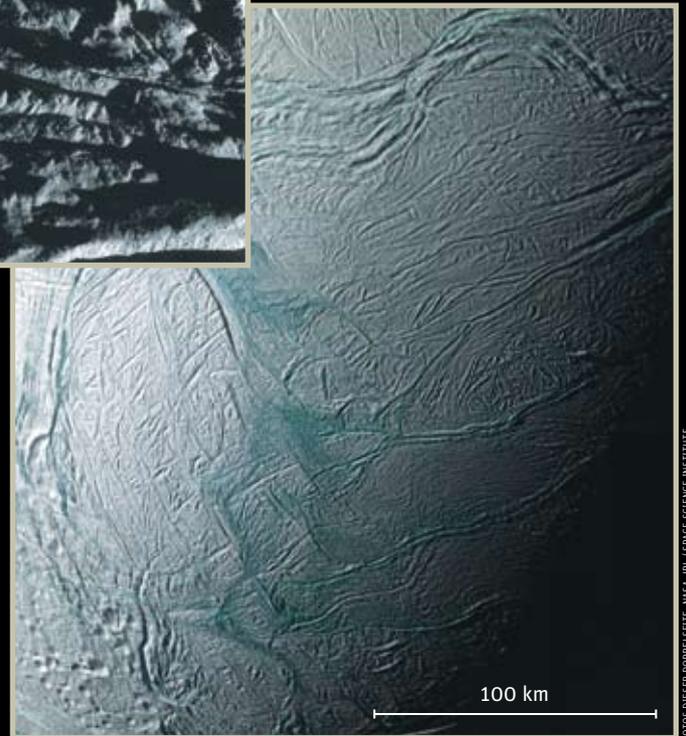
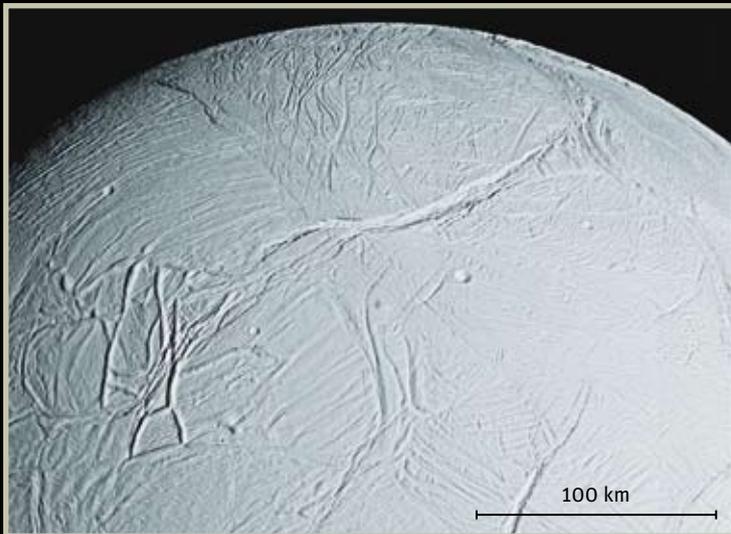
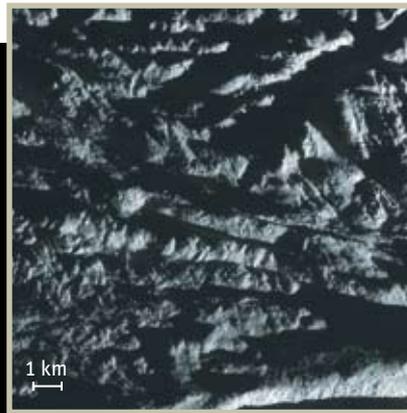
Irdisches Gestein enthält radioaktive Substanzen, die Wärme erzeugen. Zweifellos gilt für Enceladus das Gleiche, aber all sein Gestein reicht nicht aus, die beobachtete Wärme zu produzieren. Anderenfalls kommen als plausible Wärmequelle nur Gezeitenkräfte in Frage. So wie die Schwerkraft von Sonne und Mond unseren Planeten ein wenig deformiert und das Wechselspiel von Flut und Ebbe hervorruft, knetet Saturns Gravitation Enceladus durch. Wegen dessen exzentrischer Bahn variiert sein Abstand von Saturn. Je näher er ihm kommt, desto mehr wird er deformiert. Diese Variation erzeugt innere Verschiebungen

LEBEN AUF ENCELADUS?

Der Mond erfüllt drei notwendige Voraussetzungen für Leben: flüssiges Wasser, organische Verbindungen und Energie. Bestanden diese Bedingungen so lange, dass sich Leben entwickeln konnte? Niemand weiß, wie viel Zeit dafür nötig ist. Den **geologischen Befunden** zufolge entstanden Mikroben auf der Erde relativ rasch – ein paar hundert Millionen Jahre nach Abschluss der Planetenbildung.



Bei genauer Betrachtung durch Cassini erweisen sich große Gebiete, die für Voyager glatt aussahen, in Wirklichkeit als reich strukturiert (unten). Tiefe Schluchten erstrecken sich nordwärts in die Bruchregionen. Sogar Krater sind gebrochen, aufgeschnitten und oft fast eingeebnet (links).



Ein Nahaufnahme der Tigerstreifenregion zeigt hausgroße Eisblöcke (ganz oben). Rund um die Streifen und den Südpol liegt eine gewellte Bergkette – vielleicht durch ähnliche tektonische Verschiebungen aufgewölbt wie unser Himalaya.

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: NASA, JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

und somit Wärme. Auch für die Oberflächenformen scheint die Gravitation eine Rolle zu spielen. Die Tigerstreifen liegen 45 Grad zur Saturnrichtung; Gezeitenkräfte bieten eine natürliche Erklärung für diese Orientierung.

Das Ausmaß der Erwärmung hängt nicht nur von der Bahnexzentrizität ab, sondern auch von der Beschaffenheit des Mondinneren. Ein sehr starrer Körper wird nicht deformiert. Ein völlig elastisches Gebilde deformiert sich zwar, gibt aber keine Energie als Wärme ab. Ein formbarer Mond aus zähem Material gibt nach und erwärmt sich – aber auch ein Trabant, der teilweise starr, aber von Rissen durchzogen ist, so dass Eisbrocken sich gegeneinander verschieben und Reibungswärme erzeugen. Der Mond heizt sich wohl nicht gleichmäßig auf, sondern vorwiegend in den Rissen der äußeren Eishülle.

Normalerweise erschöpft sich die Gezeitenenergie allmählich. Da das Mondmaterial für die Deformation Zeit braucht, reagiert es verzögert auf die Gezeitenkräfte. Dadurch entsteht ein Drehmoment, das die Umlaufbahn des Mondes kreisförmig macht. Die Ge-

zeitenkräfte variieren nicht mehr, der Mond nimmt eine endgültige Form an, und die Erwärmung hört auf. Doch Enceladus bleibt wegen einer Bahnresonanz mit dem größeren Partner Dione auf einer elliptischen Bahn. In der Zeit, die Enceladus für zwei Umläufe braucht, vollendet Dione eine Saturnumkreisung. Dabei schubst sie den kleineren Gefährten periodisch auf dessen unrunde Bahn.

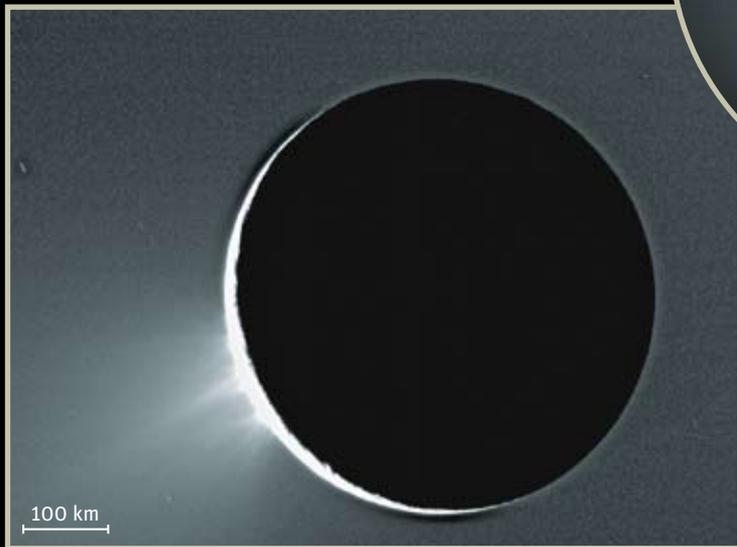
Aber auch diese Erklärung reicht nicht aus. Wie Jennifer Meyer und Jack Wisdom vom Massachusetts Institute of Technology herausgefunden haben, ist die vom exzentrischen Umlauf erzeugte Gezeitenenergie um den Faktor fünf kleiner als die Energie, die am Südpol frei wird. Die gegenwärtige Bahn von Enceladus liefert einfach zu wenig Energie, um seine Erwärmung zu erklären.

Ein Mond aus zähem Kitt?

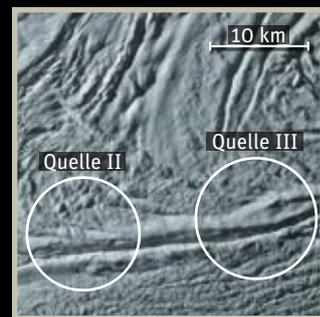
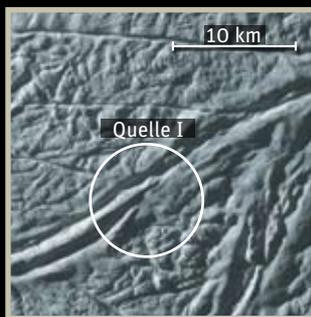
Das Problem entsteht nur, wenn man annimmt, die derzeitige Gezeitenenergie müsse exakt mit der gegenwärtigen Wärmeabgabe übereinstimmen. Aber vielleicht gibt Enceladus noch immer Wärme aus einer

HEISSE QUELLEN AUF EINEM KALTEN MOND

Aus der Südpolregion schießen Materiejets, die in eine breite, hoch aufragende Eruptionsfahne münden.



Die Jets führen dem E-Ring des Saturns Materie zu; das zeigten Cassini-Aufnahmen aus rund zwei Millionen Kilometer Entfernung. Einige der faserigen Strukturen in der Nähe des Mondes sind die langen Enden der Jets. Andere entstehen durch den Einfluss des Schwerefelds von Enceladus auf Partikel im E-Ring.



Die winzigen, in den Weltraum versprühten Eiskörner sind am besten sichtbar, wenn die Sonne sie von hinten bescheint. Die Schattengrenze lässt Berge und Täler erkennen.

Die Jets lassen sich bestimmten Orten auf den Tigerstreifen zuordnen. Seltsamerweise sehen diese Stellen nicht anders aus als die übrigen Streifen.

Literaturhinweise:

McKay, C. P. et al.: The Possible Origin and Persistence of Life on Enceladus and Detection of Biomarkers in the Plume. In: *Astrobiology* 8(5), S. 909–922, 2008.

Porco, C. C. et al.: Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus. In: *Science* 311, S. 1393–1401, 2006.

Porco, C. C.: Cassini: The First One Thousand Days. In: *American Scientist* 95(4), S. 334–341, 2007.

Tobie, G. et al.: Solid Tidal Friction above a Liquid Water Reservoir as the Origin of the South Pole Hotspot on Enceladus. In: *Icarus* 196(2), S. 642–652, 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/992813.

früheren Erwärmungsphase ab? Ein mögliches Szenario für den geologisch aktiven Jupitermond Io untersuchten Greg Ojakangas und David Stevenson 1986 am California Institute of Technology: Der Umlauf eines Mondes und seine innere Beschaffenheit können im Wechselspiel zu einer zyklischen Variation von Bahnexzentrizität und Wärmeabgabe führen.

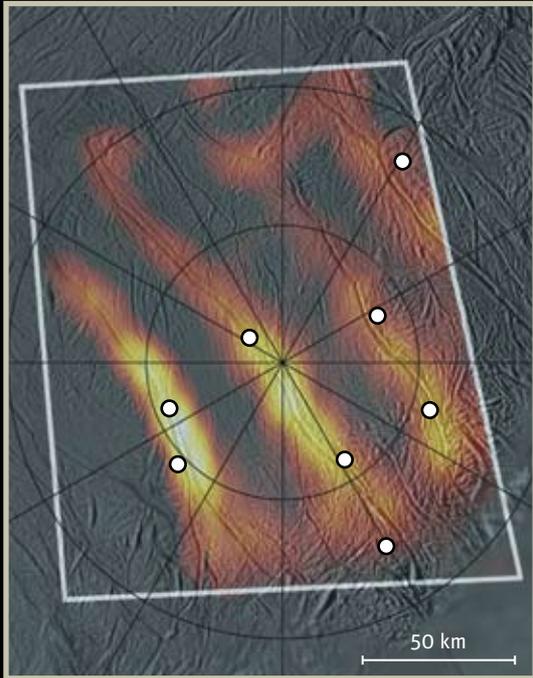
Beginnen wir mit einem kalten, größtenteils starren Enceladus auf fast kreisförmiger Bahn. Die Gezeitenenerwärmung ist relativ schwach. Dione erzwingt mehr Exzentrizität, was wiederum stärkere Deformation und mehr Reibungswärme in der Eishülle ergibt. Beides nimmt zu, bis an einem gewissen Punkt die Erwärmung des Mondes seine Fähigkeit zur Wärmeabgabe übersteigt. Die innere Temperatur beginnt nun zu wachsen, das Material im Inneren wird weicher und weniger starr, was zu noch mehr Gezeitenenerwärmung führt. In einem Alternativszenario wird der Mond weniger starr, weil Risse entstehen. Gezeitenkräfte brechen das Eis und verursachen Scherbewegungen. Die Reibung zwischen den Bruchflächen führt dort zu Erwärmung.

In beiden Fällen wird die Mondbahn durch die zusätzliche Umwandlung von Gezeiten-

energie in Wärme kreisförmiger, und schließlich kehrt sich der Trend um. Die Gezeitenenerwärmung nimmt ab und sinkt schließlich unter den Wärmeverlust an der Oberfläche. Der Mond kühlt aus, und entweder wird das Eis wieder fest oder – im zweiten Szenario – die Risse schließen sich. Der Zyklus, der mehrere zehn Millionen Jahre dauern kann, beginnt von vorn. So können wir zu einem Mond gelangen, dessen Wärmehaushalt gerade nicht im Gleichgewicht ist. In diesem Schwingungsschema gleichen sich Wärmezufuhr und -abgabe nur über den ganzen Zyklus aus. Zu jedem Zeitpunkt kann die Wärmeabgabe des Mondes über oder unter dem Durchschnitt liegen – und über oder unter seiner augenblicklichen Erwärmungsrate.

Wie Ojakangas und Stevenson zeigten, kann ein über die Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Eis vermittelter Zyklus für Io funktionieren, bei dem – wie bei Enceladus – die Wärmebilanz nicht aufgeht. Leider versagt die Erklärung für Enceladus: Der Mond hat Meyer und Wisdom zufolge nicht genug Masse. Höchstens ein über Risse vermittelter Zyklus wäre möglich, doch das muss noch genauer untersucht werden.

Gabriel Tobie von der Université de Nantes (Frankreich) hat eine andere Möglich-



Ein Wärmediagramm zeigt längs der Streifen Temperaturen bis zu 180 Kelvin – viel zu hoch für bloße Solarerwärmung. Die Jets entspringen in den allerheißesten Regionen (weiße Kreise).

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: NASA, JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

keit untersucht: In einer geologisch schwachen Zone am Südpol könnte sich dauerhaft Gezeitenenergie konzentrieren. Tobies Gruppe simulierte die Reaktion von Enceladus auf Gezeiteinflüsse unter der Annahme, dass unter dem Südpol ein Sektor niedriger Viskosität liegt, wodurch dieser Teil des Mondes leichter verformbar ist als der Rest. Das Modell gibt den beobachteten Wärme-Output wieder – aber nur unter zwei Bedingungen, die unser Bild von Enceladus revolutionieren.

Ein riesiger See in der Tiefe

Erstens muss das Eis dort warm sein – nahe seinem Schmelzpunkt –, und zweitens muss zwischen der Eishülle und dem Gesteinskern eine flüssige Schicht liegen, die sich fast über die gesamte Südhalbkugel erstreckt. Andernfalls würde die Verformung und somit die Reibungswärme nicht ausreichen; außerdem träte sie eher am Äquator als am Pol auf.

Für die Idee, unter der Oberfläche schlummere ein See, spricht, dass die Südpolkappe eigentlich ein 500 Meter tiefes Becken ist. Nach Geoffrey Collins vom Wheaton College und Jason Goodman von der Woodshole Geographic Institution könnte diese Vertiefung die Folge darunterliegenden Wassers sein. Da es in flüssiger Form dichter ist als Eis,

WARUM DER SÜDPOL?

Weshalb konzentriert sich die geologische Aktivität am Südpol? Vielleicht durch einen Zufall. Der Einschlag eines Meteors könnte – ähnlich wie im Fall der riesigen Becken auf den Saturnmonden Iapetus und Tethys – die äußere Eishülle aufgebrochen oder wenigstens geschwächt haben, wodurch die Gezeitenenergie bevorzugt dort angriff. Dann verschob sich die Eishülle mit der Zeit durch eine sogenannte **echte Polwanderung**, und zugleich wurden Regionen geringer Dichte durch Zentrifugalkräfte zu den Polen getrieben. Paul Helfenstein von der Cornell University in Ithaka (New York) fand Indizien dafür: Ein äquatornahes Gebiet namens Sarandib Planitia ähnelt einer erodierten Version der Südpolregion, als hätte es einst am Pol gelegen und wäre seither an seinen gegenwärtigen Ort gewandert.



wichtige onlineadressen

- ▶ CONTOO**
Das Konferenzportal zur Organisation, Verwaltung und Präsentation wissenschaftlicher Tagungen
www.contoo.de
- ▶ Managementwissen**
per Fernlehre kostengünstig ortsunabhängig erwerben
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter
www.cqa.de
- ▶ Expedition Zukunft**
ScienceExpress – ein Wissenschaftszug fährt quer durch Deutschland
www.expedition-zukunft.org
- ▶ Kernmechanik**
Können Sie das Rätsel der Kernstrukturen und Dipolmomente lösen? Gewinnen Sie bis zu 1.000 Euro (Rechtsweg ausgeschlossen)!
www.kernmechanik.de
- ▶ SciLogs**
Die größte deutschsprachige Webseite mit Wissenschaftsblogs
www.scilogs.de
- ▶ Lärm im Labor?**
Dagegen haben wir was:
www.sonation.com
- ▶ vdi nachrichten-Shop**
Der Onlineshop für Ingenieure
www.vdi-nachrichten-shop.com

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

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

nimmt das gesamte Wasser im fraglichen Gebiet ein geringeres Volumen ein. Eigentlich ist die ganze Polarregion ein riesiges Senkgebiet.

Ein See würde einen großen Teil der geologischen Vielfalt auf Enceladus erklären. Wie Isamu Matsuyama von der Carnegie Institution in Washington und Francis Nimmo von der University of California in Santa Cruz betont haben, sind Position und Orientierung der wichtigsten geologischen Besonderheiten – insbesondere die Risse in Nord-süd-Richtung und die den Pol umringenden Bergzüge – Indizien dafür, dass die Eishülle des Mondes relativ zu seiner Drehachse verrutscht ist. Der Mond wirkt wie ein riesiger Drehkrei-

sel, dessen Außenhülle mehr oder weniger frei rotieren kann.

Das würde erklären, warum die geologisch aktive Region genau am Südpol liegt: Ein warmes Gebiet mit unterdurchschnittlicher Dichte driftet von selbst zur Rotationsachse hin. Außerdem steigt eine Wärmezone unter dem Südpol durch Konvektion auf und drängt die spröde Deckschicht der Eishülle nach oben und außen; das erklärt die Ähnlichkeit der Südpolregion mit einer Spreizungszone. Damit die Eishülle sich so bewegen kann, muss eine Flüssigkeitsschicht das Eis von den tieferen Schichten entkoppeln.

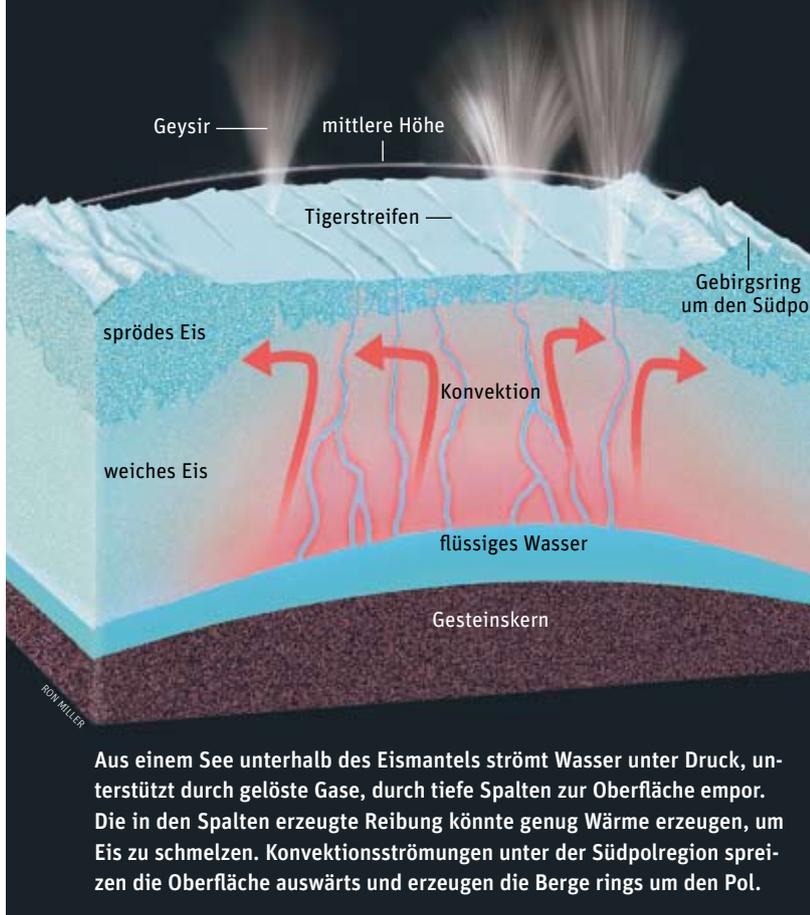
Wahrscheinlich verursacht eine Kombination all dieser Effekte die geologische Aktivität auf Enceladus. Wenn der Mond einen durch Risse vermittelten Erwärmungszyklus durchläuft und wenn die Gezeitendeformation der äußeren Eishülle schnell genug vor sich geht, könnten sich Risse in die formbare warme Zone unterhalb ausbreiten – und vielleicht sogar bis zu dem See in der Tiefe. Die Reibung zwischen den Bruchflächen verstärkt die gesamte viskose Erwärmung unter dem Südpol. Entlang der tiefen Risse schmilzt das Eis, und das Schmelzwasser beschleunigt die Erwärmung zusätzlich. Indem flüssiges Wasser aus der darüberliegenden Hülle in den See sickert, kann sich das Reservoir im Untergrund dauerhaft etablieren. Wenn der See während der Abkühlungsphase des Zyklus nicht komplett einfriert, geht der ganze Prozess weiter, solange Enceladus synchron mit Dione den Saturn umläuft.



EINE VERBORGENE WASSERWELT

Jets und hohe Temperaturen weisen deutlich auf flüssiges Wasser im Mondinneren hin. Die Jets versprühen Wassereispartikel und Dampf, und die intensive Wärme, die sie antreibt, erfordert offenbar flüssiges Wasser, um die starke Wirkung der von Saturn ausgeübten Gezeitenkräfte zu erklären.

Enceladus besteht wahrscheinlich aus einem Gesteinskern, der von einem dicken Eismantel umhüllt ist. Die gesamte Region um den Südpol ist eine 500 Meter tiefe Senke – vielleicht Folge eines Sees unter der Oberfläche. Die Berge um den Pol ragen einen Kilometer hoch über den Boden der Senke.



Aus einem See unterhalb des Eismantels strömt Wasser unter Druck, unterstützt durch gelöste Gase, durch tiefe Spalten zur Oberfläche empor. Die in den Spalten erzeugte Reibung könnte genug Wärme erzeugen, um Eis zu schmelzen. Konvektionsströmungen unter der Südpolregion spreizen die Oberfläche auswärts und erzeugen die Berge rings um den Pol.

Ein verborgener See als Wiege außerirdischen Lebens?

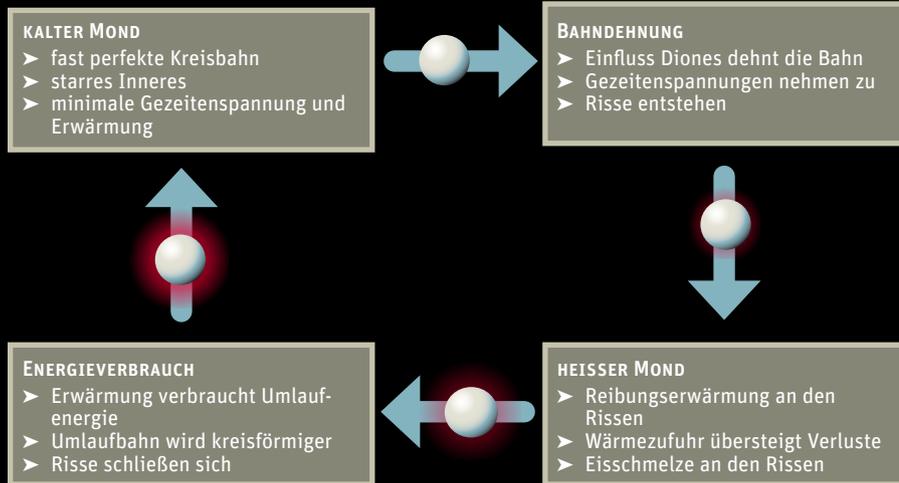
Überdies könnte flüssiges Wasser die beobachteten Eruptionen zwanglos erklären. Michael Manga von der University of California in Berkeley hat gezeigt, dass partielles Gefrieren eines Untergrundsees seinen Druck erhöht und Flüssigkeit nach oben presst. Während der Druck beim Aufstieg nachlässt, bilden Kohlendioxid und andere gelöste Gase Bläschen, die den Aufstieg fördern – wie beim Schütteln einer Sektflasche. Falls die Flüssigkeit es tatsächlich bis ganz nach oben schafft, beantwortet dies sofort die Frage, wie die Wärme von ihrem Entstehungsort tief im Mondinneren an die Oberfläche gelangt: Wasser ist ein ausgezeichnete Wärmeträger. Demnach sind die Jets in der Tat Geysire, die unterirdischen Wasserreservoirs entspringen.

Da Enceladus unter der Oberfläche fast sicher Wasser birgt, stehen wir vor der faszinierenden Möglichkeit, dass sich in dem kleinen Mond zumindest Vorstufen von Leben regen. Alles Nötige scheint vorhanden: flüssiges Was-

DIE WIRKUNG DER GEZEITENKRÄFTE

Durch denselben Prozess, der auf der Erde Ebbe und Flut verursacht, streckt die Schwerkraft von Saturn seinen Mond zu einer etwas länglichen Form. Das Ausmaß der Dehnung variiert während des Umlaufs, weil die Bahn von Enceladus nicht perfekt kreisförmig ist. Die resultierenden Spannungen erwärmen das Innere. Durch diesen Vorgang strebt die Umlaufbahn zur Kreisform, aber die Schwerkraft eines anderen Saturnmondes namens Dione sorgt dafür, dass die Bahn exzentrisch bleibt.

EINFLUSS DER GEZEITENERGIE ➤



◀ ERWÄRMUNGSZYKLUS

Gegenwärtig ist die Gezeiterwärmung zu gering, um das Ausmaß der beobachteten geologischen Aktivität zu erklären. Eine Hypothese besagt, dass Enceladus von einer Wärmezufuhr vor tausenden oder Millionen Jahren profitiert. Falls die Umlaufbahn einst noch exzentrischer war, könnte die Erwärmung stärker gewesen sein. Da das Ausmaß der Exzentrizität und der inneren Rissbildung sowie die Stärke der Erwärmung voneinander abhängen, entsteht ein Zyklus, in dem alle drei Größen variieren.

MELISSA THOMAS

ser, die erforderlichen chemischen Elemente und überschüssige Energie. Einem Ökosystem auf Enceladus würden auf der Erde am ehesten unterirdische vulkanische Schichten ähneln, in denen Wasser in völliger Finsternis heißes Gestein umspült. Hier findet man Organismen, die entweder Wasserstoff und Kohlendioxid aufnehmen, um daraus Methan zu erzeugen, oder Wasserstoff und Sulfate; Energie beziehen sie nicht von der Sonne, sondern aus der Erdwärme.

Selbst Cassini vermag viele Fragen zu Enceladus und seiner Vergangenheit nicht zu beantworten. Erst ein spezieller Orbiter, der den Mond oft umkreist, könnte das Schwerfeld und die Topografie vollständig vermessen, um die interne Massenverteilung festzustellen und insbesondere tief liegende Wasserschichten aufzuspüren. Ein kleines Landegerät könnte mit einem Seismometer verborgene Flüssigkeitsbewegungen entdecken.

Hohe Kosten und eine lange Entwicklungszeit zwingen bei komplexen Missionen zu sorgsamer Auswahl des Zielorts: Viele Forscher möchten zum Jupitermond Europa zurückkehren, der anscheinend ebenfalls in seiner Tiefe einen Ozean und somit möglicherweise außerirdisches Leben trägt (siehe

SdW 12/1999, S. 42). Ich verspreche mir hingegen von Enceladus mehr. Da auf Europa keine aktiven Geysire bekannt sind, müsste man dort auf der Suche nach einem verborgenen Ökosystem Tiefbohrungen anstellen; dieses Unternehmen ist so aufwändig, dass es gewiss nicht mehr zu unseren Lebzeiten stattfinden wird. Um hingegen Proben aus dem Inneren von Enceladus zu gewinnen, genügt es, durch die Eruptionsfahne zu fliegen oder in der Südpolregion zu landen.

Zudem ist die Magnetosphäre von Saturn viel schwächer als die von Jupiter; darum muss eine Enceladus-Mission nicht mit einem so starken Strahlungsfeld fertig werden wie bei Europa. Und schließlich könnte eine Reise zu Enceladus auch den Saturnmond Titan einschließen, der ebenfalls einen Blick auf chemische Voraussetzungen für Leben verspricht (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2007, S. 32).

Vorläufig freuen wir uns über die Überraschung, die uns der kleine, rätselhafte Saturnmond beschert hat: Seine Südspitze ist ein fantastischer und ruheloser Ort mit tiefen, eisigen Schluchten und gewaltigen Springbrunnen. Damit wurden die kühnsten Erwartungen der Planetenforscher übertroffen. ◁



Carolyn Porco leitet das Cassini-Kamerateam und das Cassini Imaging Central Laboratory for Operations (Ciclops). Sie gehörte dem Voyager-Kamerateam an und war von 2001 bis 2003 zweite Vorsitzende des Solar System Exploration Decadal Survey Committee der National Academy of Sciences, das künftige Planetenmissionen auswählt. Im Januar 2008 verlieh ihr die American Humanist Association den Isaac Asimov Science Award. Porco war 1997 Beraterin für den Film »Contact« und beriet kürzlich den Regisseur J.J. Abrams bei dem neuesten »Star Trek«-Film.

QUANTEN- COMPUTER MIT IONEN



Forscher experimentieren bereits mit Geräten, in denen einzelne Atome Daten speichern und manipulieren. Am Ende dieser Entwicklung könnten ungeahnt leistungsfähige Computer stehen.

In Kürze

- ▶ **Quantencomputer** werden Daten mittels Atomen, Photonen oder künstlichen Mikrostrukturen speichern und verarbeiten, erwarten Forscher. Eines Tages sollen diese Maschinen geradezu unglaubliche Rechenkunststücke zu Wege bringen.
- ▶ Auf die **Manipulation eingefangener Ionen** richten sich dabei besondere Hoffnungen. Schon heute lassen sich Daten auf Ionen speichern und von einem Ion zum anderen übertragen.
- ▶ Komplette **Ionenfallen-Computer** zu entwickeln, ist im Prinzip sicher machbar – aber noch bleiben viele praktische Probleme zu lösen.

Von Christopher R. Monroe und David J. Wineland

In den letzten Jahrzehnten haben sich Rechentempo und Zuverlässigkeit von Computern drastisch erhöht. Moderne Chips packen fast eine Milliarde Transistoren auf eine zentimetergroße Siliziumscheibe, und künftig werden Computerelemente noch weiter schrumpfen, bis hinunter zur Größe einzelner Moleküle. Solche Rechner dürften höchst ungewohnt anmuten, denn sie werden nach quantenmechanischen Regeln arbeiten – gemäß den physikalischen Gesetzen, die das Verhalten von Atomen und Elementarteilchen erklären. Daran knüpft sich die große Erwartung, dass Quantencomputer bestimmte wichtige Aufgaben wesentlich schneller auszuführen vermögen als herkömmliche Rechner.

Die wohl bekannteste dieser Aufgaben ist das Faktorisieren einer großen Zahl, die das Produkt zweier Primzahlen ist. Zwei Primzahlen zu multiplizieren fällt Computern

leicht, selbst wenn die Zahlen hunderte Ziffern lang sind, aber der umgekehrte Prozess – das Herleiten der Primfaktoren – ist so schwierig, dass er die Grundlage fast aller heute gebräuchlichen Verschlüsselungstechniken bildet, vom Onlinebanking bis zur Übertragung von Staatsgeheimnissen. Im Jahr 1994 zeigte Peter Shor an den Bell Laboratories in Murray Hill (New Jersey), dass ein Quantencomputer diese Codes theoretisch leicht knacken könnte, weil das Tempo, in dem er Zahlen zu faktorisieren vermag, exponentiell höher ist als das jedes bekannten klassischen Algorithmus. Und 1997 zeigte Lov K. Grover, damals ebenfalls an den Bell Labs, dass ein solches Gerät das Durchsuchen einer unsortierten Datenmenge erheblich beschleunigen würde – beispielsweise das Auffinden einer Person in einem Telefonbuch, von der man nur die Telefonnummer kennt.

Doch einen Quantencomputer tatsächlich zu bauen wird gar nicht leicht sein. Seine Hardware – die Atome, Photonen oder künstlichen Mikrostrukturen, welche die Daten als

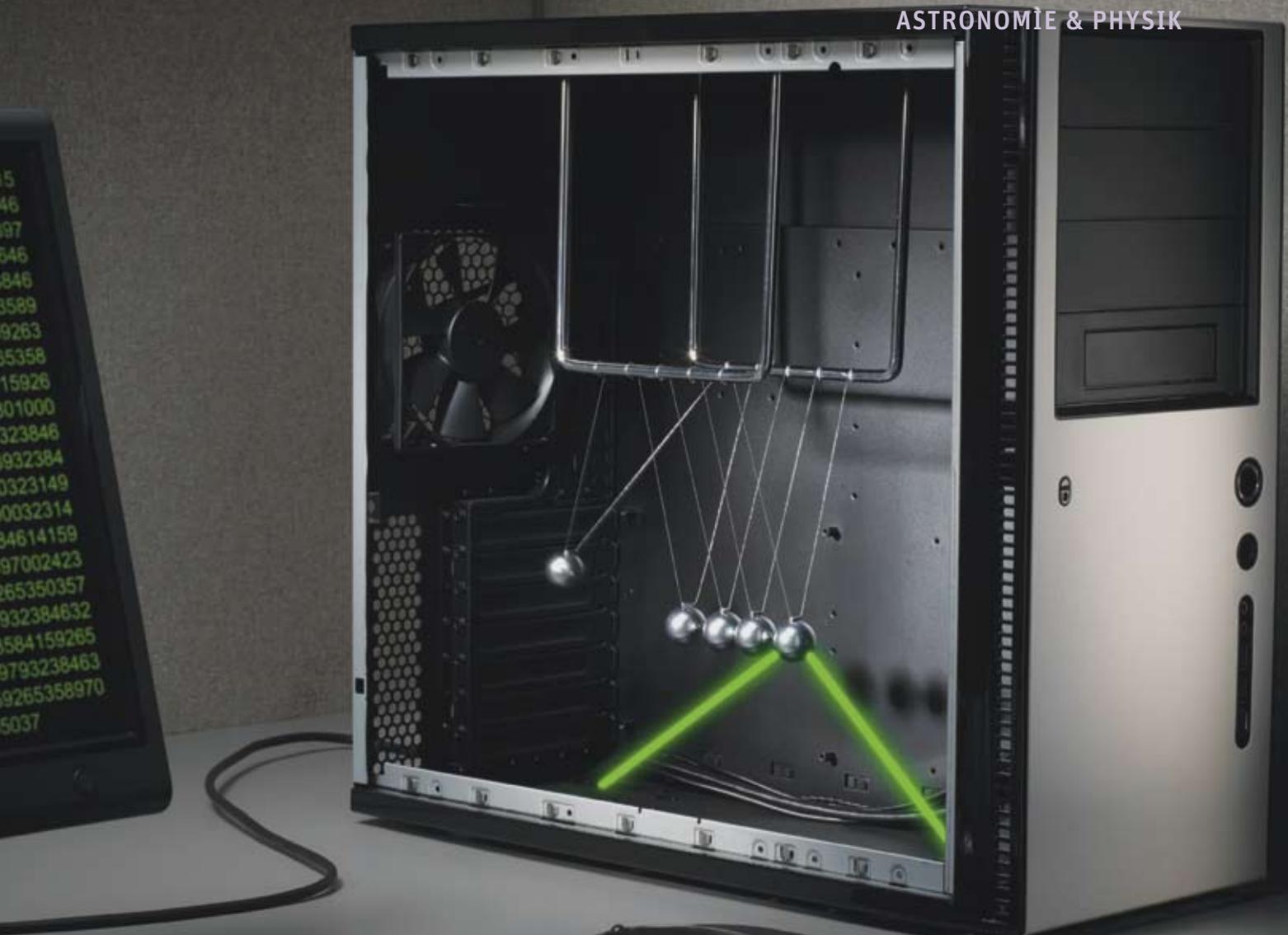


FOTO: DAVID EMMITE; FOTOILLUSTRATION (KUGELN): GEORGE RETSECK

Quantenbits, kurz Qubits, speichern – muss widersprüchlichen Forderungen genügen. Die Qubits müssen einerseits genügend isoliert von ihrer Umgebung sein; sonst würden unerwünschte Wechselwirkungen die Berechnung stoppen. Dieser zerstörende Vorgang, die so genannte Dekohärenz, ist der Fluch des Quantencomputers. Andererseits müssen die Qubits stark miteinander wechselwirken und letztlich exakt gemessen werden, damit sich das Resultat ihrer Berechnungen feststellen lässt.

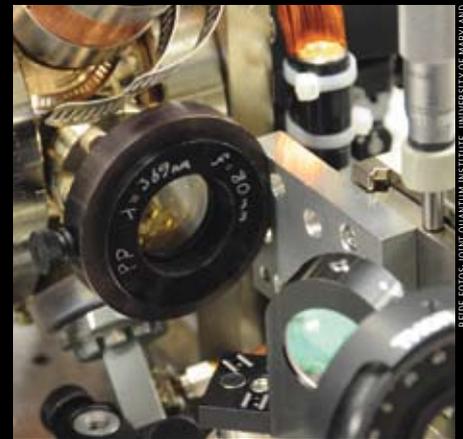
In aller Welt verfolgen Wissenschaftler mehrere Ansätze, um den ersten Prototyp eines Quantencomputers zu bauen. Unsere eigene Forschung konzentriert sich auf die Datenverarbeitung mittels einfach positiv geladener Ionen; das sind Atome, denen ein Hüllenelektron geraubt wurde. Wir haben kurze Ionenstränge in Fallen gesperrt, halten also die Teilchen in einem Vakuum zwischen Elektroden fest, indem wir elektrische Felder anlegen. So können sie Inputsignale von einem Laser empfangen und gemeinsam Daten speichern.

Unser Ziel ist die Entwicklung skalierbarer Rechengeräte – das heißt von Systemen, die Hunderte oder auch Tausende Qubits enthalten. Solche Systeme würden in der Tat komplexe Aufgaben lösen, an denen jeder gewöhnliche Computer scheitern muss.

Ein Akkord von Quantenzuständen

Die Quantenmechanik ist eine Wellentheorie. Genau wie Schallwellen, die von mehreren Klaviersaiten ausgehen, sich zu einem Akkord vereinen, können verschiedene Quantenzustände zu einer Überlagerung oder Superposition kombiniert werden. Beispielsweise kann ein Atom gleichzeitig an zwei Orten oder in zwei unterschiedlichen Anregungszuständen sein. Wenn ein Quantenteilchen in einem solchen Superpositionszustand gemessen wird, »kollabiert« der Zustand – so die gängige Interpretation – zu einem eindeutigen Resultat, wobei die Wahrscheinlichkeit jedes möglichen Messresultats durch den relativen Anteil der Wellen in der Superposition gegeben ist (siehe Kasten auf S. 36). Auf diesen Superpositionen

Künftige Ionenfallen-Computer könnten Daten mit Ionensträngen kodieren und verarbeiten, die sich ein wenig wie das als Schreibtischspielzeug beliebte – und hier symbolisch in ein Computergehäuse eingebaute – Kugelstoßpendel verhalten. Die Ionen treten durch Schwingungsbewegungen miteinander in Wechselwirkung. Forscher können die Teilchen manipulieren, indem sie Laserstrahlen darauf richten.



