

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

PORTRÄT

ERNST PERNICKA
DER NEUE
ERFORSCHER
VON TROJA

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

MEDIZIN

Hitzeschockproteine
gegen Krebs

NEUROLOGIE

Optogenetik macht
Hirnprozesse sichtbar

SERIE AUTO (TEIL IV)

Fahrzeuge, die nicht mehr
kollidieren



Der Kosmos vor dem Urknall

Hatte unser Weltall
einen Vorläufer?

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



www.spektrum.de

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

05/09

MAI 2009



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Mehr Licht ins dunkle Gehirn

Auch wenn die »Spektrum«-Redakteure ständig nach den neuesten Entwicklungen in der Wissenschaft Ausschau halten, geschieht es nicht eben häufig, dass man dem Entstehen eines neuen Forschungszweigs praktisch zusehen kann. Diese Gelegenheit bietet derzeit die »Optogenetik«. Den Begriff gibt es erst seit 2006. Ziel ist die Kombination von Optik und Genetik, um die Aktivitäten von Nervenzellen (Neuronen) und ihrer Netzwerke im Gehirn oder Rückenmark sichtbar zu machen.

Der Österreicher **Gero Miesenböck**, nach Zwischenstationen in den USA heute an der University of Oxford tätig, hat zusammen mit anderen ein Verfahren entwickelt, bei dem in Neuronen genetisch modifizierte Sensoren und Schalter eingebaut werden, welche die Zellen bei Bestrahlung mit Licht feuern und dabei die dadurch aktivierten nachgeschalteten Neurone aufleuchten lassen. Ganze neuronale Netzwerke können so an lebenden Tieren in Aktion sichtbar gemacht werden.

Miesenböck führt damit Arbeiten mit fluoreszierenden Proteinen fort, für die der Amerikaner Roger Y. Tsien im letzten Jahr den Nobelpreis für Chemie erhielt. Von dem neuen revolutionären Verfahren heute schon medizinische Anwendungen zu erwarten, wäre bei einem so jungen Gebiet verfrüht. Gleichwohl haben die Forscher die großen Ziele schon ins Visier genommen: etwa die Regeneration schadhafter Lichtrezeptoren in der Netzhaut und vielleicht auch Hilfe bei Parkinson (S. 48).

Viele Leser haben uns kontrovers zu unserem Essay über Poppers Dogma geschrieben, wonach jede wissenschaftliche Behauptung widerlegbar sein müsse (April 2009;

www.spektrum.de/Popper). Auch im Essay dieser Ausgabe geht es um Fragen der Wissenschaftlichkeit. Wie man sieht, beschäftigt mich dieses Thema, und das nicht erst seit der Kreativitätsdebatte. Diesmal diskutiert der renommierte Teilchenphysiker Dieter Lüst die Frage, ob denn die heutige Teilchenphysik, hauptsächlich repräsentiert durch die alles dominierende Stringtheorie, überhaupt noch Wissenschaft sei – und nicht etwa nur spekulative Metaphysik.

Hier schwelt die Kontroverse bereits seit einiger Zeit. So übten vor drei Jahren die theoretischen Physiker Lee Smolin und Peter Woit fast zeitgleich in Büchern heftige Kritik an der Stringtheorie: Auch nach Jahrzehnten intensiver Forschung über Myriaden von Paralleluniversen und Extradimensionen der Raumzeit bleibe sie doch mehr ein Mythos als eine physikalische Theorie. Ohne überprüfbare Aussagen bewege sie sich außerhalb der Wissenschaft – und sei damit keine.

Solche Anwürfe gerade von kundiger Seite erregten seinerzeit die Gemüter und lösten heftige Gegenreaktionen aus. Ich wollte wissen, wie mit etwas Abstand die heutige Sicht auf die Kritik ist. Dieter Lüst hat geantwortet – und nichts weniger als einen Paradigmenwechsel in der Physik postuliert (S. 34).

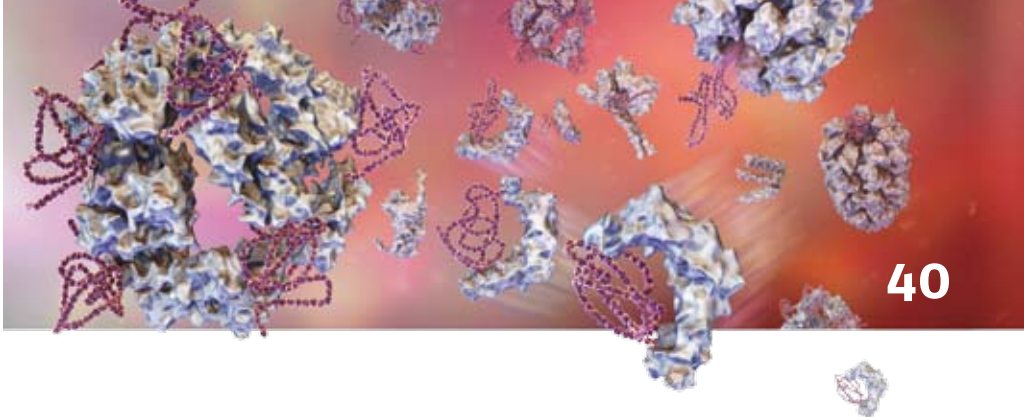
Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

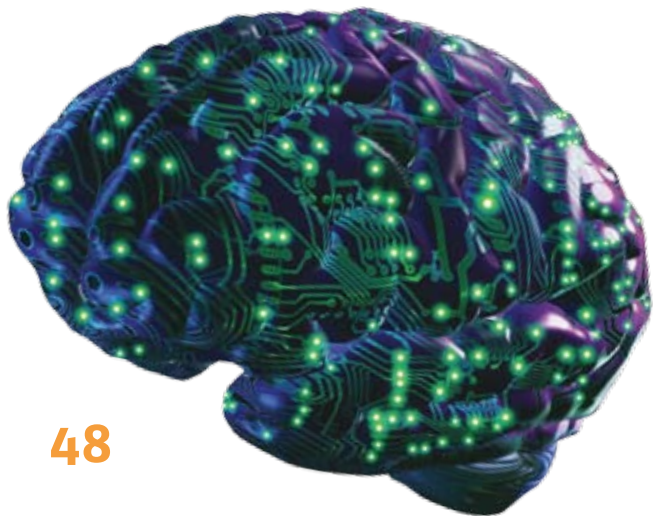


Der Neurobiologe Gero Miesenböck aktiviert Nervenzellen mit Laserlicht.

MEDIZIN & BIOLOGIE
Hitzeschockproteine gegen Krebs

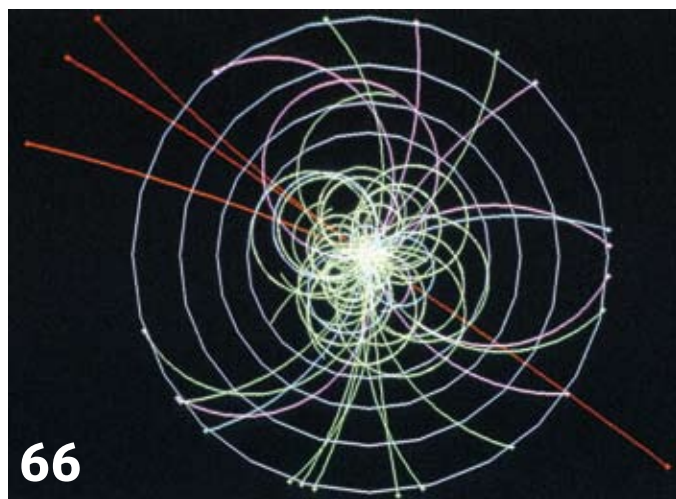


40



48

MEDIZIN & BIOLOGIE
Erleuchtete Schaltkreise im Gehirn



66

MENSCH & GEIST
Großes Rätsel der Mathematik: das Yang-Mills-Problem

AKTUELL

10 Spektrogramm

Tanz der Giganten · Augen für Artgenossen · Hyänen lernen Rangordnung · Gepfährtes Vampirskellett · Judaskuss der infizierten Zelle u. a.

13 Bild des Monats

Vom Winde verweht

14 Saurier als Superväter

Bei Raubsauriern brüteten die Männchen die Eier aus

16 Teilchenmassen exakt berechnet

Ab-initio-Rechnungen reproduzieren experimentell bestimmte Teilchenmassen

20 Mars-Oasen auf der Spur

Karbonate und Methanwolken lassen den Mars lebensfreundlicher erscheinen

22 Mit GPS Lufttemperatur messen

Signale von GPS-Satelliten erlauben genauere Klimabeobachtungen

24 Springers Einwürfe

Tierische Schmerzen

ASTRONOMIE & PHYSIK

TITEL

26 Der Ur-Sprung des Alls

Unser Universum begann vielleicht mit einem »Big Bounce« – also einem Rückprall. Demnach wäre der Urknall die Folge einer vorangegangenen Implosion gewesen

SCHLICHTING!

33 Schattentheater am Himmel

Licht- und Schattenstraßen am Abendhimmel entstehen dank tief hängender Wolken und Wassertröpfchen

ESSAY

34 Ist die Stringtheorie noch eine Wissenschaft?

Viele Behauptungen dieser Theorie seien nicht prüfbar, sagen Kritiker. Der Stringtheoretiker Dieter Lüst antwortet auf die Vorwürfe

MEDIZIN & BIOLOGIE

40 ► Mit Hitzeschockproteinen gegen Krebs impfen

Diese Eiweißstoffe sorgen für Ordnung. Ihre Beteiligung an Immunprozessen prädestiniert sie als therapeutische Impfstoffe – gegen Krebs, Autoimmunerkrankheiten und chronische Infektionen

48 ► »Lichtschalter« im Gehirn

Eine raffinierte Kombination von Optik und Gentechnik erlaubt, Schaltkreise im Gehirn mit ungeahnter Präzision zu kartieren – und sogar zu steuern

Titelmotiv: Kenn Brown & Chris Wren,
Mondolithic Studios

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

www.spektrum.de/audio

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 Klimawandel im Fokus
www.spektrumdirekt.de/klima



WISSENSLOGS SciLogs-Preis 2009
www.spektrum.de/artikel/987906

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Berühmtheiten der Wissenschaftsgeschichte

Jane Goodall und Charles Darwin, Robert Millikan und Ernst Haeckel: Anlässlich wichtiger Jahrestage wirft **spektrumdirekt** für Sie einen Blick zurück

www.spektrumdirekt.de/rueckblick

Klimawandel im Fokus

Australien, der Amazonas, die Polarregionen: Aus allen Weltgegenden berichten Klimaforscher über ungewöhnliche Entwicklungen. **spektrumdirekt** hält Sie in einem Online-Dossier auf dem Laufenden. Und diskutiert auch die »Wahl der Waffen« gegen den Klimawandel

www.spektrumdirekt.de/klima

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

»Spektrum« hören?

Jeden Monat können Sie ausgewählte Artikel aus der aktuellen Ausgabe auch hören: per Dateidownload von unserem Partner audible.de. Das erste digitale Hörbuch – Dauer jeweils rund eine Stunde – ist kostenlos

www.spektrum.de/audio

»Imperium, Konflikt, Mythos – 2000 Jahre Varusschlacht«

Die groß angelegte Ausstellung, die ab dem 16. Mai an Originalschauplätzen zu sehen ist, können Sie schon jetzt erleben – bei einer virtuellen Tour mit prächtigen Bildergalerien und praktischen Links

www.epoc.de/bilder

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Sie haben gewählt!

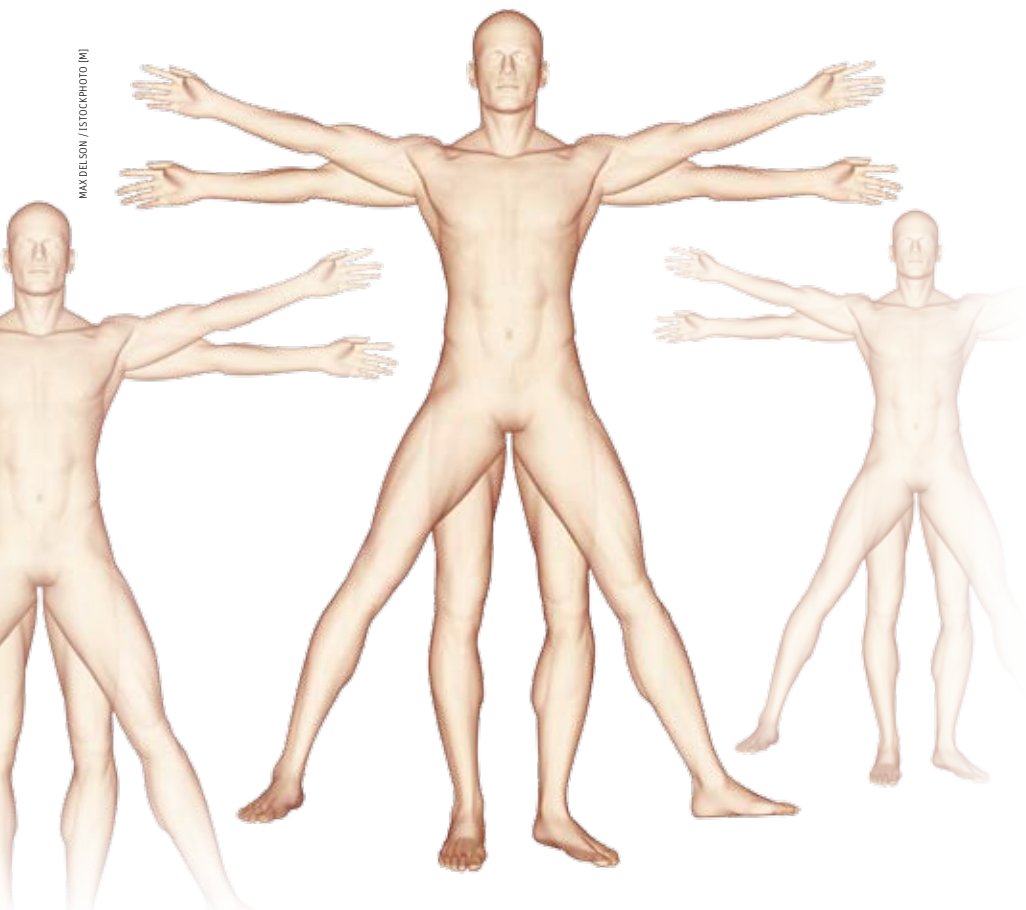
Der kommende Wunschartikel ist gekürt. Zur Wahl standen unter anderem Berichte zu genetischen Schäden durch ein ungewolltes Luftverschmutzungs-»Experiment«, zu selbstreinigenden Materialien und zur mathematischen Theorie der endlichen einfachen Gruppen. Das Ergebnis stellt »Spektrum«-Chefredakteur Reinhard Breuer vor

www.spektrum.de/artikel/983339

Sieben auf einen Streich

Schreiben, E-Mails lesen, Nachrichten hören, am besten alles gleichzeitig: Nicht jeder beherrscht das, obwohl es angesichts der alltäglichen Informationsflut bisweilen nötig wäre. In »Multitasking« gibt Torkel Klingberg nun Tipps, wie diese zu bewältigen ist. Lesen Sie die Rezension von Tagrid Yousef oder stellen Sie das Buch selbst vor

www.spektrumdirekt.de/artikel/987451



FÜR ABONNENTEN »Wie geht unsere Evolution weiter?«

www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Wie geht die Menschenevolution weiter?«

Anders, als viele meinen, steht auch unsere eigene Evolution nicht still. Körper und Geist haben sich noch in den letzten Jahrtausenden verändert – und sie werden es weiter tun. Die Frage ist nur: in welcher Weise?

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

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

»Was darf man mit IQ-Tests tun?«

IQ-Tests wurden und werden immer wieder dazu benutzt, zwischen Ethnien oder den Geschlechtern zu differenzieren. Das diskriminiert Menschen und sollte daher unterbleiben, fordert Mediziner Matthias Wenderlein. Der Persönlichkeitspsychologe Jens Asendorpf hält dagegen

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

www.gehirn-und-geist.de/artikel/986530

»Vom Asteroiden zum Meteoriten«

Im Oktober 2008 sorgte der Miniasteroid 2008 TC3 für Schlagzeilen: Wenige Stunden nach seiner Entdeckung stand fest, dass er auf der Erde einschlagen würde. Eine weitere Sensation folgte, als Forscher einige Bruchstücke im nördlichen Sudan aufspürten

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

www.astronomie-heute.de/artikel/987676



FREIGESCHALTET

»Vom Asteroiden zum Meteoriten«

www.astronomie-heute.de/artikel/987676

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

SciLogs-Preis 2009

Vor wenigen Wochen trafen sich auf Einladung von **Spektrum der Wissenschaft** Wissenschaftsblogger aus der ganzen Republik und vergaben den SciLogs-Preis 2009. Nominiert worden war die »Klima-Lounge« der Klimaforscher Stefan Rahmstorf, Anders Levermann und Martin Visbeck, »Go for Launch« des Raumfahrt-Ingenieurs Michael Khan und Michael Blumes Weblog »Natur des Glaubens«, der schließlich den Sieg davontrug (www.spektrum.de/artikel/987906). Der belgische Wissenschaftsjournalist Reinout Verbeke hatte ihn vorgeschlagen: Blume thematisiere mit den Möglichkeiten des Web 2.0 kompetent und aktuell die Erforschung der biologischen Wurzeln von Religiosität

www.wissenslogs.de
www.sciloggs.de



TITEL

26

War der Urknall nur ein Zwischenknall?

MENSCH & GEIST

PORTRÄT

58 ▶ Ernst Pernicka

Er ist der führende Experte für Archäometrie in Deutschland, zudem Grabungsleiter in Troja – das Porträt eines Grenzgängers

SERIE (TEIL VIII)

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

66 Das Yang-Mills-Problem

Dem höchst erfolgreichen Standardmodell der Teilchenphysik fehlt ein solides mathematisches Fundament. Noch weiß niemand, wie es aussehen könnte

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

74 Abelpreis für Mikhail Gromov

Die Geometrisierung der Gruppentheorie ist nur eine von vielen Leistungen dieses genialen Mathematikers

ERDE & UMWELT

78 Ackerbau ohne Pflügen



Besonders in Nord- und Südamerika pflügen viele Farmer ihr Land nicht mehr. In Europa setzt sich die so genannte Direktsaat langsamer durch. Dabei ist die Methode günstiger und außerdem ökologisch nachhaltig



78

ERDE & UMWELT

Ackerbau ohne Pflügen?