BERKE FOTOS: JOHN QUANTUM INSTITUTE, UNIVERSITY OF MARYLAND

Das Prinzip der quantenmechanischen Datenverarbeitung lässt sich auf dem Labortisch demonstrieren. Die Forscher verwenden einen Laser (das blaue Gerät in der Fotografie links), dessen Strahlen durch mehrere Spiegel bis zu dem Apparat geleitet wird, der die gefangenen Ionen enthält (oben). Der Laser kühlt das Ion – entzieht ihm also seine kinetische Energie –, so dass die Forscher es leicht manipulieren können.

beruht die Macht eines Quantencomputers. Während ein herkömmliches Bit nur die Werte 0 oder 1 annehmen kann, vermag ein Qubit zugleich 0 und 1 zu sein. Ein System mit zwei Qubits kann vier Werte auf einmal annehmen – 00, 01, 10 und 11. Im Allgemeinen vermag ein Quantencomputer mit N Qubits gleichzeitig 2^N Zahlen zu manipulieren; eine Ansammlung von nur 300 Atomen, die je ein Quantenbit speichern, könnte mehr Werte enthalten, als es Teilchen im Universum gibt!

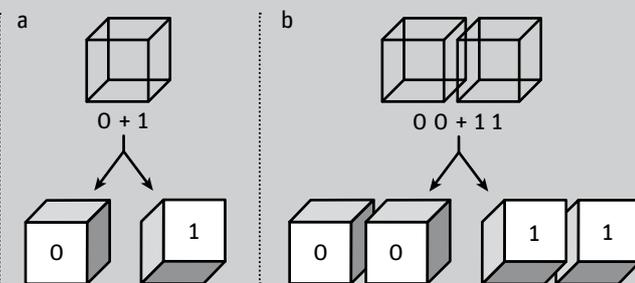
Diese größeren Quantensuperpositionen sind üblicherweise verschränkt, das heißt, die

Messungen der einzelnen Qubits sind korreliert. Man kann sich die Quantenverschränkung, die in der klassischen Physik kein Gegenstück hat, als eine unsichtbare Verdrachung zwischen den Teilchen vorstellen; Einstein sprach darum von »spukhafter Fernwirkung«. In unseren Experimenten mit eingefangenen Ionen verhält sich jedes elektrisch schwebende Ion wie ein mikroskopischer Stabmagnet; die Qubit Zustände 0 und 1 entsprechen zwei möglichen Orientierungen jedes atomaren Magneten, sagen wir aufwärts und abwärts. Mittels Laserkühlung, die den Atomen durch Photonenstreuung kinetische Energie entzieht, werden die Ionen in der Falle fast zum Stillstand gebracht. Da sie in einer Vakuumkammer ruhen, sind sie von der Umgebung isoliert, doch die elektrische Abstoßung zwischen ihnen liefert eine starke Wechselwirkung, so dass sie Verschränkung erzeugt. Haarfeine Laserstrahlen werden auf einzelne Ionen gerichtet, um die in den Qubits gespeicherten Daten zu manipulieren und zu messen.

In den letzten Jahren haben Forscher viele experimentelle Indizien dafür gesammelt, dass Quantencomputer mit eingefangenen Ionen prinzipiell konstruierbar sind. Man hat verschränkte Zustände aus bis zu acht Qubits erzeugt und gezeigt, dass diese rudimentären Computer simple Algorithmen ausführen können. Anscheinend ist es im Prinzip einfach,

SPUKHAFT FERNWIRKUNG

Der zweideutige Kippwürfel (a, oben) symbolisiert ein Ion in einem Superpositionszustand von 0 und 1. Erst die Messung versetzt das Ion in einen eindeutigen Zustand, entweder 0 oder 1 (a, unten). Bilden zwei Ionen eine verschränkte Superposition (b), zwingt eine Messung beide in den gleichen Zustand – entweder 0 oder 1 –, obwohl eine physikalische Verbindung zwischen ihnen fehlt.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: FRED ALAN WOLFF, TAKING THE QUANTUM LEAP

obgleich technisch sehr aufwändig, mit gefangenen Ionen auch viel mehr Qubits darzustellen. Nach dem Vorbild klassischer Computer gälte es, aus jeweils nur wenigen eingesperrten Ionen einige Typen logischer Gatter zu konstruieren. Man kann herkömmliche Fehlerkorrekturtechniken auf die Quantenwelt anwenden, indem man jedes Qubit durch mehrere Ionen kodiert. Diese redundante Kodierung macht das System fehlertolerant, solange die Fehler sich nicht zu sehr häufen. Letztlich würde ein brauchbarer Quantencomputer höchstwahrscheinlich mindestens 1000 Ionen speichern und manipulieren, die inmitten komplexer Anordnungen von Elektroden auf mikroskopischen Chips gefangen säßen.

Die erste Bedingung für einen »universellen« – für alle möglichen Berechnungen tauglichen – Quantencomputer ist ein zuverlässiger Speicher. Versetzen wir ein Qubit in eine Superposition von 0 und 1 (wobei die magnetische Orientierung des Ions zugleich auf- und abwärtsweist), muss es diesen Zustand beibehalten, bis die Daten verarbeitet oder gemessen werden. Wie die Forscher seit Langem wissen, können in elektromagnetischen Fallen fixierte Ionen sehr gute Qubitspeicher bilden, mit einer Superpositionsdauer – auch Kohärenzzeit genannt – von mehr als zehn Minuten. Diese relativ lange Lebensdauer folgt aus der extrem schwachen Wechselwirkung eines Ions mit seiner Umgebung.

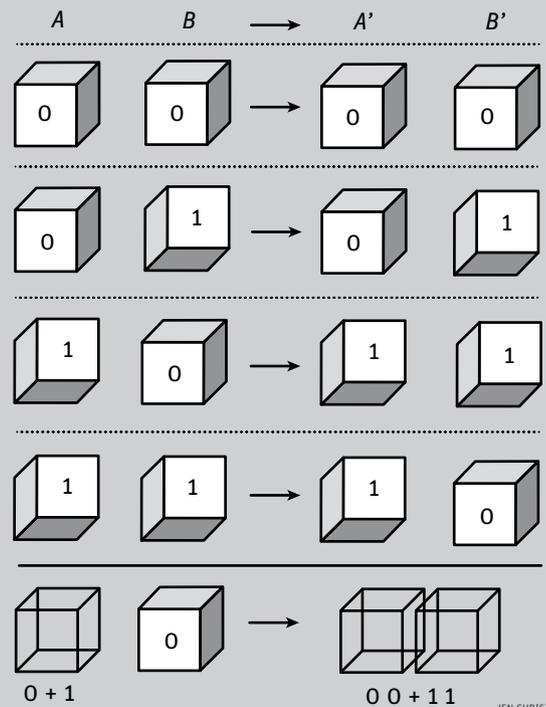
Nur nicht den Nachbarn stören!

Die zweite Grundvoraussetzung ist die Fähigkeit, ein einzelnes Qubit zu manipulieren. Da die Qubits auf der magnetischen Orientierung eines eingesperrten Ions beruhen, können die Forscher für kurze Zeit oszillierende Magnetfelder anlegen, um ein Qubit von 0 zu 1 oder umgekehrt umzuschalten, oder um es in eine Superposition zu versetzen. Auf Grund der kleinen Abstände zwischen den gefangenen Ionen – meist nur ein paar tausendstel Millimeter – lassen sich die oszillierenden Felder zwar nur schwer auf ein einzelnes Ion beschränken. Gerade das ist aber wichtig, denn oft wollen wir die Orientierung eines Qubits ändern, ohne seinen Nachbarn zu stören. Das Problem lässt sich lösen, indem man feine, genau auf das oder die gewünschten Qubits fokussierte Laserstrahlen verwendet.

Die dritte Vorbedingung ist die Fähigkeit, zumindest einen Typ von logischem Gatter zwischen Qubits zu konstruieren. Ein solches Schaltelement kann einem klassischen UND- oder ODER-Gatter gleichen, aus denen herkömmliche Prozessoren aufgebaut sind, aber es muss auch auf die nur Qubits eigenen Superpositionen einwirken. Ein häufiges logisches

WAHRHEITSTAFEL EINES CNOT-GATTERS

Ein Computer mit gefangenen Ionen beruht auf logischen Gattern wie dem kontrollierten Nicht-Gatter CNOT aus zwei Ionen A und B. Die Wahrheitstafel zeigt: Hat A (das Kontrollbit) den Wert 0, bleibt B unverändert. Doch wenn A gleich 1 ist, kippt das Gatter den B-Wert, das heißt: B wechselt von 0 nach 1 oder umgekehrt. Falls A in einem Superpositionszustand von 0 und 1 ist, versetzt das Gatter die beiden Ionen in eine verschränkte Superposition. (Ihr Zustand ist dann identisch mit dem im Kasten links unten (b) gezeigten.)



Gatter für zwei Qubits heißt kontrolliertes Nicht-Gatter oder kurz CNOT. Nennen wir die Qubit-Inputs A und B, wobei A das Kontrollbit ist. Hat A den Wert 0, so lässt das CNOT-Gatter B unverändert; wenn A gleich 1 ist, kehrt das Gatter den Wert von B um – von 0 nach 1 oder umgekehrt (siehe Kasten oben). Dieses Element heißt auch bedingtes logisches Gatter, denn seine Einwirkung auf den Qubit-Input B – ob das Bit kippt oder nicht – wird durch den Wert des Qubit-Inputs A bedingt.

Um ein bedingtes logisches Gatter zwischen zwei Ionen-Qubits herzustellen, brauchen wir eine Kopplung zwischen ihnen; sie müssen kommunizieren. Da beide Qubits positiv geladen sind, sind ihre Bewegungen durch Coulomb-Abstoßung elektrisch stark gekoppelt. Im Jahr 1995 schlugen Juan Ignacio Cirac und Peter Zoller an der österreichischen Universität Innsbruck eine Methode vor, wie sich mit Hilfe dieser Coulomb-Wechselwirkung die internen Zustände der beiden Ionen-Qubits indirekt koppeln lassen und ein CNOT-Gatter verwirklicht werden kann.

Eine Variante ihres Gatters funktioniert kurz zusammengefasst folgendermaßen. Stellen wir uns zwei Murmeln in einer Mulde vor. Angenommen, sie sind geladen und stoßen sich gegenseitig ab. Beide Murmeln streben zum tiefsten Punkt der Mulde, aber die Cou-

ENORMES POTENZIAL

Die hohen Erwartungen, die sich an Computer mit Ionenfallen richten, beruht auf der Tatsache, dass ein System mit N Ionen 2^N Zahlen auf einmal zu speichern vermag. Mit wachsendem N nimmt der Wert 2^N exponentiell zu.

$$2^5 = 32$$

$$2^{10} = 1024$$

$$2^{50} = 1125899906842624$$

$$2^{100} = 1267650600228229401496703205376$$

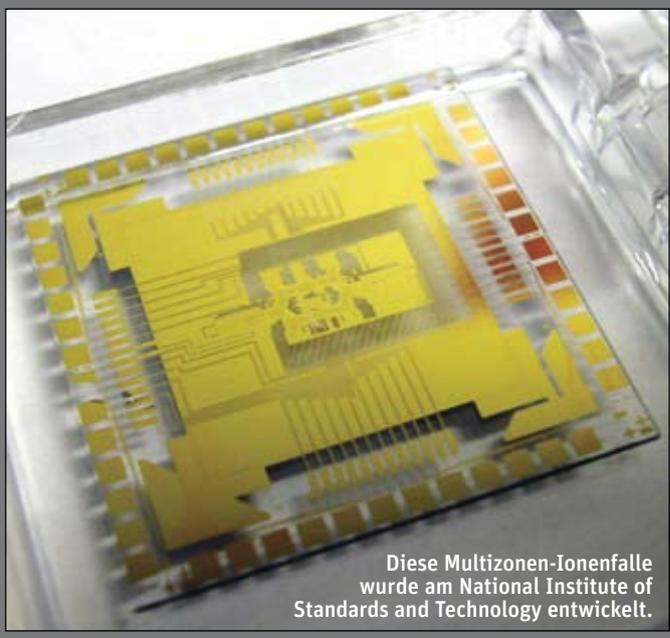
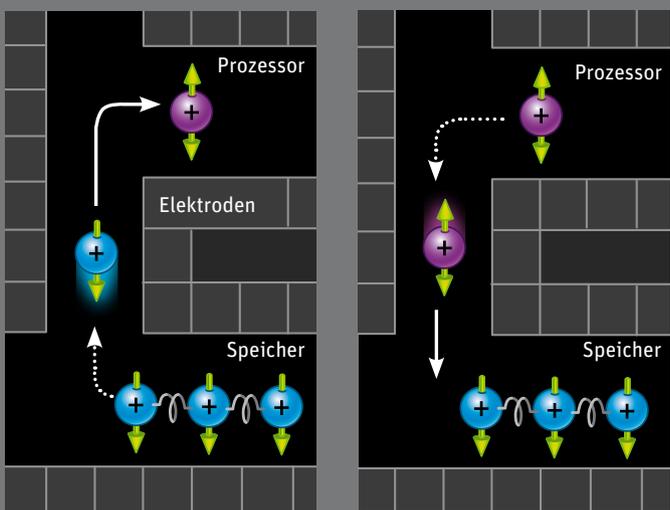
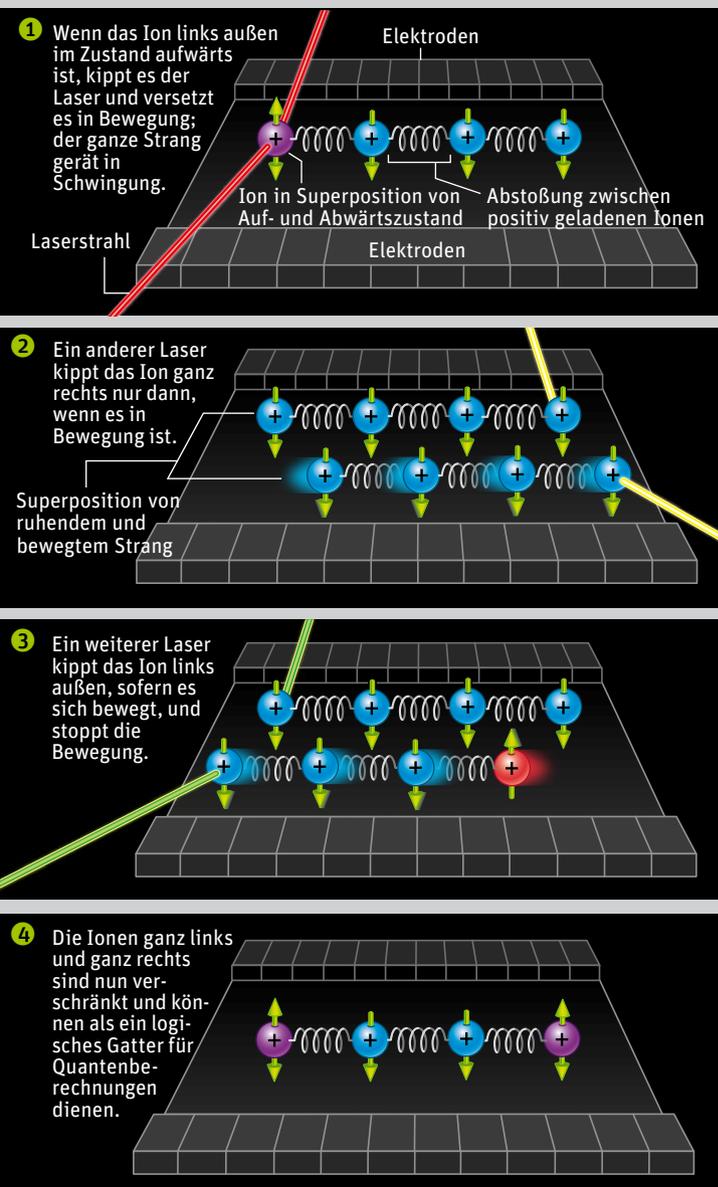
lomb-Abstoßung zwingt sie, ein bisschen weiter oben und einander gegenüber zu verharren. In diesem Zustand bewegen sich die Murmeln nicht unabhängig voneinander. Sie könnten beispielsweise in der Mulde längs ihrer Verbindungsgeraden in konstantem Ab-

stand hin- und herschwingen. Auch ein Paar von Qubits in einer Ionenfalle würde eine gemeinsame Bewegung ausführen, wie zwei durch eine Feder verbundene Pendelgewichte. Diese Bewegung können die Forscher anregen, indem sie mit einem Laserstrahl, der auf

BEWEGUNGSKOPLUNG VON IONENSTRÄNGEN

Ein Weg zum Bau eines Ionencomputers führt über die Verbindung der Ionen durch ihre gemeinsame Bewegung. Ein Ionenstrang schwebt durch elektrische Kräfte zwischen zwei Anordnungen von Elektroden. Da die positiv geladenen Teilchen einander abstoßen, teilt sich jede Oszillation, in die ein einzelnes Ion versetzt wird – etwa durch einen präzise gezielten Laser –, dem ganzen Ionenstrang mit. Laser können auch die magnetische Orientierung der Ionen kippen, in der die im Strang gespeicherten Daten kodiert sind. Wenn die Orientierung aufwärts dem Wert 1 entspricht, bedeutet abwärts 0.

Die Zukunft: Dieses System auf größere Ionenzahlen zu erweitern, ist allerdings schwierig. Anscheinend sind längere Stränge aus mehr als 20 Ionen fast unmöglich zu kontrollieren, weil ihre zahlreichen gemeinsamen Bewegungszustände miteinander interferieren. Darum entwickeln Forscher gitterförmige Fallen, in denen die Ionen beispielsweise von einem Speicherstrang zu einem Datenverarbeitungsstrang befördert werden können. Durch die Quantenverschränkung der Ionen werden Daten von einer Zone der Falle zu einer anderen übertragen.



ILLUSTRATIONEN: JEN CHRISTENSEN; FOTO IONENFALLE: JASON AMINI, NIST

die natürliche Schwingungsfrequenz der Falle moduliert ist, Strahlungsdruck ausüben (siehe Kasten links).

Vor allem lässt sich der Laserstrahl so einstellen, dass er das Ion nur beeinflusst, wenn dessen magnetische Orientierung aufwärtsweist, was hier dem Qubitwert 1 entspricht. Außerdem rotiert die Orientierung dieser mikroskopischen Stabmagneten, während sie im Raum oszillieren. Das Ausmaß der Rotation hängt davon ab, ob sich nur ein Ion oder beide im Zustand 1 befinden. Insgesamt gilt: Indem wir die Ionen für eine sorgfältig abgestimmte Zeitspanne einer spezifischen Laserkraft aussetzen, können wir ein CNOT-Gatter erzeugen. Werden die Qubits anfangs in einen Superpositionszustand gebracht, verschränkt die Wirkung dieses Gatters die Ionen; dadurch wird es ein grundlegender Baustein für die Realisierung einer beliebigen Quantenberechnung mit vielen Ionen.

99 Prozent sind noch zu wenig

Forscher an mehreren Laboratorien – an der Universität Innsbruck, an der University of Michigan in Ann Arbor, am National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder (Colorado) und an der University of Oxford – haben funktionierende CNOT-Gatter hergestellt. Natürlich arbeitet keines dieser Gatter perfekt, weil Fluktuationen der Laserintensität und elektrische Streufelder die Reinheit der Ionenbewegungen beeinträchtigen. Derzeit gelingt den Forschern die Konstruktion eines Zwei-Qubit-Gatters, das mit einer Genauigkeit von knapp über 99 Prozent arbeitet, das heißt mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von unter einem Prozent. Ein brauchbarer Quantencomputer benötigt allerdings rund 99,99 Prozent Genauigkeit, damit Korrekturtechniken richtig funktionieren. Alle Teams, die Ionenfallen erforschen, versuchen nun, das Hintergrundrauschen entsprechend zu reduzieren; diese Aufgabe ist zwar unheimlich schwierig, aber prinzipiell lösbar.

Doch lässt sich aus gefangenen Ionen wirklich ein vollwertiger Quantencomputer entwickeln? Leider sind längere Ionenketten, die mehr als rund 20 Qubits enthalten, kaum zu kontrollieren, weil ihre zahlreichen kollektiven Bewegungszustände miteinander interferieren. Darum verfolgen Wissenschaftler den Ansatz, die Quantenhardware in handliche Stücke zu teilen und Berechnungen mit kurzen Ionenketten auszuführen, die auf dem Quantencomputerchip hin und her verschoben werden. Elektrische Kräfte können die Ionenketten nämlich bewegen, ohne deren innere Zustände zu stören, und somit die von ihnen getragenen Daten bewahren. Man könnte

eine Kette mit einer anderen verschränken, um Daten zu übertragen und Verarbeitungsaufgaben auszuführen, die den Einsatz vieler logischer Gatter erfordern. Diese Architektur würde dem in Digitalkameras verwendeten ladungsgekoppelten Bauelement (*charge-coupled device*, CCD) ähneln. So wie ein CCD elektrische Ladung über eine Anordnung von Kondensatoren verschiebt, könnte ein Quantenchip Fäden aus einzelnen Ionen durch ein Gitter aus linearen Fallen treiben.

Bei vielen Experimenten am NIST werden Ionen durch eine so genannte Multizonen-Linienfalle geschleust. Für viel größere Systeme sind aber kompliziertere Strukturen erforderlich, in denen zahlreiche Elektroden die Ionen in jede Richtung zu leiten vermögen. Die Abmessungen der Elektroden müssten zwischen hundertstel und zehntel Millimeter liegen, damit sie den Ionen transport präzise eingrenzen und steuern. Zum Glück können die Konstrukteure dafür Mikrofabrikationstechniken nutzen, die bereits für den Bau herkömmlicher Computerchips in Gebrauch sind, insbesondere mikroelektromechanische Systeme und die Halbleiterlithografie.

Im Jahr 2007 haben mehrere Teams die ersten integrierten Ionenfallen vorgeführt. An den Universitäten von Michigan und Maryland wurde dafür eine Galliumarsenid-Halbleiterstruktur eingesetzt. Am NIST haben Forscher eine neue Ionenfallen-Geometrie entwickelt, bei der die Ionen über einer Chipoberfläche schweben. Gruppen bei der Firma Alcatel-Lucent und den Sandia National Laboratories fabrizierten auf Siliziumchips sogar noch raffiniertere Varianten.

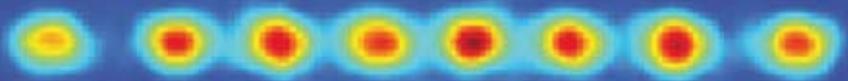
Dennoch sind diese Chipfallen weiterhin sehr unvollkommen. Die Forscher müssen das von nahen Oberflächen ausgehende atomare Rauschen reduzieren, vielleicht durch Kühlung der Elektroden mit flüssigem Stickstoff oder Helium. Auch müssen sie die Bewegung der Ionen über den Chip geschickt organisieren, damit die Teilchen sich nicht erwärmen und ihre Position unkontrolliert verändern. Allein um Ionen um eine Ecke in einer T-förmigen

DIE KLEINE GRENZE

Der Bau eines Computers mit einzelnen Atomen als Speicherelementen führt an eine natürliche Grenze der Miniaturisierung. Schon 1959 meinte der amerikanische Physiker Richard Feynman in einer berühmten Vorlesung mit dem Titel **»There's Plenty of Room at the Bottom«** (Ganz unten ist viel Platz): **»Wenn wir in der sehr, sehr kleinen Welt ankommen – sagen wir, bei Schaltkreisen aus sieben Atomen –, begegnen wir vielen neuen Vorgängen, die völlig neue Konstruktionsmöglichkeiten bieten. Atome verhalten sich im Kleinen völlig anders als irgendetwas im Großen, denn sie gehorchen den Gesetzen der Quantenmechanik.«**

Ein schwebender Strang von acht Kalziumionen wird in einer Vakuumkammer gefangen gehalten und durch Laserkühlung fast völlig zum Stillstand gebracht. Solche Stränge können Quantenberechnungen ausführen.

MIT FRDL, GEN. VON RAINER BLATT, UNIVERSITÄT INNSBRUCK



IONENKOPPLUNG MITTELS PHOTONEN

Ein anderer Ansatz verbindet die Ionen mit Hilfe der von ihnen emittierten Lichtquanten. Zwei weit voneinander entfernte gefangene Ionen (lila) schweben jeweils in einer Vakuumröhre (Foto unten). Sie werden mit Laserpulsen angeregt und emittieren Photonen, die dann durch Glasfasern zu einem Strahlteiler wandern. Die Frequenz der Photonen hängt von der magnetischen Orientierung der Ionen ab; ein Photon, das von einem Ion in einem Superpositionszustand Aufwärts-Abwärts stammt, ist zum Beispiel in einer Frequenzsuperposition Rot-Blau. Sind die Photonen der zwei Ionen im selben Zustand, so lenkt der Strahlteiler beide zu einem Fotodetektor. Falls die Photonen unterschiedliche Zustände repräsentieren, wandern sie zu separaten Detektoren. Sobald das geschieht, sind die Ionen verschränkt, denn nun lässt sich nicht sagen, welches Ion welches Photon emittiert hat.

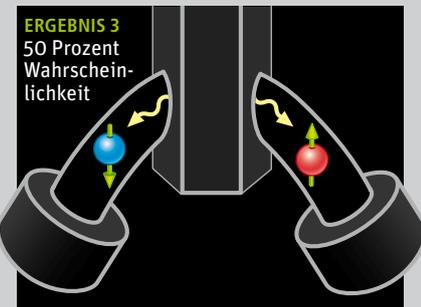
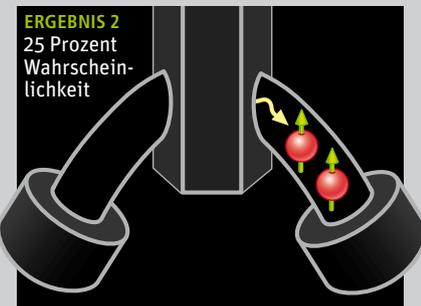
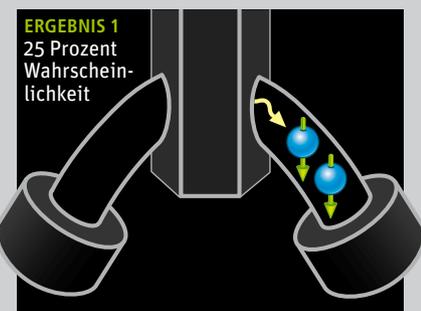
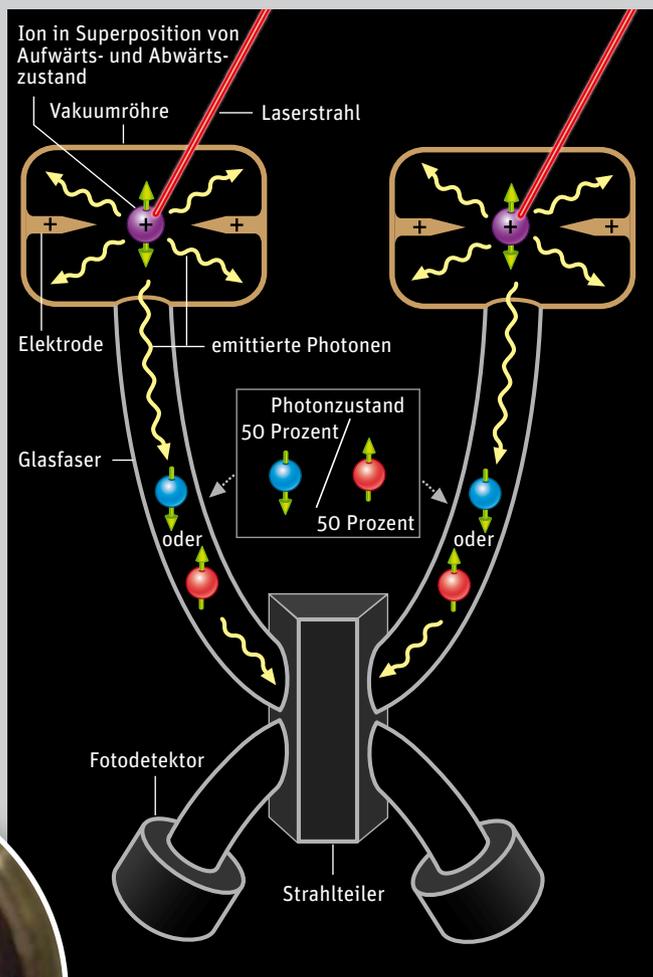
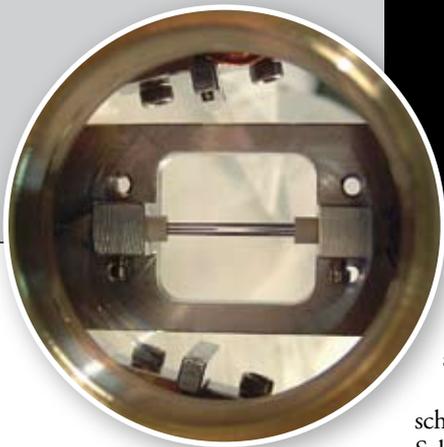


FOTO VAKUUMRÖHRE: STEVEN OLMSCHEK, JOINT QUANTUM INSTITUTE, UNIVERSITY OF MARYLAND; ILLUSTRATIONEN: JEN CHRISTIANSEN



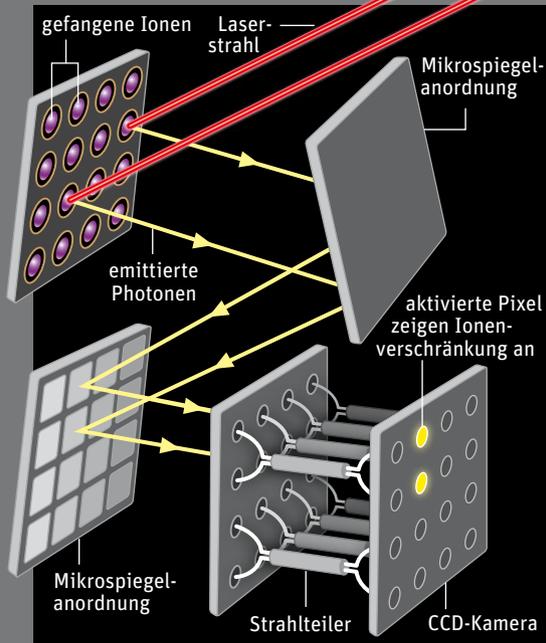
Kreuzung zu bugsieren, sind die elektrischen Kräfte sorgsam zu synchronisieren.

Unterdessen verfolgen andere Wissenschaftler einen alternativen Ansatz, der einige Schwierigkeiten bei der Kontrolle der Ionenbewegungen umgehen soll. Statt die Ionen durch ihre Oszillationen zu koppeln, dienen Photonen, also Lichtteilchen, zur Verbindung der Qubits. Nach einer Idee, die Cirac, Zoller und ihre Kollegen Luming Duan von der University of Michigan und Mikhail Lukin von der Harvard University 2001 formulierten, emittiert jedes gefangene Ion Photonen, deren Eigenschaften wie Polarisation oder Wellenlänge dabei mit den internen magnetischen Zuständen des Ions verschränkt werden. Dann wandern die Lichtteilchen durch Glasfasern zu einem Strahlteiler. Solch ein optisches Element spaltet normalerweise einen Lichtstrahl, in dieser Anordnung funktioniert es aber umgekehrt als Lichtweiche: Die Photonen treten von entgegengesetzten

Seiten in das Gerät ein, und wenn sie die gleiche Polarisation und Wellenlänge besitzen, interferieren sie miteinander und können nur auf ein und derselben Bahn austreten. Doch bei unterschiedlicher Polarisation oder Wellenlänge – ein Hinweis darauf, dass sich die gefangenen Ionen in unterschiedlichen Qubit-zuständen befinden – folgen die Photonen separaten Pfaden zu einem Detektorenpaar (siehe Kasten oben). Der entscheidende Punkt ist: Nachdem sie die Detektoren erreicht haben, lässt sich nicht mehr sagen, welches Ion welches Photon emittiert hat, und genau dieses Quantenphänomen erzeugt die Verschränkung zwischen den Ionen.

Doch die emittierten Photonen werden nicht bei jedem Versuch erfolgreich gesammelt oder nachgewiesen. In der Tat gehen die Lichtteilchen sogar in den allermeisten Fällen verloren, sodass die Ionen nicht verschränkt sind. Aber dieser Fehler lässt sich kompensieren, indem man den Vorgang wiederholt und

Die Zukunft: Die Ionenkopplung mit Photonen verspricht ein relativ einfaches Verfahren zu sein, mit dem sich viele Ionen verbinden lassen. Laserstrahlen werden auf eine Anordnung gefangener Ionen gerichtet, und die emittierten Photonen wandern zu einer Batterie von Strahlteilern. Eine CCD-Kamera könnte leicht feststellen, wann zwei Ionen verschränkt werden, und jede Verschränkung würde die Rechenkapazität des Ionencomputers steigern.



einfach darauf wartet, dass Photonen in den Detektoren gleichzeitig gezählt werden. Sobald dies eintritt – selbst wenn die Ionen weit auseinanderliegen –, beeinflusst die Manipulation des einen Qubits das andere, und ein logisches CNOT-Gatter kann funktionieren.

Forscher an den Universitäten von Michigan und Maryland haben erfolgreich zwei Ionen-Qubits, die rund einen Meter voneinander entfernt gefangen lagen, mittels der Interferenz der von ihnen emittierten Photonen verschränkt. Das größte Hindernis bei solchen Experimenten ist die magere Verschränkungsrate; die Wahrscheinlichkeit, die einzelnen Photonen in einer Faser einzufangen, ist so gering, dass nur ein paar Mal pro Minute Ionen verschränkt werden. Die Quote ließe sich drastisch steigern, wenn jedes Ion in einem so genannten optischen Hohlraum von hoch reflektierenden Spiegeln umgeben würde. Dadurch würde die Ionenemission viel stärker mit den Glasfasern verkoppelt, aber diese Verbesserung lässt sich derzeit experi-

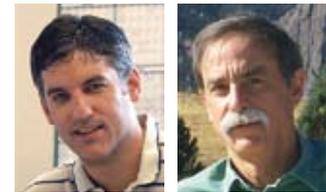
mentell nur sehr schwer realisieren. Bis jetzt müssen die Forscher zwar jeweils lange auf den Eintritt der Interferenz warten, dann aber können sie das System tatsächlich zum Verarbeiten von Quantendaten nutzen. Der Vorgang ähnelt dem Versuch, in einem neuen Haus Kabelfernsehen zu bekommen: Es mag viele Telefonanrufe erfordern, bis die Kabelfirma das System installiert, aber letztlich wird man angeschlossen, und der Fernseher läuft.

Außerdem können die Quantengatter im Prinzip große Qubitmengen verarbeiten, wenn man per Glasfaser zusätzliche Ionenemitter anschließt und die Prozedur wiederholt, bis immer mehr verschränkte Verbindungen entstehen. Auch sollte es möglich sein, sowohl die Photonenkopplung als auch die zuvor diskutierte Bewegungskopplung einzusetzen, um mehrere kleine Gruppen gefangener Ionen über große oder gar globale Distanzen zu verbinden. Genau das ist die Idee eines »Quantenverstärkers«, in dem kleine Quantencomputer in regelmäßigen Abständen vernetzt werden, um ein Qubit aufrechtzuerhalten, während es hunderte von Kilometern zurücklegt. Ohne ein solches System würden die Daten meist für immer verloren gehen.

Erste Zeichen radikaler Veränderung

Noch liegt die Konstruktion eines leistungsfähigen Quantencomputers in weiter Ferne. Dennoch werden schon heute manchmal Quantendaten verarbeitet. Zum Beispiel finden einige simple logische Operationen, die für Zwei-Qubit-Gatter nötig sind, in Atomuhren Verwendung; diese Geräte messen die Zeit mittels der Frequenz der von Atomen beim Übergang zwischen unterschiedlichen Quantenzuständen emittierten Strahlung. Auch können Forscher die Verfahren zum Verschränken gefangener Ionen nutzen, um spektroskopische Messungen zu verfeinern, das heißt, das von angeregten Atomen emittierte Licht genauer zu analysieren.

Das Gebiet der Quanteninformatik wird die Datenverarbeitung radikal verändern. Ansammlungen eingesperrter Ionen spielen dabei eine führende Rolle, denn sie sind zum einen besser von der Umgebung isoliert als die meisten anderen physikalischen Systeme. Andererseits können die Forscher verschränkte Quantensuperpositionen, die aus einigen Ionen bestehen, mit Hilfe von Lasern leicht herstellen und messen. In den kommenden Jahren rechnen wir mit einer neuen Generation von Ionenfallen-Chips, die den Weg für Quantencomputer mit viel mehr Qubits bereiten könnten. Dann wird vielleicht der Traum von einer extrem leistungsfähigen Quantenmaschine endlich Wirklichkeit. ◀



Christopher R. Monroe (links) ist Physikprofessor an der University of Maryland und gehört deren Joint Quantum Institute und dem National Institute of Standards and Technology (NIST) an. Seine Spezialität ist das elektromagnetische Einfangen, Laserkühlen und Manipulieren von Atomen und Ionen.

David J. Wineland promovierte 1970 an der Harvard University. Er leitet die Ionenspeichergruppe bei der Time and Frequency Division des NIST in Boulder (Colorado). Sie konzentriert sich auf Laserkühlung und Spektroskopie von eingefangenen Ionen.

Aaronson, S.: Die Grenzen der Quantencomputer. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2008, S. 90–97.

Monroe, C. R.: Quantum Information Processing with Atoms and Photons. In: Nature 416(6877), S. 238–246, 2002.

Nielsen, M. A.: Spielregeln für Quantencomputer. In: Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 48–56.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/992814.

Trübe Aussichten? Nicht nur!

Beim Blick unter Ljubljanas Brücken zeigt sich ein faszinierendes Wechselspiel diffuser und spiegelnder Reflexion.

Nicht jeder wird dieses Foto betrachten, ohne in leichte Verwirrung zu geraten. Doch woher rührt seine Rätselhaftigkeit? Wie uns schon Leonardos Einsicht zeigt, verdankt sie sich tatsächlich der Trübe des Wassers. Doch nur zu einem Teil.

Ein Besucher von Sloweniens Hauptstadt steht mit der Sonne im Rücken auf der ersten von drei Brücken über die Ljubljanica. Auf die Wasseroberfläche unter der zweiten hat er sein Kameraobjektiv gerichtet. Und sieht ein faszinierendes Schattentheater, oben begrenzt vom überbelichteten Bogen der zweiten Brücke (g in der Lageskizze), unten (b) von dessen Spiegelung auf der Laibach (so heißt der Fluss auf Deutsch).

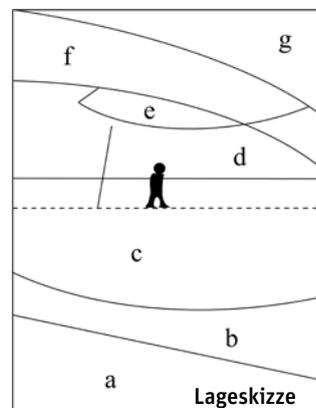
Offensichtlich reflektieren grünlich schimmernde Schwebstoffe im Wasser (d) das Licht der Sonne diffus, streuen es also in alle Richtungen. Dort, wo die erste Brücke und ihr Geländer das Sonnenlicht abblenden, reißen sie ihrer Form gemäß Löcher ins Licht und lassen so einen Schattenriss im trüben Wasser entstehen (c).

Mit im Spiel ist aber auch die spiegelnde Reflexion, die immer dann dominiert, wenn die gespiegelten Objekte hell genug sind. Für sie gilt, dass der Einfallswinkel, mit dem das Licht auf die Wasseroberfläche trifft, gleich seinem Ausfallswinkel ist. Die Überlagerung beider Reflexionsarten bringt nun interessante Effekte hervor. Im sonnenbeschienenen Bereich (d) unter dem zweiten Brückenbogen überwiegt die diffuse Reflexion. Denn von hier wird nur Licht spiegelnd in die Augen des Beobachters reflektiert, das von der Unterseite des zweiten Brückenbogens ausgeht. Diese liegt aber weit gehend im Dunkeln.

Erst jenseits davon (f) und damit im Schatten der zweiten Brücke gelangt Licht vom Geländer der dritten Brücke und vom Himmel – spiegelnd reflektiert – in die Linse der Kamera. Die Oberfläche der Ljubljanica wirft das Licht dieser hellen Objekte sogar in recht intensiven Farben zurück. Nur in (e), wohin die Sonne gerade noch direkt strahlt, wird die spiegelnde Reflexion deutlich von der diffusen Reflexion am trüben Wasser überlagert. Darum verwässern dort die Farben, wie



Ästhetisch reizvoll sind auch perfekte Spiegelungen. Regelrechte Faszination aber kann die Vermischung diffuser und spiegelnder Reflexion ausüben. Das Bild links zeigt einen Blick auf die sommerliche Ljubljana, über die sich drei Brücken spannen.



sich insbesondere an der Aufhellung des Himmelsblaus zeigt.

Sehr dunkel wirkt im Vergleich aber der Himmelsausschnitt im Vordergrund (a). Müsstent wir nicht erwarten, dass er in Helligkeit und Farbe mit dem beschatteten Bereich (f) übereinstimmt? Nein. Denn im Hintergrund wird horizontnahes, im Vordergrund aber zenitnahes Himmelslicht spiegelnd reflektiert. Blickt man auf Horisonthöhe durch die Atmosphäre ins Weltall, ist sie rund 40-mal dicker als beim Blick senkrecht nach oben – entsprechend mehr weißes Streulicht ist also aus dieser Richtung zu erwarten.

Hinzu kommt, dass das Wasser bei steilem Lichteinfall mehr Licht absorbiert als bei flachem. Wie viel, das lässt sich ungefähr am gespiegelten Brückenbogen (b) ablesen: Er zeigt sich, obwohl der Originalbogen (g) stark überbelichtet ist, in nahezu natürlichen Farben.

Für ein schönes Motiv hätte natürlich auch klares Wasser gesorgt. Und noch perfekter würden die – hier ein wenig ausgefranst – Spiegelbilder ausfallen, wäre die Flussoberfläche nicht in leichter Bewegung gewesen. Nur: Zum Nachdenken wäre dann weniger übrig geblieben ...

Kein glänzender und durchsichtiger Körper kann auf sich den Schatten irgendeines Gegenstandes aufweisen, wie man am Schatten der Brücken über den Flüssen sieht, welche man nur sehen kann, wenn das Wasser trüb ist ...

Leonardo da Vinci (1452 – 1519)



Ebenso sehenswert, aber weniger rätselhaft: die drei Originale



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

Speziell zum Artikel produzierte Videos von Spektrum finden Sie unter: www.spektrum.de/zauberei

Wie Zauberer mit der WAHRNEHMUNG spielen



Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

In Kürze

- ▶ Zauberei beruht oft auf **verdeckter Irreführung**: Der Magier lenkt die Zuschauer so ab, dass sie den Clou hinter einem Trick nicht mitbekommen.
- ▶ Für Neurowissenschaftler eröffnen Zaubertricks neue Möglichkeiten zur Untersuchung von **Aspekten des Bewusstseins**, die nicht in der aktuellen sensorischen Realität gründen.
- ▶ Aufnahmen der Gehirndurchblutung beim Betrachten bestimmter Zaubertricks liefern Hinweise darauf, welche Hirnregionen an der **Interpretation kausaler Zusammenhänge** beteiligt sind.

Zauberkünstler manipulieren seit Jahrhunderten Wahrnehmung und Aufmerksamkeit der Zuschauer. Dabei haben sie intuitiv manche Erkenntnisse der modernen Neurowissenschaft vorweggenommen. Die kann auch heute noch von ihnen lernen.

Von Susana Martinez-Conde und Stephen L. Macknik

Der Lichtkegel des Scheinwerfers taucht die Assistentin des Zaubers in gleißendes Licht. Die attraktive junge Frau blendet das Publikum förmlich mit ihrem engen, strahlend weißen Kleid. Der Große Tomsoni verkündet, er werde die Farbe des Stoffs gleich in Rot verwandeln. Gebannt starren die Zuschauer auf die Assistentin, brennen deren Bild förmlich in ihre Netzhaut ein, um sie ja nicht aus den Augen zu lassen. Tomsoni klatscht in die Hände, einen Wimpernschlag lang erlischt der Scheinwerfer, um sogleich in leuchtendem Rot wieder aufzuflammen. Die Assistentin erscheint wie in Blut gebadet.

Moment mal! Das Publikum fühlt sich genarrt; einen farbigen Scheinwerfer benutzen kann schließlich jeder. Der Magier steht am seitlichen Bühnenrand, sichtlich erheitert ob seines kleinen Scherzes. Ja, räumt er ein, das sei ein billiger Trick gewesen; die habe er am liebsten, wie er diabolisch grinsend erklärt. Tatsächlich muss man zugeben, dass er das Kleid der Assistentin umgefärbt hat – aber auch alles andere drumherum. Nachsichtig richten die Zuschauer ihr Augenmerk wieder auf die hübsche junge Frau, als Tomsoni plötzlich in die Hände klatscht, das Licht erneut erlischt und die Bühne förmlich in einem Feuerwerk aus Weiß explodiert. Doch hoppla! Das Kleid ist wirklich rot geworden! Der Große Tomsoni hat es wieder einmal geschafft!

Dieser Trick und seine Erklärung verraten ein tiefes intuitives Wissen des Zaubers um die neuronalen Prozesse im Gehirn der Zuschauer. Wir Neurowissenschaftler können

uns da noch eine Scheibe abschneiden. Und so funktioniert der Trick: Wenn John Thompson, wie Tomsoni mit bürgerlichem Namen heißt, seine Assistentin auf die Bühne bittet, verleitet ihr hautenges, weißes Kleid den Zuschauer stillschweigend zu der Annahme, darunter könne unmöglich irgendetwas – zum Beispiel ein zweites Kleid – versteckt sein. Das stimmt natürlich nicht. Die attraktive Frau sorgt zudem dafür, dass sich die Aufmerksamkeit des Publikums genau dahin richtet, wo Thompson sie haben will: auf ihren Körper. Je gebannt die Zuschauer sie anstarren, desto weniger bemerken sie die im Bühnenboden verborgene Vorrichtung und desto mehr stellen sich ihre Augen auf die Helligkeit und die wahrgenommene Farbe ein.

Nach seinem kleinen »Scherz« schindet Thompson ein wenig Zeit mit belangloser Plauderei, damit im visuellen System der Zuschauer eine so genannte neuronale Adaptation stattfindet. Sie beinhaltet einen Sättigungs- und einen Trägheitseffekt. Einerseits lässt die Reaktion jedes neuronalen Systems auf einen konstanten Stimulus mit der Zeit nach: Die Nervenzellen feuern seltener – als ignorierten sie den Dauerreiz, um ihre Kräfte für den Moment aufzusparen, in dem sie eine Änderung zu melden haben. Andererseits merken sie es nicht sofort, wenn der konstante Reiz dann tatsächlich aufhört, und feuern in einer Art Echo noch ganz kurz weiter. Diese Reaktion bezeichnet man als Nachentladung.

Im vorliegenden Fall stellt das rot angestrahlte Kleid den adaptierenden Reiz dar, und Thompson weiß, dass die Netzhautneurone der Zuschauer in dem Sekundenbruchteil nach dem Dämpfen des Lichts noch übersättigt sind und weiter Impulse abgeben. Das



Das Zauberduo Penn & Teller präsentiert eine modernisierte Version des Klassikers »zersägte Jungfrau«, der immer noch einen unvergesslichen Eindruck hinterlässt. Penn bedient die Kreissäge, während Teller das freiwillige Opfer gibt. Neurowissenschaftler nutzen die Methoden von Zauberern zunehmend für ihre Experimente – zum Beispiel für Untersuchungen darüber, wie das Gehirn auf Wahrnehmungen reagiert, die allen bisherigen Erfahrungen mit der Realität Hohn zu sprechen scheinen.

OPTISCHE TÄUSCHUNGEN

Täuschung des Gehirns oder des Auges?



LABORATORY OF VISUAL NEUROSCIENCE, JORGE OTERO-MILLAN

Beim Betrachten dieser Grafik, die auf dem Bild »Enigma« des französischen Malers Isia Léviant beruht, entsteht der Eindruck einer Fließbewegung in den konzentrischen Ringen. Wo aber findet die Täuschung statt: im Auge oder im Gehirn? Die experimentellen Befunde waren widersprüchlich, bis die Autoren und Kollegen im Oktober letzten Jahres nachwiesen, dass es Mikrosakkaden sind, welche die Illusion hervorrufen. Dabei handelt es sich um ruckartige, unwillkürliche Bewegungen des

Augapfels, mit denen der Blick von einem Fixationspunkt zum nächsten springt. Die Rolle von Auge und Gehirn bei Zauberkünsten zu klären ist eine Grundbedingung für deren Einsatz bei neurowissenschaftlichen Experimenten.

KOGNITIVE TÄUSCHUNGEN

Neurowissenschaftler interessieren sich zunehmend dafür, wie Zauberer kognitive Beschränkungen nutzen. Hier eine kleine Liste.

➤ **Veränderungsblindheit**

Dem Zuschauer entgehen Veränderungen einer Szene nach einer kurzen Unterbrechung.

Beispiel: Möbelstücke haben plötzlich eine andere Farbe.

➤ **Unaufmerksamkeitsblindheit**

Der Zuschauer nimmt Gegenstände unmittelbar vor seinen Augen nicht wahr.

Beispiel: Eine Person in einem Gorillakostüm läuft unbemerkt mitten durchs Bild.

➤ **Wahlblindheit**

Der Zuschauer begründet eine Wahl, die er gar nicht getroffen hat.

Publikum sieht also ein rotes Nachbild mit der Silhouette der Assistentin. In diesem Moment öffnet sich kurz eine Falltür im Bühnenboden, und das nur locker von Klettverschlüssen gehaltene weiße Kleid, von dem unsichtbare Fäden unter die Bühne führen, wird von ihrem Körper gerissen. Dann flammen die Scheinwerfer wieder auf.

Zwei weitere Kunstgriffe unterstützen die Illusion. Zum einen ist das Licht kurz vor dem Abstreifen des Kleides so grell, dass die Zuschauer im Augenblick seines Verlöschens nicht sehen können, wie sich die Fäden bewegen und das weiße Kleid in der Unterbühne verschwindet. Denselben Effekt erleben Sie, wenn Sie von einer sonnenbeschienenen Straße, in der sich Ihre Pupillen stark verengt haben, in einen düsteren Laden treten. Zum anderen führt Thompson den Trick vor, wenn das Publikum glaubt, er sei schon vorüber. Das verschafft ihm einen wichtigen kognitiven Vorteil: Im entscheidenden Augenblick sind die Zuschauer nicht auf eine Täuschung gefasst und schauen daher nicht ganz so argwöhnisch und aufmerksam hin.

Gezielte Manipulation der Aufmerksamkeit

Thompsons Trick verdeutlicht sehr schön, was Bühnenmagie ausmacht. Illusionisten sind im Grunde Aufmerksamkeits- und Bewusstseinskünstler: Indem sie Gegenstand und Grad unserer Aufmerksamkeit manipulieren, bestimmen sie in jedem Moment, was uns bewusst ist und was nicht. Das erreichen sie mit ver-

schiedenen Mitteln. Ihr Arsenal enthält unter anderem

- visuelle Täuschungen wie Nachbilder,
- optische Tricks wie den Einsatz von Nebel und Spiegeln,
- Spezialeffekte wie Explosionen, vorgeäuschte Schüsse oder exakt abgestimmte Beleuchtungseffekte,
- Taschenspielerlei,
- versteckte mechanische Vorrichtungen,
- besonders präparierte Requisiten und Hilfsmittel, beispielsweise künstliche Fingerglieder mit Hohlräumen, um kleine Objekte darin zu verstecken.

Das vielseitigste Instrument in der Trickkiste dürfte jedoch die Fähigkeit sein, kognitive Illusionen zu erzeugen. Wie optische Täuschungen verzerren sie die Wahrnehmung der physischen Realität. Allerdings sind dabei nicht die Sinne selbst betroffen, sondern höhere Funktionen wie Aufmerksamkeit, Gedächtnis und intuitives Schlussfolgern. Auf diese Weise machen es geübte Zauberkünstler den Zuschauern praktisch unmöglich, dem wahren Geschehen zu folgen, und erwecken so den Eindruck, die einzig denkbare Erklärung sei Magie.

Noch können die Neurowissenschaftler den Meistern der Illusion, was die Fähigkeit zur Manipulation von Aufmerksamkeit und Kognition betrifft, kaum das Wasser reichen. Doch sie holen allmählich auf. Natürlich unterscheiden sich ihre Ziele von denen der Zauberer. Der Neurowissenschaftler sucht die zerebralen und neuronalen Grundlagen geistiger Prozesse aufzuklären; der Magier möchte in erster Linie kognitive Schwächen ausnutzen. Dennoch könnten sich die von der Zaubererzunft über Jahrhunderte entwickelten Tricks in der Hand von Neurologen als ebenso subtile wie potente Untersuchungsinstrumente erweisen, welche die Palette der in der experimentellen Forschung bereits eingesetzten Verfahren ergänzen und bereichern.

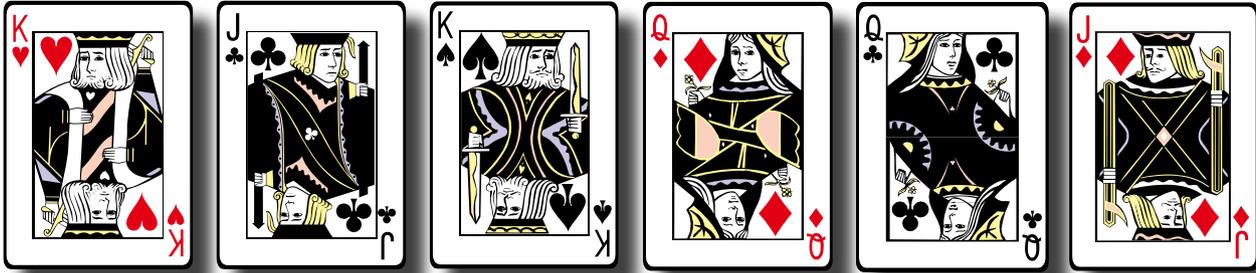
Wollen sich Neurologen magischer Kniffe für ihre Zwecke bedienen, müssen sie diese allerdings selbst zuvor wissenschaftlich unter die Lupe nehmen. So konnten sie in einigen Fällen erstmals nachweisen, was sich während bestimmter Tricks in den Gehirnen der Zuschauer abspielt.

Viele der bisher durchgeführten einschlägigen Untersuchungen haben frühere Ergebnisse der experimentellen Psychologie zu Kognition und Aufmerksamkeit erhärtet. Kritiker mögen solche Bemühungen deshalb abtun: Warum noch eine Studie durchführen, wenn sie doch nur bestätigt, was man längst schon weiß? Dabei verkennen sie jedoch Bedeutung und Sinn dieser Untersuchungen.

VERÄNDERUNGSBLINDHEIT

Bezweifeln Sie, dass wir Ihre Gedanken lesen können?

Dies ist die vereinfachte Version eines Tricks, den der Zauberkünstler Henry Hardin schon Anfang des 20. Jahrhunderts erfunden hat. Eine noch verblüffendere Fassung von Clifford Pickover, Autor zahlreicher populärer Bücher über Mathematik und Naturwissenschaften, finden Sie online unter: <http://sprott.physics.wisc.edu/pickover/home.htm>.



Hier also der Trick: Mittels Hardins Methode der übersinnlichen Wahrnehmung können wir mit 98-prozentiger Sicherheit vorher-sagen, welche der hier abgedruckten sechs Karten Sie auswählen werden. Bitte treffen Sie völlig unbeeinflusst Ihre Entscheidung.



Prägen Sie sich die ausgesuchte Karte gut ein. Sprechen Sie ihre Bezeichnung mehrmals laut aus, damit Sie sie nicht vergessen. Wenn Sie sicher sind, sich die Karte gemerkt zu haben, streichen Sie eines der Augen in der unteren Reihe durch. Blättern Sie jetzt zu S. 52.

Durch die Analyse der Kniffe von Trickkünstlern können sich die Neurowissenschaftler neue Methoden aneignen und auf ihre eigenen Zwecke ummünzen. Das verhilft ihnen vielleicht zu aussagekräftigeren Experimenten sowie wirksameren kognitiven und optischen Täuschungen, um zu den neuronalen Grundlagen von Aufmerksamkeit und Bewusstsein vorzudringen.

Zauberei als Medizin?

Magische Tricks eignen sich eventuell aber auch für diagnostische und therapeutische Verfahren bei Patienten mit bestimmten kognitiven Defiziten. Man denke etwa an die Folgen von Hirnverletzungen, Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS) oder Alzheimerdemenz. Möglicherweise gelingt es mit manchen Methoden der Bühnenzauberei zudem, die Patienten in einer Weise zu »überlisten«, dass sie sich auf die Kernpunkte ihrer Therapie konzentrieren und nicht von nebensächlichen Dingen beeinflussen lassen, die sie nur verwirren.

Es gibt sogar schon ein erstes Beispiel für den medizinischen Einsatz eines Zauberutensils. Vilayanur S. Ramachandran und Diane Rogers-Ramachandran von der University of California in San Diego täuschen mit einem Spiegelkasten, in dessen nicht sichtbaren Hohlräumen Illusionisten gerne Dinge verbergen, amputierten Menschen in Therapiesitzungen die Existenz des fehlenden Körperteils vor. Dadurch verringert sich nachweislich der Phantomschmerz.

Tatsächlich wäre die Kognitionsforschung unseres Erachtens schneller vorangekommen, hätte sie sich früher schon mit den auf Intuition beruhenden Täuschungsmanövern von Zaubernern befasst. Auch heute hat die Illusionistenzunft mit Sicherheit noch ein paar Tricks im Ärmel, von denen die Neurowissenschaft nichts ahnt.

Zauberer sind groß darin, die Aufmerksamkeit des Publikums von einer heimlichen Aktion abzulenken. Die Zuschauer sollen sich ganz auf den »Effekt« konzentrieren und nichts von der »Methode«, dem Geheimnis dahinter, mitbekommen. In Anlehnung an Fachbegriffe der kognitiven Psychologie kann man zwischen offener und verdeckter Irreführung unterscheiden. Offen geschieht sie, wenn der Zauberkünstler das Publikum von der Methode ablenkt, indem er dafür sorgt, dass es in die falsche Richtung blickt – etwa durch die Aufforderung, einen bestimmten Gegenstand zu fixieren. Als der Große Tomsoni beispielsweise seine hübsche Assistentin vorstellt, kann er sicher sein, dass aller Augen auf ihr ruhen.

Verdeckte Irreführung ist subtiler. Auch hier zieht der Zauberer das Augenmerk des Zuschauers – oder seinen Argwohn – weg von der Methode, doch ohne die Blicke in eine andere Richtung zu lenken. In diesem Fall hat das Publikum das Geheimnis hinter dem Trick direkt vor Augen und bemerkt es trotzdem nicht.

Die kognitive Neurowissenschaft kennt bereits mindestens zwei Arten verdeckter Irreführung. Die eine nutzt das Phänomen der Veränderungsblindheit. Den Betrachtern einer Szene

Beispiel: Der Betrachter merkt nicht, dass ein von ihm ausgewähltes Foto heimlich gegen ein anderes vertauscht wurde, und begründet seine Vorliebe für letzteres (siehe Kasten S. 49).

► Illusorische Korrelation

Ein Ereignis scheint ein anderes, nicht damit zusammenhängendes zu verursachen.

Beispiel: Ein Zauberer schwingt seinen Stab, und ein Kaninchen erscheint.

Speziell zum Artikel produzierte Videos von Spektrum finden Sie unter: www.spektrum.de/zauberei

OFFENE IRREFÜHRUNG

Wie man Münzen aus dem Nichts holt

Für diese Illusion nutzt der Zauberer Raymond Teller Irreführung und Taschenspielertricks. Am Anfang hat er in jeder Hand sechs

Münzen verborgen. Diese zieht er dann scheinbar aus allem, was er erreichen kann – seinem eigenen Haar, der Kleidung der Zuschauer oder der Luft – und wirft sie mit lautem Klappern in



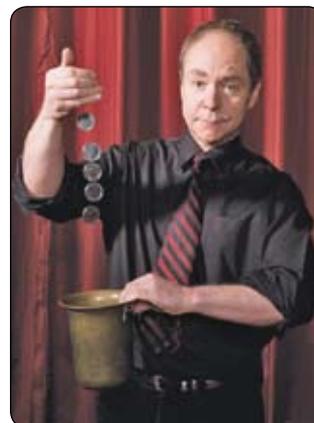
Nachdem Teller gezeigt hat, dass der Kübel leer ist, produziert er Münzen in der rechten Hand.



Durch starres Blicken auf die rechte Hand sorgt Teller dafür, dass die Zuschauer nicht auf seine linke Hand achten. Wenn er eine Münze scheinbar in den Kübel wirft, lässt er sie in Wahrheit aus der linken Hand fallen und erzeugt so das Klappern, das den Wurf vortäuscht.



Da Teller die Münzen nicht wirklich wirft, kann er ein und dasselbe Exemplar immer wieder aus der rechten Hand hervorzaubern.



Als das Publikum zu argwöhnen beginnt, dass Teller nur zuvor in der Handfläche versteckte Münzen hervorholt, lässt er fünf von den sechsen auf einmal in den Kübel fallen. Das wirkt verblüffend, weil es unmöglich scheint, elf Münzen in einer Hand zu verbergen.

VISUELLE TÄUSCHUNGEN IN DER ZAUBEREI

Nicht alle Zaubertricks beruhen auf kognitiven Unzulänglichkeiten. Auch das Sehsystem lässt sich täuschen, was zu überraschenden Effekten führen kann.

➤ Löffel verbiegen

Der Zauberer schüttelt einen Löffel, wobei sich der Stiel zu krümmen scheint.

Warum es funktioniert:

Neurone in der primären Sehrinde, die sowohl auf Bewegung ansprechen als auch die Enden von Linien verarbeiten, reagieren anders auf Schwingungen als die übrigen visuellen Nervenzellen. So kommt es zu einem scheinbaren Wider-

entgeht dabei, dass etwas anders ist als zuvor. In diesem Fall genügt es nämlich nicht, in jedem Moment genau hinzusehen. Vielmehr muss man sich an den Zustand zuvor erinnern und ihn mit dem momentanen vergleichen.

Viele Untersuchungen ergaben, dass diese Art der Blindheit keineswegs nur bei feinen Unterschieden auftritt. Selbst einschneidende Änderungen einer visuellen Szene werden nicht bemerkt, wenn sie während einer kurzzeitigen Unterbrechung des Sehvorgangs stattfinden. Ursache kann ein Blinzeln, eine Sakkade – eine der unwillkürlichen, sprunghaften Augenbewegungen, die wir nicht bemerken – oder auch ein kurzes Flimmern des gezeigten Bilds sein.

Eindrucksvoll illustriert das ein Video des Psychologen und Zauberkünstlers Richard Wiseman von der University of Hertfordshire in Hatfield (England). Sie finden es unter www.youtube.com/watch?v=voAntzB7EwE

und sollten es anschauen, um das Phänomen würdigen zu können. Während Wiseman einen Kartentrick vorführt und die Kamera mehrfach vorübergehend Nahaufnahmen des Blatts zeigt, werden heimlich Farbänderungen bei Kleidung und Ausstattung vorgenommen, die dem Zuschauer anschließend, wenn er die Szene wieder voll im Blick hat, nicht auffallen.

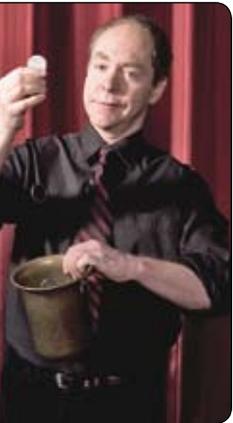
Die zweite Art der Irreführung nutzt die so genannte Unaufmerksamkeitsblindheit. Hier

übersehen die Betrachter ein unerwartetes Objekt, das sie unmittelbar vor Augen haben. Ein klassisches Beispiel stammt von den Psychologen Daniel J. Simons und Christopher F. Chabris. Sie führten 1999 an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) Versuchspersonen ein Video vor und baten sie, mitzuzählen, wie oft eine »Mannschaft« aus drei Basketballspielern den Ball an einen Teamkollegen abgibt; die Pässe des »gegnerischen« Trios sollten sie ignorieren. Etwa die Hälfte der Beobachter merkte nicht, wie ein als Gorilla kostümierter Mensch mitten durchs Bild läuft, im Zentrum sogar kurz anhält und sich auf die Brust trommelt. Für diesen Effekt war keinerlei plötzliche Unterbrechung oder künstliche Ablenkung nötig; die Beobachter konzentrierten sich so aufs Zählen, dass sie direkt auf den Gorilla blickten und ihn doch nicht wahrnahmen.

Die Täuschung findet im Gehirn statt

Illusionisten halten verdeckte Irreführung gemeinhin für eleganter als offene. Neurowissenschaftler haben andere Kriterien. Sie interessieren sich in erster Linie dafür, welche Vorgänge in Gehirn und Nervensystem bewirken, dass eine Irreführung – gleich ob verdeckt oder offen – funktioniert. Grundsätzlich wollen sie einfach wissen, welche kognitiven Prozesse sich die Magie zu Nutze macht.

einen Metallkübel. Der Trick beruht teilweise auf falschen Hinweisen durch Kopfhaltung und Blickrichtung.



Nun produziert Teller die letzte versteckte Münze aus seiner rechten Hand. Dann dreht er die Hand, um zu zeigen, dass sie in der Tat leer ist.



Als spektakulären Schlussgag wirft Teller die elf Münzen im Kübel in die Luft, während er die letzte Münze weiterhin in der rechten Hand hält.

Die erste Untersuchung, bei der Forscher an Beobachtern einer Zaubervorführung physiologische Messungen durchführten, wurde 2005 publiziert. Autoren waren die Psychologen Gustav Kuhn von der englischen Durham University und Benjamin W. Tatler von der University of Dundee (Schottland). Sie hatten die Augenbewegungen ihrer Versuchspersonen aufgezeichnet, während Hobbymagier Kuhn eine Zigarette wegzauberte, indem er sie unter einen Tisch fallen ließ. Im Mittelpunkt stand die Frage, weshalb die Beobachter nicht hinter den Trick kamen. Schauten sie nicht zur richtigen Zeit an die richtige Stelle

oder gaben sie generell nicht genügend Acht? Das Ergebnis war eindeutig: Es kam nicht darauf an, wohin die Probanden blickten.

Zum selben Resultat führte eine ähnliche Untersuchung über einen anderen Zaubertick, die ein Jahr später Kuhn zusammen mit dem Neurobiologen Michael F. Land von der University of Sussex bei Brighton (England) vornahm. Auch sie zeigte, dass die Blickrichtung nicht entscheidend ist und Magier die Aufmerksamkeit der Zuschauer auf einer höheren kognitiven Ebene manipulieren.

Bei dem Trick wirft der Zauberer zu Beginn einen Ball mehrmals senkrecht in die Luft und fängt ihn wieder auf. Den letzten Wurf führt er jedoch nicht wirklich aus, sondern tut nur so. Er macht zwar die Handbewegung, lässt den Ball aber nicht los, sondern verbirgt ihn geschickt in seiner hohlen Hand. Gleichwohl folgt er mit dem Kopf und den Augen der imaginären Flugbahn. Unter diesen Umständen sehen die meisten Zuschauer den (gar nicht geworfenen) Ball vermeintlich aufsteigen und sich dann mitten in der Luft auflösen.

Wie die Untersuchung ergab, blickten die Zuschauer gar nicht auf die Stelle, an der sie ihrer eigenen Aussage nach den Ball hatten verschwinden sehen. Folglich entstand die Illusion nicht in den für die Steuerung der Augen zuständigen Hirnregionen der Betrachter. Vielmehr waren, so die Schlussfolgerung von Kuhn und Land, die Kopf- und Augenbewegungen des Zauberkünstlers für die Täuschung entscheidend; denn sie sorgten insgeheim dafür, dass sich die Aufmerksamkeit – und nicht etwa der Blick – der Zuschauer auf die vorhergesagte Position des Balls richtete.

Tatsächlich befinden sich die Neurone, die auf die vom Illusionisten suggerierte Ballbewegung reagierten, in denselben visuellen Arealen wie jene, die auf reale Ortsveränderungen ansprechen. Wenn aber vorgetäuschte und wirkliche Bewegungen dieselben neuro-

spruch zwischen der Wahrnehmung der Löffelenden und der Stielmitte; das Objekt scheint sich zu verbiegen.

➤ **Phantomobjekte zeigen**
Der Illusionist entfernt einen Gegenstand aus dem Blickfeld; dieser bleibt jedoch noch kurze Zeit sichtbar.

Warum es funktioniert:
Durch neuronale Nachentladung entsteht für etwa 100 Millisekunden nach dem Ende eines starken visuellen Reizes ein Nachbild.

➤ **Jerry-Andrus-Effekt**
Blickt man eine Zeit lang auf eine Scheibe mit einem Spiralmuster in drei konzentrischen Zonen, die sich beim Drehen auszudehnen oder zusammenzuziehen scheinen, und danach auf ein unbewegtes Objekt, hat man den Eindruck, dass auch dieses sich abwechselnd aufbläht und schrumpft.

Warum es funktioniert:
Die Neurone des Sehsystems adaptieren sich an die Bewegungen in den drei Zonen.

Speziell zum Artikel produzierte Videos von Spektrum finden Sie unter: www.spektrum.de/zauberei

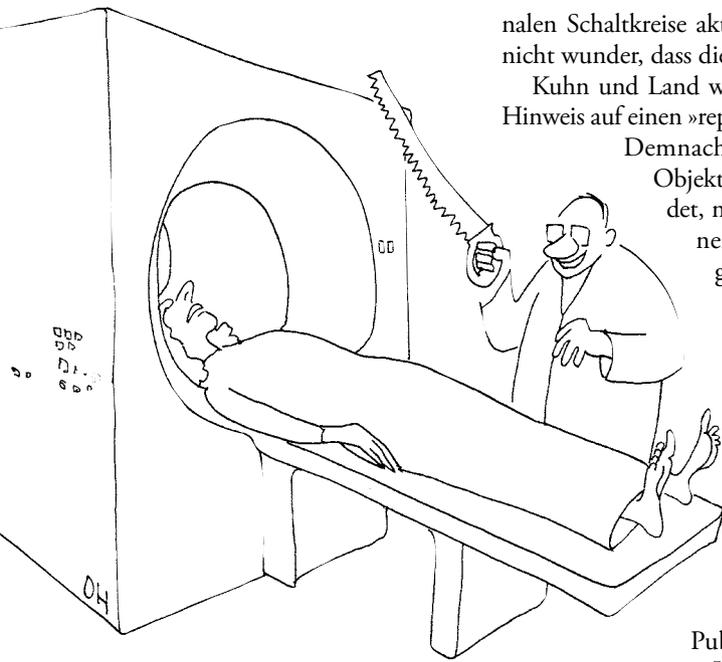
WAHLBLINDHEIT

Verführung zum Schönreden

In einem Experiment sollten Probanden von zwei gezeigten Fotos (a) das für sie attraktivere wählen (b). Danach drehte der Forscher die Aufnahmen um (c) und vertauschte sie mit einem Taschenspielertrick. Schließlich deckte er das abgelehnte Foto als vermeintlich gewähltes auf und bat die Versuchsperson, ihre Wahl zu begründen (d). In knapp drei Vierteln der Fälle merkten

die Probanden die Vertauschung nicht und konstruierten eine Erklärung, warum sie sich für das in Wahrheit abgelehnte Bild entschieden hätten. Offenbar ist der Drang, die vermeintlich eigene Wahl in einen in sich stimmigen Handlungsablauf einzupassen, so stark, dass er die Erinnerung an die tatsächliche Entscheidung beiseiteschieben kann.





nalen Schaltkreise aktivieren, dann nimmt es nicht wunder, dass die Illusion so echt wirkt.

Kuhn und Land werteten ihren Befund als Hinweis auf einen »repräsentationalen Impuls«.

Demnach scheint ein bewegtes Objekt, das plötzlich verschwindet, noch ein Stück weiter seiner vorigen Bahn zu folgen; seine vermeintliche Endposition ergibt sich durch Extrapolation der Bewegung, die es vor seinem Verschwinden vollführt hat.

Viele Zuschauer zerbrechen sich den Kopf darüber, wie der Zauberer das bloß gemacht hat.

Oft stachelt dieser das Publikum selbst dazu an, seine Kunstgriffe aufzudecken;

denn je mehr sich ein Beobachter müht, einen Trick zu durchschauen (und daran scheitert), desto stärker wird der Eindruck von Magie. Ein Zauberer »beweist« also etwa, dass ein Hut leer ist oder das Kleid der Assistentin zu eng sitzt, als dass ein zweites darunter verborgen sein könnte. Doch damit betreibt er meist nur Irreführung mit dem Ziel, die Rekonstruktion zu erschweren.

Veränderungs- und Unaufmerksamkeitsblindheit sind dabei nicht die einzigen kognitiven Illusionen, die er ausnutzen kann. Angenommen, ein Magier muss für einen Trick die Hand heben. Laut Raymond Teller, der einen Hälfte des in Amerika bekannten Zaubererduos Penn & Teller, erregt es mehr Verdacht, wenn er das ohne ersichtlichen Grund tut, als

wenn er eine scheinbar natürliche oder spontane Geste ausführt – etwa seine Brille zu rechtrückt oder sich am Kopf kratzt. Die Bewegung wird dadurch motiviert und somit getarnt. Dem Zauberer James Randi (»the Amazing Randi«) zufolge wirken Suggestionen und Tarninformationen überzeugender als direkte Behauptungen. Beim Versuch, den Trick zu durchschauen, nimmt der Zuschauer solche unausgesprochenen Botschaften dann für bare Münze.

Wahlbetrug bleibt unbemerkt

Die Psychologen Peter Johansson und Lars Hall von der Universität Lund (Schweden) nutzten diese und andere Taschenspielertricks gemeinsam mit Kollegen für einen neuartigen Ansatz zur Beantwortung neurowissenschaftlicher Fragestellungen. Sie legten nichts ahnenden Versuchspersonen Bildpaare von weiblichen Gesichtern vor und forderten sie auf, jeweils das in ihren Augen attraktivere auszuwählen. Bei einigen Durchgängen sollten die Probanden zudem ihre Wahl begründen. Gelegentlich vertauschten die Forscher mit einem Trick, den sie von dem Profimagier Peter Rosengren gelernt hatten, heimlich die beiden Gesichter, nachdem die Versuchsperson ihre Wahl getroffen hatte. Dadurch verkehrte sich die ursprüngliche Entscheidung in ihr Gegenteil.

Nur 26 Prozent der so hereingelegten Probanden bemerkten den Tausch. Mehr noch: Wenn eine Versuchsperson anschließend ihre manipulierte Wahl begründen sollte, erfand sie aus dem Stegreif Argumente dafür – rechtfertigte also das Gegenteil ihrer wirklichen Entscheidung! Johansson und seine Mitarbeiter bezeichnen dieses Phänomen als »Wahlblindheit«. Indem die Forscher den Probanden vorgaukelten, sie hätten eine bestimmte Wahl getroffen, konnten sie zeigen, wie weit nachträgliche Rationalisierungen gehen – so weit, dass Menschen besten Gewissens selbst solche Entscheidungen begründen, die ihren ursprünglichen Intentionen völlig zuwiderlaufen.

Viele Irreführungsmethoden von Zauberern werden auch von Taschendieben angewendet. Diese gehen oft an belebten öffentlichen Orten ihrem Gewerbe nach und nutzen in hohem Maß soziale Verhaltensweisen zur Ablenkung – Blick- und Körperkontakt sowie Eindringen in die persönliche Zone des zu Bestehlenden. Auch ihre Gesten dienen gezielt dazu, die Aufmerksamkeit des Opfers zu steuern. Soll es auf die Bahn der Hand achten, malen sie eine geschwungene Linie in die Luft. Eine schnelle, gerade Bewegung lenkt das Augenmerk dagegen von deren Verlauf weg und auf die Endposition hin. Wie uns

TASCHENSPIELERTRICKS

Multisensorische Ablenkung

Apollo Robbins (rechts), der sich selbst als professionellen Taschendieb bezeichnet, führt vor, wie er eine Person so gründlich ablenkt, dass sie nicht mehr auf ihre Wertgegenstände achtet. Robbins manipuliert dazu den Berührungssinn des Opfers, dringt in seine persönliche Zone ein und lenkt seinen Blick in eine unverfängliche Richtung. Ein verblüffendes Video, wie Robbins heimlich die Armbanduhr einer Person entwendet, finden Sie unter tinyurl.com/6lhxy8.



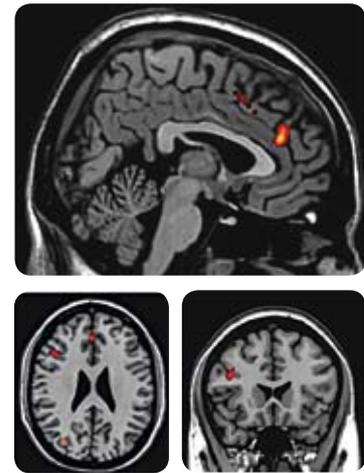
MIT FRDL. GEN. VON APOLLO ROBBINS

ILLUSORISCHE KORRELATION

Wie das Gehirn mit dem »Unmöglichem« umgeht

In einem Experiment sahen die Probanden, während funktionelle Magnetresonanzbilder ihres Gehirns aufgenommen wurden, Zaubertrickvideos mit scheinbar unmöglichen Kausalbeziehungen. So ließ der Zauberer etwa einen Ball verschwinden (obere Bildreihe). Eine Kontrollgruppe sah

ganz ähnliche Videos, allerdings ohne Täuschung (untere Reihe). Die farbig hervorgehobenen Bereiche in den Magnetresonanzaufnahmen (rechts) markieren Regionen gesteigerter neuronaler Aktivität in den Gehirnen der Zaubertrickbetrachter.



der berufsmäßige Taschendieb Apollo Robbins erklärt hat, sind beides wesentliche Tricks zur Irreführung des Opfers. Noch gibt es keine neurowissenschaftliche Erklärung dafür, wie sie funktionieren. Doch haben wir mehrere überprüfbare Hypothesen aufgestellt.

Eine besagt, dass geschwungene und geradlinige Gebärden im Gehirn zwei verschiedene Steuersysteme für Augenbewegungen aktivieren. Das »Nachführsystem« dient dazu, bewegte Objekte kontinuierlich zu verfolgen. Dagegen ist das »Sakkadensystem« für sprunghafte Augenbewegungen von einem visuellen Ziel zum nächsten zuständig. Gemäß dieser Hypothese aktivieren weitschweifige Gesten des Taschendiebs beim Opfer das Nachführ-, schnelle, geradlinige Bewegungen das Sakkadensystem.

Für den Langfinger springt dabei zweierlei heraus. Beschäftigt er das Nachführsystem des Opfers mit einer komplizierten Geste, lenkt er dessen visuellen Fokus vom Ort des Diebstahls weg. Und wenn er mit einer raschen, geradlinigen Bewegung das Sakkadensystem des Opfers anspricht, erreicht er, dass dessen visuelle Wahrnehmung, während das Auge von Punkt zu Punkt springt, blockiert ist. Dieses Phänomen ist als sakkadische Unterdrückung bekannt.

Eine Alternativhypothese beinhaltet, dass geschwungene Bewegungen dem Betrachter vielleicht automatisch bedeutsamer erscheinen als lineare und deshalb größere Beachtung fin-

den. In diesem Fall würde nur das Aufmerksamkeitssystem des Gehirns – und nicht das für die Steuerung der Augenbewegungen – vom manuellen Ablenkungsmanöver des Taschendiebs beeinflusst. Dazu passen Ergebnisse früherer Untersuchungen von uns, wonach Wölbungen und Ecken von Gegenständen prominenter erscheinen und stärkere Gehirnaktivität hervorrufen als gerade Kanten. Der Grund ist wahrscheinlich, dass sie weniger vorhersehbar und daher informationshaltiger sind. Analog könnten auch weitschweifige Gesten aussagekräftiger erscheinen und somit mehr auffallen als geradlinige Bewegungen.

Zaubertricks als Quelle kognitiver Täuschungen eröffnen vielerlei Möglichkeiten, die neuronalen Schaltkreise hinter bestimmten geistigen Funktionen aufzudecken. So haben Neurowissenschaftler damit die menschliche Neigung untersucht, eine Kausalbeziehung zwischen Ereignissen herzustellen, die unmittelbar aufeinanderfolgen. Ein gewiefter Bühnenmagier macht sich das zu Nutze, indem er als Vorbereitung auf einen Trick Ereignis A (beispielsweise gießt er Wasser auf einen Ball) immer vor Ereignis B (der Ball verschwindet) eintreten lässt. Natürlich hat beides nichts miteinander zu tun, doch da A grundsätzlich B vorausgeht, entsteht der Eindruck von Kausalität. Kognitionspsychologen nennen das illusorische Korrelation.

Vor drei Jahren führten Kuhn sowie Ben A. Parris und Tim L. Hodgson an der Uni-

Literaturhinweise

Johansson, P. et al.: Failure to Detect Mismatches Between Intention and Outcome in a Simple Decision Task. In: *Science* 310, S. 116–119, 7. Oktober 2005.

Kuhn, G., Land, M. F.: There's More to Magic Than Meets the Eye. In: *Current Biology* 16(22), S. R950–R951, 21. November 2006.

Kuhn, G. et al.: Misdirection in Magic: Implications for the Relationship Between Eye Gaze and Attention. In: *Visual Cognition*, 16(2–3), S. 391–405, 2008.

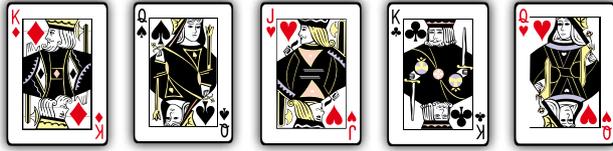
Macknik, S. L. et al.: Attention and Awareness in Stage Magic: Turning Tricks into Research. In: *Nature Reviews Neuroscience*. Online-Vorabveröffentlichung, 30. Juli 2008.

Parris, B. A. et al.: Imaging the Impossible: an fMRI Study of Impossible Causal Relationships in Magic Tricks. In: *Neuroimage* 45(3), S. 1033–1039, 2009.

Speziell zum Artikel produzierte Videos von Spektrum finden Sie unter: www.spektrum.de/zauberei

WIR KÖNNEN IHRE GEDANKEN LESEN

Wir haben genau Ihre Karte entfernt!



Haben wir richtig getippt? Lag es an Hardins Methode der außersinnlichen Wahrnehmung, oder gibt es eine einfachere Erklärung? Lesen Sie erst weiter, wenn Sie die Antwort nicht selbst herausfinden können.

Sie haben aufgegeben? Schauen Sie sich nochmals die sechs Karten auf S. 47 an und vergleichen Sie sie mit den fünf Karten oben. Bemerken Sie irgendwelche Unterschiede? Wenn Sie auf den Trick hereingefallen sind (wie die meisten Menschen), lag es an dem, was Psychologen und Illusionisten als Veränderungsblindheit bezeichnen. Als Sie das Auge ankreuzten, wurden Sie abgelenkt. Danach erinnerten Sie sich nicht mehr genau an das, was Sie gesehen hatten, und nach dem Umlblättern fiel Ihnen deshalb nicht auf, welche großen – und eigentlich offensichtlich – Unterschiede zwischen den Karten auf den beiden Seiten bestehen.

Neurotricks und Zauberwissenschaft

Neurowissenschaftler erforschen zunehmend die wahrnehmungspsychologischen Hintergründe der Zauberkunst und nutzen deren Erfahrungsschatz für eigene Experimente.

Sehen Sie dazu auch spezielle Videos unter:
www.spektrum.de/zauberei

Von Thomas Fraps

Das Interesse der Wissenschaft an der Zauberkunst reicht über 100 Jahre zurück. Eine erste Analyse von Kunststücken wie dem im nebenstehenden Artikel erwähnten in der Luft verschwindenden Ball versuchte schon 1894 Alfred Binet. Weitere frühe Arbeiten zur Psychologie der Täuschung erschienen 1896 im Fachjournal »Science« sowie im Jahr 1900 im »American Journal of Psychology«.