90

TECHNIK & COMPUTER

Bitte keinen Autocrash mehr!

TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

88 Bitte zum 101. Stock!

Neue Antriebe und Computer verbessern die Effizienz von Aufzügen

SERIE (TEIL IV) AUTOS DER ZUKUNFT

90 ▶ Hilffsysteme zur Crashvermeidung



Künftige Sicherheitstechnik wird Autofahrern immer mehr Entscheidungen abnehmen. Ingenieure hoffen, damit die Häufigkeit von Fahrfehlern und Unfällen zu reduzieren

WISSENSCHAFT & KARRIERE

98 »Verantwortung für Menschen übernehmen«

Der Maschinenbauer und Schott-Manager Udo Ungeheuer

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Mehr Licht ins dunkle Gehirn
- 8 Leserbrief
- 8 Impressum
- 65 Im Rückblick
- 106 Vorschau

100 Rezensionen:

Govert Schilling, Lars Lindberg Christensen
Unser Fenster zum Weltraum

W. Buschlinger, B. Conradi und H. Rusch
Philomat

Hans Wußing *6000 Jahre Mathematik*

Vera Trachmann *Summs und die Honigbienen*

Form der Menschentrauben

Amtseinführung aus dem Alt Bild des Monats, März 2009

Bemerkenswert erscheint mir die Form der Menschentrauben vor den Großbildschirmen. Die Menschen versuchen, das Geschehen auf dem Bildschirm unter nicht zu kleinem Winkel zu sehen, wodurch sich als Rand einer Menschentraube in guter Näherung ein Fasskreis durch die Seiten der Leinwand ergibt.

Dr. Lothar Kiefer, Bietigheim-Bissingen

Mutation und Selektion: Motor der Evolution

Missverständnisse um Darwin
Februar 2009

In dem Artikel wird das Prinzip der Selektion als die Hauptkraft der Evolution bezeichnet. Eine Hauptkraft ist sie sicher; selektieren kann die Umwelt aber nur zwischen bereits vorliegenden Varianten, die innerhalb einer Spezies durch Mutationen entstehen. Zur Erklärung der Evolution braucht man also zwei Prinzipien oder Kräfte, die Mutation und die Selektion, die in ihrem antagonistischen Zusammenspiel gleichwertig als Motor der Evolution wirken. Mutation ist die schöpferische Fantasie, die die Ideen liefert, und Selektion das rationale Prinzip, nach dem die Umwelt aus

diesen Ideen wählt. Wo keine Ideen, da gibt es auch nichts auszuwählen; wo keine Mutation, da auch keine Selektion.

Dr. Gunter Berauer, München

Bienen unterscheiden Muster und Menge

Auch Bienen können bis drei zählen
Spektrogramm, März 2009

Da ist also auch »Spektrum« auf die unwissenschaftliche Übertreibung hereingefallen, dass Bienen bis drei zählen können. So eine Aussage wird in dem zitierten Artikel gar nicht gemacht. Von »zählen« ist dort an keiner Stelle die



Bienen können nicht nur Muster erkennen, sondern auch Mengen erfassen.

Rede, und *number-based visual generalization* (so der Titel des Artikels) bedeutet natürlich nicht »zählen«. Weiter muss man beachten, dass die Experimente auch gar nicht eine solche Aussage erlauben würden.

Was die Autoren zeigten, war für Bienen schon viele Male vorher nachgewiesen worden, dass sie nämlich über die Fähigkeit verfügen, visuelle Muster zu generalisieren und dabei die Musterkomponenten berücksichtigen. Die Aussage Ihres Berichts geht also völlig an dem vorbei, was die zitierte Publikation betrifft.

Allerdings gibt es andere und recht spannende Untersuchungen zu der Frage, ob Bienen Kleinstmengen unterscheiden können, also eins von zwei oder zwei von drei nacheinander wahrgenommenen Objekten. Solche Objekte können zum Beispiel Landmarken sein. Hier gibt es Hinweise für derart sequenzielle Unterscheidungen, aber auch das hat mit »zählen« nichts zu tun.

Die Frage nach den verschiedenen Formen der Mengenbewertung (*numerosity*) und der Generalisierung und der Abstraktion von Mengen (*number estimation*) ist eine wichtige Forschungsthematik der Psychologie und der Verhaltensforschung.

Prof. Randolf Menzel, Berlin

Antwort der Redaktion:

Das Wort »zählen« kommt nur im Titel des Beitrags vor und ist dort eine journalistische Überspitzung sowie ein Wort-

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, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
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: Hermann Englert, Lars Fischer, Bernhard Gerl, Dr. Rainer Kayser, 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; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; 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, Goethestraße 85, 10623 Berlin, Tel. 030 526821-841, Fax 030 7526821-828; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 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: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Weraststraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 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 Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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.



Manche Schwäne sind grau

Essay, März 2009

Warum Poppers Kriterium sich selbst nicht genügt

Interessant hinsichtlich Poppers Theorie der Falsifizierbarkeit erscheint die Tatsache, dass sie offenbar ihrem eigenen Kriterium nicht unterworfen ist. Denn als den Geisteswissenschaften zuzuordnende Theorie kann sie keiner Falsifikation im strengen Sinn unterliegen, da ihre objektive Überprüfbarkeit (die Existenz des einen schwarzen Schwans), mangels eines objektiven Maßstabs von »richtig« und »falsch« unmöglich ist. Insbesondere im Bereich der Geisteswissenschaften drängt sich das von Howson entwickelte Kriterium der überwiegenden Wahrscheinlichkeit auf – zumal es selbst sich dem Wettbewerb der Wahrscheinlich-

keiten und damit seinem eigenen Kriterium stellt.

Jochen Koch, Leinfelden

Logik der Forschung

Leider differenziert Matthews zu wenig. Meines Erachtens wäre einerseits zu unterscheiden zwischen einer präskriptiven Wissenschaftstheorie und einer deskriptiven, also nicht miteinander zu vermischen, worin Wissenschaft als Methode bestehen soll und was Wissenschaft in der faktisch durch die Wissenschaftler gelebten Praxis ist. Das führt gleich zum zweiten zu unterscheidenden Paar, der Wissenschaft als institutionalisiertem Wissenschaftsbetrieb mit seiner Soziologie und Psychologie und der Wissenschaft als Pro-

gramm auf dem Weg der Wahrheitsuche. Denn immerhin geht es sowohl in Poppers als auch im bayesschen Ansatz in erster Linie um die Logik, nicht um die Praxis der Forschung.

Das alles ist leicht und übersichtlich nachzulesen im Abdruck des Radiovortrags (NDR, 07.03.1972), den Popper in die Aufsatzsammlung »Alles Leben ist Problemlösen« (1994) aufnehmen ließ, und zeigt, dass der wahrscheinlichkeitstheoretische bayessche Ansatz keineswegs mit Poppers empirischer Falsifikation unverträglich ist, sondern sich zu dieser komplementär verhält. Matthews' polarisierende Darstellung erscheint mir von daher sachlich verfehlt oder zumindest journalistisch zu sehr überspitzt.

Paul-Gerhard Schank, Berlin

Weitere Reaktionen siehe:
www.spektrum.de/artikel/982928

spiel mit der gängigen Phrase »nicht bis drei zählen können« (weshalb von drei die Rede ist, obwohl die Bienen laut Untersuchung sogar bis vier »zählen« können). Dass der Ausdruck nicht ernst gemeint ist, ergibt sich auch aus der späteren ironischen Formulierung »zum Zählen fehlen ihnen [den Bienen] nun einmal die Finger«.

Zu der Aussage, die Arbeit bestätige nur die längst bekannte Tatsache, dass Bienen Muster erkennen können: Es geht nicht um Muster, sondern in der Tat um Mengen, welche die Insekten intuitiv erfassen, wenn auch nicht abzählen können.

Destruktive Motive unterstellt

Neidische Hunde
Spektrogramm, Februar 2009

Hier wird das Phänomen der Zuschreibung eigener Motive auf das Gegenüber deutlich. Entgegen der Schlussfolgerung ist der Hund nicht neidisch. Wäre er es, dann würde er aggressiv gegenüber dem bevorzugten Hund reagieren. Dieser schaut aber gar nicht ängstlich. Der Beleidigte ist abweisend gegenüber dem, der die Spielregeln verletzt. Das heißt, er agiert die Spannung nicht affektiv an dem anderen Hund aus, weil er Angst vor dem Untersucher hat, sondern reagiert logisch auf dem Boden der Regel und präsentiert sich souverän gegenüber

dem Regelverletzer. Das Gerechtigkeitsgefühl ist nachgewiesenermaßen genetisch-neurobiologisch präformiert.

Wer hier nicht versteht und destruktive Motive unterstellt, das ist der Mensch. Der gleiche Effekt ist gegenwärtig im Sozialsystem zu beobachten: Wer auf Ungerechtigkeiten hinweist, der wird des Neides bezichtigt.