Die experimentellen Methoden waren damals jedoch begrenzt und im Wesentlichen auf fotografische Einzelaufnahmen eines Trickablaufs beschränkt. Im Zuge der Entwicklung von modernen bildgebenden Verfahren erwachte das Interesse der Wissenschaftler an der Zauberkunst neu. So bezeichnete es der renommierte Wahrnehmungspsychologe Richard L. Gregory 1982 als »grobe Nachlässigkeit von Psychologen, die Zauberkunst als reine Spielerei abzutun. Einer erfolgreichen Täuschung liegt sehr viel mehr zu Grunde als eine Hand, die schneller ist als das Auge«. Ende der 1990er Jahre verwendete der Kogniti-

onspsychologe Olivier Houdé von der Pariser Sorbonne einfache Kunststücke, um die Entstehung des Zahlbegriffs und reflexiven Bewusstseins bei Kindern zu erforschen, und wies auf die Möglichkeiten der Kombination von Zaubertricks mit Videotechnik für die Forschung hin.

Die seit 2005 von Gustav Kuhn von der Durham University (England) veröffentlichten Experimente haben die Magie endgültig als Forschungsobjekt ins Labor geholt und weitere Wissenschaftler für das Gebiet interessiert. Dazu gehört etwa der Kognitionsforscher John Henderson von der University of Edinburgh (Schottland). Er untersucht zusammen mit dem Psychologen und Zauberkünstler Peter Lamont das Phänomen der Veränderungsblindheit mit speziell dafür entworfenen Trickabläufen.

An der Graduate School of Systemic Neuroscience der Universität München zeichnet die Psychologin Amory Faber im Rahmen ihrer Doktorarbeit Elektroenzephalogramme von Versuchspersonen beim Betrachten von Zaubertricks auf. Solche EEGs haben eine

höhere zeitliche Auflösung als funktionelle Magnetresonanzaufnahmen, welche Änderungen in der Durchblutung des Gehirns registrieren. Sie sollen Aufschluss über den zeitlichen Verlauf der Erregungsmuster verschiedener Hirnareale im Moment der Verblüffung geben. Bei der Auswahl und Aufnahme der Trickfilme wirkte ich als Berater und Zauberkünstler mit.

David Edelman vom Neurosciences Institute in San Diego arbeitet zusammen mit dem New Yorker Zauberkünstler Mark Mitton an einem allgemeinen Modell der Ablenkung, um reproduzierbar zu erklären, warum sich zum Beispiel manche Bewegungen von Zauberkünstlern aus dem Bewusstsein der Zuschauer ausradieren lassen. Statt solche Bewegungen nur zu motivieren, um sie unverdächtig wirken zu lassen (wie im Artikel beschrieben), sucht sie der Illusionist – ähnlich dem Gorilla bei der Unaufmerksamkeitsblindheit – ganz »unsichtbar« zu machen. Das gilt insbesondere für Close-up-Kunststücke, bei denen sich die Zuschauer direkt neben dem Zauberer befinden, also zum Beispiel an einem Tisch mit ihm sitzen.

Ein Meister dieser Form war Tony Slydini (1900–1991). Der italoamerikanische Zauberkünstler verwendete bei

Der Autor wirkt bei Trickfilmen für ein Projekt an der Graduate School of Systemic Neurosciences der Universität München mit. Mit Elektroenzephalogrammen will man dabei den zeitlichen Verlauf der Erregungsmuster im Hirn im Moment der Verblüffung durch Zauberkunststücke ermitteln.

versity of Exeter (England) Versuchspersonen in einem Magnetresonanztomografen Filme von Zaubertricks vor, die allem Anschein nach gegen das Gesetz von Ursache und Wirkung verstießen. Anschließend verglichen sie die Gehirnaufnahmen ihrer Probanden mit denen einer Kontrollgruppe, die analoge Videos gesehen hatte, bei denen aber alles mit rechten Dingen zugeht. Wie sich herausstellte, war bei denjenigen, die den Zaubertrick betrachteten, ein Bereich im vorderen (anterioren) Gyrus cinguli stärker aktiviert als bei den Vergleichspersonen. Demnach könnte diese Hirnregion für die Interpretation kausaler Zusammenhänge bedeutsam sein.

Die Untersuchung von Kuhn und Kollegen gibt nur einen Vorgeschmack davon, wie gut sich Zaubertricks dafür eignen, bei Experimenten zur Erforschung der Physiologie des Gehirns Aufmerksamkeit und Bewusstsein zu manipulieren. Neurowissenschaftler sollten also lernen, die Methoden der Magie genauso geschickt wie professionelle Zauberer anzuwenden. Dann dürften sie im Stande sein, durch eine präzise Steuerung der Aufmerksamkeit in Echtzeit einen Zusammenhang zwischen Bewusstseinsinhalten und neuronalen Vorgängen herzustellen. Damit würden sie über die Mittel verfügen, einigen der Rätsel des Bewusstseins selbst auf die Spur zu kommen. ◁



Susana Martinez-Conde und **Stephen L. Macknik** arbeiten am Barrow Neurological Institute in Phoenix. Martinez-Conde leitet dort das Laboratory of Visual Neuroscience, Macknik das Laboratory of Behavioral Neurophysiology. Von ihnen ist in dieser Zeitschrift im Dezember 2007 bereits der Artikel »Fenster ins Gehirn« erschienen.

seinen Tricks, die er zumeist am Tisch sitzend vorführte, nur Alltagsrequisiten und verzichtete auf jede »offene« Ablenkung wie Explosionen und Lichtwechsel. Das zwang ihn, grundlegende Täuschungsmechanismen einzusetzen. So war das Prinzip der gezielten Lenkung der Aufmerksamkeit durch lineare und kurvenförmige Bewegungen ein wesentlicher Bestandteil seiner Kunststücke. Mit seinen Methoden frappte er selbst die besten Kollegen, und manche seiner Tricks finden sich noch heute im Repertoire vieler Zauberer.

Einige der erwähnten Arbeitsgruppen präsentieren ihre Ergebnisse und Praxiserfahrungen übrigens im ersten wissenschaftlichen Workshop zu diesem

Thema bei der Jahrestagung der Association for the Scientific Study of Consciousness vom 5. bis 8. Juni in Berlin (www.assc13.com/tutorials).

Der Dialog zwischen Zauberer und Neurowissenschaft kommt also immer mehr in Gang, ist aber auch prinzipiellen Beschränkungen unterworfen. So müssen die Kunststücke auf Video aufgenommen werden, um den experimentellen Laborbedingungen und der Forderung nach wissenschaftlicher Standardisierung zu entsprechen. Dies begrenzt das einsetzbare Repertoire, weil keine direkte Interaktion mit dem Publikum möglich ist. Tricks, die einen Zuschauer einbeziehen – der etwa eine Spielkarte oder eine Münze hält, die sich

dann in seiner Hand verwandelt –, sind dadurch momentan keinem neurowissenschaftlichen Experiment zugänglich.

Zudem funktionieren verschiedene Methoden der offenen und verdeckten Ablenkung auf Video gar nicht oder nur in abgeschwächter Form. Die von Zauberern empirisch entwickelten Mechanismen zur Lenkung der Aufmerksamkeit sind stark von der wechselseitigen Dynamik und vor allem dem Kontext einer Livevorführung abhängig. Auch der Illusionist beobachtet bei vielen Kunststücken das Publikum (nicht nur umgekehrt!), um bestimmte, zur Ablenkung erforderliche Bewegungsabläufe zeitlich auf dessen Reaktionen abzustimmen.

Trotz dieser Einschränkungen kann die Neurowissenschaft viel vom Wissen und den Fähigkeiten der Zauberer profitieren. Dass deren Vorführungen dadurch entzaubert werden, steht nicht zu befürchten. Schließlich tun neurowissenschaftliche Erkenntnisse über die Wahrnehmung von Musik dem Genuss eines Beethoven-Konzerts ebenfalls keinen Abbruch. Somit wird auch der Besitzer eines Gehirns, das alles über die neuronalen Korrelate der Ablenkung weiß, von einem guten Zauberer weiterhin aufs Angenehmste getäuscht werden!

Thomas Fraps hat sich nach Abschluss des Physikstudiums 1994 der Zauberei zugewandt. Er erhielt diverse Auszeichnungen, moderierte zwei Jahre lang »trickreich« die Fernsehsendung »Faszination Wissen« im Bayerischen Rundfunk und verbindet seither Magie und Wissenschaft auf der Bühne wie im Labor.



GRADUATE SCHOOL OF SYSTEMIC NEUROSCIENCES GUN-URIG, MÜNCHEN

Wie lässt sich NEUEN PANDEMIEEN vorbeugen?

Das aktuelle »Schweinegrippevirus« macht die Bedrohung durch neue Erreger wieder bewusst. Ein internationales Netzwerk, das frühzeitig Alarm schlägt, wenn irgendein Virus von Tieren auf Menschen überspringt, dürfte dazu beitragen, die Entstehung weltweiter Epidemien zu verhindern.

Von Nathan D. Wolfe

In Kürze

- ▶ Die Mehrheit menschlicher **Infektionskrankheiten** stammt ursprünglich von Tieren.
- ▶ Epidemiologen konzentrierten sich früher meist auf **Haustiere als mögliche Quelle von Erregern**, viele jedoch, darunter auch HIV, sind von Wildtieren auf den Menschen übersprungen.
- ▶ Um abzuschätzen, welche **Bedrohung von Wildtieren** ausgeht, werden diese und die Menschen, die häufig mit ihnen in Kontakt kommen, nun von Forschern auf Erreger untersucht.
- ▶ Solche **Überwachungsmaßnahmen** können dazu beitragen, neuartige Infektionskrankheiten des Menschen rechtzeitig zu entdecken, um Pandemien zu vermeiden.

Schweiß lief mir über den Rücken, dorniges Gestrüpp zerkratzte meine Arme, und wir hatten sie schon wieder verloren: Das Grunzen, Heulen und Kreischen der wilden Schimpansen, denen mein Kollege und ich seit fünf Stunden folgten, war verstummt. Ihre vielfältigen Lautäußerungen hatten uns geholfen, die Tiere durch Ugandas Kibale-Urwald zu verfolgen. Dass drei erwachsene Männchen plötzlich schwiegen, bedeutete nicht Gutes. Als wir uns einer kleinen Lichtung näherten, sahen wir sie wieder: Das Triumvirat stand unter einem großen Feigenbaum und beobachtete heimlich einen Trupp Colobusaffen, der hoch oben fraß und spielte.

Einen Moment lang schienen sich die drei am Boden zu verständigen, dann trennten sie sich. Während zwei von ihnen benachbarte Bäume erklommen, schlich der Anführer zum Feigenbaum. Plötzlich schoss er laut schreiend am Stamm empor. In Panik versuchten die Äffchen ihm zu entkommen. Doch der Überfall war gut geplant. Einem seiner Jagdgenossen gelang es, ein Jungtier unter den Flüchtenden zu ergreifen und auf den Waldboden zu zerren, bereit, seine Beute zu teilen.

Ich beobachtete, wie die Schimpansen Fleisch und Eingeweide verschlangen, und dachte: Dies ist das perfekte Szenario, bei dem Mikroorganismen von einer Tierart auf die andere überspringen können. Irgendwelchen Krankheitserregern im Körper der Beute bot sich hier die ideale Gelegenheit, einen neuen Wirt zu erobern. Die Schimpansen fraßen frische rohe Organe. Ihre Hände waren besudelt

mit Blut, Speichel und Kot, die Erreger enthalten konnten. Blut und andere Körperflüssigkeiten spritzten in ihre Augen und Nasenlöcher. Jede Wunde, jeder Kratzer am Körper der Jäger gewährte direkten Zugang zu ihrer Blutbahn.

Tatsächlich vermochten meine und andere Arbeitsgruppen nachzuweisen, dass die Jagd auf Wildtiere Viren gewissermaßen Trittsteine liefert, von der Beute auf den Jäger überspringen – sei der nun Tier oder Mensch. Genau so begann auch die HIV-Pandemie: Eine tierische Form des Virus ging von Tieraffen auf Schimpansen über und später von diesen Menschenaffen auf den Menschen.

Allerdings wäre die weltweite Ausbreitung des Aidsregers, des Human-Immunschwäche-Virus HIV, nicht zwangsläufig erfolgt. Hätten Wissenschaftler schon in den 1960er und 1970er Jahren versucht, Anzeichen für neuartige Infektionskrankheiten in der afrikanischen Bevölkerung zu entdecken, so wäre der Erreger lange vor dem Befall von Millionen Menschen bekannt gewesen. Mit einem solchen Vorsprung hätten Epidemiologen durchaus die Chance gehabt, einzugreifen und die Ausbreitung zu verlangsamen.

HIV ist nicht das einzige Übel, das aus einem Tierreservoir hervorging (siehe Kasten S. 56). Mehr als die Hälfte der heute bekannten Infektionskrankheiten hat ihren Ursprung in tierischen Wirten, darunter Sars, Dengue-Fieber, Ebola-Fieber – und gerade wieder in den Schlagzeilen: Influenza. In unserer globalisierten Welt, mit ihrem internationalen Straßen- und Luftverkehr, können sich neue Erreger rasch zu einer weltweiten Epidemie, einer Pandemie, ausbreiten – gleich ob sie nun direkt von Wildtieren auf den Menschen übersprin-



Vorsicht Biogefahr: Wildtiere können Krankheitserreger beherbergen, die in der Lage sind, auch auf den Menschen überzuspringen, was der erste Schritt zur Entwicklung und Verbreitung einer lebensgefährlichen Infektionskrankheit sein kann. Daher setzt ein neuer Plan zur Vermeidung von Pandemien bereits hier an.

gen wie HIV oder den Umweg über Nutztiere nehmen, wie das Japanische Enzephalitisvirus oder eben manche Stämme des Influenzavirus. Um solchen Bedrohungen entgegenzutreten, entwickelten meine Kollegen und ich vor Kurzem einen kühnen Plan zur Überwachung von Wildtieren und bestimmten Bevölkerungsgruppen, die mit ihnen oft in Kontakt kommen. Unser Ziel dabei ist, Anzeichen für neu auftretende Krankheitserreger oder Veränderungen ihres Verhaltens zu erfassen. Damit hätte man wohl – so unsere Hoffnung – die dringend nötige Frühwarnung, um Pandemien zu stoppen, noch bevor sie dazu werden.

Die Idee für ein solches Überwachungsprogramm erwuchs aus unserer Forschungsarbeit, die vor zehn Jahren begann – im zentralafrikanischen Kamerun mit einer Studie bei Dorfbewohnern, die Wildtiere jagen und schlachten, aber auch fangen und als Haustiere halten. Wir wollten herausfinden, ob neue Stämme des Immunschwächevirus gerade dabei waren, in menschliche Populationen einzudringen. Bei diesen Dorfbewohnern vermuteten wir eine besonders hohe Gefährdung. Man muss sich dazu nur den Berufsalltag eines typischen zentralafrikanischen Buschjägers vor Augen führen. Bei seinen Streifzügen auf schmalen Pfaden durch urwüchsigen Wald geht er barfuß und trägt leichte Baumwollshorts. Erlegte Beute, zum Beispiel einen 20 Kilogramm schweren Pavian, schleppt er auf dem Rücken viele Kilometer weit nach Hause. Das Blut des Tiers mischt sich mit dem menschlichen Schweiß, tröpfelt und rinnt in frische Schrammen, die der Jäger sich unterwegs zugezogen hat. Irgendwelche Krankheitserreger aus dem tierischen Blut gelangen so leicht in Blut und Gewebe des Jägers.

Hätten der Mann und die Mitglieder seines Dorfs die Wahl, würden sie wohl lieber Schwein oder Rind essen. Doch Fleisch von Nutztieren ist in dieser Gegend rar. Also tun Menschen das, was ihre Vorfahren seit Jahrtausenden getan haben: Sie bejagen die heimischen Wildtiere. Wenn meine Freunde in New Jersey in der Jagdsaison auf ihrer Farm Rotwild schießen, ist das insofern etwas anderes, als dass der zentralafrikanische Jäger samt seiner Familie das Fleisch zum Überleben benötigt – und sich dabei von seiner Hauptbeute, eben Affen, eher eine Infektion mit Viren oder anderen Mikroorganismen zuzieht. Die verwandtschaftliche Nähe zum Menschen macht die Beute problematischer.

WECHSELSEITIGER AUSTAUSCH



GETTY IMAGES, WILFRIED KRECHTMOST

Krankheitserreger gehen teilweise auch von Menschen auf Tiere über, darunter

- Tuberkulose auf Kühe
- Gelbfieber auf Neuweltaffen
- Masern auf Berggorillas
- Kinderlähmung auf Schimpansen

TIERISCHE INFEKTIONSQUELLEN

Viele der wichtigsten menschlichen Infektionskrankheiten stammen, wie es aussieht, ursprünglich aus Wildtieren. Deren Erreger müssen also zusätzlich zu denen der Nutztiere überwacht werden. Die Tabelle nennt zehn solcher Krankheiten und die Tiere, von denen sie wahrscheinlich auf den Menschen übertragen wurden.

Krankheit	Quelle
Aids	Schimpansen
Hepatitis B	Menschenaffen
Influenza A	Wildvögel
Pest	Nager
Dengue-Fieber	Altweltaffen
Ostafrikanische Schlafkrankheit	wild lebende und domestizierte Wiederkäuer
Westafrikanische Schlafkrankheit	wild lebende und domestizierte Wiederkäuer
Malaria tertiana	asiatische Makaken
Gelbfieber	afrikanische Affen
Chagas-Krankheit	viele wild lebende und domestizierte Säugetiere

Ein ganzes Sortiment neuer Viren

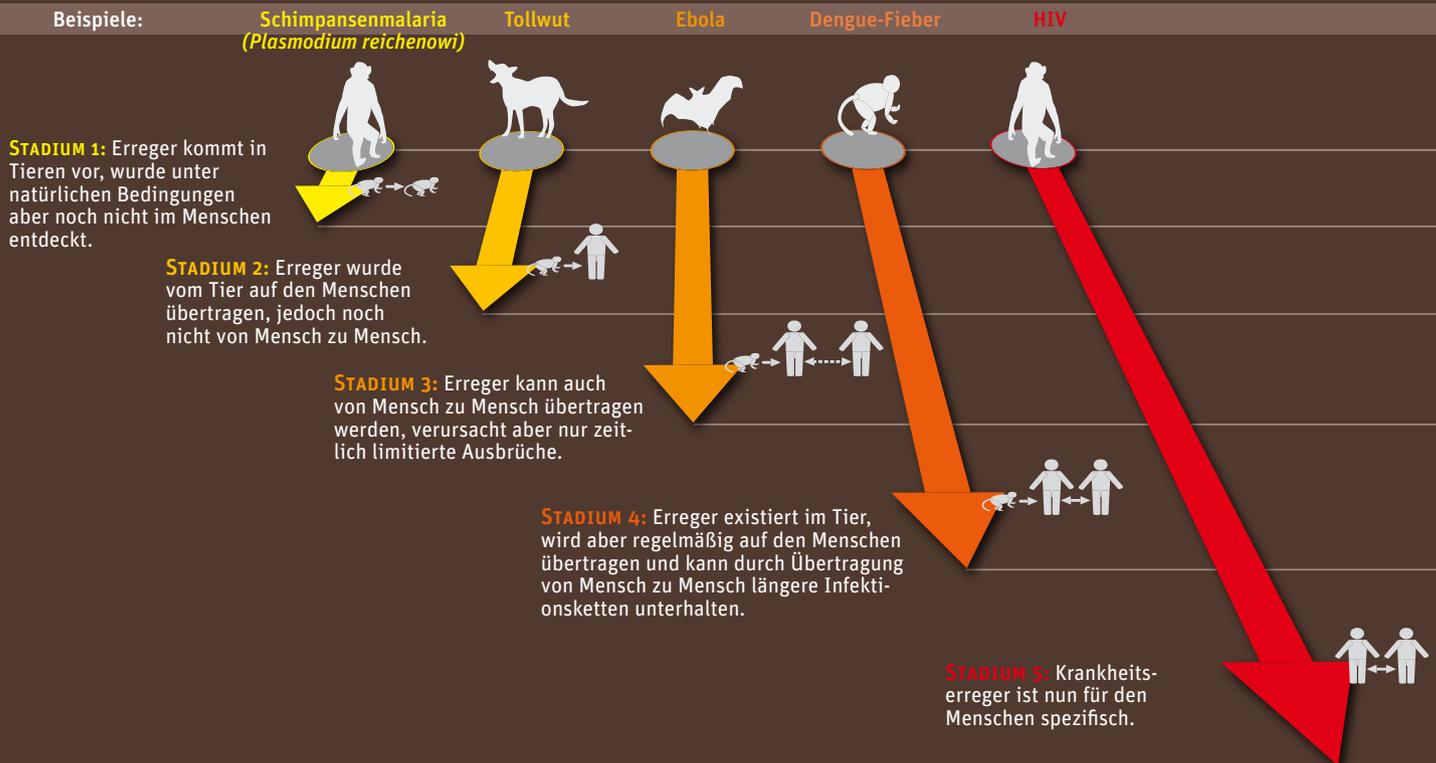
Es war nicht einfach, die Dorfbevölkerung für unser Projekt zu gewinnen. Viele befürchteten, wir wollten ihnen ihr Jagdwild wegnehmen. Erst nachdem wir ihr Vertrauen gewonnen hatten, konnten wir Proben und Daten sammeln. Ihre Kooperation war unverzichtbar: Wir stellten nicht nur zahlreiche Fragen zu Gesundheitszustand und Jagdgewohnheiten, sondern benötigten natürlich auch Blutproben der Bewohner – und der Beute. Dazu gaben wir den Jägern Filterpapier mit, das sie mit dem frischen Blut der Tiere tränkten.

In den Blutproben von Jägern und Beutetieren entdeckten wir mehrere Viren, die noch niemand zuvor beim Menschen nachgewiesen hatte. Eines davon ist das Simian Foamy Virus (SFV), über dessen Anwesenheit wir erstmals 2004 in der Fachzeitschrift »Lancet« berichteten. Es handelt sich um ein Retrovirus, gehört also zur gleichen Großgruppe wie HIV. Natürlicherweise kommt es bei den meisten tierischen Primaten vor, unter anderem bei Meerkatzen, Mandrills und Gorillas. Jede dieser Affenarten beherbergt eine eigene genetische Variante des SFV – und alle drei Varianten waren auf die jagende Bevölkerung übergegangen. In einem besonders anschaulichen Fall hatte sich ein 45-jähriger Mann, der angab, Gorillas erlegt und geschlachtet zu haben, mit dem Gorilla-SFV angesteckt. Diese Menschenaffen werden nur selten von Jägern verfolgt, die das Fleisch für den Eigenbedarf benötigen.

Bei denselben zentralafrikanischen Populationen entdeckten wir ein Sortiment weiterer Retroviren, und zwar humane T-lymphotrope Viren (HTLVs). Diese befallen, wie ihr Name besagt, bevorzugt T-Lymphozyten, bestimmte Immunzellen im Blut des Wirts. Von zwei dieser Viren, HTLV-1 und HTLV-2, wusste man damals, dass sie bereits Millionen Menschen weltweit infiziert hatten und bei manchen der Befallenen bestimmte Krebsarten und Erkran-

VOM TIERISCHEN ZUM REIN MENSCHLICHEN KRANKHEITSERREGER

Die Entwicklung vollzieht sich in fünf Etappen, wobei ein Erreger auf jeder dieser Stufen stehen bleiben kann. Auf Stufe 3 etwa mag er zwar äußerst lebensgefährlich sein, aber insgesamt nur wenige Todesopfer fordern, weil er sich nicht frei von Mensch zu Mensch verbreiten kann. Je besser sich beispielsweise ein Virus unter Menschen auszubreiten vermag, desto leichter kann es pandemisch werden.



MELISSA THOMAS, NACH: NATHAN D. WOLFE ET AL., ORIGINS OF MAJOR HUMAN INFECTIOUS DISEASES, NATURE, BD. 447, 17. MAI 2007

kungen des zentralen Nervensystems auslösen können. Doch zwei weitere waren der Wissenschaft neu: HTLV-3 und HTLV-4, die wir 2005 in den »Proceedings of the National Academy of Sciences USA« erstmals beschrieben. Angesichts der ausgeprägten genetischen Ähnlichkeit von HTLV-3 mit seinem Gegenstück in Affen, STLV-3, dürfte der Mensch es sich wohl über erlegte infizierte Affen eingefangen haben. Der Ursprung von HTLV-4 ist noch offen. Vielleicht finden wir seinen Vorläufer, wenn wir die Verbreitung dieser Virusgruppe bei Affen weiter erforschen.

Neue Killerseuchen verhindern

Noch wissen wir auch nicht, ob SFV oder die neuen HTLV-Viren bei Menschen überhaupt Krankheiten hervorrufen können. Nicht jedes Virus führt zwangsläufig zu einer Erkrankung – und nicht alle Viren, die Menschen krank machen und sogar innerhalb unserer Spezies weitergegeben werden, lösen eine Pandemie aus; oft ziehen sie sich von selbst wieder zurück. Da jedoch SFV und HTLV derselben Virusfamilie angehören wie HIV, das sich weltweit ausgebreitet hat, sollten die Epidemiologen diese Vertreter genau im Auge behalten.

Die Umwandlung eines tierischen Krankheitserregers in einen spezifisch menschlichen

haben meine Kollegen und ich in fünf Stadien unterteilt (siehe Kasten oben). Zunächst kommt der Erreger nur bei Tieren vor (Stadium 1), in Stadium 2 können sich Menschen bei Tieren anstecken, nicht jedoch bei infizierten Menschen. In Stadium 3 wird der Erreger zu einem geringen Teil auch von Mensch zu Mensch übertragen, die Infektionskette reißt jedoch früh ab und Ausbrüche bleiben beschränkt. Im Stadium 4 kann er länger in der menschlichen Bevölkerung weitergegeben werden. Im Stadium 5 schließlich liegt ein spezifisch menschlicher Erregerstamm vor, der nun nicht mehr auf ein Tierreservoir angewiesen ist. Erreger der Stadien 4 und 5 können massiv Todesopfer fordern.

Hätten wir die afrikanischen Jäger schon 30 Jahre eher beobachtet, wäre uns HIV wohl in die Fänge geraten, bevor es das Stadium eines Pandemieerregers erreichte. Diese Chance ist dahin. Jetzt stellt sich die Frage, wie die nächsten neuen Killerseuchen zu verhindern sind. Mit unserer Methode lassen sich Bevölkerungsgruppen in abgelegenen Gegenden gut beobachten. Mit einer Ausweitung unserer Arbeit wäre somit das Übergangsmuster von tierischen Krankheitserregern auf den Menschen auch auf breiterer Basis erfassbar. Uns schwebte ein weltweites Überwachungs-

GEFAHRENQUELLE HAUSTIER



GETTY IMAGES, THOMAS BARWICK

Nicht nur Wild- und Nutztiere stellen potenzielle Quellen für eine neue Pandemie dar. Auch auf Hunde, Katzen und andere Haustiere können bei Kontakt zu infizierten Wildtieren Erreger überspringen, die dann womöglich auf den Halter übertragen werden.



CARL AMMAN

LAND: Kamerun
NEUERE HIER HERVORGEGANGENE VIREN: HIV
INDIKATORGRUPPE ZUR ERFASSUNG NEUER KRANKHEITSERREGER:
Menschen, die Wildtiere jagen und schlachten

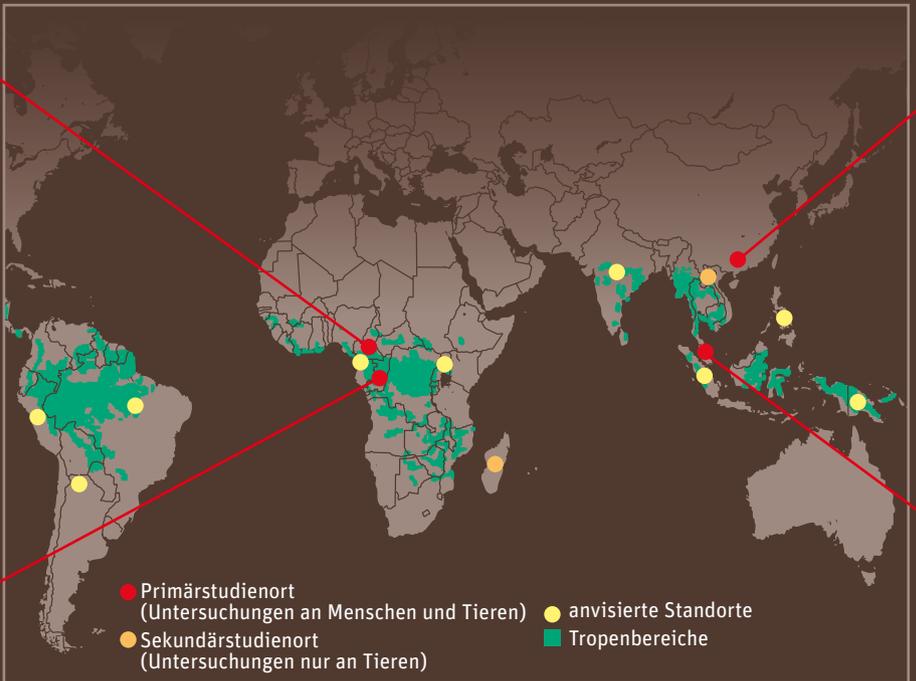


AP PHOTO, SCHALF VAN ZUYDAM

LAND: Demokratische Republik Kongo
NEUERE HIER HERVORGEGANGENE VIREN:
Marburg-Virus, Affenpockenvirus, Ebola-Virus
INDIKATORGRUPPE:
Menschen, die Wildtiere jagen und schlachten

AUFBAU EINES ÜBERWACHUNGNETZWERKS

Durch Überwachung von Mikroorganismen bei Wildtieren und jenen Menschen, die häufig mit ihnen in Kontakt kommen, könnten Wissenschaftler neu auftretende Infektionskrankheiten erkennen, bevor sie sich ausbreiten. So hat der Autor vor Kurzem die Global Virus Forecasting Initiative (GVFI) ins Leben gerufen. Das ist ein Netzwerk von rund 100 Wissenschaftlern und Mitarbeitern des Gesundheitswesens in sechs Ländern (rote und orangefarbene Punkte), die den Übergang potenziell gefährlicher Infektionserreger von Tieren auf Menschen erfassen und beobachten. Die Aktivitäten der GVFI konzentrieren sich weitgehend auf tropische Regionen (grün), da diese eine große Artenvielfalt beherbergen und viele dort lebende Menschen durch die Jagd und andere Tätigkeiten oft in Kontakt mit Wildtieren kommen. Die GVFI hofft, ihr Netzwerk allmählich um weitere Länder mit großer Biodiversität erweitern zu können; einige davon sind hier mit gelben Punkten gekennzeichnet.



MELISSA THOMAS

MASSNAHMEN IM ERNSTFALL

Schon nach ersten Anzeichen dafür, dass ein neuer Erreger von einzelnen Menschen, die in direktem Kontakt zu Wildtieren standen, auf die Bevölkerung übergreift, wird Alarm geschlagen. Der nächste wichtige Schritt zur Verhinderung einer Pandemie wäre dann die Überwachung der Blutkonserven. Dazu müssten schnellstmöglich Tests zum Nachweis des neuen Erregers entwickelt und produziert werden.

system vor, das vor einer neu auftauchenden Infektionskrankheit zu warnen vermag, bevor der Topf überkocht.

Mit Unterstützung von Google.org und der Skoll-Stiftung konnten wir die Global Viral Forecasting Initiative (GVFI) ins Leben rufen. Innerhalb dieses Forschungsprogramms arbeiten weltweit Naturschutzbiologen, Epidemiologen und Mitarbeiter des öffentlichen Gesundheitswesens zusammen. Sie identifizieren Infektionserreger in ihren ursprünglichen Wirten und überwachen, ob diese von dort auf den Menschen übergehen und sich vom Entstehungsort ausbreiten. Statt sich nur auf bestimmte Viren oder eine gerade aktuelle Erkrankung zu konzentrieren, versucht die GVFI, das komplette Spektrum von Viren, Bakterien und Parasiten abzudecken, die dabei sind, von Tieren auf den Menschen überzugreifen.

Obwohl die Initiative noch am Anfang steht, beschäftigt die GVFI schon rund 100 Wissenschaftler, die kontinuierlich Indikator-

populationen und Wildtiere in Kamerun, der Demokratischen Republik Kongo, in Madagaskar, China, Laos und Malaysia beobachten – alles Länder, die als wichtige Brutstätten für neue Infektionskrankheiten gelten. Viele der Indikatorpersonen sind Jäger; wir untersuchen jedoch auch andere Hochrisikogruppen, wie Händler und Beschäftigte auf den Fleischmärkten Asiens, wo lebende Tiere angeboten werden (siehe Kasten oben).

Bei einem Jäger eine neue Mikrobe zu finden, ist jedoch nur der erste Schritt. Als Nächstes muss nämlich geklärt werden, ob sie Krankheiten verursacht, von Mensch zu Mensch übertragen wird und schon in städtische Zentren vorgedrungen ist, wo sie sich wegen der hohen Bevölkerungsdichte schnell verbreiten könnte. Tritt ein neu auftauchender Erreger entfernt von seinem Ursprungsort in einem Ballungsgebiet auf, so ist dies als besonders Besorgnis erregendes Zeichen für ein pandemisches Potenzial zu werten.



LAND: China
 NEUERE HIER HERVORGEANGENE VIREN:
 Sars-Coronavirus, Influenzavirus H5N1
 INDIKATORGRUPPE: Händler auf Fleischmärkten mit
 lebenden Tieren in Hongkong



LAND: Malaysia
 NEUERE HIER HERVORGEANGENE VIREN: Nipah-Virus
 INDIKATORGRUPPE: Jäger von Wildtieren

Im Fall der Viren HTLV-3 und HTLV-4 haben wir begonnen, Hochrisikogruppen in Städten nahe bekannter Brutstätten für neue Infektionskrankheiten zu beobachten. Sie werden regelmäßig auf beide Viren getestet. Zu den Gruppen, die sich schon frühzeitig infizieren könnten, gehören Patienten, die an einer Sichelzellanämie leiden und daher regelmäßig Bluttransfusionen erhalten. Fänden wir bei ihnen die Viren, würden wir eine weltweite Überprüfung der Blutkonserven anstreben, um weitere Empfänger zu schützen. Dazu entwickeln wir mit unserem langjährigen Partner Bill Switzer und unseren Kollegen von den US-amerikanischen Centers of Disease Control and Prevention neue diagnostische Tests zur Untersuchung von Blutkonserven auf Viren. Außerdem ist es unbedingt nötig herauszufinden, auf welchem Weg der Erreger übertragen wird. Beispielsweise könnten die Gesundheitsbehörden bei sexuell übertragbaren Erregern Aufklärungskampagnen wie im Fall

von HIV starten, die unter anderem auch den Gebrauch von Kondomen empfehlen.

Regierungen könnten überdies Maßnahmen ergreifen, die neuartige Viren daran hindern, überhaupt in die Bestände der Blutbanken zu gelangen. So hat die kanadische Regierung als Reaktion auf unsere oben beschriebenen Forschungsergebnisse ihre Gesetze für das Blutspendewesen geändert: Personen, die Kontakt zu Affen hatten, sind nicht mehr als Spender zugelassen.

Neben unseren eigenen Bemühungen umfasst das neue Gebiet der Pandemieprävention auch Programme wie HealthMap und ProMed, die täglich aktuelle Meldungen zu Krankheitsausbrüchen weltweit zusammenstellen. Internetgestützte Warnsysteme – wie das von Google.org initiierte Instrument Flu Trends – nutzen Suchanfragemuster für die Influenzavorhersage. Entsprechend werden auch die nationalen und internationalen Überwachungs- und Aktionssysteme lokaler Regierungen und der Weltgesundheitsorganisation eine wichtige Rolle zur frühzeitigen Eindämmung künftiger Seuchen spielen.

Wir selbst streben die Ausweitung unseres Überwachungsnetzwerks auf weitere Länder rund um den Globus an. Dazu sollten unter anderem Brasilien und Indonesien gehören, da diese Länder eine enorme Vielfalt von Tieren beherbergen, die Krankheitserreger auf Menschen übertragen könnten. Der Ausbau der GVFI wird allerdings größere Investitionen erfordern: Das Netzwerk so zu erweitern, dass es über genügend Mitarbeiter und Laborkapazität verfügt, um Indikatorpopulationen und ihre Kontakttiere alle sechs Monate zu testen, dürfte etwa 30 Millionen Dollar kosten. Für den laufenden Unterhalt des Systems rechnen wir mit zusätzlichen 10 Millionen Dollar jährlich. Wenn es allerdings innerhalb der nächsten 50 Jahre gelingt, auch nur eine einzige Pandemie zu verhindern, so würde sich der gesamte Aufwand bereits mehr als nur rechnen. Selbst ein bloßes Abmildern einer Seuche würde die Kosten rechtfertigen.

Der Mensch bemüht sich, eine ganze Reihe hoch komplexer natürlicher Bedrohungen vorherzusagen. Nur selten fragen wir nach dem Sinn solcher Bestrebungen im Fall von Wirbelstürmen, Tsunamis, Erdbeben oder Vulkanausbrüchen. Wir sehen keinen Grund zu glauben, Pandemien seien schwieriger vorherzusagen als Tsunamis. Angesichts der enormen Summen, welche die Eindämmung bereits etablierter Pandemien verschlingt, erscheint es nurmehr sinnvoll, mit einem Bruchteil dieses Geldes schon das Aufkeimen an sich zu stoppen. Das Quäntchen Vorbeugung wäre nirgends besser angebracht. ◀



Nathan D. Wolfe ist Inhaber einer von Lorry I. Lokey gestifteten Gastprofessur für Humanbiologie an der kalifornischen Stanford University und leitet die »Global Viral Forecasting Initiative«. Er hat 1998 in Harvard über die Immunologie von Infektionskrankheiten promoviert. Wolfe ist Träger des »Director's Pioneer Award« der US-amerikanischen National Institutes of Health und des »Emerging Explorer Award« der National Geographic Society. Derzeit betreibt er Forschungsprojekte und öffentliche Gesundheitsprogramme in mehr als zehn afrikanischen und asiatischen Ländern.

Wolfe, N. D. et al.: Naturally Acquired Simian Retrovirus Infections in Central African Hunters. In: *Lancet* 363(9413), S. 932–937, 20. März 2004.

Wolfe, N. D. et al.: Emergence of Unique Primate T-Lymphotropic Viruses among Central African Bushmeat Hunters. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102(22), S. 7994–7999, 31. Mai 2005.

Wolfe, N. D. et al.: Bushmeat Hunting, Deforestation, and Prediction of Zoonotic Disease Emergence. In: *Emerging Infectious Diseases* 11, S. 1822–1827, Dezember 2005.

Wolfe, N. D. et al.: Origins of Major Human Infectious Diseases. In: *Nature* 447, S. 279–283, 17. Mai 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/993072.

LIMAN TEPE – Trojas unbekannte Schwester

Archäologen entdecken an der türkischen Küste immer mehr Großsiedlungen der Bronzezeit, die wie das berühmte Troja durch Handwerk und Handel gediehen.

Von Waltraud Sperlich

Die Archäologin Sila Votruba bemüht sich, ruhig und gleichmäßig zu atmen, wie es ihr die Kollegen von der Universität Haifa beigebracht haben. Zehn Meter unter der Wasseroberfläche schwebend, zeichnet sie mit einem Spezialstift einen kurzen Abschnitt einer bronzezeitlichen Mole auf eine Kunststofffolie. Vor mehr als 4500 Jahren florierte an diesem Ort an der heutigen türkischen Küste der Fernhandel zwischen den bronzezeitlichen Kulturen der Ägäis und denen Anatoliens. Liman Tepe, so der Name des Siedlungshügels im Ortsteil Iskele der Kleinstadt Urla, 40 Kilometer westlich von Izmir, erweist sich immer mehr als Eldorado für Frühgeschichtler.

Plötzlich hält Votruba inne. Steckt dort zwischen den Steinen der Hafenummauer etwa eine Scherbe? Vorsichtig schwimmt sie näher, vertreibt einen Fisch und versucht, das Objekt im trüben Wasser genauer zu betrachten. Stein oder Scherbe? Im letzteren Fall wäre es wunderbar, das Ornament eines Kraken zu entdecken, das einem Stempel »made in Mykene« gleichkäme. Keramik von der anderen Seite der Ägäis würde der türkischen Archäologin gut ins Konzept passen, denn sie schreibt ihre Doktorarbeit über die Handelsbeziehungen zwischen Liman Tepe und dem mykenischen Griechenland.

Bevor sie sich daranmachen kann, das fragliche Objekt genau zu kartieren und seinen Fundzusammenhang zu dokumentieren, geschweige denn es zu bergen, mahnt der Druckmesser zum Aufstieg, der Luftvorrat wäre andernfalls zu knapp, um noch auf fünf Metern den dreiminütigen Sicherheitsstopp einzulegen.

Die Unterwasserarchäologin ist Mitarbeiterin des Izmir Region Excavations and Research Project (IRERP) der Universität Ankara, das Hayat Erkanal initiiert hat, der in Liman Tepe die Grabungen über wie unter Wasser leitet. Dass Teile der jahrtausendealten Stadt auch im Meer liegen, hatten er und sein Team schnorchelnd ermittelt. Seit neun Jahren unterweisen Spezialisten der Universität Haifa jeden Sommer die Forscher im Gerätetauchen.