Ein Beispiel: Eine Bank kann einem 70-Jährigen keinen Kredit über acht Jahre geben, wohl aber tausend 70-Jährigen einen über acht Jahre, wenn sie eine durchschnittliche Lebenserwartung von zehn Jahren haben. Leben diese aber alle in einem Altersheim und werden von derselben Grippewelle dahingerafft, dann ist das Risiko nicht gestreut, sondern gebündelt.

Ebenso war die Risikostreuung der »Giftpapiere« CDO-Derivate keine Streuung, sondern eine Bündelung, denn die Risiken waren über den erhitzten Immobilienmarkt verbunden. Kunden mit niedrigen Risiken wurden überredet, ihr gedecktes Darlehen aufzustocken auf die Höhe des überbewerteten »Wertzuwachses« der Immobilie. Das war insgesamt ein Schneeballsystem, welches in Europa und den USA mit Strafe belegt und verboten ist.

Doch wegen dieser »genialen Finanzprodukte« wurden und werden die falschen Dinge getan. Neue Kredite sollen nun das Kreditproblem lösen. Das ist, als ob die Suchtberatung Alkohol ausschenkt, damit ja niemand ins Entzugsdelir gerät.

Man bedenke stets, dass auch der Mensch Natur ist, und somit unterliegt auch er letztlich Naturgesetzen.

Andreas Thumulla, Bomlitz

Korrigendum: Wie real ist das Unendliche? März 2009

Der vorletzte Absatz des Artikels muss richtig lauten:

»Allem Anschein nach hatten Cantor und Gödel Recht, als sie behaupteten, die Kontinuumshypothese sei für uns nicht frei wählbar. Vielmehr scheint die Tatsache, dass diese – im Gegensatz zu Cantors Überzeugung – falsch ist, uns vorgegeben.«

Bernhard Strauß aus Nersingen hat uns darauf aufmerksam gemacht.

Die Red.

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

METEOROLOGIE

Feuriger Bruder des Wirbelsturms

■ Am 12. Juni 1811 beobachtete ein Kapitän in den Gewässern um die Inselgruppe der Azoren ein spektakuläres Naturschauspiel: eine senkrechte, schwarze Säule, die sich über dem Wasser drehte, begleitet

Blitze umzuckten die Eruptionswolke des Vulkans Chaitén in Südchile, als er am 3. Mai 2008 ausbrach.

von Blitzen, die sie umzuckten. Rotation, elektrische Entladungen und Wind- oder Wasserhosen sind eigentlich typische Merkmale von Tornados. Was der Seemann damals aber sah, war ein Vulkanausbruch. Ähnliche Phänomene wurden seither immer wieder in vulkanischen Eruptionswolken beobachtet; bislang ließ sich ihr Zustandekommen jedoch nicht recht erklären.

Wissenschaftler um Pinaki Chakraborty von der University of Illinois in Urbana-Champaign haben jetzt ein Modell veröffentlicht, wonach die Vorgänge in Vulkanwolken denen in Tornados gleichen. Sie analysierten dazu eine Serie von Satellitenbildern, die vom Ausbruch des Pinatubo 1991 auf den Philippinen gemacht worden waren. Wie sich zeigte, drehte sich der Schirm der Vulkanwolke um seinen Mittelpunkt. Die Forscher schließen daraus, dass im Inneren der Säule ein Mesozyklon entstanden war, der die Wolke zum Rotieren brachte.

Ein solcher Mesozyklon ist auch das Herzstück eines Tornados. Bei einem Vulkanausbruch bildet er sich, wie Chakraborty und seine Kollegen vermuten, wenn heiße Gase schnell emporsteigen und dabei horizontale Wirbelringe um die Eruptionssäule erzeugen. Der senkrechte Strom reißt diese Ringe dann mit nach oben und verzerrt sie zu vertikalen Schläuchen, aus denen sich ein Zyklon entwickeln kann. Zu den Blitzen kommt es durch Reibung zwischen aufsteigenden und niederfallenden Teilchen. Wie bei Tornados treten sie nicht im Zentrum des Mesozyklons auf, wo die starke Aufwärtsströmung alles mit sich reißt, sondern an der Peripherie.

Nature, Bd. 458, S. 497



INTERTOPICS / LANDOV, CARLOS GUTIERREZ

ARCHÄOLOGIE

Vampirskelett mit Pfahl im Mund

■ Als im Venedig des 15. und 16. Jahrhunderts der schwarze Tod umging und die Medizin keine Heilung kannte, suchte man nach einem Sündenbock – und fand ihn in vermeintlichen Vampiren. Der Legende nach waren dies Pestopfer, die sich zunächst von anderen Verstorbenen ernährten, bis sie genug Kraft gesammelt hatten, um auch unter den Lebenden zu wüten und die Krankheit weiterzutragen. Als Gegenmaßnahme hätten die Venezianer, wie es heißt, potenziellen Blutsaugern – meist an

der Pest verstorbenen Frauen – einen steinernen Pfahl in den Mund gestoßen.

Den handfesten Beweis dafür entdeckten Forscher um Matteo Borrini von der Università degli Studi di Firenze jetzt in einem



MATTEO BORRINI, UNIVERSITÀ DI FIRENZE

In einem Massengrab aus der Zeit der venezianischen Pest um 1576 fand sich dieser Frauenschädel, in dessen Mund ein Steinpfahl steckt.

Massengrab auf der Insel »Lazzaretto Nuovo« in der venezianischen Lagune, die während der Pestepidemie 1576 als Quarantänestation diente. Dort stießen sie auf das Skelett einer Frau, in deren offenem Mund ein Stein steckte. Er war offenbar mit solcher Wucht hineingestoßen worden, dass dabei sogar einige Zähne herausbrachen.

Der mit Pestopfern verbundene Vampirglaube entstand vielleicht, weil den Kranken nach dem Tod oft noch ein Rinnsal von Blut aus dem Mund lief. Mit dem modernen Mythos des nächtlichen Blutsaugers hat er nichts zu tun. Dieser stammt aus südosteuropäischen Volkslegenden und fand erst durch Bram Stokers Horror-Liebesdrama »Dracula« von 1897 große Verbreitung.

Tagung der American Academy of Forensic Sciences

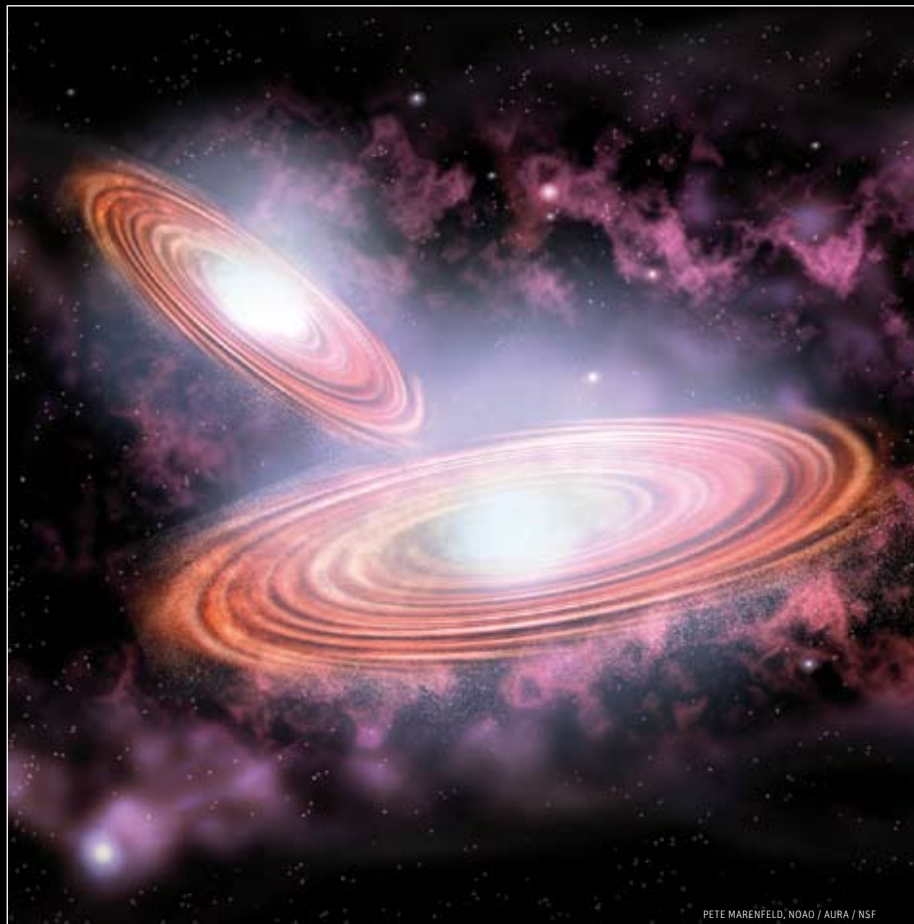
Tanz der Giganten

■ Wenn zwei Galaxien kollidieren, entsteht ein gewaltiger Wirbel aus Sternen und Gas. Im Inneren dieses Hexenkessels sollten sich die Schwarzen Löcher der ursprünglichen galaktischen Zentren umkreisen, bis sie schließlich ineinanderstürzen und verschmelzen. Bislang konnten Physiker diesen Vorgang jedoch nicht beobachten, sondern nur sein Ergebnis entdecken – etwa das Schwarze Loch von mehreren Milliarden Sonnenmassen im Zentrum des uns benachbarten Virgo-Haufens. Nun ist es Todd Boroson und Tod Lauer vom National Optical Astronomy Observatory in Tucson (Arizona) erstmals gelungen, zwei Schweremonster aufzuspüren, während sie noch umeinanderkreisen.

Wie bei einem Wirbelsturm rotiert auch im Gravitationsstrichter eines Schwarzen Lochs die innerste Gasmasse sehr schnell. Dadurch entsteht eine charakteristische breite Emissionslinie. Im Spektrum des Quasars SDSS J153636.22+044127.0 fanden sich jedoch gleich zwei solche Linien, was auf zwei separate Schwarze Löcher hindeutete. Ihre unterschiedlichen Dopplerverschiebungen zeigten zugleich eine große Relativgeschwindigkeit zwischen den Objekten an. Tatsächlich umkreisen die Löcher, wie die genaue Analyse ergab, einander mit einer Periode von etwa 100 Jahren im Abstand von gerade einmal 0,3 Lichtjahren – dem 13. Teil der Entfernung zwischen der Sonne und unserem nächsten Sternennachbarn Alpha Centauri.

Diese Beobachtung stützt die Vorstellung, wonach Galaxien wachsen, indem sie mehrfach mit ihresgleichen verschmelzen.

Nature, Bd. 458, S. 53



PETE MARENFELD, NOAO / AURA / NSF

Erstmals konnten zwei sich umkreisende Schwarze Löcher aufgespürt werden. Im Schaubild sind sie mit ihren leuchtenden Akkretionsscheiben dargestellt.

SOZIALVERHALTEN

Hyänen lernen Rangordnung

■ Bei den Tüpfelhyänen haben die Weibchen das Sagen. Mütter schmieden mit ihren Töchtern oder Schwestern Koalitionen und halten so die Männchen im Rudel in Schach. Ihren einmal gefestigten Rang geben sie dann an ihren Nachwuchs weiter. Wie dies genau geschieht, war bislang unklar. Man vermutete Dominanzgene oder den Einfluss von Hormonen im Mutterleib.

Forscher um Marion L. East vom Institut für Zoo- und Wildtierforschung in Berlin kamen nun zu einem anderen Ergebnis. Sie werteten Daten aus, die über einen Zeitraum von 20 Jahren im Serengeti-Nationalpark sowie im Ngorongoro-Krater in Tansania gesammelt worden waren. Dank DNA-Analysen wussten die Biologen über die verwandtschaftlichen Beziehungen

innerhalb der Hyänenrudel Bescheid. Außerdem war die soziale Stellung jedes einzelnen Tiers bekannt.

Als besonders interessant für die Forscher erwiesen sich 13 Fälle, bei denen neugeborene, verwaiste Hyänen von fremden Weibchen adoptiert worden waren. Als Erwachsene standen diese Jungtiere dann auf einer ähnlichen Stufe in der Hierarchie wie ihre Adoptivmütter. Dagegen unterschied sich ihre soziale Stellung von derjenigen ihrer leiblichen Mutter.

Demnach spielen Gene oder Hormone im Embryonalstadium keine Rolle. East und ihre Kollegen ziehen vielmehr den Schluss, dass junge Tüpfelhyänen ihren späteren Rang von dem sie aufziehenden Weibchen erlernen. Ihre Mutter, gleich ob leiblich



OLIVER HÖNERLZOW BERLIN

Tüpfelhyänenmütter geben ihren eigenen Rang an den Nachwuchs weiter. Das geschieht über soziales Lernen.

oder nicht, kommt ihnen bei Auseinandersetzungen mit rangniederen Weibchen zu Hilfe und schlägt diese in die Flucht. Das Junge erkennt so, welche Tiere es einschüchtern und dominieren kann.

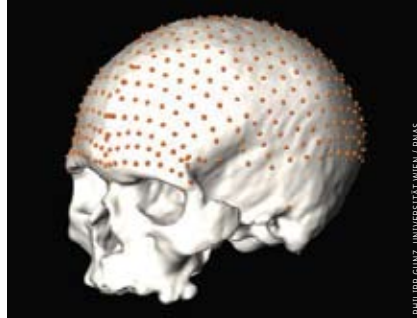
Behavioral Ecology, Online-Vorabveröffentlichung

PALÄANTHROPOLOGIE

Das Wandern war des Menschen Lust

Die Wurzeln der Menschheit liegen in Afrika. Von dort hat sich vor rund zwei Millionen Jahren zunächst der *Homo erectus* über Europa und Asien ausgebreitet. Später – vor etwa 200 000 Jahren – entwickelte sich auf dem Schwarzen Kontinent auch der *Homo sapiens* und besiedelte nach und nach die übrige Welt. Doch wie das im Einzelnen geschah, liegt noch weitgehend im Dunkeln, weil kein genetisches Material zur Verfügung steht, mit dem es gelingen könnte, die Wanderbewegungen zu rekonstruieren.

Deshalb haben Forscher um den Anthropologen Gerhard Weber von der Universität Wien nun fossile Schädelknochen verschiedenster Frühmenschen auf morphologische Merkmale analysiert, um daraus Verwandtschaftsbeziehungen abzuleiten. Mit einem Computertomografen scannen sie rund 200 Schädel und versahen ihre virtuellen Ebenbilder mit jeweils rund 500 repräsentativen Messpunkten. Dies erlaubte in Verbindung mit komplexen ma-



Schädel mit Messpunkten für den anatomischen Vergleich

thematischen Methoden einen exakten anatomischen Vergleich der Funde.

Dem überraschenden Ergebnis zufolge zeichneten sich die frühen modernen Menschen durch eine besonders große Variabilität in ihren Schädeln aus. Zugleich ähneln sie den heute lebenden Menschen stärker als beispielsweise dem Neandertaler oder anderen archaischen Gruppen. Daraus schließen die Wiener Forscher, dass die Besiedlung Eurasiens durch verschiedene Populationen in mehreren Migrationswellen erfolgte. Bevor der *Homo sapiens* aus Afrika aufbrach, hatte er sich dort offenbar schon in diverse räumlich getrennte Fraktionen aufgespalten. Diese erreichten Eurasien vermutlich auch auf unterschiedlichen Wegen.

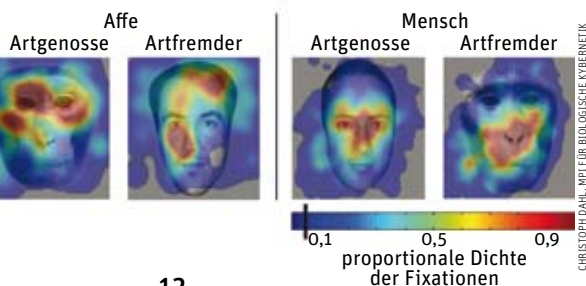
PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

PRIMATEN

Nur Augen für Artgenossen

Wenn wir ein Gesicht betrachten, schauen wir meist zunächst auf die Augenpartie; erst danach wandert der Blick zu Nase und Mund. Christoph D. Dahl vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen und seine Kollegen fragten sich, ob Ähnliches auch für andere Primatenarten gilt. Deshalb verglichen sie in Experimenten die Augenbewegungen von Menschen und Rhesusaffen. Beide mussten sowohl Gesichter von Mitgliedern der eigenen wie der jeweils anderen Art auf Fotos anschauen.

Nur bei Gesichtern ihrer Artgenossen blicken sowohl Menschen als auch Rhesusaffen zuerst auf die Augenpartie.



Wie erwartet blickten die menschlichen Versuchspersonen bei Porträts von Menschen länger auf die Augenpartie als auf Nase oder Mund. Fixierten sie hingegen die Affengesichter, fiel dieser Unterschied weg. Die Rhesusaffen machten es ebenso – nur umgekehrt: Bei den Fotos ihrer Artgenossen schauten sie länger auf die Augenpartie als auf Nase oder Mund. Doch bei den Menschengesichtern zeigten sie keine Präferenz für irgendeine Region.

Rhesusaffen können demnach offenbar unterscheiden, ob sie das Gesicht eines Artgenossen vor sich haben oder nicht. Bei einem artfremden Individuum sind die Augen anscheinend nicht interessanter als andere Bereiche. Genau dasselbe gilt für den Menschen. Bei beiden Spezies entfällt auch das besondere Interesse an der Augenpartie von Artgenossen, wenn die Fotos auf dem Kopf stehen. All dies liefert einen weiteren Beleg dafür, wie nah der Mensch seinen nächsten Verwandten im Tierreich steht.

Current Biology, Bd 19, S. 509

AIDS

Judaskuss der virusinfizierten Zelle

Schon lange weiß man, dass sich der Aids-Erreger, das Humane Immunschwächevirus (HIV), auch direkt von einer Zelle zur nächsten fortpflanzen kann. Das geschieht im Reagenzglas sogar mehr als 1000-mal so schnell wie die Ausbreitung durch freie Viren. Zur Übertragung dienen dabei Kontaktstellen, die als virologische Synapsen bezeichnet werden. Sie bilden sich, wenn eine infizierte Zelle mit einer gesunden zusammentrifft. Die Details des Vorgangs waren bisher jedoch unklar.