Eine Stunde wird Votruba nun geduldig an der Oberfläche warten müssen, bis sie wieder für eine halbe Stunde unter Wasser darf – zunächst muss der ins Blut aufgenommene Stickstoff abgeatmet werden. Sie pellt sich aus ihrem Neoprenanzug, unwillig ob der Zwangspause. »Das Graben unter Wasser verlangt Archäologen noch mehr Geduld ab als üblich. An Land könnte ich zur Not auch in der Nacht im Licht einer Taschenlampe weiterarbeiten, bis ich ein Artefakt geborgen habe.«

Die Verstimmung lässt sich gut verstehen: Adrenalin im Blut gehört in ihrer Berufsgruppe nicht zum Alltag. Archäologen arbeiten sich Millimeter für Millimeter durch die Hinterlassenschaften der Vergangenheit, messen und zeichnen, bergen und dokumentieren, ob zu Lande oder unter Wasser. Doch Liman Tepe ist etwas Besonderes: Die Siedlung an der türkischen Küste hatte kein Forscher auf der Rechnung. Inzwischen ist klar, dass diese befestigte Anlage im 3. Jahrtausend v. Chr. mit dem berühmten Troja zu einem die Ägäis und Anatolien verbindenden Handelsnetz gehörte.

Eine »Stadt voll prangender Häuser« mit »wohl bebauten Gassen«; »eine gewaltige Feste« mit »türmenden Mauern« und »gottgebauten Türmen«, so beschrieb Homer das Troja der Überlieferungen. Und so hätte der erste Dichter Europas wohl auch Liman Tepe beschrei-

Auch aus der Luft ist die versunkene Mole gut zu sehen (oben). Graben unter Wasser bedeutet: absaugen (Mitte und unten).





Unter dem Schlick der prähistorischen Hafenanlagen entdecken die Archäologen immer wieder auch Keramik – Zeugnisse einst reger Handelstätigkeit.

ben können. Ganz in der Nähe geboren – sei es nun in Smyrna, Kolophon oder auf der Insel Chios, wie Experten diskutieren –, war es ihm vielleicht sogar vertraut. Im 8. Jahrhundert v. Chr. waren die Wehrtürme des Orts wohl schon halb von Erde bedeckt, boten aber immer noch so viel Schutz, dass griechische Einwanderer sie als Stützmauern für ihre einfachen Katen nutzten. Klazomenai nannten die Kolonisten ihren Weiler, der 300 Jahre später zu den reichsten Städten Ioniens gehören sollte, des von ionischen Stämmen besiedelten Küstengebiets Kleinasiens. Weitere 800 Jahre später waren die bronzezeitlichen Bastionen ganz verschwunden und mit ihnen auch die Erinnerung an eine ältere Siedlung. Der griechische Schriftsteller und Geograf Pausanias (um 115–180 n. Chr.) notierte: »Die Stadt der Klazomenier war, bevor die Ionier nach Asien kamen, nicht bewohnt.«

In Wahrheit gehörte Liman Tepe wohl zu den ersten dauerhaften Siedlungen Kleinasiens überhaupt. Die neolithische Revolution, die aus Wildbeutern Bauern machte, hatte die Westküste vor 6500 Jahren erreicht. Im Chalkolithikum, dem von der ersten Kupfernutzung geprägten Abschnitt der ausklingenden Steinzeit, entstanden erste Dörfer an saisonal genutzten Lagerplätzen, so auch in Liman Tepe. Wie der Prototyp eines Hauses dort

aussah, wissen die Forscher ziemlich gut: Es war von der Form her ein Zelt, dessen Schrägen aus Ästen bestanden, die man mit Reisig verflocht; Lagen von Lehm dichteten die Konstruktion ab.

Die griechische Archäologin Ourania Kouka, Expertin für frühe Kulturen in der Ägäis, kam 1997 in Erkanals Team. Wissenschaftlich funktioniert bestens, was politisch nicht immer klappt – eine türkisch-griechische Kooperation. Dabei bestätigt die gemeinsame Arbeit, was für Troja schon als gesichert gilt und nun offenbar für den Westen Kleinasiens verallgemeinert werden kann: Über weite Zeiträume hinweg fungierte er als Kontaktfläche, dort verschmolzen die Kulturen des Ägäisraums mit denen des angrenzenden Anatolien.

Vom Luxus der Frühen Bronzezeit – man denke nur an den von Heinrich Schliemann in Troja ausgegrabenen und nach Deutschland geschmuggelten »Schatz des Priamos« – war man in der Kupfersteinzeit noch weit entfernt. Das kostbarste Gut waren die Vorräte, dementsprechend wohnte man selbst in Leichtbauweise, während massive Stampflehntechnik das Getreide gegen Nagetiere schützte: Zwischen zwei Schalbretter stampften die Bauern stark tonhaltige Erde ein, die nach dem Trocknen eine feste Mauer ergab. Auch, was bei den Dorfbewohnern auf den Tisch respektive den

In Kürze

- ▶ Ausgrabungen am Siedlungshügel Liman Tepe nahe dem heutigen Urla an der Westküste der Türkei zeigen, dass dort im 3. Jahrtausend v. Chr. eine **stadtartige Ansiedlung** existierte.
- ▶ Wehranlagen, öffentliche Gebäude und die erste Hafenanlage der Welt sowie eine Unzahl von Kleinfunden lassen darauf schließen, dass Liman Tepe ein wichtiger Knotenpunkt in jenem **Fernhandelsnetz der Frühen Bronzezeit** (2500–2100 v. Chr.) war, zu dem auch Troja gehörte.

DIE GRÖSSTEN SIEDLUNGEN DER FRÜHEN BRONZEZEIT (ÄGÄISRAUM UND KLEINASIEN)

LIMAN TEPE

Eine bis in das 4. Jahrtausend v. Chr. zurückreichende Küstensiedlung nahe Urla, 40 Kilometer von Izmir entfernt. Größte Blüte als Knotenpunkt in einem Handelsnetz in der Frühen Bronzezeit (2500–2100 v. Chr.); gewaltige Wehranlagen, Hafenanlage, großes kommunales Gebäude mit noch unklarer Funktion

BAKLA TEPE

Südlich von Izmir am Eingang der fruchtbaren Menderes-Ebene gelegene Siedlung, die schon am Ende der Kupferzeit einen Durchmesser von 300 Metern hatte und während der Bronzezeit mit einer Wehrmauer befestigt war. Von besonderem Interesse für die Archäologen sind die Friedhöfe außerhalb der Stadtmauer. Die Toten wurden meist in Grabamphoren beigesetzt und im

Rahmen eines Rituals mit Getreidekörnern bestreut; mehr als 80 Gräber wurden untersucht, zahlreiche Beigaben, auch aus Bronze und Silber, ausgegraben.

TROJA

Siedlung an den Dardanellen, seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. bis in das 12. Jahrhundert v. Chr. dauerhaft bewohnt, seit etwa dem 7. Jahrhundert als griechische Siedlung Ilios. Größte Ausdehnung (Unterstadt eingerechnet) in der Späten Bronzezeit (Troja VI und VII)

HERAION AUF SAMOS

Eine Siedlung nahe dem Hera-Heiligtum auf Samos, die mit Magnetometer-Messungen im Moor entdeckt wurde. In diesem Sommer beginnt dort Wolf-Dietrich Niemeier, der Leiter der Abteilung Athen des Deutschen Archäologischen Instituts, mit den Ausgrabungen und erhofft sich Großes, auf jeden Fall eine der größten Siedlungen der Frühen Bronzezeit.

POLIOCHNI AUF LIMNOS

Wird »älteste Stadt Europas« genannt, weil die frühesten Siedlungsreste aus dem 5./4. Jahrtausend v. Chr. stammen. Großstadt in der Frühen Bronzezeit mit einer Wehrmauer, »kommunalen Gebäuden«, gepflasterten Straßen und einem Abwassersystem

KOLONNA AUF ÄGINA

Ägina liegt im Saronischen Golf vor der attischen Küste. Schon 3000 v. Chr. bauten die Insulaner die Siedlung auf einem Küstensporn und befestigten sie mit einem mächtigen Wall, fügten bald einen zweiten Mauerring dazu, dann noch einen dritten. Niemand weiß, vor wem sich die Bewohner schützen mussten.

Archäologen entdeckten 2003 Schmuck, der dem »Schatz des Priamos« aus Troja in keiner Weise nachsteht. Viele Teile bestehen aus Silber, das sich weder wie Kupfer aus Erz schmelzen noch wie Gold aus Flusssand herauswaschen lässt, sondern spezielle Techniken wie die Verwendung von Säuren zur Gewinnung benötigt.

LERNA IN DER ARGOLIS

In der Region, wo später mykenische Hochburgen wie Mykene, Tiryns und Argos entstanden, errichtete man schon im 4. Jahrtausend v. Chr. eine Siedlung aus Rechteckhäusern. Zu Beginn des 3. Jahrtausends v. Chr. wurde sie mit einer doppelten Ringmauer umgeben, deren Zwischenraum man mit Wohnhäusern zubaute. Das erstaunlichste Gebäude aus der Frühen Bronzezeit ist das von den amerikanischen Ausgräbern so genannte *house of tiles*: Bereits zweistöckig, trug es das älteste bekannte Dach aus gebrannten Ziegeln.

KÜLLÜOBA IN NORDWESTANATOLIEN, BEYCESULTAN IM WESTEN, ALACA HÖYÜK IN ZENTRALANATOLIEN, KARATAS-SEMAYÜK IM SÜDEN UND TARSUS IM SÜDOSTEN

Große Siedlungen im Kleinasien der Frühen Bronzezeit mit Befestigungen, Rampen und großen »kommunalen Gebäuden«, möglicherweise Palästen

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK



gestampften Lehm Boden kam, haben die Forscher ermittelt: In den Silos fanden sie verkohlte Körner von Gerste, Einkorn und Emmer, den Wildformen des Weizens. Vermutlich wurden die Getreide geschrotet, zu Brei verkocht und auf heißen Steinen zu Fladenbrot gebacken; Linsen bereicherten den spätsteinzeitlichen Speiseplan. Aus den Nahrungsresten lesen die Forscher aber noch mehr: »Um ein Haus standen offenbar Speicher für Getreide, um ein anderes waren solche für Linsen gruppiert. Für uns ist das ein deutliches Indiz, dass diese Siedlung bereits genossenschaftlich organisiert war«, erklärt Kouka.

Vorräte mussten in Gefäßen aufbewahrt werden, deshalb benötigten die Bauern Werkzeuge – in Liman Tepe wurde gehämmert, gesägt, geschnitten und getöpft. Neben jeder Bettstatt befand sich eine Werkstatt. Klängen und Pfeilspitzen schlug man gern aus Obsidian heraus, einem Vulkangestein, das hart wie Glas ist und scharfe Kanten ergibt. Analysen haben gezeigt, dass der an diesem Ort gefundene Obsidian von Milos stammt, einer Insel der Kykladen. Mit anderen Worten: Schon das kupfersteinzeitliche Liman Tepe war in ein ägäisches Handelsnetz eingebunden.

Die ersten Schmiede

Adrenalin aber vermittelte den Prähistorikern ein anderer Werkstoff, den sie 1994 im Abfall eines der zeltförmigen Bauernhäuser entdeckten: Schlackenreste beweisen, dass dort vor 5500 Jahren Kupfer nicht nur in gediegener Form verwendet, sondern auch aus Erzen ausgeschmolzen und verarbeitet wurde. Liman Tepe's Schmiede waren die ersten in Kleinasien (auf der Westseite des Schwarzen Meeres, im heute bulgarischen Varna, verstand man sich darauf möglicherweise bereits 4600 v. Chr., wie Grabfunde zeigen). Weil Kupfer zu weich für Waffen war, diente es hauptsächlich für Luxusgegenstände wie Prunkgefäße und Schmuck. In der Schmiede wurde es in Formen gegossen, durch rasche Abkühlung gehärtet und dann mit Meißel und Hämmern aus Stein fein bearbeitet.

Diesen Sensationsfund konnten die Forscher gut brauchen: Türkischen Ausgräbern fällt es ungleich schwerer als ihren deutschen Kollegen, an Fördermittel für ihre Arbeit zu kommen. Hayat Erkanal verkaufte sogar seine Wohnung in Ankara, um 1992 mit anderen Wissenschaftlern und Studenten in Liman Tepe zu graben. Schnell stellte sich heraus, dass es sich hier nicht nur um eine einzelne Siedlung, sondern um ein ganzes Siedlungsgebiet handelt. Bei Surveys in der Region und durch Notgrabungen vor einem Staudamm wurden weitere Orte wie Bakla Tepe oder



Panaz Tepe entdeckt, die schon zur Kupfersteinzeit bewohnt waren (siehe Kasten links). Und so wuchs, was an Uras Hafenhügel begann, schließlich zum Izmir Region Excavations and Research Project.

Das chalkolithische Liman Tepe hatte nicht nur im Umland, sondern auch vor der Küste Nachbarn. Auf der nahen Insel Chios rückten beim heutigen Emporio frühe Bauern ihre Katen enger zusammen; auf Limnos wählten Siedler eine Anhöhe beim jetzigen Poliochni für ihre Siedlung aus. Und gut 175 Kilometer weiter nördlich entstand an den Dardanellen die Siedlung auf dem Kumtepe, die etwa 2900 v. Chr. auf einen benachbarten Hügel umzog und Karriere machte – das legendäre Troja.

Ein neues Zeitalter brach an, als der Mensch eine folgenschwere Entdeckung machte. Ob durch Zufall oder als Ergebnis gezielter Versuche: Schmiede mischten dem Kupfer Zinn bei und erzeugten so Bronze. Diese Legierung war besonders hart und eignete sich deshalb gut für neue Werkzeuge und Waffen; dies bedeutete auch das Ende der Steinzeit. Und als habe die Welt nur auf den neuen Werkstoff gewartet, formierte sie sich um 3000 v. Chr. neu: An Euphrat und Tigris entstanden die ersten Städte; am Nil wurde mit der Vereinigung von Ober- und Unterägypten der Grundstein zum späteren Großreich gelegt; am Unterlauf des Indus manifestierte sich mit Harappa ein Großstadtstaat; auf Kreta kündigte sich die minoische Palastkultur an.

Auch in Liman Tepe brachen andere Zeiten an, und die waren offenbar kriegerisch: Um 3000 v. Chr. wurde rund um die Ansiedlung eine Wehrmauer errichtet, auf einem etwa 90



Die ersten Häuser in Liman Tepe bestanden aus Stangen, Reisig und Lehm. In Tonbruchstücken (unten) haben sich die Abdrücke davon erhalten; der Nachbarbau steht in Kirklarelli an der türkisch-bulgarischen Grenze.

KULTUREPOCHEN AN DER OSTKÜSTE DER ÄGÄIS

- Chalkolithikum:**
4500 – 3000 v. Chr.
- Frühe Bronzezeit:**
3000 – 2000 v. Chr.
- Mittlere Bronzezeit:**
2000 – 1700 v. Chr.
- Späte Bronzezeit:**
1700 – 1200 v. Chr.
- Eisenzeit:**
1200 – 200 v. Chr.



Vor etwa 4500 Jahren gehörte Liman Tepe dank seiner Küstenlage zu den wichtigsten Handelszentren der Frühen Bronzezeit. Nicht nur das Geschäft mit hochwertigen Produkten aus Metall wie bronzenen Fibeln (oben) florierte, es entstand auch die nach heutigem Kenntnisstand weltweit erste Hafenanlage, um die Reiche der Ägäis besser mit Anatolien zu verbinden.



Zentimeter dicken Steinsockel ragte eine Wand aus luftgetrockneten Lehmziegeln auf; insgesamt war dieser Wall gut 2,70 Meter hoch. Auf einer Länge von 25 Metern haben die Archäologen ihn freigelegt. In regelmäßigen Abständen fallen Vorsprünge ins Auge, die vermutlich der Zier dienten. Auffällig ist auch die Toranlage: Wehrtürme zu beiden Seiten und ein 2,70 Meter breiter Durchgang dürften auf Besucher wie Bewohner mächtig Eindruck gemacht haben, was die herrschende Elite sicher so geplant hatte.

Nach einem Großbrand modernisierte man die wachsende Siedlung: Auch die Wohnhäuser wurden nun aus Lehmziegeln auf Steinsockeln errichtet. Die alte Wohnform, die Leben und Arbeiten unter einem Dach vereinte, behielt man zwar bei, benötigte aber jetzt offenbar deutlich mehr Raum. In die Höhe zu bauen, verbot die verfügbare Bautechnik, so blieb allein die Länge. Stolze 25 Meter misst das größte der vier ausgegrabenen Langhäuser, das erst im November 2008 entdeckt wurde – ausreichend Platz für erste regelrechte Handwerksbetriebe; in einer der Wohn-/Werkhallen dieser Häuser wurden anscheinend Wolle und Flachs in größerem Umfang gesponnen. Dafür spricht eine Unmenge von Spinnwirteln, Gewichten aus Ton und Stein, die an den Spindeln hingen.

In einem benachbarten Langhaus wurden Geweihknochen zu Näh- und Gewandnadeln verarbeitet, in einem anderen Obsidian zu Pfeilspitzen und Messerklingen. Wieder ein Haus daneben wohnte ein Schmied, was ein Schmelztiegel, Gussformen aus Ton, Schlackenreste und bronzenen Meißel zeigen. Und Ourania Kouka, die Gastarchäologin aus Griechenland, fand in einem der Langhäuser neben einem mit geometrischen Ritzmustern verzierten Armreif sogar Gold: das erste der Grabung und der früheste Goldschmuck an der Westküste Anatoliens.

Mit all den Produkten scheint rege und mit großem Erfolg gehandelt worden zu sein, denn die Stadt wurde zusehends reicher. Zu Beginn der Frühen Bronzezeit II um 2600 v. Chr. konnte sich Liman Tepe eine neue Wehrmauer leisten, höher als die vorige und ebenso wie die Wehrtürme ganz aus Stein. Nicht allein der Verteidigung, sondern auch als Statussymbole dienten wohl die bauchigen Bastionen in Hufeisenform, denn dergleichen kannten die Archäologen schon von anderen Zitadellen jener Zeit, etwa von Lerna auf dem griechischen Festland oder von Kastri auf der Kykladeninsel Syros. Doch Liman Tepe Wehrtürme waren um einiges größer: 10 bis 20 Meter tief, gut 20 Meter breit und 6 Meter hoch (zum Vergleich: Kastri Bastionen waren

im Mittel 5 Meter tief und der größte 4 Meter breit). »Das ist die größte Wehranlage der Frühen Bronzezeit, die ich je gesehen habe«, erklärte Wolf-Dietrich Niemeier, Leiter der Abteilung Athen des Deutschen Archäologischen Instituts, als er 1997 die Ausgrabung eines der Türme besuchte. Diese bautechnische Höchstleistung war dank des speziellen Kalksteins gelungen, der rund um Urla vorkommt. Er ist von Natur aus geschiefert, bricht also mit glatten Kanten, so dass er ohne weitere Bearbeitung aufgeschichtet werden kann.

Selbst vor dem Meer machten die Baumeister nicht Halt. Im Wasser errichteten sie die erste Mole der Welt, gut 100 Meter lang und 40 Meter breit. Offenbar bestand ein Bedarf an einer derartigen Hafenanlage. Auch das dürfte eine Folge der Bronzezeit gewesen sein: Dank der besseren Werkzeuge konnten Zimmerleute Boote mit ausladenden Bäumen fertigen, Seefahrer also immer mehr Waren befördern. Lief der Handel zu Beginn der Frühen Bronzezeit um 3000 v. Chr. noch vorwiegend von Westen nach Osten, drehte sich das 1000 Jahre später um, wie Keramikimporte zeigen. Liman Tepe entwickelte sich zu einem Knotenpunkt im Handelsnetz zwischen dem anatolischen Hochland und der Ägäis.

Bleiringe als Zahlungsmittel

Auf stabilen Feldsteinfundamenten errichtete Kontore beherbergten Erzeugnisse aus Metall, Obsidian, Ton und Wolle, erfüllten aber wohl noch andere Zwecke. Das zentrale Gebäude, das die Archäologen »kommunaler Komplex« nennen, scheint eine Art Multifunktionsresidenz gewesen zu sein: Ein dort ausgegrabenes Siegel spricht für eine Verwaltungsaufgabe; Idole in Phallusform deuten auf eine Kultstätte hin; Unmengen von zum Teil noch intakter kostbarer Keramik zwischen den doppelten Außenmauern auf ein Schatzhaus; der geräumige Innenhof erinnert eher an die gut 1000 Jahre später gebauten minoischen Paläste Kretas.

Waren wurden in Liman Tepe gelöscht und verladen, gekauft und verkauft. Doch wie zahlte man eigentlich in Zeiten, die noch gut 2000 Jahre von der Erfindung geprägter Münzen entfernt war? »Wir haben die irriige Meinung, dass für Keramik mit einem Sack Getreide gezahlt, Schmuck für eine Ladung Obsidianmesser eingekauft wurde.« Grabungsleiter Erkanal schüttelt den Kopf. »Falsch. Lange vor Einföhrung der Münzen wurde bereits mit Metall bezahlt.« In Liman Tepe hat er in Schichten der Mittleren Bronzezeit Bleiringe gefunden, die er für solche frühen Zahlungsmittel hält. Meist wurde aber wohl Edelmetall verwendet.

In Liman Tepe hatte man davon genug: Im Radius von 100 Kilometern existierten zehn

Goldminen, mehrere Kupfer- und Silbervorkommen. Doch es waren nicht allein das Gold und die Lage an den Handelswegen, die Liman Tepe zu einem der bedeutendsten Plätze der Frühen Bronzezeit machten. Seine Bronzeschmiede gehörten nach wie vor zu den führenden ihrer Zeit, und mit dem Verkauf von Rüstungsgütern wurde die Hafencity an der Westküste Kleinasien noch wohlhabender. Mit 290 Metern im Durchmesser hatte Liman Tepe die mit Abstand größte Oberstadt an der Westküste Kleinasien. Auch außerhalb der Befestigungen setzte sich die Siedlung fort. Zwar sind die Grenzen noch nicht genau bekannt, doch das IRERP-Team geht davon aus, dass ihre Fläche jener der Unterstadt Trojas vergleichbar war. Die Erforschung dieses Bereichs steht ganz oben auf der Agenda Erkanals, dessen Arbeit auch von deutschen Archäologen wie Harald Hauptmann, Emeritus der Universität Heidelberg, unterstützt wird.

Veränderungen markierten um 2000 v. Chr. den Anbruch einer neuen Kulturphase: die Mittlere Bronzezeit. Als »riesige Siedlung« beschreibt Ourania Kouka nun Liman Tepe, denn wo immer im heutigen Iskele die Archäologen punktuell den Untergrund durch Grabungen oder Sondagen erkunden können, entdecken sie Zeugnisse jener Zeit. Die jetzt ovalen Langhäuser dienten weiterhin als Werkstätten einer boomenden Metallurgie und Textilwirtschaft, als neuer Exportschlager trat offenbar Luxuskeramik hinzu, die dank einer speziellen Glasur Gefäße aus Gold und Silber imitierte. Erstaunlicherweise entdeckten die Archäologen bislang keine Hinweise auf eine neue Befestigung, die dem Wachstum der Siedlung Rechnung getragen hätte.

In der Späten Bronzezeit, die 1700 v. Chr. begann, beherrschten griechische Stadtstaaten wie Mykene und Tiryns den Ägäisraum. Das zeigte sich auch in Liman Tepe. Ab 1450 v. Chr. nahm der Import mykenischer Ware rasant zu, füllte Keramik vom Peloponnes die kombinierten Lager-/Wohnhallen, die nun wieder rechteckig waren. Und noch ein Zeichen städtischen Gepräges: Alle Straßen wurden nun gepflastert. Und doch scheint es, als wäre der Stern der Hafencity im Sinken begriffen gewesen, während gleichzeitig Troja im Norden an Bedeutung gewann.

Die frühbronzezeitlichen Bastionen von Liman Tepe waren gut 2000 Jahre alt, als sich zu Beginn des 1. Jahrtausends v. Chr., mit Anbruch der Eisenzeit, griechische Einwanderer dort ansiedelten. Ob diese eine verlassene Stadt vorfanden oder die Einheimischen vertrieben, lässt sich aus dem archäologischen Befund leider nicht ablesen. Klazomenai nann-

ten die Kolonisten, wie eingangs schon erwähnt, ihre neue Heimat.

Doch zurück zur Bronzezeit. Die Karriere Liman Tepes wäre nicht denkbar ohne ein Netzwerk von Handelspartnern. Viel tat sich im 3. und 2. Jahrtausend v. Chr. rund um die Ägäis. Troja wurde groß und kontrollierte die Dardanellen und damit den Seeweg ins Schwarze Meer. Die Minoer dominierten von Kreta aus die südliche Ägäis, bis das Erdbeben und der Vulkanausbruch auf Santorin Mitte des 2. Jahrtausends ihrer Kultur einen schweren Schlag versetzten, von dem sie sich nie wieder erholten (um 1450 v. Chr. wurde das geschwächte Kreta wahrscheinlich von Fest-

Dicke Steinmauern schützten Liman Tepe in der Frühen Bronzezeit. Um 1800 v. Chr. entwickelte sich in Çeşme ein neues Handelszentrum. Zur Ausstattung einer Küche gehörte dort neben der Herdstelle ein Mahlstein (unten).





Geduld, Wissen und Fantasie muss die Restauratorin mitbringen, um aus Fragmenten ein Gefäß mit mykenischen Mustern zu rekonstruieren.



Die Historikerin **Waltraud Sperlich** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Griechenland.

landgriechen erobert). Diese Naturkatastrophe liefert den Archäologen heute weitere Details über das Netzwerk, in das Liman Tepe und Troja eingebunden waren.

Im Sommer 2002 klingelte das Telefon bei Hayat Erkanal: In Çeşme, einem Ferienort 100 Kilometer von Izmir entfernt, war man bei Ausschachtungen auf Mauern gestoßen. Seitdem arbeitet Erkanals Mitarbeiter Vasif Şahoğlu dort – an einem Ort, der sich als Glücksfall für die Archäologen herausstellte. Denn die Altvorderen haben hier nicht wie üblich neue Häuser auf eingeebneten älteren gebaut, sondern sich auf Grund eines steigenden Meeresspiegels mit jeder neuen Entwicklungsphase Richtung Inland bewegt, so dass die Ausgräber ungestörte Siedlungsschichten antreffen.

Liman Tepe ist ein Paradebeispiel für einen Ort der Frühen Bronzezeit, Çeşme-Bağlararası dagegen steht für die sich anschließende mittlere Periode. Um 1800 v. Chr. entwickelte sich dort eine Hafenstadt, wahrscheinlich sogar nach einem festen Plan, wie das Raster des Straßennetzes vermuten lässt. Gewohnt wurde dort durchweg nobel und noch luxuriöser als in Liman Tepe. Jedes Domizil hatte seine eigenen vier Wände, teilte also keine Mauer mit dem Nachbarhaus. Sockel wie Lehmziegelmauern wurden sauber mit einem feinen Kalkanstrich verputzt, auf dem heute noch Spuren von roter Farbe mit bloßem Auge zu erkennen sind. Şahoğlu dachte natürlich sofort an Fresken, denn Santorin und damit die minoische Kultur mit ihren Wandgemälden waren nah – bis jetzt kamen aber noch keine ans Licht.

Ein Erdbeben hatte um 1650 v. Chr. Mauern zum Einsturz gebracht und so den bronzezeitlichen Alltag konserviert. Da die Bewohner ihre Stadt zum Inland versetzt wieder aufbauten, widerfuhr den Ausgräbern das Glück »ungestörter« Küchen. Was sie aus den Scherben zusammenfügten, ließ sie staunen: Becher und Tassen, die ineinanderpassten; bislang war ein so altes Stapelgeschirr nur von der Grabungsstätte Arslan Tepe im Südosten Anatoliens bekannt. Zur Grundausstattung der Küchen gehörten zudem ein Backofen mit gewölbter Decke und ein Herd fürs kleinere Feuer; daneben immer eine fein verputzte, mit Stein ausgelegte Arbeitsfläche. Große Vorratsbehälter aus Ton waren in den Boden eingelassen; Mahlsteine und Mörser gehörten ebenfalls in jede Küche. Weil sie aber auch Spindeln fanden, gehen die Wissenschaftler davon aus, dass Wohn- und Arbeitsstätte dort kombiniert wurden.

Auf den gemauerten Tisch kamen, so die Analyse des jahrtausendealten Abfalls, viel

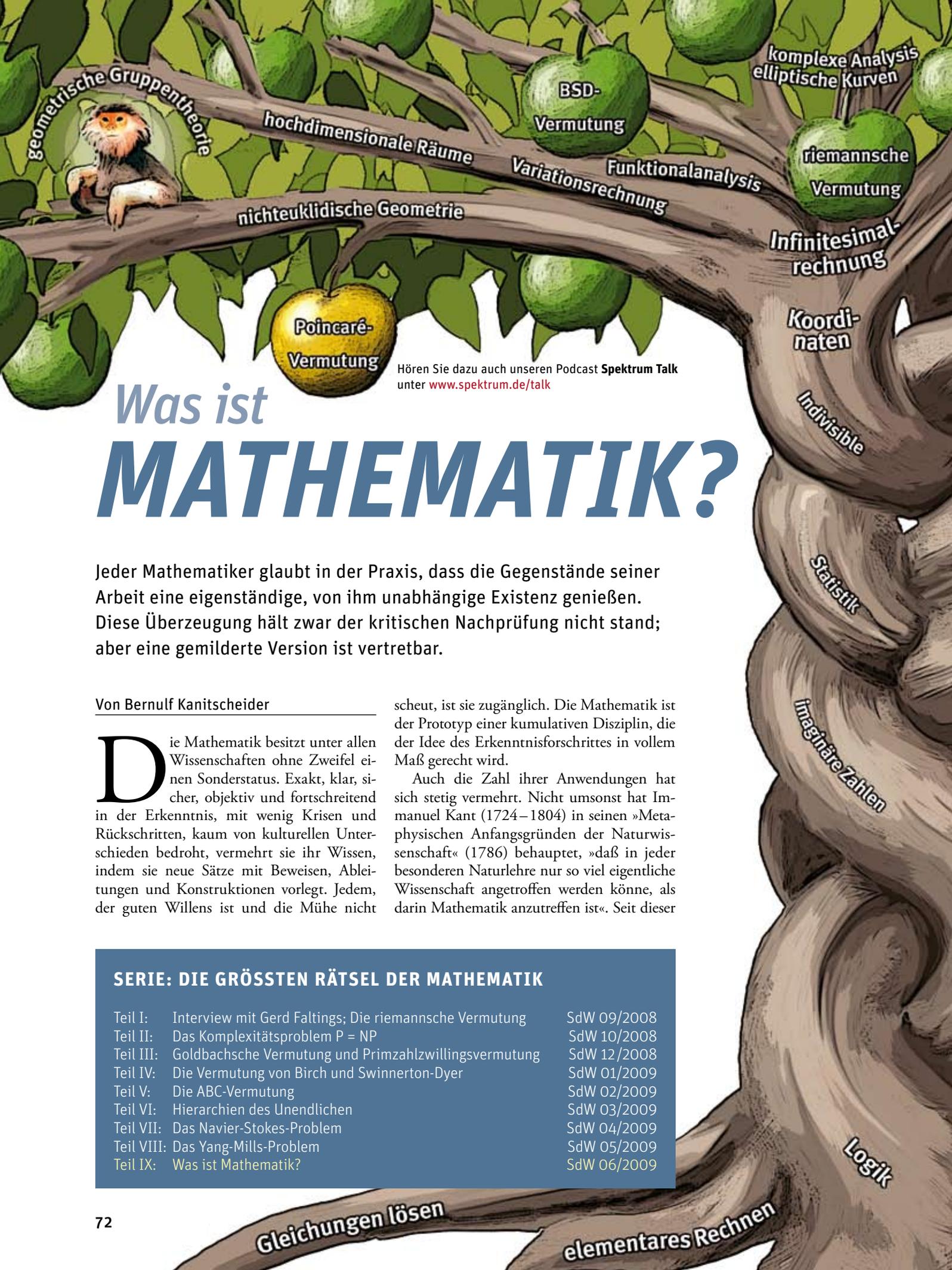
Fisch, Oliven und Mandeln. Zahlreiche Kerne von Weintrauben in einem der Häuser lassen vermuten, dass dort die älteste Weinkelerei der Ostägäis betrieben worden ist, die Forscher bis heute kennen. In verputzten Becken hat man die Trauben mit Füßen zerstampft, den Saft über Rinnen in tief in den Boden eingelassene Amphoren geleitet und vergoren. Şahoğlu kann sich gut vorstellen, dass der Wein ein Exportschlager dieser Stadt war. Dafür sprechen die vielen, zum Teil noch versiegelten Tonkrüge, die häufig mit Wein gefüllt und dann verschickt wurden.

Eine besondere Herausforderung prähistorischer Forschung ist das Fehlen von Schriftquellen. Kein Text hilft dabei, archäologische Funde in einen Gesamtkontext zu stellen. Und so bleibt manche Frage offen, wie etwa: Wie nannten die Bewohner von Liman Tepe oder Çeşme-Bağlararası ihre Stadt? Hilfe erhoffen sich die Forscher deshalb von den Kollegen aus der Hethitologie.

Hoffen auf Hattuscha

Zu Beginn des 2. Jahrtausends v. Chr. waren die Hethiter von ihrer Hauptstadt Hattuscha in Anatolien zur Supermacht aufgestiegen, die fast ganz Kleinasien und große Teile Mesopotamiens beherrschte. In Keilschrifttexten korrespondierten die Großkönige mit ihresgleichen, mit Vasallen, Verbündeten und Feinden. Aus diesen Briefwechseln haben Hethitologen bereits erfahren, dass die Region um das heutige Izmir im 15. Jahrhundert v. Chr. von den Hethitern Arzawa genannt wurde und dass Troja bei ihnen Taruwisa hieß. Bislang enthüllten die tönernen Aktenberge aus Hattuscha leider noch keinen Namen für Liman Tepe. Immerhin spricht manches dafür, dass er der griechischen Bezeichnung ähnlich sein dürfte. Denn Klazomenai sei nicht indoeuropäischen Ursprungs, konstatieren Altphilologen, und damit weder aus der griechischen noch aus der hethitischen Sprache abzuleiten. Er dürfte also ältere Wurzeln haben und könnte eines Tages in einer der Quellen aus Hattuscha auftauchen.

Apropos auftauchen: Sila Votruba ist nach ihrer Pause an Land sofort wieder in den Anzug geschlüpft und hat im nächsten Tauchgang tatsächlich eine Scherbe aus der antiken Hafenmauer geborgen. Gemeinsam mit Ourania Kouka und Hayat Erkanal betrachtet sie später die vom Schlick und Bewuchs gereinigte Keramik. Wie erhofft zeigt das Dekor Meeresmotive wie Wellen und Tintenfische. Made in Mykene. Die Griechin und ihre türkischen Kollegen schmunzeln: ein weiterer Beweis für die Verbundenheit der Kulturen in der Ägäis. Damals. <



Was ist MATHEMATIK?

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Jeder Mathematiker glaubt in der Praxis, dass die Gegenstände seiner Arbeit eine eigenständige, von ihm unabhängige Existenz genießen. Diese Überzeugung hält zwar der kritischen Nachprüfung nicht stand; aber eine gemilderte Version ist vertretbar.

Von Bernulf Kanitscheider

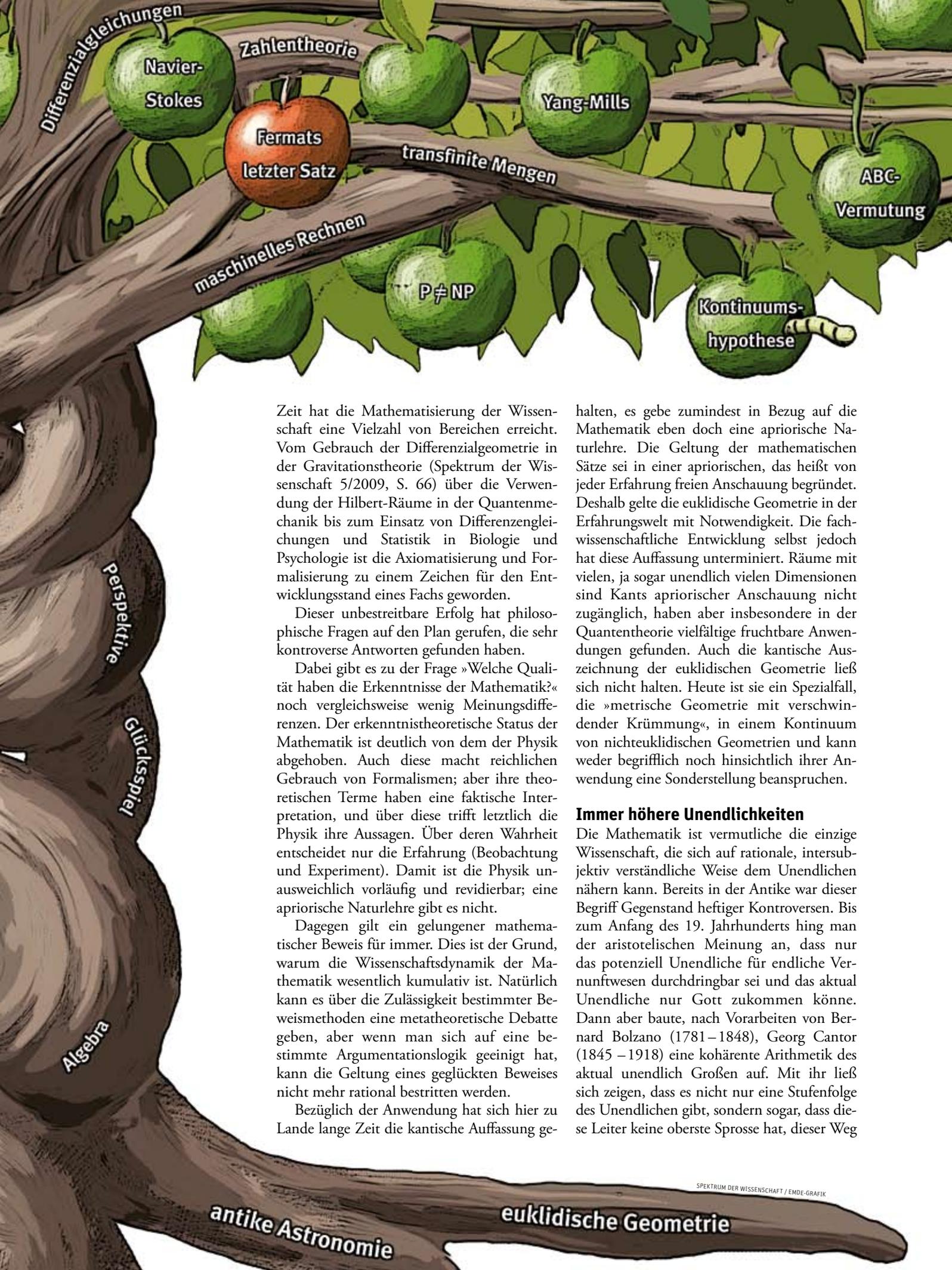
Die Mathematik besitzt unter allen Wissenschaften ohne Zweifel einen Sonderstatus. Exakt, klar, sicher, objektiv und fortschreitend in der Erkenntnis, mit wenig Krisen und Rückschritten, kaum von kulturellen Unterschieden bedroht, vermehrt sie ihr Wissen, indem sie neue Sätze mit Beweisen, Ableitungen und Konstruktionen vorlegt. Jedem, der guten Willens ist und die Mühe nicht

scheut, ist sie zugänglich. Die Mathematik ist der Prototyp einer kumulativen Disziplin, die der Idee des Erkenntnisfortschrittes in vollem Maß gerecht wird.

Auch die Zahl ihrer Anwendungen hat sich stetig vermehrt. Nicht umsonst hat Immanuel Kant (1724–1804) in seinen »Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft« (1786) behauptet, »daß in jeder besonderen Naturlehre nur so viel eigentliche Wissenschaft angetroffen werden könne, als darin Mathematik anzutreffen ist«. Seit dieser

SERIE: DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

Teil I:	Interview mit Gerd Faltings; Die riemannsche Vermutung	SdW 09/2008
Teil II:	Das Komplexitätsproblem $P = NP$	SdW 10/2008
Teil III:	Goldbachsche Vermutung und Primzahlzwillingsvermutung	SdW 12/2008
Teil IV:	Die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer	SdW 01/2009
Teil V:	Die ABC-Vermutung	SdW 02/2009
Teil VI:	Hierarchien des Unendlichen	SdW 03/2009
Teil VII:	Das Navier-Stokes-Problem	SdW 04/2009
Teil VIII:	Das Yang-Mills-Problem	SdW 05/2009
Teil IX:	Was ist Mathematik?	SdW 06/2009



Zeit hat die Mathematisierung der Wissenschaft eine Vielzahl von Bereichen erreicht. Vom Gebrauch der Differentialgeometrie in der Gravitationstheorie (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 66) über die Verwendung der Hilbert-Räume in der Quantenmechanik bis zum Einsatz von Differenzgleichungen und Statistik in Biologie und Psychologie ist die Axiomatisierung und Formalisierung zu einem Zeichen für den Entwicklungsstand eines Fachs geworden.

Dieser unbestreitbare Erfolg hat philosophische Fragen auf den Plan gerufen, die sehr kontroverse Antworten gefunden haben.

Dabei gibt es zu der Frage »Welche Qualität haben die Erkenntnisse der Mathematik?« noch vergleichsweise wenig Meinungsdivergenzen. Der erkenntnistheoretische Status der Mathematik ist deutlich von dem der Physik abgehoben. Auch diese macht reichlichen Gebrauch von Formalismen; aber ihre theoretischen Terme haben eine faktische Interpretation, und über diese trifft letztlich die Physik ihre Aussagen. Über deren Wahrheit entscheidet nur die Erfahrung (Beobachtung und Experiment). Damit ist die Physik unausweichlich vorläufig und revidierbar; eine apriorische Naturlehre gibt es nicht.

Dagegen gilt ein gelungener mathematischer Beweis für immer. Dies ist der Grund, warum die Wissenschaftsdynamik der Mathematik wesentlich kumulativ ist. Natürlich kann es über die Zulässigkeit bestimmter Beweismethoden eine metatheoretische Debatte geben, aber wenn man sich auf eine bestimmte Argumentationslogik geeinigt hat, kann die Geltung eines geglückten Beweises nicht mehr rational bestritten werden.

Bezüglich der Anwendung hat sich hier zu Lande lange Zeit die kantische Auffassung ge-

halten, es gebe zumindest in Bezug auf die Mathematik eben doch eine apriorische Naturlehre. Die Geltung der mathematischen Sätze sei in einer apriorischen, das heißt von jeder Erfahrung freien Anschauung begründet. Deshalb gelte die euklidische Geometrie in der Erfahrungswelt mit Notwendigkeit. Die fachwissenschaftliche Entwicklung selbst jedoch hat diese Auffassung unterminiert. Räume mit vielen, ja sogar unendlich vielen Dimensionen sind Kants apriorischer Anschauung nicht zugänglich, haben aber insbesondere in der Quantentheorie vielfältige fruchtbare Anwendungen gefunden. Auch die kantische Auszeichnung der euklidischen Geometrie ließ sich nicht halten. Heute ist sie ein Spezialfall, die »metrische Geometrie mit verschwindender Krümmung«, in einem Kontinuum von nichteuklidischen Geometrien und kann weder begrifflich noch hinsichtlich ihrer Anwendung eine Sonderstellung beanspruchen.

Immer höhere Unendlichkeiten

Die Mathematik ist vermutlich die einzige Wissenschaft, die sich auf rationale, intersubjektiv verständliche Weise dem Unendlichen nähern kann. Bereits in der Antike war dieser Begriff Gegenstand heftiger Kontroversen. Bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts hing man der aristotelischen Meinung an, dass nur das potenziell Unendliche für endliche Vernunftwesen durchdringbar sei und das aktual Unendliche nur Gott zukommen könne. Dann aber baute, nach Vorarbeiten von Bernard Bolzano (1781–1848), Georg Cantor (1845–1918) eine kohärente Arithmetik des aktual unendlich Großen auf. Mit ihr ließ sich zeigen, dass es nicht nur eine Stufenfolge des Unendlichen gibt, sondern sogar, dass diese Leiter keine oberste Sprosse hat, dieser Weg

In Kürze

► **Der ontologische Status** der Gegenstände der Mathematik (»Wie real sind die reellen Zahlen?«) ist seit der Antike umstritten.

► In der täglichen Arbeit folgen die Mathematiker dem **philosophischen Realismus**, nach dem mathematische Begriffe in einem »eigenen Reich« jenseits der physikalischen Realität existieren.

► Diese Haltung ist philosophisch anfechtbar, kann aber durch das **Unvermeidlichkeitsargument** gerettet werden: Die Gegenstände der Mathematik erben ihre Realität von den Gegenständen der realen Welt, zu deren Beschreibung (in der Physik) sie unvermeidlich sind.

zum Transfiniten also niemals endet. Manche Mathematiker wie Hermann Weyl (1885–1955) haben das Unendliche sogar als den konstitutiven Gegenstand der Mathematik angesehen.

Die einfachste Weise, sich den kontraintuitiven Eigenschaften des Unendliche zu nähern, hat bereits Galileo Galilei (1564–1642) aufgewiesen, als er in den »Discorsi« davon spricht, dass eine unendliche Menge zu einer ihrer echten Teilmengen bijektiv ist, das heißt umkehrbar eindeutig auf sie abgebildet werden kann, etwa die Menge der natürlichen Zahlen $\{0, 1, 2, 3, 4, \dots\}$ auf die Menge der Quadratzahlen $\{0, 1, 4, 9, 16, \dots\}$. Somit könne der im Endlichen geläufige Grundsatz, dass das Ganze größer sei als jedes seiner echten Teile, im Unendlichen nicht mehr gelten. Während Bolzano dies noch ein Paradoxon nennt, verwendet Richard Dedekind (1831–1916) es sogar zur Definition des Unendlichen: Eine Menge ist genau dann unendlich, wenn sie zu einer echten Teilmenge ihrer selbst bijektiv ist.

Viel Kopfzerbrechen hat den Philosophen der Mathematik die Tatsache bereitet, dass es zwischen dem Endlichen und dem Unendlichen nicht so etwas wie eine gedankliche Brücke gibt. Wenn man von einer endlichen Menge ausgeht, dann lässt sich mit noch so vielen Mengenoperationen – Vereinigung, Durchschnitt, kartesisches Produkt und Teilmengenbildung – das Unendliche nicht erreichen. Man muss den Sprung zum Unendlichen axiomatisch fordern, dann kann man untersuchen, welchen arithmetischen Gesetzen es folgt und wie viele Arten von Unendlichkeit es gibt.

Schon Dedekind wies darauf hin, dass die Menge der Gedankenobjekte unendlich ist. Wenn x ein Gedanke ist, so ist auch das Denken von x und das Denken des Denkens von x ein Element der Menge aller Gedanken. Diese Idee der gedanklichen Rekursion hat 1908 Ernst Zermelo (1871–1953) zum Prinzip erhoben und in seine Axiomatisierung der Mengenlehre eingebaut. Er postulierte eine Menge w , deren Elemente sämtlich Mengen sind, mit den folgenden Eigenschaften:

- Die leere Menge \emptyset ist Element von w ;
- zu jedem Element x von w ist auch $x \cup \{x\}$, das heißt die Menge x vereinigt mit der Menge, die als einziges Element x enthält, Element von w .

Dieses Axiom ist unter dem Namen »Unendlichkeitsaxiom« in das heute gebräuchliche Axiomensystem ZFC der Mengenlehre eingegangen. (Die Abkürzung ZFC steht für die Autoren Zermelo und Fraenkel sowie *axiom of choice*, Auswahlaxiom.) In der Tat folgt

aus der trockenen Formulierung nicht nur, dass w unendlich viele Elemente enthält; sie lässt zunächst gar nicht erahnen, welche Arten des Unendlichen es geben könnte.

Cantor fand 1873, dass nicht nur die rationalen, sondern auch die algebraischen Zahlen abzählbar, das heißt bijektiv zu den natürlichen Zahlen sind. Als er 1891 aber in Halle seinen Beweis vorlegte, dass die reellen Zahlen nicht abzählbar sind, taten sich in der Mathematikergemeinde bereits die philosophischen Differenzen auf. Leopold Kronecker (1823–1891) wollte alle Mathematik auf Konstruktionen aus den natürlichen Zahlen zurückführen. Er lehnte die Beweise Cantors ab, weil sie nicht konstruktiv waren: Sie zeigten nur die Existenz überabzählbarer Mengen, gaben aber kein Verfahren an, diese zu finden oder zu konstruieren. Kroneckers Kritik hat sich bis heute im Lager der Intuitionisten erhalten (siehe unten).

Rasiert der Barbier sich selbst?

Um 1900 zeigte sich aufs neue, dass man in der Tat mit dem Unendlichen begrifflich besonders behutsam umgehen muss. Bertrand Russell (1872–1970), Cesare Burali-Forti (1861–1931) und auch Cantor selbst entdeckten, dass man den naiven Mengenbegriff nicht ohne Weiteres auf unendliche Bereiche übertragen kann, ohne auf Inkonsistenzen zu stoßen. Ein berühmtes Beispiel ist die Menge aller Mengen, die sich nicht selbst als Element enthalten. Die Frage, ob diese Menge sich selbst als Element enthält, führt auf einen unauflösbaren Widerspruch. Dessen Illustration ist die häufig zitierte Geschichte von dem Dorfbarbier, der per definitionem alle Dorfbewohner rasiert, die sich nicht selbst rasieren, und von dem man die Frage, ob er sich selbst rasiert, nicht widerspruchsfrei beantworten kann. Weitere Beispiele sind die »Menge aller Mengen« oder die »Menge aller Ordinalzahlen«.

Über derartige Objekte kann man zwar reden, sie aber nicht mit gewissen anderen Mengen in eine Relation bringen. John von Neumann (1903–1957) hat deshalb 1925 die Unterscheidung zwischen Klassen und Mengen eingeführt. Eine Klasse gilt nur dann als Menge, wenn sie Element einer anderen Klasse sein kann. Im Axiomensystem ZFC können keine »echten« Klassen – solche, die nicht zugleich Mengen sind – mehr auftauchen. Damit konnte eine Schwierigkeit des naiven Mengenbegriffs behoben werden.

Die bei Weitem heftigsten philosophischen Auseinandersetzungen kreisen seit der Antike um die Frage nach dem Objektbereich der Mathematik. In dieser »Grundlagendebatte«



BILDUNGSPARTNERMATHEMATISCHES FORSCHUNGSNETZ TUM, OBERWOLFACH

Ernst Zermelo (rechts) und Abraham Fraenkel haben das heute gebräuchliche Axiomensystem der Mengenlehre aufgestellt.

REALISMUS IST ZWEIERLEI

Ein Realist im üblichen Sprachgebrauch ist ein Mensch, der fordert, dass man die Dinge so wahrnehmen soll, wie sie sind. Ein Realist im philosophischen Sinn ist ein Mensch, der behauptet, dass die Dinge so sind, wie er sie wahrnimmt.

kann man vier Hauptrichtungen unterscheiden, die nach wie vor ihre Vertreter haben.

Die historisch älteste Deutung geht auf Pythagoras und Platon zurück. Danach bilden die formalen Gegenstände ein »eigenes Reich«, wie Gottlob Frege (1848–1925) es ausgedrückt hat, das ontologisch autonom, wohlunterschieden von den physikalischen und mentalen Zuständen der Natur für sich existiert. In der Neuzeit hat dieser »Platonismus« die Zustimmung vieler bedeutender kreativer Mathematiker gefunden, unter ihnen besonders Kurt Gödel (1906–1978).

Andere behaupten mit Aristoteles, dass die abstrakten Objekte keine autonome Existenz besitzen, sondern nur als formale innerliche Strukturen der Natur vorkommen. Die Kantianer wiederum lokalisieren die mathematischen Gegenstände in der reinen Anschauung des transzendentalen, das heißt zu synthetischer Erkenntnis a priori fähigen Subjekts.

Gegenüber diesen verschiedenen Spielarten des »Realismus«, der Vorstellung, dass den mathematischen Gegenständen – außerhalb der uns umgebenden Welt, aber trotzdem – eine Realität zukomme, haben die Positivisten wie Ludwig Wittgenstein (1889–1951) eine skeptische Haltung bezogen. Sie hielten es eher mit dem Logizismus, wonach die Mathematik eigentlich nur verkleidete Logik sei. Aus dieser Reduktion auf die Logik beziehe sie auch ihre Gewissheit.

Schon vor Wittgenstein hatte Frege dieses Ziel ins Auge gefasst, alle Begriffe und Axiome der Arithmetik und Analysis auf logische Terme zurückzuführen und deren Axiome nur aus logischen Annahmen heraus zu begründen. Dieses Programm lief den Intentionen der Mathematiker nicht unbedingt zuwider; schon Karl Weierstraß (1815–1897) und Dedekind hatten die Arithmetisierung der Analysis betrieben, auch sie wollten komplexe, reelle und rationale Zahlen auf die natürlichen Zahlen zurückführen. Es war eine plausible Fortsetzung dieser Bemühungen, wenn Frege versuchte, die natürlichen Zahlen in logischen Termen zu definieren.

Das Programm stieß 1902 auf das erwähnte Russell-Paradoxon, woraufhin Frege sein Projekt zurückzog. Russell selbst und Alfred North Whitehead (1861–1947) führten das logizistische Konzept in den »Principia Mathematica« zwar weiter, stießen aber dort auf neue Schwierigkeiten, speziell mit der logizistischen Formulierung des Unendlichkeitsaxioms und auch anderer Axiome.

Eine radikale Reaktion auf die Grundlagenkrise der Mathematik war der Intuitionismus von Luitzen E. J. Brouwer (1881–1966). Dieser lehnte das aktual Unendliche grund-

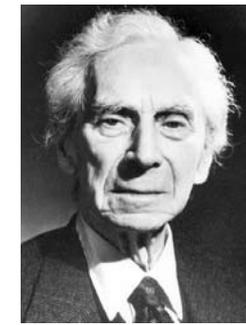
sätzlich ab und damit auch alle Konzepte, die darauf aufbauen. Während die klassische Mathematik jede konsistente Struktur akzeptiert, duldet der Intuitionismus nur Gebilde, die ein individuelles Bewusstsein schrittweise in endlicher Zeit konstruieren kann. Die Mathematik steckt nach dieser Auffassung in dieser geistigen Tätigkeit (der »Intuition«), nicht etwa in den fertigen Symbolen. Diese sind nur das Vehikel der Mitteilung.

Kein Ausweg aus der Grundlagenkrise

Ein zeitlich endliches Vernunftwesen kann danach nur das potenziell Unendliche erfassen. Also gilt die klassische Logik auch nur für endliche Mengen. Insbesondere darf das »Tertium non datur«, wonach jede Aussage an sich wahr oder falsch ist, nicht auf unendliche Gesamtheiten angewendet werden. Die unbewiesene Goldbach-Vermutung, wonach jede Zahl $n \geq 4$ als Summe zweier Primzahlen geschrieben werden kann (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 94), ist danach heute noch nicht wahr oder falsch.

Allgemein identifizieren die Intuitionisten die Wahrheit eines Satzes mit seinem Beweis und die Falschheit mit seiner Widerlegung. Brouwers Schüler Arend Heyting (1898–1980) fasste dann 1930 die erlaubten Schlussregeln in einer neuen intuitionistischen Logik zusammen.

Eine Zeit lang sah es so aus, als ob der Intuitionismus der sicherste Ausweg aus der Grundlagenkrise sei. Dann aber bewies Kurt Gödel 1932, dass man die klassische Logik und Arithmetik so in die intuitionistische übersetzen kann, dass sich dort alle gültigen Formeln, aber auch die Widersprüche wiederfinden. Die intuitionistische Mathematik



Gegner im Kampf um die Grundlagen der Mathematik: Georg Cantor und Richard Dedekind (oben), Bertrand Russell und Kurt Gödel (Mitte), Luitzen E. J. Brouwer und David Hilbert (unten)





HILARY PUTNAM / WIKIMEDIA COMMONS

Hilary Putnam, bis zu seiner Emeritierung im Jahr 2000 Professor an der Harvard University, ist eine der Schlüsselfiguren der Philosophie des Geistes im 20. Jahrhundert.

ist somit nicht sicherer als die klassische, wohl aber sind ihre Beweise komplizierter und schwerfälliger.

Einen anderen Weg ging David Hilbert mit seinem Formalismus. Er teilte die Bedenken Brouwers bezüglich der methodischen Strenge, war aber nicht gewillt, den Reichtum und die Eleganz der klassischen Mathematik zu opfern. Neue Hilfsmittel, die »finiten Beweise«, sollten das Gebäude sichern.

Hilbert unterschied zwei Arten von mathematischen Objekten, reale finite inhaltlich bestimmte und ideale infinite fiktive. Endliche reale Gegenstände wie zum Beispiel eine endliche Zeichenkette – die ihrerseits möglicherweise eine Behauptung in formaler Sprache ausdrückt – können direkt verifiziert werden. Auf der anderen Seite benötigt die Mathematik ideale Elemente, wie Punkte im Unendlichen in der projektiven Geometrie oder die transfiniten Kardinal- und Ordinalzahlen in der Mengenlehre. Hinter diesen fiktiven Elementen lauern die Gefahren eines Widerspruchs, der das Gebäude der klassischen Mathematik zum Einsturz bringen könnte. Deshalb muss mit strikt finiten Mitteln, also ohne Einbeziehung unendlicher Mengen, die Widerspruchsfreiheit bei der Verwendung idealer Objekte gezeigt werden.

Der semantische Gehalt der klassischen Mathematik kann also ohne Weiteres unendlich sein, aber die Ausdrucksmittel und die Beweise müssen endlich bleiben. Ein nicht-konstruktiver Existenzbeweis ist zwar zulässig, darf jedoch nur eine endliche Zahl von logischen Schritten umfassen.

Die Ontologie des formalistischen Standpunktes lässt sich somit sehr einfach ausdrücken: Ein abstraktes Objekt existiert genau dann, wenn es konsistent, das heißt widerspruchsfrei definierbar ist. Hilberts 1922 vorgestelltes Programm bestand in einer Rückwendung auf die metamathematische Ebene, nämlich darin, die klassische Mathematik durch Formalisierung und durch finite Konsistenzbeweise aller Theorien zu retten. Indem alle Theorien als vollständig und entscheidbar erwiesen würden, sollten sich die erkenntnistheoretischen Probleme der Mathematik lösen lassen.

Gödels Unvollständigkeitssätze

Neun Jahre nach seiner Veröffentlichung stieß Hilberts Programm auf ein gravierendes Hindernis. Kurt Gödel bewies 1931 zwei Sätze:

- ▶ Die Arithmetik kann nicht vollständig und konsistent axiomatisiert werden, und
- ▶ die Widerspruchsfreiheit einer arithmetischen Theorie kann nicht mit ihren eigenen Mitteln gezeigt werden.

Damit stellte sich Hilberts Ziel als grundsätzlich unerreichbar heraus. Wenn eine axiomatisierte Theorie widerspruchsfrei ist, dann ist das nach Gödels zweitem Theorem nicht innerhalb der Theorie beweisbar, und nach dem ersten Theorem ist sie unvollständig.

Während die Philosophen die gödelschen Sätze als Indiz für eine unüberwindbare Wissensgrenze ansahen und das scientistische Programm, nach dem die Wissenschaft allein der Weg der Erkenntnis ist und alle Konkurrenten wenig oder nichts liefern, für gescheitert erklärten, blieben die Mathematiker weniger pessimistisch. Sie gingen ihrer Arbeit nach und bewiesen seit 1931 mehr neue Theoreme als je zuvor. Zweifellos setzen die Unvollständigkeitssätze der Axiomatisierung und Formalisierung eine Grenze. Auf der anderen Seite kann man aber auch den Nachweis der Unlösbarkeit eines Problems, der Nichtableitbarkeit eines Satzes (wie des Parallelenpostulats der euklidischen Geometrie) oder der Unabhängigkeit eines Axioms von den übrigen Axiomen eines Systems (wie Cantors Kontinuumshypothese, siehe unten) als die Erledigung einer mathematischen Frage ansehen. In dem Sinne gibt es dann, wie Hilbert auch später noch betont hat, keine prinzipiellen Grenzen der Erkenntnis.

DIE KONTINUUMSHYPOTHESE

Zwischen der Unendlichkeit der natürlichen Zahlen und jener der reellen Zahlen (der »Mächtigkeit des Kontinuums«) gibt es keine Zwischenstufe. Etwas formaler ausgedrückt: Jede unendliche Teilmenge der reellen Zahlen ist bijektiv entweder zu den reellen Zahlen selbst oder zu den natürlichen Zahlen. Das ist die Kontinuumshypothese.

Die verallgemeinerte Kontinuumshypothese behauptet Entsprechendes für die Beziehung zwischen irgendeiner unendlichen Menge M und ihrer Potenzmenge $P(M)$, das heißt der Menge ihrer Teilmengen: Jede Teilmenge von $P(M)$ ist gleichmächtig (bijektiv) entweder zu $P(M)$ selbst oder zu einer Teilmenge von M .

Dies ist in der Tat eine Verallgemeinerung der Kontinuumshypothese, denn die natürlichen und die reellen Zahlen verhalten sich zueinander wie Menge und Potenzmenge: Jede reelle Zahl kann mit einer Teilmenge der natürlichen Zahlen identifiziert werden.

Formal pflegt man diese Hypothesen mit der von Cantor eingeführten Aleph-Notation auszudrücken. \aleph_0 (aleph-null) ist die Mächtigkeit der natürlichen Zahlen, \aleph_1 ist die kleinste Unendlichkeit, die größer ist als \aleph_0 , allgemein ist \aleph_n die kleinste Unendlichkeit oberhalb von \aleph_{n-1} . In Analogie zu den Verhältnissen bei endlichen Mengen schreibt man 2^m für die Mächtigkeit der Potenzmenge von M , wenn m die Mächtigkeit von M ist. In dieser Notation schreibt sich die Kontinuumshypothese

$$\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$$

und die verallgemeinerte Kontinuumshypothese

$$\aleph_{n+1} = 2^{\aleph_n} \text{ für alle } n.$$

Bedeutsamer ist die Tatsache, dass Gödel selbst seine Unvollständigkeitstheoreme als Bestätigung seiner platonistischen Deutung gesehen hat. Er betrachtete die mathematischen Gegenstände als eine unabhängig von unseren Gedanken existierende geistige Objektwelt, die wir erfahren und beschreiben. So schrieb er 1964 in seinem Aufsatz »What is Cantor's Continuum Problem?«: »Ungeachtet ihrer Erfahrungsferne besitzen wir so etwas wie eine Wahrnehmung der Gegenstände der Mengenlehre, was man daran sehen kann, dass die Axiome sich uns als wahr aufdrängen.« Aus dieser Sicht ist dann auch der Wahrheitsbegriff sinnvoll in der Mathematik anwendbar, und Gödel scheute sich auch nicht, die Kontinuumshypothese als objektiv falsch zu bezeichnen (Kasten links).

Gödels eigene Ergebnisse sowie weitere Arbeiten lieferten für eine solche Haltung nicht nur keine Rechtfertigung, sondern schienen sie geradezu ad absurdum zu führen. Gödel selbst bewies 1938, dass man die Kontinuumshypothese ebenso wie ihre Verallgemeinerung zum Axiomensystem ZFC hinzufügen kann, ohne neue Widersprüche zu erzeugen. Paul Cohen bewies 1963, dass auch die Verneinung der Kontinuumshypothese – und ihrer Verallgemeinerung – widerspruchsfrei mit ZFC verträglich ist. Daraus folgt das höchst erstaunliche Resultat, dass die Mächtigkeit des Kontinuums durch die gewöhnlichen Axiome der Mengenlehre nicht festgelegt ist und als beliebig groß angenommen werden kann. Von objektiver Wahrheit oder Falschheit kann also in Bezug auf die Kontinuumshypothese nicht die Rede sein.

Neue Axiome

Gödel selbst war der Meinung, dass sich letztendlich durch neue Axiome, welche die Existenz von »großen Kardinalzahlen« postulieren, die Wahrheitsfrage lösen lassen würde, aber diese Hoffnung hat sich nicht erfüllt. Alle diese gigantischen Mengen, deren Unendlichkeit alle bisher betrachteten Unendlichkeiten noch übersteigt, sind mit der Kontinuumshypothese genauso vereinbar wie mit deren Negation.

Erst in jüngerer Zeit ist es gelungen, neue, abermals metamathematische Kriterien für die Einführung neuer Axiome zu finden. Die unter diesen Kriterien zulässigen Axiome würden dann auch eine Aussage zur Kontinuumshypothese treffen, und zwar höchstwahrscheinlich, dass sie falsch ist. Damit könnte man auch auf diesem Gebiet wieder mit einer gewissen Berechtigung von objektiver Wahrheit sprechen (Spektrum der Wissenschaft 3/2009, S. 54).

Ganz unabhängig von diesen Entwicklungen hat Gödels Intuition einen wichtigen Kern. Erkenntnistheoretisch hat es der mathematische Realist viel leichter, über seinen Gegenstandsbereich zu sprechen. Während er mit der Mengenlehre herausfinden will, welche Mengen es gibt, wie ihre Eigenschaften sind und welche Aussagen über Mengen wahr sind, muss sein Kollege, der Antirealist, Metaphern verwenden. Für ihn ist die Mengenlehre ein Spiel, eine Geschichte über Fiktionen, sie spricht in Bildern über eigentlich Nichtvorhandenes. Immer wenn der Antirealist über abstrakte Objekte spricht, muss er sich zugleich sagen, dass es sie »eigentlich« nicht gibt. Er kann die Mengenlehre somit nur methodologisch charakterisieren: Die Theorie geht von bestimmten Problemen aus (zum Beispiel der Aufgabe, gewisse Integrale zu berechnen), hat bestimmte Wertorientierungen (Reichweite, Konsistenz, Tiefe) und will kognitive Ziele erreichen (zum Beispiel die reellen Zahlen begründen). Aber über die Gegenstände der Theorie darf der Antirealist nur so sprechen, »als ob« es diese Dinge gäbe.

Hier tut sich eine Parallele mit der Atomtheorie auf. Im 19. Jahrhundert dachte man lange Zeit, man dürfe aus empiristischen Gründen über Atome nur als Fiktionen sprechen, weil sich diese nicht direkt beobachten lassen. Dieser Redeweise haftet in der Physik wie in der Mathematik eine Künstlichkeit an. Es wirkt albern, wenn man von den Gegenständen seiner Wissenschaft immer nur so sprechen darf, »als ob« sie existierten.

Auf der anderen Seite wurde bis heute die Kritik des Philosophen Paul Benacerraf von der Princeton University nicht entkräftet, wonach der gödelsche Realismus kausale Rätsel aufwirft. Jede empirische Erfahrung der materialen Objekte in der Physik kann physiologisch-ursächlich rekonstruiert werden. Wir können ein physikalisches Ereignis wahrnehmen, weil wir ebenso wie das Ereignis Teil der materiellen Welt sind und unsere Wahrnehmung mit dem Ereignis kausal verknüpft ist. Niemand hatte aber bisher eine Idee, wie mathematische Gegenstandserkenntnis ablaufen könnte, speziell wenn Gödel betont, »dass die Objekte der transfiniten Mengenlehre natürlich nicht zur physikalischen Welt gehören«. Wenn die formalen Gegenstände akausal und ohne Status in der Raumzeit existieren, wie sollen sie dann unsere mathematische Erfahrung hervorbringen?

Der Mathematikphilosoph Charles Chihara von der University of California in Berkeley brachte das Problem auf den Punkt. Der Fall liegt analog wie beim Problem der religiösen Erfahrung: Ohne kausale Rekonstruktion der Weise, wie transzendente Entitäten



Kollege Putnams aus Harvard: Willard Van Orman Quine gilt als bedeutender Vertreter der analytischen Philosophie.

QUANTOREN

Eine elementare Aussage

der Arithmetik wie » $7+8=15$ « ist zwar wahr, aber in ihrer Aussagekraft doch sehr beschränkt. Interessanter sind Aussagen über die Gesamtheit (zum Beispiel) aller natürlichen Zahlen, zum Beispiel: »Für alle natürlichen Zahlen n gilt $(n+1)^2 = n^2 + 2n + 1$ «, oder auch: »Für jede natürliche Zahl $n > 2$ gibt es Primzahlen p und q mit der Eigenschaft $p+q = 2n$.« In der formalen Logik verwendet man zur Formulierung solch allgemeiner Aussagen besondere Zeichen, die so genannten Quantoren. Der Allquantor \forall bedeutet »für alle«, der Existenzquantor \exists bedeutet »es gibt«. Die zweite oben genannte Behauptung (die Goldbach-Vermutung) schreibt sich formal

$$\forall n \in \mathbb{N}, n > 2 \exists p, q \in \mathbb{P}: p+q = 2n$$

Quantoren verschaffen der formalen Logik die Möglichkeit, mit endlich vielen Zeichen unendlich viele Aussagen auf einmal zu treffen. Wie für die anderen Operationen der Logik (»und«, »oder«, »nicht«) gibt es auch für logische Ausdrücke, die Quantoren enthalten, Umformungsregeln.



Benulf Kanitscheider ist emeritierter Professor für Philosophie der Naturwissenschaften an der Universität Gießen. In dieser Zeitschrift ist er mit einem Forscher-Porträt ausführlich vorgestellt worden (SdW 7/2008, S. 74).

Banacerraf, P.: *Mathematical Truth.* In: *The Journal of Philosophy* 70, S. 661–679, 1973.

Cantor, G.: Über die verschiedenen Standpunkte in bezug auf das aktuelle Unendliche. In: Cantor, G.: *Gesammelte Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts*, hrsg. von Ernst Zermelo. Olms, Hildesheim 1966.

Gödel, K.: What is Cantor's Continuum Problem? In: Banacerraf, P., Putnam, H. (Hg.): *Philosophy of Mathematics: Selected Readings.* Cambridge University Press, Cambridge 1983.

Hilbert, D.: Über das Unendliche. In: *Mathematische Annalen* 95, S. 161–190, 1925.

Maddy, P.: *Naturalism in Mathematics.* Oxford University Press, Oxford 2000.

Penrose, R.: *The Road to Reality. A Complete Guide to the Laws of the Universe.* Knopf, New York 2005; Random House UK, London 2006; Vintage, London 2007.

Tegmark, M.: *Parallel Universes* (7. Februar 2003). Online unter <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0302131>

Das Unendliche. *Spektrum der Wissenschaft Spezial* 1/2001.

Unendlich (plus eins). *Spektrum der Wissenschaft Spezial* 2/2005.

Kurt Gödel. *Spektrum der Wissenschaft Biografie* 1/2002.

die religiösen Erfahrungen hervorbringen, ist die psychologische Erklärung immer besser.

Es gibt noch eine argumentative Stütze für den Realismus, die nicht von dem Kausalargument von Benacerraf betroffen ist. Das ist das »Unvermeidlichkeitsargument«, das auf Willard Van Orman Quine (1908–2000) und Hilary Putnam (* 1926) zurückgeht. Als Kriterium für einen ontologischen Anspruch dienen die Quantoren in den empirisch gestützten Theorien der mathematisierten Physik. Wenn wir wissen wollen, worüber diese bewährten Theorien sprechen, müssen wir sie in ihrer kanonischen Form mit All- und Existenzquantoren betrachten (Kasten S. 77). Wenn wir dies tun, sehen wir, dass die Quantoren sowohl auf abstrakte formale Objekte als auch auf Elementarteilchen oder Quantenfelder angewandt werden. Die physikalischen und die mathematischen Teile der Theorie sind so verschränkt, dass man nicht ohne willkürliche Parteilichkeit Realist bezüglich der konkreten Objekte sein kann und Idealist bezüglich der formalen Strukturen.

Putnam hat dies so formuliert: »Anwendung von Quantoren auf mathematische Entitäten ist für die Wissenschaft unabdingbar, dies aber zwingt uns, die Existenz dieser Objekte anzunehmen.« Der Vorteil eines solchen »schwachen« oder »intrinsischen« Platonismus besteht darin, dass man damit den hohen Erfolg der Mathematik bei der Naturbeschreibung verstehen kann, ohne gespenstische Entitäten postulieren zu müssen, deren Wechselwirkung mit dem erkennenden Gehirn im Dunkeln bleibt. Wahrnehmungen werden nur durch physische Einflüsse hervorgerufen, aber diese sind in der Natur eben in mathematischer Form vorhanden, und nur als solche treffen sie auf unsere Sinne.

Zudem werden in einer mathematisierten Theorie nie einzelne Axiome geprüft, sondern der Test einer Folgerung bestätigt oder widerlegt immer nur die gesamte Theorie. Dieser Bestätigungsholismus ist seit Pierre Duhem (1861–1916) eine kaum kontroverse These der Wissenschaftstheorie. Hat sich eine Theorie also bewährt, wird man vernünftigerweise annehmen, dass alle deskriptiven Terme einen Realitätsbezug besitzen. Was dann vorläufig offen bleibt, ist der Status der noch nicht angewandten Teile der Mathematik, etwa der erwähnten gigantischen Kardinalzahlen.

Nun haben aber in der jüngsten Zeit immer neue Bereiche der Mathematik Anwendungen gefunden, an die vordem kaum jemand denken mochte. Wer hätte sich im 19. Jahrhundert vorgestellt, dass die komplexe Analysis und der Tensorkalkül so vorteilhafte Realisierungen in der Physik finden würden?

Demgemäß könnte man die noch nicht angewandten Teile der Mathematik zum spekulativen Bestand der mathematischen Ontologie rechnen; da sie mit der gleichen Grammatik und dem gleichen Vokabular ausgestattet sind wie die angewandten Gebiete, kann man ihren Gegenständen auch denselben Status zuerkennen wie denen der angewandten Mathematik. Folgt man dieser Argumentationslinie von Quine und Putnam, kann man im Rahmen eines Naturalismus verbleiben, bei dem keine ursächlich rätselhaften Objekte die kausale Geschlossenheit der Welt stören.

Paralleluniversen

Schließlich gibt es noch eine völlig andere Strategie, die anscheinend prästabilisierte Harmonie von Natur und Zahl zu verstehen. Man macht gleich zu Beginn eine ontologische Kehrtwendung und erklärt die mathematischen Objekte für die primäre Realität. Demgegenüber ist die Realität der uns umgebenden Welt eine abgeleitete Größe. Diesen Weg hat Max Tegmark in jüngerer Zeit vorgeschlagen (*Spektrum der Wissenschaft* 8/2003, S. 34). Aus seiner Sicht sind alle konsistenten formalen Strukturen der Grundstoff, aus dem die Universen gemacht sind, wobei einige von ihnen die kontingente Eigenschaft besitzen, intelligente Substrukturen hervorzubringen. Die alte philosophische Frage nach der Kontingenz der Welt – also der Frage, warum für dieses Universum gerade der uns bekannte Satz von Gleichungen bestimmend ist – lässt sich dann auflösen. Die ontologische Asymmetrie zwischen den physikalisch realisierten und den nicht verwirklichten Strukturen ist auf einen täuschenden Selektionseffekt zurückzuführen. Dieser kommt dadurch zu Stande, dass nicht in allen konsistenten Strukturen kognitive Systeme existieren können.

Wem allerdings eine solche gigantische Erweiterung der Realität – immerhin ist das Ensemble aller konsistenten mathematischen Strukturen sicher unendlich – zu spekulativ und gespenstisch erscheint, kann es inzwischen bei einem sparsameren Platonismus belassen. Damit kann man zwar nicht verstehen, warum die Natur gerade die heute gültigen Strukturen realisiert, aber doch, warum die Welt sich überhaupt mathematisch begreifen lässt.

Es ist erstaunlich, dass bei allen inhaltlichen Fortschritten der Mathematik keine Einigkeit darüber erzielt worden ist, wovon diese Wissenschaft letztlich handelt und warum diese abstrakte formale Disziplin so erfolgreich in der empirischen Welt angewendet werden konnte. ◀

ENDE DER SERIE

1959

Elektrische Fische

»Bei diesen Tieren (Mormyriden) folgen sich fast ununterbrochen elektrische Entladungen ... Die Vermutung, die Entladungen hätten etwa eine orientierende Bedeutung nach

Art eines elektrischen Peilverfahrens, ließ sich nicht bestätigen. Dagegen ergibt sich ein verblüffendes Resultat, wenn man zu einem einzeln gehaltenen Mormyriden ein anderes Tier setzt. Schon nach wenigen Sekunden steigern sich die Entladungen nach Rhythmus und Stärke ... Jeder der beiden Gegner beteiligt sich ..., der Überlegene bestreitet jedoch den Hauptanteil.« *Die Umschau*, 59. Jg., Heft 12, 15. Juni 1959, S. 375

Italienische Schuhe gesundheitsschädlich

»Mit der sog. italienischen Schuhmode ... sind die orthopädischen Bemühungen um fußgerechtes Schuhwerk gleichsam hinweggefegt worden. ... Die spitzen Schuhformen vermehren nicht nur die Zahl der Fußverkrüppelungen ..., sondern führen auch zu Neuralgien. Durch die Lahmlegung der Fuß- und Beinmuskulatur kommt es weiterhin zu einer erheblichen Herabsetzung des Gesamtstoffwechsels, damit zur Gewichtszunahme und nicht zuletzt zur Schwächung der Atmungs- und Kreislauforgane.« *Deutsche Hebammen-Zeitschrift*, 11. Jg., Heft 6, Juni 1959, S. 190



Verkehrslenkung für Hannover-Messe

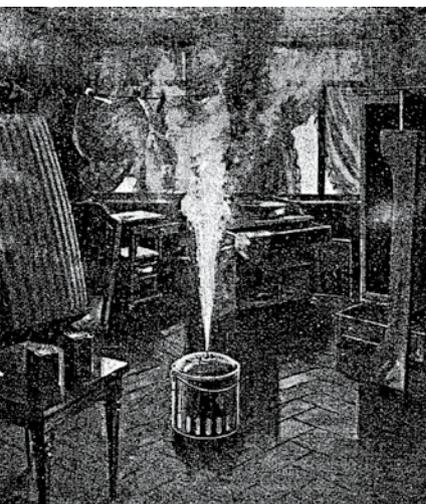
»Die wichtige Aufgabe der 800 gleichzeitig im Messeverkehrseinsatz befindlichen Polizisten wäre niemals so vorzüglich gelöst worden, wenn ... die ... modernen technischen Mittel gefehlt hätten. ... Die Regie-Zentrale der Einsatzleitung befand sich in 56 m Höhe mitten im Messegelände ... In vier Kabinen waren die Telephone, Sprechfunkanlagen, Fernschreiber, Schreibmaschinen für die eingehenden Verkehrslagemeldungen von 17 Hochbeobachtern an allen bedeutenden Verkehrsknotenpunkten ... untergebracht. Vor dem Tisch der taktischen Leitung standen ... Fernsehschirme, die ein direktes Bild von der wirklichen Verkehrslage ... vermitteln. Von sechs wichtigen Punkten der Stadt Hannover wurden von den Fernsehkameras Bilder aufgenommen ... « *Die Umschau*, 59. Jg., Heft 11, 1. Juni 1959, S. 340

Bedenkliche Desinfektionsmethode

»Die Ausgangsquelle für neue Krankheitsübertragungen ist somit in erster Linie der kranke bzw. keimtragende Mensch, und darin liegt seine hygienische Gefahr für seine Mitbürger. ... Die bedeutungsvollste Methode der Wohnungsdes-

infektion ist die mittels Formaldehyds. ... Formaldehyd wird als Oberflächendesinfiziens angewandt und es sind wässrige Niederschläge des Gases herbeizuführen. ... Dies geschieht mit einem der gebräuchlichen Apparate, die in dem Zimmer aufgestellt und angesteckt werden, oder indem man das bereits erwähnte Autan in einem Becken mit Wasser befeuchtet, wobei sich Formaldehyd- und Wasserdämpfe entwickeln. Die Öffnung der desinfizierten Räume darf frühestens nach vier Stunden, soll aber womöglich später und in besonderen Fällen (überfüllte Räume) erst nach sieben Stunden geschehen. Der überschüssige Formaldehyd ist vor dem Betreten des Raumes durch Einleiten von Ammoniakgas (durch das Schlüsselloch) zu beseitigen.« *Die Umschau*, 13. Jg., Nr. 24, 12. Juni 1909, S. 506

Mit Formaldehyddämpfen gegen Keime in der Privatwohnung?



Strom aus Windkraft

»An der windelektrischen Anlage von La Cour in Askov in Dänemark sind eingehende Versuche vorgenommen worden ... Nach einer Mitteilung der Maschinenfabrik Oerlikon berechnet sie die Anlagekosten ... bei einer jährlichen Abgabe von 20 000 KW-Stunden ... auf etwa 18 000 Mark. Bei einem Verkaufspreis von 40 Pfg. pro Kilowattstunde wird ein Gewinn von etwa 25 Proz. er-

1909

rechnet. Die Rentabilität einer derartigen windelektrischen Erzeugungstation hängt in erster Linie von der Zahl der windstillen Tage ab, durch welche die Grösse der Batterie bestimmt wird.« *Die Welt der Technik*, 71. Jg., Nr. 11, 1. Juni 1909, S. 218

Neue Technik für die Seefahrt

»Ein norwegischer Ingenieur soll eine Methode, Meerestiefen zu messen, erfunden haben. Im Prinzip besteht sie darin, auf Grund der wohlbekanntesten Geschwindigkeit des Schalles im Wasser und des genau gemessenen Zeitraums, der verfließt zwischen dem Absenden eines Schalles lotrecht ins Meer hinab und dem Emporgelangen des am Meeresboden reflektierten Schalles den von den Schallwellen zurückgelegten Weg, dessen Hälfte die gesuchte Meerestiefe ist, zu berechnen.« *Rundschaufür Technik und Wirtschaft*, 2. Jg., Nr. 12, 30. Juni 1909, S. 242 (Anmerkung der Redaktion: 1913 erhielt der deutsche Physiker Alexander Behm ein Patent auf das zur Ortung von Eisbergen entwickelte Echolot.)

Globaler WASSERMANGEL ...

Süßwasser wird immer knapper, denn der weltweite Bedarf wächst rapide. Die Technologien, mit denen man den Notstand abwenden kann, stehen zur Verfügung. Nur müssten die Verantwortlichen sie jetzt einsetzen.

Von Peter Rogers

Was für Kontraste: Ein Freund von mir lebt in Neu-Delhi, einer der reichsten Städte Indiens. An sich erhält die Region um die indische Hauptstadt eine ganze Menge Regen. Trotzdem reißt die Anwohner des Mittelklasse-Wohngebiets am frühen Morgen regelmäßig eine Lautsprecherdurchsage aus dem Schlaf: Wasser gäbe es heute nur für die nächste Stunde. Sofort stürzt mein Bekannter ins Bad, um Wanne und andere Behälter für diesen Tag zu füllen. Diese häufigen Versorgungsengpässe verdankt die Stadt vor allem der Verfügung, eine größere Menge des Wassers von Flüssen und Stauseen im Einzugsbereich zur landwirtschaftlichen Bewässerung abzuzweigen.

Im heißen Phoenix in Arizona dagegen wacht mein Sohn vom Sprühen der automatischen Rasensprenganlagen in den Gärten ringsum auf. Die fünftgrößte Stadt der USA mit vier Millionen Einwohnern liegt zwar in der Sonora, einer der größten Wüsten der Welt, aber niemand bekommt dort Wassermangel hautnah zu spüren. Im Gegenteil, selbst Parks und Golfplätze werden stets grün gehalten. In dieser Region bewilligten Politiker, dass für Grünanlagen der Städte und Vorstädte Wasser aus der Landwirtschaft entnommen wird. Allerdings wird auch aufbereitetes Brauchwasser für solche Zwecke verwendet, ebenso wie in anderen Bereichen, wo es auf Trinkwasserqualität nicht ankommt.