Dem sind nun Forscher um Wolfgang Hübner von der Mount Sinai School of Medicine in New York nachgegangen. Dazu markierten sie die HI-Viren mit dem grün fluoreszierenden Protein (GFP). So ließ sich deren Weg mit einem 3-D-Mikroskop verfolgen.



Ein mit grün markierten HI-Viren infizierter Lymphozyt hat an drei andere Zellen ange-dockt. An den Kontaktstellen ist eine An-häufung von Viruspartikeln zu sehen.

Schon nach vier Stunden hatte rund ein Viertel der infizierten Lymphozyten über virologische Synapsen an andere Zellen ange-dockt. An den Kontaktstellen sammelten sich die grün leuchtenden HI-Viren an. Im Fluoreszenzmikroskop war zu sehen, dass sich kleine »Knöpfe« bildeten. Darin knospten, wie elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigten, virusbeladene Bläschen aus. Diese wurden von der angrenzenden Zelle aufgenommen und wanderten in deren Innenraum.

Damit ist es erstmals gelungen, die HIV-Übertragung mittels virologischer Synapsen direkt im Detail zu beobachten. Ein tieferes Verständnis dieses Vorgangs könnte neue Möglichkeiten eröffnen, die Ausbreitung des Aids-Erregers im Körper zu hemmen.

Science, Bd. 323, S. 1743



Vom Winde verweht

Sanddünen auf dem Roten Planeten stehen denen auf der Erde an Schönheit nicht nach. Das beweist diese aktuelle Aufnahme der HiRISE-Kamera auf dem Mars Reconnaissance Orbiter der NASA. Sie zeigt einen 860×1040 Meter großen Ausschnitt aus dem Krater Proctor auf der Südhalbkugel des Mars mit einer Auflösung von 1,5 Metern.

Über einem Wellenmuster aus parallelen Transversalrücken mit quer verlaufenden Rippelstrukturen erhebt sich eine mächtige, flüchtig geriffelte Sanddüne. Sie besteht aus dunklerem, besonders feinem, basaltischem Material und wandert deshalb relativ schnell. Dabei beeinflusst sie auch die Orientierung der Transversalrücken in ihrer Umgebung.

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

Saurier als Superväter

Bei manchen Vogelarten kümmert sich allein das Männchen um den Nachwuchs. Überraschend ergaben jetzt Untersuchungen, dass es bei Dinosauriern, von denen die Vögel abstammen, offenbar genauso war.

Von Jochen Steiner

Dass sich auch Väter intensiv um die Kindererziehung kümmern, ist eine Errungenschaft des 20. Jahrhunderts, jüngst durch die Einführung der Elternzeit zusätzlich gefördert. In der Vergangenheit fiel diese Aufgabe den Müttern zu. Das entspricht der allgemeinen Rollenverteilung unter den Säugtieren, bei denen es mit der väterlichen Fürsorge generell nicht weit her ist; nur bei rund fünf Prozent der Säugerarten beteiligen sich die Männchen an der Aufzucht der Jungen.

Es geht aber auch anders, wie das Beispiel der Vögel zeigt: Hier sind bei weniger als zehn Prozent der Arten die Weibchen allein für die Betreuung des Nachwuchses zuständig. Bei den Neognathae, zu denen die Mehrheit der Vogelspezies von Hühnern bis Sperlingen zählt, kümmern sich beide Elternteile um die Jungen. Und bei den Paleognathae, mit den

Laufvögeln wie dem Strauß als prominenten Vertretern, sind es sogar fast durchweg die Väter allein, welche die Eier ausbrüten.

Bislang war unklar, welches dieser Fürsorgemodelle das ursprüngliche ist. Die Mehrheit der Biologen favorisierte Überlegungen, wie Nancy Tyler Burley von der University of California in Irvine und Kristine Johnson von der University of New Mexico in Albuquerque sie 2002 darlegten. Demnach gab es unter den Vögeln zunächst keine Paarbindung, und die Weibchen sorgten allein für den Nachwuchs. Da die Männchen ihrer Vaterschaft nicht sicher waren, hatten sie keinen Anreiz, Energie für das Brutgeschäft aufzubringen. Sie konnten ihre Zeit besser nutzen, indem sie sich mit möglichst vielen Weibchen verpaarten und so ihren Fortpflanzungserfolg erhöhten. Ein solches System findet sich heute noch bei den Krokodilen, einer Schwestergruppe der Vögel.

Ein Forscherteam um David J. Varricchio von der Montana State University in Bozeman hat nun eine völlig konträre Antwort gefunden: Am Anfang stand demnach überraschenderweise das allein brütende Männchen (*Science*, Bd. 322, S. 1826). Das ergab eine Untersuchung jener Dinosaurier, die als Vorfahren der Vögel gelten. Einige davon, wie *Troodon formosus*, *Oviraptor philoceratops* und *Citipati osmolskae*, brüteten ihre Eier ebenfalls aus. Etliche solche Gelege sind ausgegraben worden, und in einigen Fällen hat sich sogar das auf ihnen sitzende Elterntier erhalten. Sein Geschlecht blieb allerdings offen.

Vergleich der Fürsorgemodelle

Um es zu klären, haben Varricchio und seine Kollegen die Gelegegrößen brütender Dinosaurier mit denen von Vögeln verglichen, bei denen nur das Weibchen, beide Eltern oder ausschließlich das Männchen die Jungen aufzieht, und von Krokodilen, deren Nachwuchs allein vom Muttertier versorgt wird. Bei all diesen Fürsorgemodellen zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Gelegegröße und dem Gewicht erwachsener Tiere.

Allerdings weichen die Geraden für die vier Gruppen deutlich voneinander ab. So ist die Gelegegröße in Relation zum Körpergewicht bei den Neognathae, die den Nachwuchs partnerschaftlich aufziehen, ebenso wie bei den Krokodilen wesentlich kleiner als bei den Laufvögeln. Das dürfte daran liegen, dass beim Strauß und seiner Verwandtschaft das Männchen gleich mehreren Damen den Hof macht und deren Eier dann zusammen ausbrütet.

Auch die bekannten *Troodon*-Gelege sind mit 22 bis 30 Eiern sehr groß. Skelettfunde ausgewachsener Tiere ließen Rückschlüsse auf das Körpergewicht dieser Saurier zu. Indem die Forscher es zur Gelegegröße in Beziehung setzten, er-



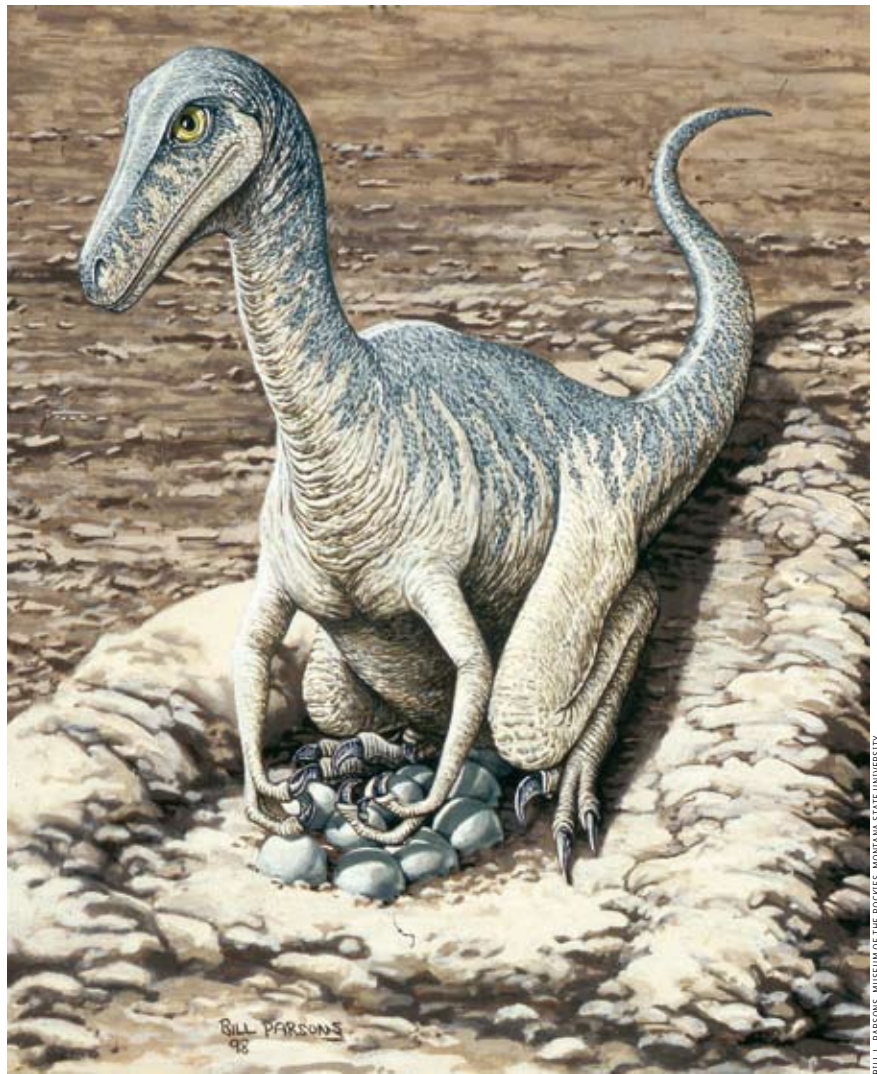
MUSEUM OF THE ROCKIES, MONTANA STATE UNIVERSITY

Dieser Querschnitt eines Röhrenknochens entstammt dem Fossil eines erwachsenen Raubsauriers der Gattung *Troodon*, der auf einem Gelege hockend ausgegraben wurde. Im hohlen Inneren fehlt die schwammige Struktur, in der Weibchen von Vögeln, aber auch von Dinosauriern wie *Tyrannosaurus rex* Minerale für die Produktion der Eierschalen speichern. Auch gibt es in den dichten Knochenwänden keine Hohlräume, die bei weiblichen Krokodilen durch Entzug von Kalzium und Phosphor für die Eier entstehen. Deshalb dürfte es sich bei dem Tier um ein Männchen handeln.