Auf den Umgang mit dem verfügbaren Süßwasser nehmen Politiker überall in der Welt großen Einfluss. Dass sie diese Befugnis oder Macht klug gebrauchen, wird zukünftig immer wichtiger sein. Jetzt schon steigt der Bedarf vielerorts rascher, als die gut zugänglichen Ressourcen nachliefern. Obwohl die

heikle Lage allzu bekannt ist, zeichnet sich vorerst keine Entspannung ab. Etwa jedem Sechsten, mehr als einer Milliarde Menschen, steht heute schon nicht genug sauberes Wasser zur Verfügung. UN-Daten zufolge bekommen über die Hälfte aller Länder bis 2025 Versorgungsprobleme – die sich teils in Engpässen, teils sogar in Unterversorgung äußern werden. Um 2050 könnten tatsächlich drei Viertel der Weltbevölkerung unter Wassermangel leiden.

Hungersnöte und Seuchen

Die Gründe hierfür sind offensichtlich: Die Weltbevölkerung wächst; der Wohlstand vieler Menschen steigt – sie verbrauchen darum, direkt wie indirekt (etwa über Konsumgüter), mehr Wasser; durch den globalen Klimawandel macht sich mehr Trockenheit breit. Zudem ist die Qualität unzähliger Ressourcen durch mangelhafte Abfallbeseitigung, industrielle Verschmutzung und ausgewaschene Düngemittel bedroht. Und wenn in Küstennähe zu viel Grundwasser abgepumpt wird, kommt es vor, dass nun Salzwasser nachsickert. Weil ein ungenügender Zugang zu sauberem Wasser Hungersnot und Seuchen sowie politische Krisen bis hin zu bewaffneten Konflikten nach sich zieht, bedeutet es, wenn man nicht handelt, derartigen Bedrohungen Vorschub zu leisten.

Auf der anderen Seite – das ist die gute Nachricht – kennen die Experten weitgehend die Technologien, die helfen könnten, die jetzigen Süßwasserbestände zu sichern oder auch das Angebot zu steigern, und sie wissen in etwa, welche politischen Schritte nötig wären, dies zu verwirklichen. Hier möchte ich Maßnahmen erörtern, die ich für besonders erfolgversprechend halte. Vor allem kommt es darauf an, zu handeln – und zwar jetzt. Regierungen und Entscheidungsträger aller Ebe-

In Kürze

- ▶ Die **Süßwasserressourcen** der Welt werden wegen des wachsenden Wasserbedarfs zunehmend knapper. Der Klimawandel dürfte die bedrohliche Situation noch verschärfen.
- ▶ Wir müssen dringend Wege finden, einerseits unser aller Wasserversorgung auch in Zukunft zu sichern, andererseits aber zugleich die **Ökosysteme**, die das Wasser liefern, nicht zu zerstören.
- ▶ An sich stehen einfache technische Lösungen für eine **ausreichende Wasserversorgung** bereit. Daneben lässt sich die Meerwasserentsalzung immer günstiger durchführen.
- ▶ Doch es kommt darauf an, unverzüglich – auf allen politischen Entscheidungsebenen – zu handeln und in **Verbesserungen von Infrastrukturen** zu investieren.

muss nicht sein



CARY WOLINSKY

So wie wir die Süßwasservorräte der Erde heute überstrapazieren, dürfte der größte Teil der Menschen schon in wenigen Jahrzehnten unter alarmierendem Wassermangel leiden.

nen müssen unverzüglich konkrete politische, ökonomische und technologische Aktionen ausarbeiten und durchsetzen, die unsere Wasserversorgung jetzt und in Zukunft garantieren.

Im globalen Durchschnitt benötigt jeder Mensch im Jahr mindestens 1000 Kubikmeter Wasser – so schätzen Experten wie Malin Falkenberg vom Stockholm International Water Institute. (In den Industrienationen liegt der Pro-Kopf-Verbrauch deutlich höher.) Damit ließe sich ein Olympiabecken (50-Meter-Schwimmbecken) zu zwei Fünfteln füllen. Diese Rechnung umfasst nicht nur Getränke sowie Wasch- und Reinigungswasser, sondern etwa auch die Lebensmittelproduktion.

Wegen der sehr ungleich verteilten Ressource hängt der Zugang zu Wasser zunächst einmal stark von der Region ab. Besonders heikel ist die Versorgung in eher regenarmen, bevöl-

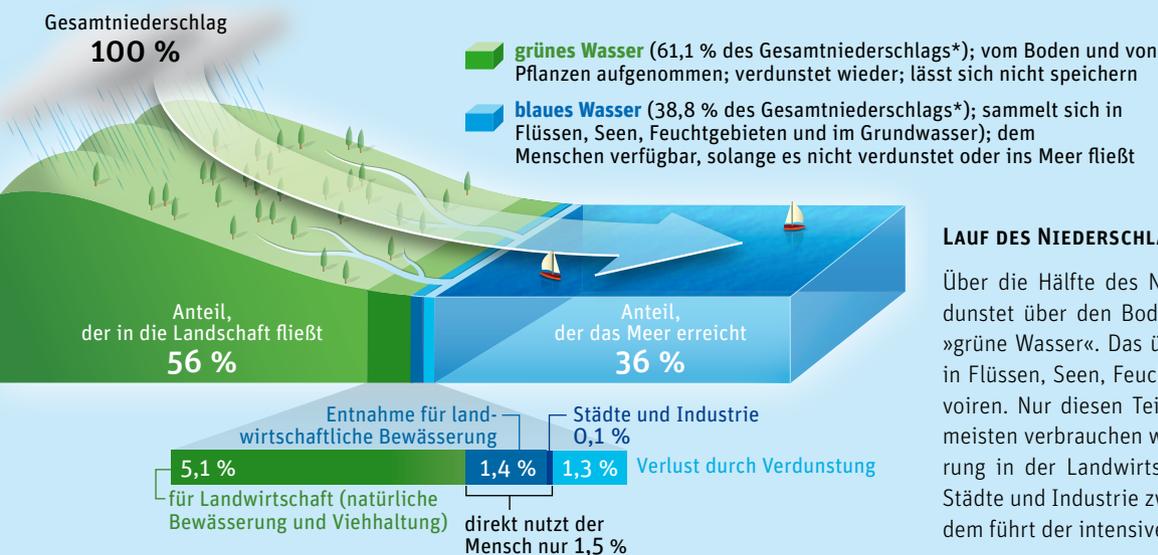
kerungsreichen Entwicklungs- und Schwellenländern. Große Flüsse wie der Nil, der Jordan, der Jangtse und der Ganges werden nicht nur übermäßig stark angezapft, sondern sie führen mittlerweile über lange Phasen im Jahr nur noch sehr wenig oder gar kein Wasser. Zum anderen sinken die Grundwasserspiegel in vielen rasch wachsenden Metropolregionen wie Neu-Delhi oder Peking dramatisch.

Doch Wasserknappheit tritt inzwischen zunehmend auch in Industrieländern auf. Zum Beispiel erlebten große Teile des nördlich von Florida gelegenen US-Staats Georgia in jüngerer Zeit nach monatelanger Trockenheit einen schweren Wassernotstand. Kennzeichnend für die sich verschärfende Situation selbst in den USA ist etwa der Zustand zweier riesiger Stauseen des völlig überbeanspruchten Colorado: des Meadstausees und des Powellstausees. An den steilen Felswänden der

WEGE DES SÜSSWASSERS

Jedes Jahr erreichen 110 000 Kubikkilometer Wasser als Niederschlag die Landflächen der Erde, die fünffache Menge des Baikalsees. Das wäre auch für unsere Zukunft mehr als genug – stünde all

dieses Wasser dort und dann zur Verfügung, wo und wenn wir es benötigen. Doch ein Großteil geht andere Wege (Darstellung oben), und das meiste ist ungleich verteilt (Darstellung unten).



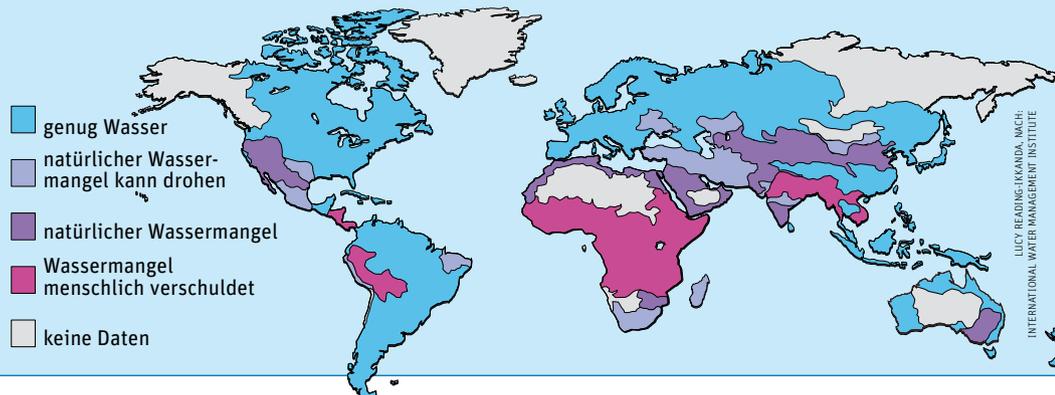
*Alle Angaben sind gerundete Werte; deswegen addieren sich die Zahlen nicht unbedingt zu 100 % auf.

LAUF DES NIEDERSCHLAGS

Über die Hälfte des Niederschlags über dem Land verdunstet über den Boden oder die Pflanzen. Das ist das »grüne Wasser«. Das übrige, das »blaue Wasser«, landet in Flüssen, Seen, Feuchtgebieten und Grundwasserreservoirs. Nur diesen Teil können wir direkt anzapfen. Am meisten verbrauchen wir davon zur künstlichen Bewässerung in der Landwirtschaft. Im Verhältnis dazu nutzen Städte und Industrie zwar nur einen kleinen Anteil. Trotzdem führt der intensive Zugriff oft lokal zu Trockenkrisen.

HEUTIGE VERSORGUNGSSITUATION

Vielerorts in Eurasien sowie in Nord- und Südamerika steht ausreichend Wasser zur Verfügung. In einigen Gebieten gibt es dort allerdings natürlicherweise weniger Wasser, als gebraucht würde. Andere Regionen der Welt, etwa Zentralafrika, Teile des indischen Subkontinents und Südostasien, leiden an »ökonomisch« bedingtem Wassermangel. Dahinter stehen oft mangelhafte technische Schulung, schlechte Politik oder ungenügende Finanzierung. Nicht selten wäre ausreichend Wasser vorhanden.



SW INFOGRAPHICS. NACH: WATER FOR FOOD; WATER FOR LIFE; INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE, 2007

LUCY READING-IRKANDA. NACH: INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE

beiden Reservoirs mitten in der Wüste sieht man gut, wie die kalkigen Hochwassermarken jedes Jahr tiefer liegen (Bild S. 85 unten).

Bekanntlich hängt die persönliche Wasserverfügbarkeit aber nicht allein vom Wohnort ab, sondern auch vom Geldbeutel. Im Westen Nordamerikas sagt man: »Normalerweise fließt Wasser abwärts. Aber es fließt immer nach oben zum Geld.« Wird es knapp, pflegt das kostbare Gut so verteilt zu werden, dass es möglichst viel einbringt. Wer arm ist, hat eben das Nachsehen.

Außer einkommensschwachen Bevölkerungsschichten zählen zu den Leidtragenden oft auch angrenzende Ökosysteme mit ihren verschiedenen Lebewesen. Wirtschaftliche Gesichtspunkte können da unter Umständen selbst beste Absichten unterlaufen. Einen einschlägigen Fall hierfür stellt das Murray-Darling-Becken im Südosten Australiens dar, das landwirtschaftlich einträglichste Gebiet des Kontinents. Es gehört zu den von Flüssen geprägten Landschaften der Welt mit einem besonders guten Management.

Zu wenig Wasser für die Wildnis

Vor Jahrzehnten entschloss man sich dort, das verfügbare Wasser nach einem ausgeklügelten System unter fairen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten auf die Weinbauern, Weizenfarmer und Schafzüchter zu verteilen. Auch dürfen sie alle mit Wasser und Wasserrechten handeln. Selbst die Natur wurde nicht vergessen: Die Wildnis, also die Ökosysteme und ihre Tiere und Pflanzen, erhielt nennenswerte Anteile zugesprochen – durchaus keine Selbstverständlichkeit, auch wenn es sich immer wieder klar erweist, wie sehr das Wohlergehen bestimmter Schlüsselarten mit darüber bestimmt, wie gut es einer Region insgesamt geht. Ein bekanntes Beispiel dafür stellen Wasser- und Sumpfgewächse bis hin zu winzigen Algen dar, die beim Reinigen der Gewässer von menschlichen Einleitungen Erstaunliches leisten.

In der Murray-Darling-Region Australiens stellte sich allerdings nachträglich heraus, dass die der Natur zugemessenen Wassermengen nicht ausreichen. Das wird stets in Dürrezeiten deutlich, ganz besonders in den letzten übermäßig niederschlagsarmen Jahren. In dieser langen Phase trocknete das Gebiet rings um das Becken mit den beiden großen Flüssen aus, was verheerende Buschbrände zur Folge hatte. Als die Entscheidungsträger die Wasserverteilungsschlüssel aufgestellt hatten, handelten sie nach damaligem Ermessen umsichtig. Nur war ihnen der tatsächliche Bedarf dieser Ökosysteme nicht klar. Die Organismen halten Trockenphasen nun nicht mehr



WARUM DIE WASSERKRISE DROHT

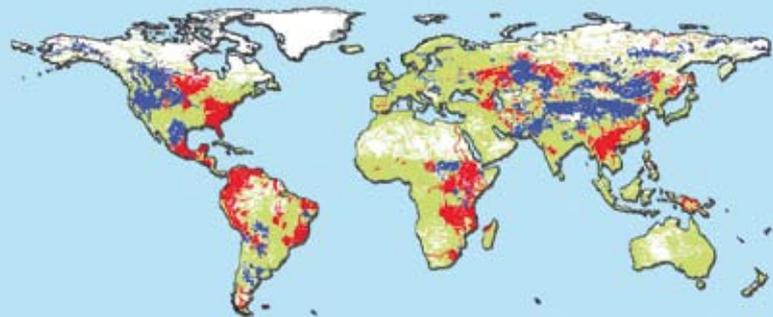
Modelliert man die Auswirkungen

des Klimawandels sowie des Bevölkerungswachstums auf die Verfügbarkeit von Wasser im Jahr 2025, so ergibt sich: Allein schon der Klimawandel wird vielerorts Wassermangel herbeiführen (Bild oben).

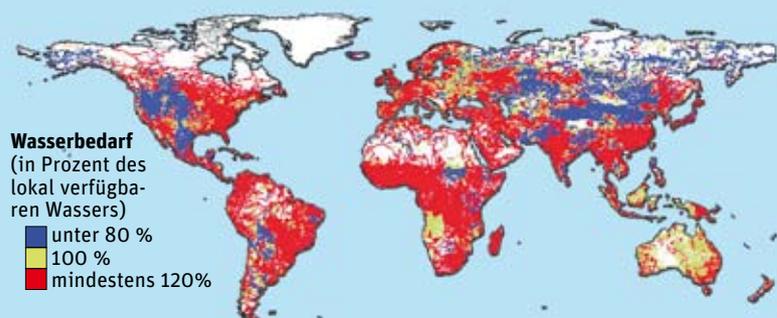
Allerdings hat das Bevölkerungswachstum noch gravierendere Auswirkungen.

Beides zusammen (Bild unten) hat in großen Teilen der Welt fatale Folgen – sofern wir nicht schnell mit Wasser viel sparsamer umgehen.

DER KLIMAWANDEL MACHT WASSER KNAPP ...



... ZUSAMMEN MIT DEM BEVÖLKERUNGSWACHSTUM DROHT EINE WELTWEITE WASSERMANGELKATASTROPHE.



Wasserbedarf
(in Prozent des lokal verfügbaren Wassers)

- unter 80 %
- 100 %
- mindestens 120 %

NOTWENDIGE INVESTITIONEN IN INFRASTRUKTUREN ZUR WASSERVERSORGUNG

von 2005 bis 2030
(in Billionen Dollar)

- 9,0 Asien mit Ozeanien
- 5,0 Lateinamerika
- 4,5 Europa
- 3,6 USA und Kanada
- 0,2 Afrika
- 0,2 Mittlerer Osten



QUELLE: BOOZ ALLEN HAMILTON

Damit Wüstenstädte wie Las Vegas ergrünen, werden Flüsse wie der Colorado erbarmungslos angezapft.

aus. Jetzt sucht die Murray-Darling Basin Commission fieberhaft nach Lösungen.

Die Wasserzuteilung innerhalb eines einzelnen Landes mag schwierig genug sein. Noch um vieles komplizierter gestaltet sich die Sache, wenn mehrere Staaten auf Zugriff zum selben Fluss Anspruch erheben. Man denke nur an den Jordan. Er fließt durch beziehungsweise grenzt an den Libanon, Syrien, Israel, die Palästinensergebiete und Jordanien. Sie alle müssen sich diese Ressource in einer extrem trockenen Region teilen. So mancher zivile und militärische Konflikt ging darauf zurück. Einigermaßen unter Kontrolle bleibt die angespannte Lage allein mit fortwährenden Verhandlungen und Kompromissen.

Nicht nur die für den Einzelnen verfügbare Wassermenge schwankt von Ort zu Ort. Auch der individuelle Bedarf – besser Anspruch – klafft oft beträchtlich auseinander. Im Allgemeinen steigt er mit dem Einkommen. Generell, doch vor allem in urbanen und in Industriegebieten verbrauchen reichere Schichten mehr Wasser als ärmere. Bessergestellte Bürger fordern außerdem Dienste wie ein Abwassermanagement ein und Möglichkeiten, landwirtschaftliche Anbauflächen intensiv zu bewässern. Im Ganzen wächst die Nachfrage gerade in vielen Städten rasant. Gegenwärtig erleben wir das in besonderem Maß in den dicht bewohnten Gegenden Asiens und Afrikas.

Neben dem Einkommen wirkt sich auch der Wasserpreis auf den Verbrauch aus. Nach einer etwa zehn Jahre alten Simulation von meinen Kollegen und mir würde die weltweit jährlich verbrauchte Menge von 3350 Kubikkilometern im Jahr 1998 bei stagnierenden Einkommen und Preisen bis 2050

auf 4900 Kubikkilometer ansteigen. Doch unter der Annahme, dass sich die Einkommen in den ärmsten Ländern denen von Ländern mittleren Wohlstands annähern, dürfte sich der globale Wasserverbrauch mit 9250 Kubikkilometern fast verdreifachen – sofern die Regierungen nicht Wassersparmaßnahmen durchsetzen. (Der Huronsee, einer der fünf großen Seen Nordamerikas, fasst etwa 3500 Kubikkilometer, der Bodensee rund 50, der Baikalsee 23 600. Ein Kubikkilometer füllt 400 000 Olympiabecken.)

Wiederverwendung von Grauwasser

Ein so hoher Zuwachs würde die schon jetzt knappen Wasservorräte noch erheblich mehr strapazieren. Unser Ergebnis passt übrigens recht gut zu den Vorhersagen des International Water Management Institute (IWMI) mit Hauptsitz in Colombo, Sri Lanka. In dem 2007 erschienenen Buch »Water for Food, Water for Life« (Wasser für Nahrung, Wasser zum Leben) zeichnet die Organisation dazu ein recht erschreckendes Szenario. Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich eine durchdachte Preispolitik, die zum sparsamen Verbrauch in Haushalten und Industrie anregt. Wasser war bisher in wirtschaftlich starken Ländern wie den USA einfach zu billig. Wir Menschen machen uns über Verschwendung nun einmal kaum Gedanken, solange etwas fast nichts zu kosten scheint.

Auf meiner Liste mit Verbesserungsvorschlägen stehen deshalb höhere Wasserpreise weit oben – wo immer dies machbar ist. Zumindest für Industriestaaten, und zwar besonders für Großstädte und Industrieregionen, erscheint mir solch eine Maßnahme vernünftig, zunehmend aber auch für Schwellenländer. Höhere Preise würden sicherlich auch zu Verbesserungen im Wassermanagement anspornen. Dazu gehören Einrichtungen, um so genanntes Grauwasser – nach Aufbereitung – als Betriebs- oder Brauchwasser dort wiederzuverwenden, wo keine Trinkwasserqualität nötig ist. (Als Grauwasser gilt gering verschmutztes, fäkalienfreies Abwasser etwa vom Duschen oder Wäschewaschen.)

Insgesamt würden höhere Preise den Bau von Recycling- und Rückgewinnungsanlagen fördern. Gemeinden und Verbraucher würden außerdem mehr gegen Wasserverluste wegen undichter Leitungen unternehmen. Ein weiterer wichtiger Aspekt: Wasserwerke bilden bei zu niedrigen Einnahmen nicht genügend Rücklagen zur Instandhaltung der Versorgungssysteme und schon gar nicht ein finanzielles Polster, um zukünftig modernere Entwicklungen zu übernehmen. In den USA etwa schieben laut einem Regierungsbericht von



GETTY IMAGES, ROBERT CAMERON

2002 viele Wasserwerke Wartungsarbeiten möglichst auf, um ihr Budget nicht zu überschreiten. Statt Lecks nachzugehen, werden sie erst bei einem Rohrbruch tätig. Sicher, ein modernes, gut gewartetes, verlustarmes System ist teuer. Allein für die USA und Kanada errechnete die Consulting-Firma Booz Allen Hamilton, dass auf die beiden Länder zusammen in den nächsten 25 Jahren Kosten von 3,6 Billionen Dollar zukämen (siehe kleiner Kasten links).

Um den Wasserverbrauch zu senken, sollte man sich zudem unbedingt um den weltweit größten Nutzer kümmern, die Landwirtschaft mit ihrer künstlichen Bewässerung. Verbesserungen auf diesem Sektor würden deutlich mehr Süßwasser einsparen als jede andere Einzelmaßnahme. Global gesehen benötigt die Landwirtschaft 70 Prozent des genutzten Süßwassers. (In den Entwicklungsländern sind es im Mittel gut 80, in den Industrieländern 30 – dort gehen knapp 60 Prozent auf das Konto der Industrie.) Folgt man der erwähnten Studie des IWMI, so steigt der Wasserbedarf für landwirtschaftliche Bewässerung bis zum Jahr 2050, um die Weltbevölkerung zu ernähren, von gegenwärtig 2700 auf 4000 Kubikkilometer – sofern die Bewässerungstechnologien nicht verbessert werden.

Bereits eine Effizienzsteigerung von zehn Prozent in diesem Bereich würde mehr Süßwasser einsparen, als den Verdunstungsverlusten auf allen anderen Verbrauchswegen zusammen entspricht. Dieses niedrige Ziel ließe sich schon erreichen, wenn erstens die Lecks in den Leitungssystemen behoben würden, zweitens die Rückhaltebecken und -kanäle so konstruiert wären, dass kaum Wasser verdunsten kann, und drittens für eine möglichst sparsame direkte Bewässerung der Pflanzen gesorgt wäre. Einen guten Ansatz in diese Richtung bildet ein Beispiel aus Südkalifornien. Dort bezahlen die Kommunen die Auskleidung von schadhafte Leitungen mit wasserdichten Materialien und dürfen dafür das gesparte Wasser für kommunale Zwecke verwenden.

Viel wäre gewonnen, könnte man Wasser aus einer Jahreszeit in die andere hinüberretten. In den meisten Regionen regnet und schneit es am meisten außerhalb der eigentlichen Vegetationsperiode. Dann führen auch die Flüsse das meiste Wasser. Es käme darauf an, solches so genannte Oberflächenwasser in unterirdischen Speichern zu sammeln, auf die man einige Monate später zugreift, wenn die Kulturpflanzen es brauchen. Üblicherweise halten wir Oberflächenwasser in Stauseen zurück. Nur leider geht dann viel davon durch Verdunstung verloren. Zur unterirdischen



CORBIS / PROGRESSIVE IMAGE, BOB ROWMAN

Speicherung müssten Experten zunächst geeignete große Reservoirs ausfindig machen, die leicht aufgefüllt und ebenso problemlos wieder angezapft werden können. Verschiedentlich wurden solche »Wasserbanken« schon eingerichtet, etwa in Arizona und Kalifornien.

Für eine effizientere Versorgung von Pflanzenkulturen empfiehlt sich die Tropf- oder Tröpfchenbewässerung. Dabei tropft das Wasser aus Schläuchen, die auf oder in der Erde liegen und womöglich sogar nur die Wurzeln benetzen. Des Weiteren sollte man auf die Züchtung von Pflanzensorten mit wenig Wasserbedarf dringen, die Dürrezeiten leichter überstehen, oder sogar von Brack-, vielleicht selbst Salzwasser tolerierenden Sorten.

Dass sich der Weltverbrauch von Süßwasser in der Landwirtschaft zu Bewässerungszwecken merklich wird senken lassen, ist zwar unwahrscheinlich, denn die Zahl der Men-

Vor allem mit leckfreien, zielgenauen Bewässerungssystemen ließe sich Wasser einsparen. Viel zu viel geht in offenen Kanälen durch Verdunstung verloren – wie bei diesem, der Wasser des Colorado in das Imperial Valley bringt, ein berühmtes kalifornisches Anbaugelände.

Der Wasserspiegel des Lake Mead, des größten Stausees der USA – vom Colorado gespeist –, sinkt Jahr für Jahr. Das lassen die weißen Mineralienbänder an seinen Ufern nur zu deutlich erkennen.



CORBIS, CHRISTOPHER MORRIS

schen wächst nun einmal, wie auch deren Einkommen – und damit die Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten. Aber viel wäre schon gewonnen, ließe sich der steigende Verbrauch für Nahrungsmittel durch verbesserte Bewässerungseinrichtungen und besser angepasste Kulturpflanzen in einem erträglichen Rahmen halten.

Vor allem auch das Konzept vom »virtuellen Wasser« kann dazu beitragen, dass in trockenen und semiariden Gebieten nicht so viel von dem knappen Gut in die landwirtschaftliche Bewässerung fließen muss. Der Begriff meint den – oft erstaunlich hohen – Wasserverbrauch bei der Produktion aller möglichen Güter, von Lebensmitteln bis zu Kleidung oder Maschinen. In diesem Sinn

kann ein Blatt Papier 10 Liter Wasser kosten, ein Kilogramm Weizen über 1000, ein T-Shirt 2000, ein Kilogramm Rindfleisch 15 000. Die Idee ist, wasserarme Länder von der Nahrungsmittelproduktion oder auch der anderer Güter teilweise zu entlasten – damit sie dafür nicht so viel Wasser verwenden müssen. Stattdessen können sie die Produkte importieren. Der Empfänger bezieht mit der Ware indirekt eben auch eine bestimmte Menge Wasser.

Zunächst klingt das nach einem rein rechnerischen Kunstgriff. Allerdings können Länder in trockenen Regionen das wenige verfügbare Nass anders verwenden, wenn sie nicht Felder bewässern müssen, sondern entsprechende Güter – und mit ihnen virtuelles Wasser – importieren. Insofern ist dieses Konzept sehr nützlich. Es verhalf zusammen mit dem sich ausweitenden internationalen Handel schon zur friedlichen Lösung so manchen Konflikts auf Grund begrenzter Wasserressourcen. Dass Jordanien nun virtuelles Wasser – in Form von Produkten – einführt, entspannte zum Beispiel sein Verhältnis zu Israel in Wasserfragen.

Die WCs der Zukunft sind trocken

Praktisch werden auf der Erde im Jahr über 800 Milliarden Kubikmeter virtuelles Wasser gehandelt. Das entspricht zehnmal dem Durchfluss des Nils. Mehr Handelsfreiheit für landwirtschaftliche Produkte und weniger Zollbeschränkungen für Nahrungsmittel würden das Handelsvolumen noch deutlich steigern. Gäbe es für Agrarprodukte keinerlei Handelsbeschränkungen, so dürfte die Menge auf mehr als das Doppelte anwachsen: auf 1,7 Billionen Kubikmeter.

Vergessen dürfen wir allerdings nicht: Die Menschen der immer größeren Städte benötigen reales Wasser – zum Trinken, Kochen, Waschen und Putzen, auch für die Toilettenspülung. Der stetig wachsende Verbrauch für sanitäre Zwecke ließe sich allerdings mit modernen Wasser sparenden so genannten Trockentoiletten stark verringern. Es gibt etwa Komposttoiletten, bei denen der Urin in einen eigenen Behälter abfließt. Er wird direkt zum Düngen verwendet, der Rest wird zunächst kompostiert. Im Prinzip ähnlich wie in einem Komposthaufen im Garten setzen aerobe Mikroben die Fäkalien in eine ungiftige Masse um. Weil diese ausgeklügelten Toilettensysteme hygienisch und geruchsfrei funktionieren, eignen sie sich auch für städtisches Wohnen. Dazu laufen bereits verschiedentlich Pilotprojekte, etwa in einem Stockholmer Vorort. Nicht nur ließen sich damit Riesmengen Wasser einsparen, sondern auch fossile Brennstoffe für Dünger.



HANDEL MIT VIRTUELLEM WASSER

»**Virtuelles Wasser**« meint sämtliches zur Produktion eines Guts, vom Lebensmittel bis zum Gebrauchsgegenstand, verwendete – sozusagen in der Ware enthaltene – Wasser. Beispielsweise erfordert ein Kilogramm Weizen 1000 Liter Wasser. Wenn Länder trockener Regionen Getreide einführen, statt es selbst anzubauen, entlastet das die lokalen Wasserressourcen.

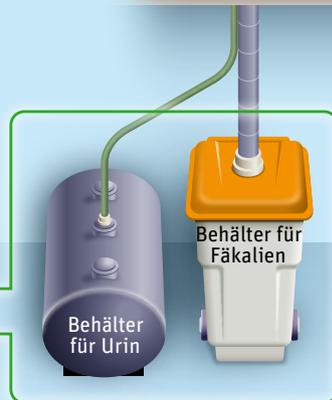


Wassermenge für eine Jeans



WASSER SPARENDE TOILETTEN

Einige 100 Kubikkilometer Wasser gehen weltweit allein in die Toilettenspülung. Wasser sparende Toiletten oder Trockentoiletten, die hygienisch und geruchsfrei funktionieren, könnten dem abhelfen. Beim Gebers-Wohnprojekt in einem Stockholmer Vorort beispielsweise werden die Fäkalien vom Urin getrennt und in einem eigenen Behälter kompostiert. Beides findet dann in der Landwirtschaft Verwendung.



zur landwirtschaftlichen Düngung





Malta: Strom und Wasser intelligent integriert.

Strom und Wasser sind in Malta aufs Engste miteinander verbunden. Denn über die Hälfte des Wassers stammt dort aus Entsalzungsanlagen. Und diese Anlagen brauchen viel Strom, der nahezu komplett aus importierten fossilen Brennstoffen erzeugt wird. Tatsächlich machen die Energiekosten 75 % des Preises für Wasser aus diesen Anlagen aus. Gleichzeitig bedroht der steigende Meeresspiegel die natürlichen Trinkwasserreserven von Malta.

Malta muss also eine ganze Reihe zusammenhängender Probleme so schnell wie möglich anpacken, damit es in Zukunft seine Ressourcen nachhaltig nutzen kann.

Deshalb arbeiten die staatlichen Wasser- und Energieunternehmen „Water Services Corporation“ und „Enemalta“ mit IBM zusammen. Das Ziel: als erstes Land der Welt die Wasser- und Stromversorgung vollständig zu integrieren und ein „smarteres“ System für beides aufzubauen.

Dieses System wird in der Lage sein, undichte Stellen und Energieverluste zu entdecken. So können die Ener-

gieversorger Investitionen besser planen und die Netze ganz gezielt effizienter machen. 250.000 „intelligente“ Stromzähler überwachen den Verbrauch in Echtzeit und ermöglichen dadurch variable Tarife, von denen besonders sparsame Kunden profitieren. Tausende intelligenter Sensoren, verteilt über Leitungen, Verteilerstationen und die ganze vorhandene Infrastruktur, helfen, den Stromfluss effizient zu regeln und Probleme schon im Ansatz zu erkennen.

Die dabei gewonnenen Daten helfen, Kosten, Verbrauch und Emissionen weiter zu senken. Malta kann also mit einem integrierten System die zusammenhängenden Probleme von Wasser und Strom anpacken.

Und das hat auch noch weitere Vorteile: Die Bürger erfahren, wie sie ihren Strom- und Wasserverbrauch optimieren können. Und das Land kann fossile Brennstoffe in Zukunft mehr und mehr durch erneuerbare Energien ersetzen – dank eines smarten Energiesystems.

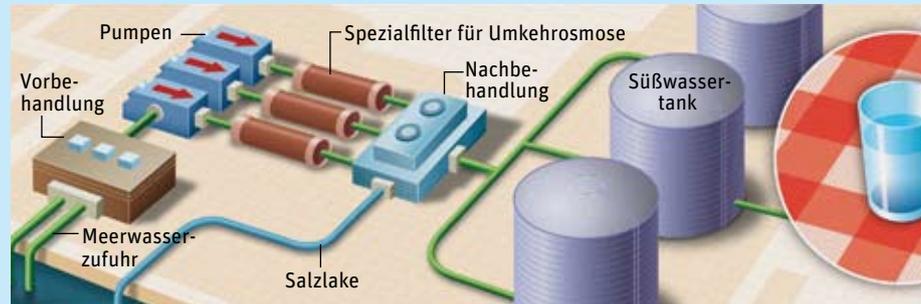
Also: Machen wir unseren Planeten ein bisschen smarter. Mehr dazu unter ibm.com/think/de/malta



SÜSSWASSER AUS DEM MEER ... DURCH UMKEHROSMOSE



Meerwasser zu entsalzen kostet viel Energie, doch immer bessere Technologien machen die Anlagen und Verfahren billiger. Bei der Umkehrosmose werden die Salzwassertanks hohem Druck ausgesetzt, wobei Wassermoleküle durch spezielle Membranfilter in Süßwassertanks übertreten.



Trotzdem – die genannten Maßnahmen werden nicht ausreichen, um die Versorgung aller zu gewährleisten. Deswegen müssen wir auch neues Süßwasser gewinnen. Das meiste freie Wasser der Erde ist Salzwasser. Der Anteil von Süßwasser macht nicht einmal drei Prozent aus. Doch längst sind vielerorts Meerwasserentsalzungsanlagen in Betrieb. Dass die energieeffizienteste dieser Technologien, die so genannte Umkehrosmose, jetzt wesentlich billiger zu haben ist als bisher, dürfte vielen Küstenstädten zugutekommen. Bei diesem Verfahren sind eine Salz- und eine Süßwasserkammer durch eine nur für Wassermoleküle durchlässige – semipermeable – Membran getrennt. Auf den Salzwasserbehälter wird Druck ausgeübt, wodurch allein die Wassermoleküle in den Süßwassertank gepresst werden.

Die Kostensenkungen erreichten Ingenieure neben diversen anderen Verbesserungen durch Membranen, die deutlich weniger Druck – also Energie – erfordern, sowie durch Modifikationen am gesamten System, was die Errichtung solcher Anlagen vereinfacht. Große Werke dieser Art sind in Singapur und Florida in Betrieb. Nochmals deutliche Einsparungen sollen Kohlenstoffnanoröhrchenfilter wegen ihrer besseren Trenneigenschaften bringen. Allerdings handelt es sich nach wie vor um eine energieintensive Technologie, weil auf die Salzwasserkammer Druck ausgeübt werden muss. Für eine verbreitete Anwendung kommt es darum auch auf günstige Stromgewinnung an.

Dass es sehr viel Geld kosten wird, zukünftige Wasserknappheit abzuwenden, kommt nicht überraschend. Analysten der Consulting-Firma Booz Allen Hamilton schätzen, dass die Welt eine Billion Dollar im Jahr investieren muss, soll sämtlicher Wasserbedarf

bis 2030 gedeckt sein – allein um vorhandene Wasser sparende Technologien umzusetzen, Infrastrukturen zu erhalten oder zu erneuern und sanitäre Anlagen einzurichten. So hoch die Summe jedoch ist, sie relativiert sich: Sie entspricht etwa 1,5 Prozent des heutigen globalen jährlichen Weltbruttoinlandsprodukts. Pro Kopf sind das rund 120 Dollar, ein wohl erschwinglicher Preis. Allerdings investieren die meisten Länder, gemessen an ihrem Bruttoinlandsprodukt, heute nur noch halb so viel in die Wasserversorgung wie vor zehn Jahren. An zukünftigen Notständen wäre also nicht ungenügendes Knowhow schuld, sondern mangelnde Voraussicht und fehlender Willen.

Ein Lichtblick zumindest zeichnet sich ab: Indien und China – die bevölkerungsstärksten Länder der Erde, die am dringendsten eine gute Infrastruktur zur Wasserversorgung benötigen – erleben gerade ein rapides Wirtschaftswachstum. Dagegen sieht es momentan nicht so aus, als würde sich Afrikas Lage verbessern, dieses Riesenkontinents mit einer Milliarde Menschen. Dort fließt in die Wasserversorgung so wenig wie nirgends sonst. Größere Investitionen könnten die meisten afrikanischen Länder allein auch gar nicht aufbringen. Deswegen müssten reichere Staaten ihnen finanziell mehr noch als bisher zur Seite stehen.

Mit vereinten Kräften kann es der internationalen Gemeinschaft gelingen, die drohende globale Süßwasserkrise abzuwenden. Dazu sind noch nicht einmal weitere technologische Neuerungen erforderlich. Es würde genügen, bereitstehende Techniken zügiger als bisher einzuführen. Einfach ist die Aufgabe nicht. Doch wenn wir sie gleich anpacken und in den Anstrengungen nicht nachlassen, müsste es uns gelingen. Andernfalls wird ein großer Teil der Welt darben. <



Peter Rogers ist an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) Gordon-McKay-Professor für Umwelt-Engineering und Professor für Stadt- und Regionalplanung. Er gehört zum Beraterstab der Organisation Global Water Partnership, die sich zum Ziel gesetzt hat, das Wassermanagement in der Welt zu verbessern.

Gleick, P. H. et al.: The Worlds Water 2008–2009. The Biennial Report on Freshwater Resources. Island Press, Washington D.C. 2008.

Molden, D. (Hg.): Water for Food, Water for Life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Earthscan (London) und International Water Management Institute (Colombo), 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/992820.



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

»Tue Gutes und rede darüber«

Peppige Wissenschaftssendungen boomen auf allen Fernsehsendern, Science Center bieten Experimente zum Mitmachen. Trotz dieses breiten Angebots erscheinen die Naturwissenschaften gerade Jugendlichen oft als fremde Welt, fürchtet der Nanophysiker Wolfgang Heckl, seit 2004 Generaldirektor des Deutschen Museums in München. Ausgerechnet diese älteste und weltweit größte Einrichtung im Kampf gegen solches Unwissen leidet unter akutem Geldmangel und drohendem Verfall. Eine schwere Aufgabe für den leidenschaftlichen Forscher

Wolfgang Heckl wurde 1958 in der Oberpfalz geboren. Er studierte an der Technischen Universität München Physik und promovierte 1988 am dortigen Institut für Biophysik. In den Jahren 1989 und 1990 war Heckl Schüler des Nobelpreisträgers Gerd Binnig bei IBM Research. Binnig gilt dank seiner Entwicklung des Rastertunnelmikroskops als Mitbegründer der Nanowissenschaften. Heckl ist seit 1993 Professor für Nanotechnologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Er stellte 1994 einen Weltrekord auf, als ihm das Schreiben eines atomaren Bits gelang, das dem kleinsten Loch der Welt entspricht. Seit 1995 ist Heckl mit einem Exponat im Deutschen Museum vertreten. Im Jahr 2001 berief man ihn auf einen Lehrstuhl am Department for Earth and Planetary Sciences der Universität Tokio. Heckls besonderes Anliegen ist die Kommunikation von Forschungsergebnissen in möglichst allgemein verständlicher Form. Dafür erhielt er 2002 den Communicator-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und 2004 den Descartes Prize for Science Communication der Europäischen Kommission. Seit 2004 ist Heckl Generaldirektor des Deutschen Museums in München.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Heckl, in den Nanowissenschaften stehen Sie an vorderster Forschungsfront, als Direktor des Deutschen Museums bewahren Sie die Erinnerung an die Errungenschaften voriger Jahrhunderte. Wie schaffen Sie diesen Spagat?

Prof. Wolfgang Heckl: Vermutlich bringe ich einfach die nötige genetische Ausstattung mit. Tatsächlich entdeckte ich im Nachlass meiner Großeltern die ältesten heute noch existierenden Eintrittskarten für das Deutsche Museum. Meine Großmutter war zudem selbst eine leidenschaftliche Sammlerin, und was soll ich sagen: Ich liebe Flohmärkte! Ich habe schon mehrere Garagen gemietet, um die zahlreichen Fundstücke unterzubringen. Mein Posten beim Deutschen Museum ermöglicht mir aber nicht nur, meiner Sammelleidenschaft nachzugehen. Es ist mir seit Langem auch ein Anliegen, die Öffentlichkeit für Wissenschaft zu begeistern.

Spektrum: Dafür erhielten Sie ja 2002 den »Communicator-Preis« der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Er zeichnet Wissenschaftler aus, die ihre Arbeit erfolgreich einem breiten Publikum vermitteln.

Heckl: Ich erforsche mit meinem Team seit vielen Jahren an der Universität München, wie sich vor Milliarden von Jahren Moleküle zu den ersten Spuren von Leben verbunden haben könnten.

Wir arbeiten an einer Schnittstelle zwischen Nanophysik und Molekularbiologie. Das ist ungemein spannend, und es wäre doch schade, wenn das außer uns und ein paar Spezialisten niemand mitbekäme. Also habe ich begonnen, Artikel zu schreiben, Interviews zu geben, in Talkshows und Wissenschaftssendungen Fragen zu beantworten. Tue Gutes und rede darüber, lautet die Devise. Schon 2001 organisierte ich eine Sonderausstellung »Physik und Leben« in den Räumen des Deutschen Museums, das ein Ausstellungsort für Forschungsgeschichte wie für aktuelle Forschung sein soll. Und natürlich bleibe ich als Wissenschaftler aktiv, denn nur so kann ich glaubhaft andere für Naturwissenschaften interessieren.

Spektrum: Sehen Sie in den boomenden Wissenschaftssendungen in Radio und Fernsehen eigentlich eine Konkurrenz zu Museen?