Raubosaurier der Gattung *Troodon* brüteten, wie auf dem Schaubild (rechts) gezeigt, ihre Eier aus. Ihre Gelege (links) waren ungewöhnlich groß, was darauf hindeutet, dass sie von mehreren Weibchen stammten, die ein einzelnes polygames Männchen befruchtet hatte. Das übernahm auch das Brutgeschäft.



DAVID J. WARRICHO, MONTANA STATE UNIVERSITY



BILL L. PARSONS, MUSEUM OF THE ROCKIES, MONTANA STATE UNIVERSITY

hielten sie einen Wert, der auf die Gerade für die Laufvögel fiel. Dasselbe galt für *Oviraptor* und *Citipati*. Das spricht dafür, dass diese Dinosaurier es im Fortpflanzungs- und Brutverhalten mit Strauß und Co. hielten: Die Männchen huldigten der Vielweiberei und zogen die Jungen allein auf.

Ein zweiter Befund stützt diese Schlussfolgerung. Fortpflanzungsfähige Weibchen von Krokodilen haben gewöhnlich kleine Hohlräume in den Knochen, da diesen Kalzium und Phosphor für die Produktion der Eierschalen entzogen wurde. Weibliche Vögel dagegen speichern Minerale für das Eierlegen in schwammartigem Knochengewebe im hohlen Inneren ihrer Röhrenknochen, wo sich das Mark befindet. Gleiche Strukturen fanden sich kürzlich auch bei Weibchen von *Tyrannosaurus*, *Allosaurus* und *Tenontosaurus*.

Die Forscher untersuchten deshalb Oberschenkel-, Wadenbein- und Mittelfußknochen eines erwachsenen *Troodon*, der auf einem Gelege sitzend ausgegraben wurde. Auch Gebeine eines brütenden *Citipati* legten sie unter das Mikroskop. Doch fanden sie keine Hohlräume durch den Entzug von Mineralstoffen, und auch das Innere der Röhrenknochen erwies sich als leer. Also waren es tatsächlich Männchen, die auf den Gelegen saßen.

Damit stellt sich die nächste Frage: Warum entstand die väterliche Fürsorge überhaupt? Einige Wissenschaftler sehen den Grund darin, dass die Eier von *Troodon*, *Oviraptor* und *Citipati* ungewöhnlich groß waren. Die Weibchen brauchten dafür mehr Energie, so dass sie länger mit der Nahrungssuche beschäftigt waren. Außerdem legten sie die Eier nicht alle gleichzeitig wie andere Dinosaurier, sondern nach und nach.

So war es möglicherweise von Vorteil, wenn das Männchen auf der ersten Charge saß, während das Weibchen sich um die Beschaffung von Futter kümmerte, um die Produktion fortsetzen zu können. Wie bei den Vögeln hatten die Eier von *Troodon* und seinen Verwandten nämlich eine Schale aus mehreren Schichten und mussten bebrütet werden. Im Unterschied etwa zu Krokodilen vergruben die Weibchen sie deshalb nicht einfach im Erdreich, sondern legten sie in Bodennester. Ein wärmendes Elternteil musste das Brutgeschäft übernehmen, und wenn das Männchen sich seiner Vaterschaft sicher war, weil es seine Herzdame direkt vor der Eiablage begattete, lag es in seinem eigenen Interesse, dieser Aufgabe nachzukommen.

Jochen Steiner ist freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.

Teilchenmassen exakter denn je berechnet

Physiker konnten die Massen von Teilchen wie Proton und Neutron bisher nur relativ ungenau aus der Theorie ableiten. Mit massivem Computereinsatz und umfangreichen Rechnungen gelang es jetzt erstmals, auf zwei Prozent an die experimentellen Werte heranzukommen.

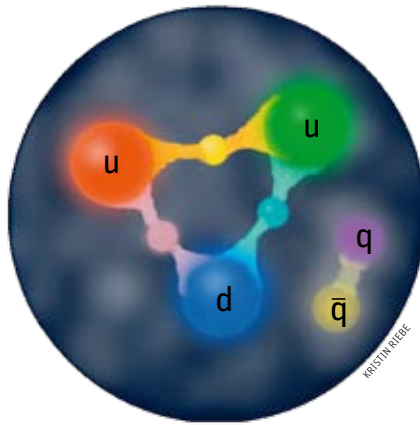
Von Vera Spillner

Aus einer Gleichung die Fülle eines Universums zu erzeugen, das versuchen alle großen Theorien, gleich ob sie quantenmechanische oder kosmologische Phänomene beschreiben. Dass das Prinzip des Reduktionismus – der Rückführung komplexer Erscheinungen auf einfache Gesetzmäßigkeiten – prinzipiell funktioniert, hat die theoretische Physik wiederholt bewiesen. So gilt Newtons Bewegungsgleichung für sämtliche Massen auf der Erde und anderswo: Äpfel und Planeten gehorchen ihr gleichermaßen.

Wie tief Physiker in den vergangenen Jahren auch in den Mikrokosmos hinabgestiegen sind, stets fanden sie bestätigt, dass immer fundamentalere Theorien makroskopische Phänomene exzellent beschreiben. Doch mit jedem neuen Beschleuniger und dramatisch zunehmender Computerleistung steigt die Genauigkeit, mit der Physiker ihre theoretischen Vorhersagen testen können. Nur wenn sich diese bei immer genauerer Überprüfung den Messwerten noch weiter annähern, kann eine Theorie ihren Wahrheitsanspruch bewahren.

Eine international zusammengesetzte Gruppe von Physikern um Zoltan Fodor von der Universität Wuppertal hat nun die Quantenchromodynamik (QCD) unter die Lupe genommen und ihre Gültigkeit mit dem Superrechner »Jugene« am Forschungszentrum Jülich strenger denn je überprüft. Im Fokus ihrer Betrachtung stand dabei das Massenspektrum der leichten Hadronen – jener Teilchen, die sich wie Protonen oder Neutronen aus Quarks zusammensetzen.

Anders als bei vorangegangenen Versuchen wollten die Forscher sämtliche von der QCD beschriebenen Effekte berücksichtigen. Bislang war ein solcher Anspruch daran gescheitert, dass er einen zu hohen Rechenaufwand erforderte. Alle Versuche, die Hadronenmassen allein aus den Gleichungen der QCD



Die Masse eines Protons setzt sich aus den über Gluonen verbundenen konstituierenden Quarks (u, u, d), aus virtuellen Seequarks des Vakuums (Quark-Antiquark-Paaren: q, \bar{q}) und aus der Wechselwirkungsenergie dieses Gesamtsystems zusammen.

plus Naturkonstanten abzuleiten – Physiker sprechen von Ab-initio-Rechnungen –, hatten die experimentell bestimmten Werte folglich nur auf 10 bis 20 Prozent genau reproduziert.

Lag das an den vorgenommenen Vereinfachungen, oder steckte doch vielleicht ein Mangel der Theorie dahinter? Mit dem erhöhten Rechenaufwand hofften Fodor und seine Kollegen Ergebnisse zu erhalten, die deutlich näher an den realen Massen lagen. Damit würde die QCD an Glaubwürdigkeit gewinnen.

Die Ab-initio-Berechnung eines Spektrums – wie hier der Hadronenmassen – läuft im Prinzip darauf hinaus, die Lösungen einer Fundamentalgleichung aufzufinden, indem man nur Naturkonstanten einsetzt. Es gibt dafür viele Beispiele; ein prominentes betrifft den Wasserstoff. Allein durch Einsetzen der Elektronen- und Protonenmasse und der elektromagnetischen Kopplungsstärke in die quantenmechanische Schrödingergleichung lassen sich sämtliche Energieniveaus dieses Atoms exakt berechnen.

Das Gleiche wollten Fodor und seine Kollegen für die Hadronen schaffen. Sowohl die Massen der aus einem Quark und einem Antiquark bestehenden Mesonen als auch die der Baryonen, die wie das Proton aus drei Quarks aufgebaut sind, sollten nur durch Einsetzen dreier Naturkonstanten in die Gleichungen der QCD präzise abgeleitet werden.

Aus zwei Gründen ist diese Aufgabe um vieles anspruchsvoller als die Berechnung des Wasserstoffspektrums. Erstens hat man es mit zusammengesetzten Teilchen statt mit Energieniveaus zu tun, und zweitens lassen sich Quarks, anders als Elektron und Proton, nicht isoliert beobachten.