Heckl: Egal wie – ich möchte die Leute für Wissenschaft begeistern. Aber lassen Sie sich von der Präsenz der Forschung im Fernsehen nicht täuschen. Unsere Jugend schaut zu oft lieber »Deutschland sucht den Superstar«. Die Mädchen kennen eher Heidi Klum als Marie Curie, die wenigsten Jungen kämen auf den Gedanken, Albert Einstein könne eine Leitfigur sein, obwohl sie ihn sofort als Genie bezeichnen würden. Aber wenn wir es nicht schaffen, junge Menschen



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Im gläsernen Forscherlabor geht ein Doktorand aus dem Bereich der Nanowissenschaften seiner Arbeit nach. Der Museumsbesucher erlebt live die Tätigkeit eines Forschers, und der Wissenschaftler lernt seine komplexe Arbeit allgemein verständlich zu kommunizieren. Im direkten Gespräch können Fachleute mit dem Forscher fachsimpeln. Aber auch junge Leute vor der Berufsfindung haben die Möglichkeit, im Dialog einen realistischen Eindruck von der Arbeit eines Wissenschaftlers gewinnen.

an die Wissenschaft heranzuführen, wer soll dann in naher Zukunft neue Technologien entwickeln? Biochips, Nanomedizin, Gentherapie, Life Sciences – mit diesen Begriffen sollten junge Leute heutzutage etwas anfangen können.

Spektrum: Die Ausstellungen des Deutschen Museums sind im Durchschnitt 19 Jahre alt. Das klingt nicht gerade nach moderner Technologie und zukunftsweisender Wissenschaft.

Heckl: Das müssen wir auch schleunigst ändern. Im November eröffnen wir das »Zentrum für Nano- und Biotechnologie«. Hier werden zusätzlich zur regulären Ausstellung Forschungseinrichtungen wie die Fraunhofer- und die Max-Planck-Gesellschaft oder die Helmholtz-Gemeinschaft die Gelegenheit bekommen, ihre aktuellen Projekte vorzustellen. Die Forschungslandschaft hier zu Lande ist vielschichtig und wenig transparent. Wer macht was? Woher kommen die Gelder? Woran wird geforscht? In drei bis fünf Jahren soll dann das »Forum der Technik« mit modernen Exponaten aus europäischen Forschungseinrichtungen folgen. Doch schon jetzt gibt es das gläserne Labor. Hier arbeitet ein Teil meiner Studenten unter den Augen des Publikums, jeden Tag, an dem wir geöffnet haben. Die Besucher können nicht nur zuschauen, sondern bekommen Antworten auf ihre Fragen. Was ist Forschung? Woher stammt das Leben? Welches naturwissen-

schaftliche Studium eignet sich für mich? Wir sind ein Haus der Bildung und Forschung, das mit den Menschen im Dialog steht.

Spektrum: Sie haben es vor einigen Jahren mit dem kleinsten gebohrten Loch ins Guinnessbuch der Rekorde geschafft. Nun ist Ihnen ein weiterer Rekord gelungen: Innerhalb kurzer Zeit sammelten Sie fast 40 Millionen Euro für das Deutsche Museum. Wie haben Sie das gemacht?

Heckl: Ehrlich gesagt, um die ersten beiden Geldgeber musste ich mich nicht bemühen, sie sind auf uns zugekommen. Und wenn erst mal die Großen mitmachen, ist es einfacher, an die Tür anderer zu klopfen. Vor allem habe ich nicht aufgehört, öffentlich präsent zu sein und für mein Anliegen zu werben. Ich sitze in Talkshows, gebe Interviews und bin Mitglied diverser Fachgesellschaften. Da trifft man ständig auf wunderbare Menschen, die nicht nur daran interessiert sind, was wir machen, sondern auch Geld haben. Die spreche ich dann einfach an.

Spektrum: Wie ernst wird man als Wissenschaftler genommen, der durchs Fernsehen tingelt und Geld für ein Museum sammelt?

Heckl: Wissen Sie, diese Frage ist typisch deutsch. Kaum ist hier zu Lande einer in der Lage, seine Forschung den Leuten in drei Sätzen zu erklären und

für seine Sache zu kämpfen, ist er gleich kein richtiger Wissenschaftler mehr. Hier haben uns die angelsächsischen Länder einiges voraus. Da zählen eben nicht nur die Publikationen, sondern auch deren Verbreitung in der Öffentlichkeit, das Engagement für die Studenten und die Effizienz beim Beschaffen von Forschungsgeldern. Mein Communicator-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und ebenso mein Descartes-Preis der Europäischen Kommission weisen in die richtige Richtung, aber wir müssen unseren Elfenbeinturm noch mehr verlassen. Wissenschaft sollte auf keinen Fall elitär sein.

Spektrum: Begeben Sie sich mit dem Einwerben von Geldern nicht in Abhängigkeiten, die dem Ideal eines Museums widersprechen?

Heckl: Wäre es denn besser, das Museum würde bald schließen? Unsere Gebäude sind über 80 Jahre alt und wurden nie grundsaniert. Können Sie sich vorstellen, wie die Bausubstanz aussieht, wie gut unser Leitungsnetz ist? In den Depots verkommen unersetzliche Exponate. Die sieben Gründer der »Zukunftsinitiative Deutsches Museum« sind keine Sponsoren, die sich einkaufen, sondern Mäzene. Sie geben das Geld, weil sie an die Sache glauben – und nicht, weil sie uns dazu verdonnern, ihre Produkte auszustellen. Profit machen sie auf lange Sicht: Weil sie auch künftig gute Ingenieure,



DEUTSCHES MUSEUM MÜNCHEN

Gute Kontakte zur Politik gehören zu einem erfolgreichen Wissenschaftsmanagement dazu (hier Wolfgang Heckl beim Pressetermin mit Dr. Annette Schavan, Bundesministerin für Bildung und Forschung).

Mediziner, Physiker oder Biochemiker finden, wenn sie heute ihren Teil dazu beitragen, dass wir die Jugend für Natur und Technik begeistern.

Spektrum: Sie hatten über Monate eine Beraterfirma im Haus. Deren Studie zufolge brauchen Sie nicht 40, sondern 400 Millionen Euro. Das ist viel Geld in Zeiten einer Finanzkrise. Woher soll das kommen?

Heckl: Mir war schnell klar, dass ohne genaue Analyse der Situation und einen entsprechenden Plan bei den Geldgebern aus der Wirtschaft und dem Freundeskreis des Museums nichts zu holen sein wird. Deshalb hat uns McKinsey unterstützt, übrigens ohne dafür ein Honorar zu erhalten. Zu Ihrer Frage: Kürzungen, Schließungen und Entlassungen, die üblichen Maßnahmen bei gebeutelten Wirtschaftsunternehmen, haben wir von vornherein ausgeschlossen. Stattdessen entwickelten wir mit McKinsey ein zukunftsweisendes Konzept, wie wir das Deutsche Museum innerhalb der nächsten zehn Jahre wieder zu einem Leuchtturm der internationalen Museumslandschaft machen können. Denn was viele vergessen haben: Wir spielen in der gleichen Liga wie das Natural History Museum in London oder das Museum of Science and Industry in Chicago.

Spektrum: Um diese Sichtbarkeit wieder zu erreichen, fehlen Ihnen aber 400 minus 40 Millionen Euro.

Heckl: Wir haben mündliche Andeutungen vom Bund und vom Land Bayern, beide sollten uns mit je 180 Millionen Euro unterstützen. Doch noch gibt es keine festen Zusagen, geschweige denn einen ausreichenden Betriebshaushalt. Leider werden wir von der Politik in Deutschland noch immer als ein Museum unter vielen wahrgenommen. Aber das ändert sich, da bin ich sicher.

Spektrum: Wie problematisch ist in dieser Lage die Konkurrenz der Science Center?

Heckl: Die sehe ich als Bereicherung. In den regionalen Experimentierstuben und Forschungsparks lernen Schüler das, was die Schulen nicht mehr leisten können: naturwissenschaftliche Experimente auf hohem Niveau. Dieser direkte Kontakt mit der Wissenschaft kommt bei den jungen Leuten gut an. Das ist doch prima, davon können wir nur profitieren. Wen die Begeisterung angesteckt hat, der kommt irgendwann zu uns, der Mutter aller Science Center.

Spektrum: Herr Prof. Heckl, welche Zukunftspläne haben Sie persönlich?

Heckl: Der Nobelpreis wird wohl schwierig. Aber ich denke darüber nach, zur übernächsten Amtsperiode für die Wahl zum Bundespräsidenten zu kandidieren. (lacht) ◀

Das Gespräch führte die Hamburger Wissenschaftsjournalistin **Constanze Löffler**.

DAS DEUTSCHE MUSEUM

Das Deutsche Museum in München wurde 1903 gegründet und zeigt heute auf einer Fläche von 73 000 Quadratmetern rund 28 000 der knapp 100 000 Objekte umfassenden Sammlung aus den Bereichen Naturwissenschaft und Technik. Mit 1,4 Millionen Besuchern jährlich ist es das meistbesuchte Museum Deutschlands. Ziel der Initiatoren ist es, naturwissenschaftliche und technische Erkenntnisse gut verständlich zu vermitteln. Neben dem Haupthaus auf der Museumsinsel sind auch die Flugwerft in Schleißheim, das neue Verkehrszentrum an der Theresienhöhe sowie das Deutsche Museum Bonn Publikumsmagneten.

Auf Grund des fortgeschrittenen Alters des Museums sind sowohl viele Ausstellungen als auch der Gebäudekomplex auf der Museumsinsel dringend sanierungsbedürftig. Der Museumskomplex wurde nach dem Zweiten Weltkrieg nur notdürftig repariert und seitdem nicht mehr grundsaniiert. Um das Deutsche Museum auch künftig als führende internationale Adresse im Bereich Naturwissenschaft und Technik zu erhalten, wurde die »Zukunftsinitiative Deutsches Museum« ins Leben gerufen.

ALLES IM NETZ

Ob Getränkepackung oder Druckerpresse, das »Internet der Dinge« soll künftig alle Produkte verbinden. Vorausgesetzt, RFIDs verleihen ihnen die Fähigkeit, per Funk zu kommunizieren.

Von Bernd Müller

Am 28. Mai 2008 traf sich eine illustre Runde deutscher Spitzenmanager im Real-Supermarkt von Tönisvorst: die Vorstandsvorsitzenden von Telekom und SAP, René Obermann und Henning Kagermann, sowie Eckhard Cordes, Vorstandsvorsitzender der Metro-Gruppe, zu der die Real-Märkte gehören. Einem Tross von Journalisten demonstrierten die drei Manager, wie wir alle in zehn Jahren einkaufen sollen. Ein spezielles Handy als mobiler Einkaufsassistent führt Kunden des »Future-Store« zum Regal mit der gewünschten Ware und liefert ergänzende Informationen. Interaktive Terminals bestimmen den Hauttyp und geben Tipps zur Schönheitspflege. Autonome Roboter streifen durch den Markt, um interessante Neuheiten zu erklären. Und ist alles im Einkaufswagen verstaut, wird sein Inhalt an der Kasse automatisch erfasst und mittels Fingerabdruck bezahlt.

Dafür trägt jede Ware einen Funkchip, der einem Lesegerät den Inhalt der Packung sowie Angaben zu Herkunft, Haltbarkeit und Inhaltsstoffen übermittelt. Diese RFID-Chips (*Radio Frequency Identification*), im Englischen auch *Tag* (Etikett) genannt, sollen den herkömmlichen Barcode ersetzen. Sie verleihen den Gegenständen unseres Alltags ein Gedächtnis, das jederzeit abrufbar ist, nicht allein per Handy, sondern auch über das Internet. Denn schon bald sollen Waren im Supermarkt, später auch Autos und in ferner Zukunft sogar Haustüren, Lichtschalter oder die Bewässerungsanlage im Garten in das

weltumspannende Netz der Netzwerke eingebunden sein. Das ist die Vision von Experten: das so genannte Internet der Dinge.

Der Feldafinger Kreis, eine mit hochkarätigen Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft besetzte Kommission, die Trends zu Informationstechnologien aufspürt und entsprechende Empfehlungen für Politiker erarbeitet, sieht darin einen wichtigen Zukunftstrend. Das Internet der Dinge sei ein Instrument, das unsere gesamte Umwelt durchdringen und unser Leben erleichtern wird. Verwandte Begriffe sind *Ambient Intelligence* (intelligente Umgebungen) und *Ubiquitous Computing* (allgegenwärtige Computer), mit denen Szenarien etwa zu Wohnen oder Arbeit bezeichnet werden, in denen Computer im Hintergrund wirken und beispielsweise unsere Gesundheit überwachen. Bereits in der Erprobung sind ein intelligenter Teppichboden, der den Notarzt alarmiert, wenn eine Person stürzt – beispielsweise in einer Seniorenwohnung –, und ein Urinsensor in der Toiletenschüssel, der dem Arzt Messwerte übermittelt.

Die Wirtschaft hat ihre Ziele allerdings zunächst niedriger gesteckt, noch geht es ihr vor allem um eine bessere Kennzeichnung und Nachverfolgung von Waren. Gerd Wolfram, Geschäftsführer der Metro Group Information Technology, spricht deshalb auch lieber vom Intranet der Waren als vom Internet der Dinge. Intranet deshalb, weil der RFID-Chip auf der Milchpackung zunächst nur innerhalb der Lieferkette des Konzerns – von der Molkerei bis ins Kühlregal – mit einer Datenbank vernetzt sein soll. Und auch das ist noch Zukunftsmusik. Die 100 Real-Märkte, die seit

In Kürze

- ▶ Das »Internet der Dinge« gehört zu den Haupttrends der Informatik: Alle Waren sollen **miteinander vernetzt** werden, nicht zuletzt um Warenströme transparenter zu machen und besser zu organisieren.
- ▶ Will Deutschland einen vorderen Platz unter den Exportnationen einnehmen, müssen Techniken entwickelt werden, Produkten **Intelligenz und Kommunikationsfähigkeit** zu verleihen.
- ▶ Damit einher gehen aber Möglichkeiten, das Konsumverhalten des Einzelnen zu verfolgen. Datenschützer fordern deshalb, das »Internet der Dinge« auch **abschalten zu können**.

2007 ihre Warenlogistik aufgerüstet haben, nutzen RFID bislang nur zur Nachverfolgung kompletter Paletten. Lediglich die Herrenabteilung der Essener Galeria-Kaufhof-Filiale stattet auch Kleidungsstücke mit *Tags* aus. Kunden sollen so über Monitore die richtige Größe schneller finden, Mitarbeiter in Sekundenschnelle täglich Inventur machen können.

Michael ten Hompel, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik in Dortmund, will RFIDs eine Art Bewusstsein verleihen, so dass sie sich miteinander verständigen und untereinander abstimmen können. Online bestellte Ware fordert dann dank ihrer intelligenten Funkchips die für die Lieferung benötigten Transportleistungen selbst an; in Frachtzentren entscheidet sie, wie sie am schnellsten weiterkommt. »Dazu müssen

Kisten, Kartons, Paletten und Container zu intelligenten, kommunizierenden Subjekten werden«, erklärt ten Hompel. »RFID-Etiketten verschaffen ihnen eine Identität und vernetzen sie mit der Umwelt.«

Welches Potenzial in diesem Ansatz steckt, zeigt die Forschungsabteilung Corporate Technology von Siemens in München. Sie arbeitet an einer praktischen Umsetzung des Internets der Dinge für Produktionsprozesse. Die Idee: Bauteile, Maschinen und Transporteinrichtungen sollen künftig ihre Aufgaben nicht starr abarbeiten, sondern sich miteinander über den günstigsten Ablauf verständigen. Fällt zum Beispiel eine Maschine aus, suchen sich die zu montierenden Bauteile eine andere und organisieren den Transport dorthin, wenn nötig sogar die Umrüstung der Ersatzanlage für

Digitale Technik ist längst Teil unseres Alltags, und ein erheblicher Teil der Kommunikation verläuft bereits über das Internet. Behalten Experten Recht, wird sich dieser Trend fortsetzen, bis unsere gesamte Lebensumwelt davon durchdrungen und gänzlich vernetzt ist.



NMEDIA / FOTOLIA

GERMANY-LAB

Experten aus Forschung und Wirtschaft rechnen mit einer rasanten Weiterentwicklung des Internets. Um diese mit voranzutreiben – und im internationalen Wettbewerb nicht abgehängt zu werden –, gründeten sechs deutsche Hochschulen im Oktober 2008 das Projekt Germany-Lab (kurz: G-Lab). Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit elf Millionen Euro geförderten und auf drei Jahre angelegten Vorhabens sollen **Schlüsseltechnologien** wie neue Kommunikationsprotokolle und Netzarchitekturen – etwa für das »Internet der Dinge« – entwickelt werden. Angesichts der massiven Gefährdung durch Schadsoftware und Hacker-Angriffe steht die Sicherheit der künftigen Netzwelt ganz oben auf der Agenda.

die neue Aufgabe. Auch wenn sich Teile ändern – und das geschieht wegen der wachsenden Zahl von Produktvarianten in immer kürzeren Zeitabständen – oder wenn neue Maschinen hinzukommen, ist kein Eingriff von außen nötig. Ein solches Szenario bietet erhebliche wirtschaftliche Vorteile, glaubt Marquart Franz, der Erfinder des Konzepts.

Die Struktur dieses autonomen Produktionsnetzwerks haben sich die Siemens-Forscher bei so genannten Peer-to-Peer-Netzwerken abgeschaut, die vor einigen Jahren die Musikindustrie in Atem hielten. Wie bei der ehemaligen Musikausbörse Napster lagern die Informationen nicht mehr auf einem zentralen Rechner, sondern sind im Netzwerk verteilt. Sie werden von den Akteuren – den Peers (englisch für Gleichrangige) – untereinander weitergereicht. Im Siemens-Szenario kommunizieren die Peers über WLAN (*Wireless Local Area Network*), den Funkstandard, mit dem auch immer mehr Menschen drahtlos im Internet surfen.

Eine Variante von WLAN ist die Basis für das derzeit wohl ehrgeizigste Vorhaben zum Internet der Dinge, die Car-2-Car-Kommunikation. Nach der Vorstellung des gleichnamigen Konsortiums, dem alle großen europäischen Automobilhersteller angehören, soll künftig jedes Auto ein Peer sein. Über eine Funkschnittstelle baut es ad hoc mit Fahrzeugen in seiner Nähe ein Netzwerk auf und organisiert selbstständig den Datenaustausch. Die Warnung vor Gefahren ist eine mögliche Anwendung: Sensoren für typische Unfallrisiken wie Glätteis oder Vollbremsung haben die meisten Fahrzeuge heutzutage ohnehin bereits an Bord; was bisher fehlte, waren ein Kommunikationsstandard und die erforderlichen Funkfrequenzen. Nachdem die Idee der Fahrzeug-Fahrzeug-

Kommunikation seit Ende der 1990er Jahre dahindümpelte, erwarten die Hersteller jetzt einen großen Schritt vorwärts. Letzten Sommer hat die EU-Kommission ihnen endlich ein Frequenzband bei 5,9 Gigahertz reserviert. Doch das Auto-Internet funktioniert nur, wenn möglichst viele Fahrzeuge damit ausgerüstet sind. Auf Europas Straßen dürfte das wohl noch mehr als zehn Jahre dauern.

Die Vorstellung vom funkenden Auto ruft auch Politiker und Datenschützer auf den Plan. Die einen spielen mit dem Gedanken, die Technologie für die Abrechnung von Mautgebühren oder zur Fahndung nach Kriminellen zu verwenden. Die anderen befürchten eine lückenlose Überwachung und den Verlust von Privatsphäre. Im Projekt »Network on Wheels« des Bundesforschungsministeriums sendet jedes Fahrzeug alle paar Sekunden einen Identifikationskode sowie Angaben zu Geschwindigkeit und Position – theoretisch ließen sich diese Informationen auch zur Überwachung von Personen nutzen.

Das Internet der Dinge muss abschaltbar sein

Auch mit RFID-*Tags* ausgestattete Waren im Supermarkt bergen solche Risiken, denn die Kombination aus Produktinformation und Kundendaten ermöglicht es, persönliche Verhaltensweisen auszuspielen. Nach Angaben des Bundesverbands der Verbraucherzentralen sind 80 Prozent der Deutschen deshalb besorgt. »Diese Technologie wird nur akzeptiert, wenn Datenschutz und -sicherheit gewährleistet sind, und da gibt es noch viel zu tun«, versichert Peter Schaar, Bundesbeauftragter für den Datenschutz. Der RFID-Einsatz dürfe nicht heimlich erfolgen, und der Schreib-Lese-Mechanismus solle durch den Kunden kontrolliert und deaktiviert werden können, damit Daten der Chips von verschiedenen Produkten nicht zu Konsum- und Bewegungsprofilen zusammengeführt werden können. Industrie und Handel sollen sich seines Erachtens zu einem umfassenden Datenschutz verpflichten.

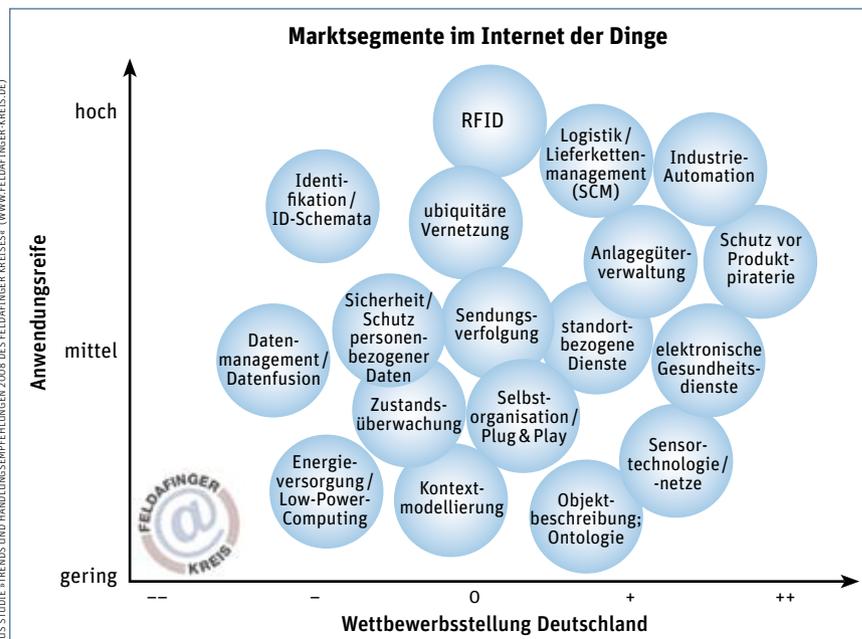
Das sieht auch die Bundesregierung so, lehnt aber eine rechtliche Regelung derzeit ab. Auf eine Anfrage im Bundestag ließ sie verlauten, die Verbreitung der RFID-Etiketten sei noch zu gering und eine gewisse Rechtsunsicherheit in der Anfangszeit hinnehmbar. Für die typischen datenschutzrechtlichen Problemfelder wie Erhebung, Verarbeitung oder Nutzung personenbezogener Daten gebe es bereits Regelungen im Bundesdatenschutzgesetz. Laut Heinz-Paul Bonn, Vizepräsident des Branchenverbands BITKOM, will die Wirtschaft ohnehin überall dort, wo Privatpersonen betroffen sein könnten, nur solche



RFID-*Tags* verwenden, die sich problemlos deaktivieren lassen.

Doch mit dem Abschalten verlöre das Internet der Dinge an Reiz. Eine der Vorzeiganwendungen ist der Kühlschrank, der erkennt, dass die Milch zur Neige geht, und sie im Supermarkt nachbestellt. Oder der via Internet erfährt, dass eine Wurstpackung möglicherweise Gammelfleisch enthält. Ohne aktive RFID-Etiketten wäre das nicht möglich. Dass die Kunden solche Optionen aber wirklich wollen, bestätigte Matthias Rothensee von der Berliner Humboldt-Universität im vergangenen Jahr in seiner Dissertation. Am Beispiel des intelligenten Kühlschranks prüfte er die Akzeptanz für allgegenwärtige Computerintelligenz. Die 150 Testpersonen, denen er eine Simulation des Geräts vorführte, bewerteten das Angebot positiv, allerdings gab es Unterschiede. Ältere Probanden bevorzugten zum Beispiel Gesundheitsinfos. So darf der Kühlschrank warnen, wenn ein Diabetiker mehr als die täglich erlaubte Zuckerration entnimmt. Auch Infos zu Haltbarkeit, Inhaltsstoffen und aktuellen Preisen im Supermarkt wurden gut angenommen. Dagegen fiel der Rezeptplaner durch, der aus den Waren im Kühlschrank Menüvorschläge kreierte. Generell sah Rothensee eine hohe Akzeptanz, wenn Funkchips wirklich den Alltag erleichtern. Eine Mikrowelle, die Leistung und Garzeit des Fertiggerichts automatisch einstellt, oder eine Waschmaschine, die warnt, wenn eine rote Socke in die weiße Wäsche gepackt wird, würde vermutlich gerne genutzt.

Deutschlands oberstem Datenschützer Peter Schaar ist dennoch nicht wohl. Er fordert: »Das Internet der Dinge muss abgeschaltet werden können.« Schaar meint damit nicht das Löschen der Daten auf einzelnen Chips, sondern das Abschalten der ganzen Infrastruktur. Friedemann Mattern, Professor an der ETH Zürich und Autor eines Buchs zum Thema, rät zwar zu einer intensiven Beschäftigung mit dem Datenschutz, glaubt aber nicht, dass sich die informationstechnische Durchdringung der Lebenswelt bremsen lässt. »Die Grenzen zwischen online und offline verschwimmen.« Sein Team entwickelt beispielsweise millimetergroße Sensoren, die ins Gartenbeet gestreut werden, Temperatur und Feuchtigkeit messen und per Funk und Internet an die Sprinkleranlage melden. Die berücksichtigt in ihrer Bewässerungsplanung ohnehin den online abgerufenen Wetterbericht. »Intelligenter Staub« könnte nach der Vorstellung der Züricher überall ausgestreut werden, um die Umwelt zu überwachen und etwa vor einer Schadstoffbelastung zu warnen. Mattern hält nichts davon, ein solches Netzwerk abschalten zu



können, denn der Mehrwert ergebe sich gerade daraus, dass es immer und überall verfügbar sei. Kritisch seien aber Anwendungen, die eine Ortung von Personen ermöglichen. »Ein Schlüssel mit RFID-Chip ist toll, weil man ihn leicht wiederfindet. Aber damit könnte ein Staat auch seine Bürger überwachen.«

Diese Ambivalenz wird bei Geschäftsmodellen deutlich, über welche die Forscher bereits nachdenken. Eines könnte *pay per use*, Bezahlen nach Nutzung sein. Ein Beispiel: Autos werden sich künftig nicht nur untereinander vernetzen, sondern können via Internet die zurückgelegte Strecke und den Ort, wo sie nachts parken, an die Versicherung übermitteln. Bei wenigen Kilometern und einem Parkplatz in einer Garage wäre der Versicherungstarif entsprechend günstiger – der Versicherte würde also finanziell profitieren, sich aber auch der Gefahr der Überwachung aussetzen.

Ein solches »Internet der Dienste« wird das Internet der Dinge ergänzen. Wolfgang Wahlster, Leiter des Deutschen Forschungszentrums für künstliche Intelligenz und Mitglied des Feldafinger Kreises, nutzt semantische Technologien, um dem Netz einen Hauch von Intelligenz zu verleihen. Sie soll beispielsweise das Finden von Information erleichtern. Im Web 3.0, wie es die Fachleute nennen, ziehen Rechner eigene Schlussfolgerungen und verknüpfen sie mit Gegenständen. Wahlster erklärt dazu: »Diese Umgebungintelligenz erlaubt völlig neue Dienste in Echtzeit, die sich automatisch an die Kundenwünsche anpassen.« Das Internet, vielleicht sogar weite Teile der Wirtschaft, würden sich dann von einem Angebots- zu einem Nachfragemarkt wandeln – E-Business würde vom »Me«(Mein)-Business abgelöst. <

Selbst einfache Gegenstände des täglichen Lebens sollen bald mit elektronischer Intelligenz und der Fähigkeit zur Kommunikation ausgestattet sein. Bereits heute sind einige Anwendungsfelder weit entwickelt, und die Bundesrepublik besitzt dabei eine gute Marktposition. In anderen wie der Vernetzung dezentraler Energieerzeugung muss noch Entwicklungsarbeit geleistet werden.



Bernd Müller ist Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987516.

TENNIS

Noch gut oder schon im Aus?

Wenn sich die Größen des internationalen Tennis duellieren, überwacht »Hawk-Eye« jeden ihrer Schläge.

Zehn Kameras erfassen jeweils die Hälfte des Courts.

Von Mark Fischetti

Ein neuer Teilnehmer tritt auf den Center Courts der größeren Tennisturniere auf: Wenn in diesem Monat der erste Aufschlag auf dem Rasen von Wimbledon erfolgt, wird das Falkenauge zum dritten Mal dabei sein und für mehr Gerechtigkeit sorgen: »Hawk-Eye« verfolgt den Ball und ermittelt auf 3,6 Millimeter genau, ob er innerhalb, außerhalb oder auf der Linie landete. Vor nun fast drei Jahren in das Profitennis eingeführt, hat das Falkenauge seine Tauglichkeit inzwischen bei 16 000 Spielen unter Beweis gestellt.

Zehn Hochgeschwindigkeitskameras mit unterschiedlichen Perspektiven liefern pro Sekunde jeweils 500 Bilder (zum Vergleich: 25 Bilder bei der üblichen Fernsehkamera). Die zweidimensionalen »Frames« werden von Computern vorverarbeitet, dann aus den Resultaten die räumliche Position des Balls sowie die Flugbahn in Echtzeit kalkuliert. Das System schätzt anschließend ab, wo der Bodenkontakt erfolgt, und berechnet die Kompression sowie das Wegrutschen des Balls – der acht Millimeter hohe Rasen in Wimbledon dämpft beispielsweise den Aufprall. Auch Bewegungen einzelner Kameras durch Windböen werden bei den Berechnungen berücksichtigt.

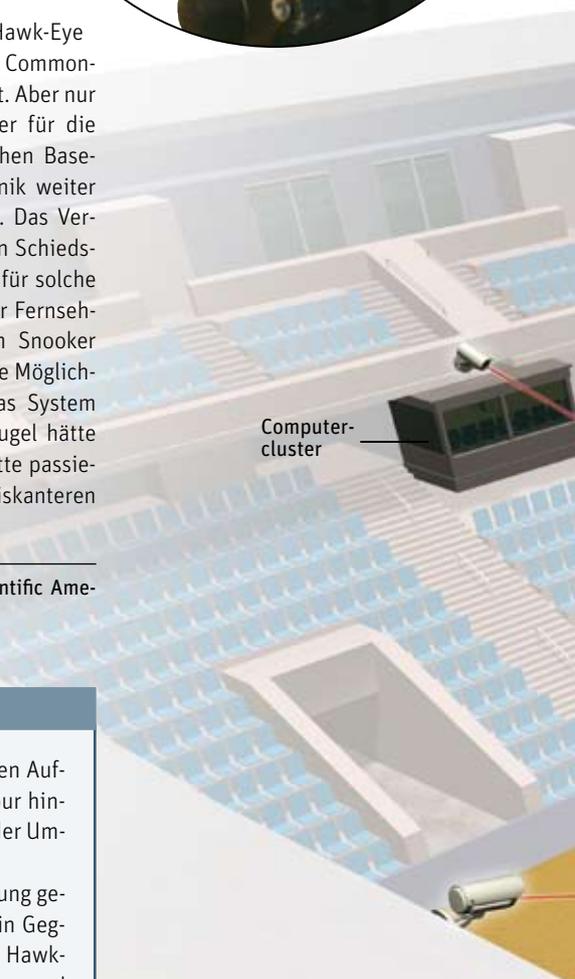
Der britische Fernsehsender BBC nutzte Hawk-Eye erstmals im Februar 2002 beim Davis Cup (dem Wettkampf der Tennisnationalmannschaften), um die Kommentatoren zu unterstützen. Im März 2006 diente das System dann bei der Nasdaq-100 Open als Entscheidungshilfe: Wenn

Spieler das Urteil eines Linienrichters anzweifeln, wurden die Hawk-Eye-Daten zu Rate gezogen.

Seit 2008 kommt dieses Arrangement bei den Grand-Slam-Turnieren zum Einsatz, die nicht auf Sand gespielt werden: den Australian Open, den Wimbledon Championships, den US Open. Jeder Spieler hat das Recht, zwei Überprüfungen – so genannte *challenges* – pro Satz eines Matches zu fordern (in Wimbledon drei). Gibt ihm das System nicht Recht, hat er eine Option vertan.

Erfinder Paul Hawkins erdachte Hawk-Eye zunächst für das in England und den Commonwealth-Staaten traditionsreiche Cricket. Aber nur Fernsehkommentatoren nutzen es hier für die Spielanalyse. Auch beim amerikanischen Baseball besteht kein Interesse, der Technik weitere reichende Kompetenzen einzuräumen. Das Verkünden von *balls* und *strikes* durch den Schiedsrichter, so glaubt Hawkins, sei zentral für solche Spiele. Ebenfalls zur Unterstützung der Fernsehberichterstattung hat Hawk-Eye beim Snooker Bedeutung gewonnen. Dort spielt es die Möglichkeiten der virtuellen Realität aus: Das System berechnet beispielsweise, wie eine Kugel hätte getroffen werden müssen oder was hätte passieren können, wenn der Spieler einen riskanteren Stoß ausgeführt hätte.

MARK FISCHETTI ist Redakteur bei »Scientific American«.

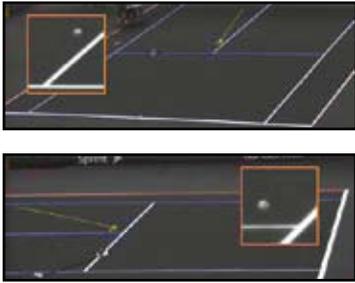


WUSSTEN SIE SCHON?

- ▶ **Organisatoren von Sandturnieren** wie den French Open erachteten den technischen Aufwand für Hawk-Eye bislang als unnötig, weil die Bälle auf dem Sandplatz eine klare Spur hinterlassen. Aber Tests haben ergeben, dass bei einem kräftigen Aufprall Sandpartikel in der Umgebung des komprimierten Balls aufwirbeln und den eigentlichen Abdruck vergrößern.
- ▶ **Als »bislang größten Fehler« bezeichnet** der Hersteller des Systems die Entscheidung gegen Ivan Ljubicic im Viertelfinalspiel der ATP-Masters im vergangenen März 2009. Sein Gegner Andy Murray hatte den Ball tatsächlich ins Aus geschlagen, doch der Operator, der Hawk-Eye bediente, blendete den zweiten Aufprall auf die Bildschirme der Schiedsrichter ein – und der hatte die Linie getroffen. Eine Modifikation soll künftig solche Bedienfehler ausschließen.
- ▶ **Tor oder nicht Tor?** Anfang 2008 entschieden Fifa und UEFA, diese Frage auch künftig ohne technische Aufrüstung zu klären und lieber zwei weitere Linienrichter einzusetzen.

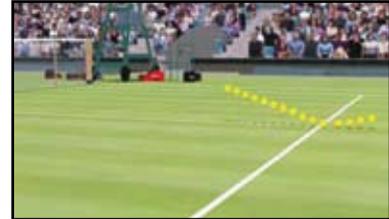
ALLE KLEINBILDER: HAWK-EYE INNOVATIONS LTD.; STADION MIT TENNISPLATZ: 5W INFOGRAPHICS

Jeder Kameracomputer bestimmt die zweidimensionale Position des Balls in einem Einzelbild.

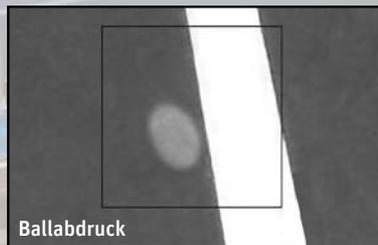
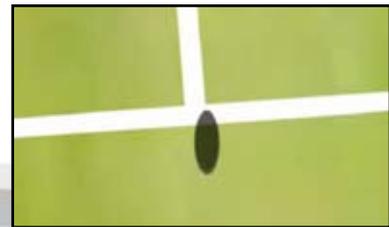


Ballmarkierung: Ob ein Ball eine Linie berührt, hängt davon ab, wie er verformt wird. Hochgeschwindigkeitskameras zeigen, dass bei einem typischen Schlag quer über den Platz 44 Millimeter vom Ball den Boden berühren. Aber dabei hinterlässt er nur eine 35 Millimeter breite Spur, da seine Ränder nicht fest genug auf den Boden treffen, um die Oberfläche aufzurauen. Jahrelang haben die Linienrichter ihre Entscheidungen anhand der Abdrücke getroffen; Hawk-Eye berechnet die Kompression.

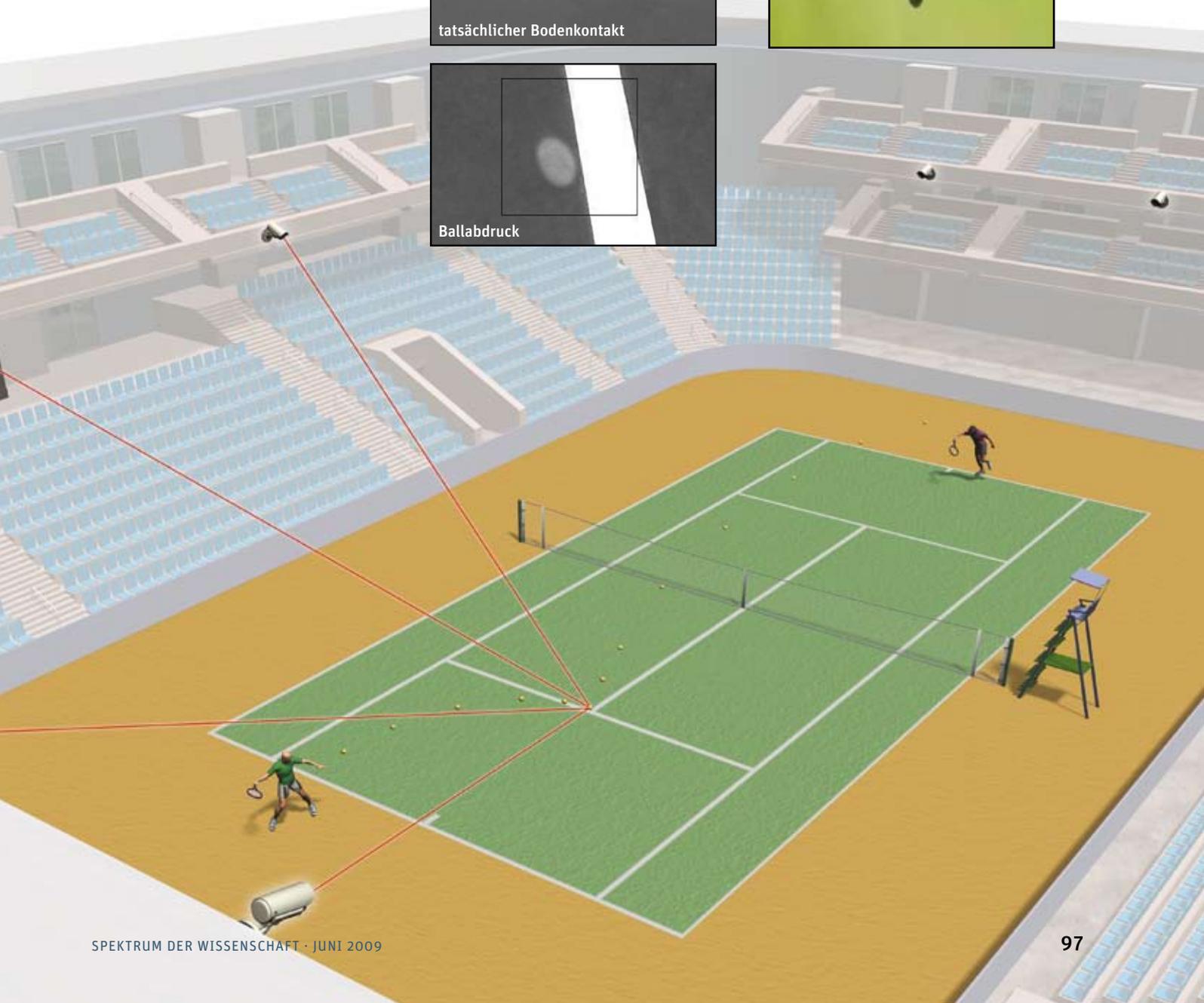
Bildverarbeitungssoftware kombiniert die Einzelbildanalysen zu einer dreidimensionalen Position. Daraus wird die Flugbahn des Balls ermittelt sowie der zu erwartende Auftreffpunkt.



tatsächlicher Bodenkontakt



Ballabdruck



Was uns zu Menschen macht

Vom Schimpansen unterscheiden wir uns weniger in den typischen Genen als im vermeintlichen DNA-Schrott



CARY WOLINSKY

WEITERE THEMEN IM JULI

Porträt Rudolf Jaenisch

Als einer der profiliertesten deutschen Molekularbiologen erforscht Jaenisch seit fast 40 Jahren in den USA, was unsere Gene steuert

Wurzeln der Großzügigkeit

Mathematische Modelle enthüllen, wie sich soziale Verhaltensmuster – wie etwa die Großzügigkeit – evolutionär entwickelt haben

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter



MATT COLLINS

**Wunsch-
artikel**

Spielereien mit »einfachen« Gruppen

Drei neue Puzzles nach Art des Rubikwürfels, nur schwerer, bieten Gelegenheit, sich mit einigen der kompliziertesten Objekte der abstrakten Algebra vertraut zu machen: sporadischen einfachen Gruppen

Ein Sonnenschutz für die Erde

Gelänge es, die Sonneneinstrahlung abzuschirmen, ließe sich die globale Erwärmung bremsen. Wir gewännen so Zeit, das Übel an der Wurzel zu packen



KEVIN BRAND