Schon der erste Unterschied bedeutet eine Riesenhürde. Um die Masse eines zusammengesetzten Teilchens zu berechnen, genügt es nicht, einfach die Werte seiner Quark-Bausteine zu addieren. Das sieht man schnell am Beispiel des Protons, das aus einem down- und zwei up-Quarks besteht. Deren Massen in Energieeinheiten lassen sich feldtheoretisch zu etwa fünf beziehungsweise drei Millionen Elektronvolt (MeV) abschätzen. Das ergibt zusammen 11 MeV. Tatsächlich bringt das Proton jedoch 939 MeV auf die Waage.

Rolle der Gluonen und Seequarks

Dieser Unterschied macht eine Hauptschwierigkeit der QCD deutlich: Massen entstehen auf komplexe interaktive Weise. Zwischen den Quarks bewegen sich die Austauschteilchen der starken Kraft, die so genannten Gluonen. Auch diesen kann eine Masse zugeordnet werden. Überdies entstehen und verschwinden im umgebenden Vakuum fortlaufend weitere Quark-Antiquark-Paare – die so genannten Seequarks. Sie tragen im Mittel ebenfalls zur Masse eines Hadrons bei.

Das Vakuum bebt, und jedes Teilchen wechselwirkt mit jedem. Diesen nichtlinearen, relativistischen Vielteilchenprozess kann die QCD zwar theoretisch be-

schreiben. Ihn zu berechnen überstieg bislang jedoch die Kapazität selbst der leistungsfähigsten Supercomputer.

Die zweite Hürde ist, dass sich zu einem Hadron verbundene Quarks nicht trennen lassen. Versucht man es, muss man so viel Energie aufwenden, dass im sich auftuenden Zwischenraum neue Quarks aus dem Vakuum entstehen, mit denen sich die Teilchen sofort wieder verbinden. Auch im Quark-Gluon-Plasma, das bei extrem hohen Energien entsteht, kann man Quarks nicht isoliert beobachten und ihre Masse bestimmen. Dafür müsste man sie nämlich ein Stück weit frei fliegen lassen, um ihren Impuls zu ermitteln. Die betreffenden Wegstrecken im Quark-Gluon-Plasma sind jedoch zu kurz. Die Natur breitet also einen Schleier über die Massen der Quarks, so dass man sie nicht direkt für eine Ab-initio-Berechnung der Hadronenmassen heranziehen kann.

Beim Wasserstoffatom verhält es sich ganz anders. Elektron und Proton lassen sich problemlos isolieren. Damit kann man auch ihre Massen experimentell be-

stimmen und in die Schrödingergleichung einsetzen.

Trotz der enormen Schwierigkeiten schafften es Fodor und seine Kollegen erstmals, beide Probleme zu umgehen. Grundlage war ein schon 1974 von Kenneth Wilson eingeführter mathematischer Trick, dessen sich Teilchenphysiker seither gerne bedienen. Dabei wird die kontinuierliche Raumzeit durch ein Gitter ersetzt, in dem Quarks nur auf den Knotenpunkten sitzen und Gluonen sich ausschließlich dazwischen bewegen können. Am Schluss lässt man den Gitterabstand gegen null gehen, um wieder beim Kontinuum zu landen. Diese Vereinfachung erlaubt den Einsatz der statistischen Monte-Carlo-Methode, eines numerischen Näherungsverfahrens, das komplexe Probleme berechenbar macht.

Im Interesse einer hohen Genauigkeit wählten die Forscher das betrachtete Gesamtsystem relativ groß und die Gitterabstände klein. Vor allem aber bezogen sie die Seequarks ein, was dank »Jugene« und großzügig zugestandener Rechenzeit erstmals möglich war.

Da man die Massen der Quarks nicht genau kennt, mussten die Forscher sie zunächst kalibrieren. Dazu drehten sie an den Werten für die näherungsweise gleich gesetzte Masse des up- und down-sowie des etwas schwereren s-Quarks, das nur in exotischen Partikeln vorkommt, und variierten zugleich die Kopplungsstärke der starken Kraft. Das probierten sie so lange, bis die QCD-Gleichungen drei bekannte Massen relativ leichter Hadronen exakt reproduzierten: des Pions, des Kaons und des Sigma-Teilchens.

Würde sich aus den Fundamentalgleichungen mit den so kalibrierten Quarkmassen und der Kopplungsstärke das restliche Hadronenspektrum exakt extrapolieren lassen? Wenn ja, hätten die Forscher gezeigt, dass die QCD bei strikterer Anwendung auch ein genaueres Ergebnis liefert. Dies würde sie als gute Fundamentaltheorie ausweisen. Und in der Tat: Der Algorithmus reproduzierte die Teilchenmassen von neun Hadronen auf bis zu zwei Prozent, genauer als je zuvor. Das kann man nur als großen Erfolg für die QCD werten.

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®

Mehr Energie für das Gehirn.

*** 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: März 2009 T/03/09/1



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

Nutzen Sie die Himmelscheibe von Nebra in ihrer Originalverwendung! Als geprägter Blechkalender (Maße 30 x 20 cm) ist sie ein praktischer Blickfang für zu Hause oder Ihr Büro!



Weitere
aktuelle
Präsente unter
spektrum.de/mai



Diese CD bietet Ihnen alle Spektrum-Monatshefte inkl. Bildern des vergangenen Jahrgangs im PDF-Format. Zusätzlich enthält sie noch eine Registerdatenbank mit Suchfunktion bis zur Erstausgabe 1978 sowie das spektrumdirekt-Archiv mit über 10.000 Artikeln (Register und spektrumdirekt nur für Windowssysteme).

EIN ABO – VIELE VORTEILE

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

Ihr Zugang zu den Onlinevorteilen:

www.spektrum.de/plus

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

LESER WERBEN LESER:

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



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



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

SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751



E-MAIL: service@spektrum.com

www.spektrum.de/mai

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/mai

MINIABO

SIE MÖCHTEN SPEKTRUM
DER WISSENSCHAFT GERNE
NOCH TESTEN?

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

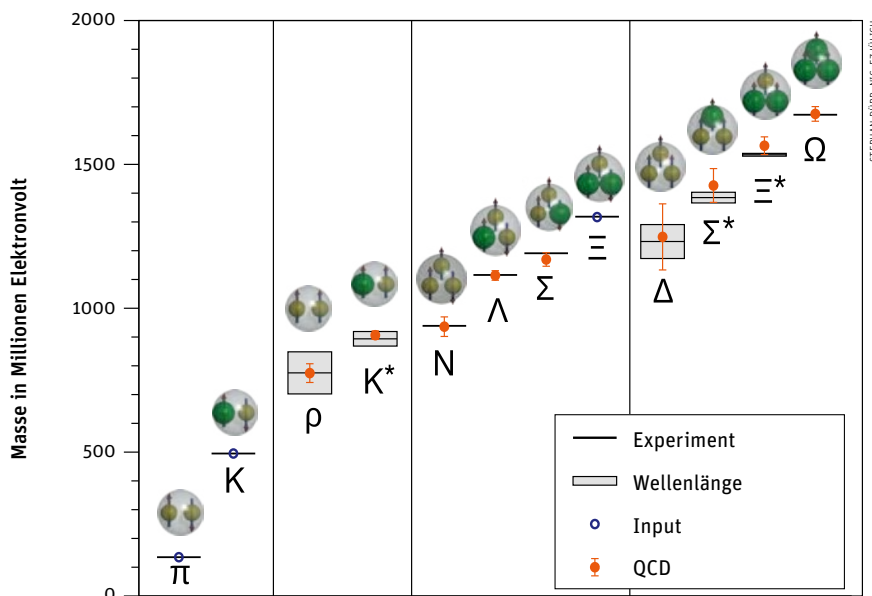
www.spektrum.de/mai

PRODUKT DES MONATS

Magnetschwebeset Maglev 3:
Die Neodymmagnete ziehen sich an, während das Graphitplättchen diamagnetisch von den Magneten abgestoßen wird und somit schwebt.
Ahornbox; Maße: 40 × 40 mm;
Preis für Abonnenten: € 23,-
inkl. Versand Inland (statt € 28,-)

www.spektrum.de/plus





Nachdem die Parameter der Quantenchromodynamik so eingestellt waren, dass die Massen dreier Hadronen (π , K und Ξ) reproduziert wurden, ließen sich die anderen leichten Hadronenmassen mit Hilfe der Theorie sehr genau berechnen. In der Grafik stehen gelbgrüne Kugeln für up- und down-, größere, dunkelgrüne Kugeln für strange-Quarks; die Pfeile symbolisieren die Spins der Bausteine. Antiteilchen sind nicht gekennzeichnet.

Drei Parameter mussten die Wissenschaftler fixieren – und somit einen Punkt im Parameterraum aller möglichen Kombinationen von up/down- und strange-Quark sowie der Kopplungsstärke auswählen. »Unsere Welt ist dieser eine Punkt«, sagt Dürr, »und es gibt auch nur einen solchen Punkt, der zu den Rechnungen passt.«

Natürlich würden die Physiker gerne die Quarkmassen aus einer noch fundamentaleren Theorie exakt ableiten können. Mit dem Standardmodell der Teil-

chenphysik, so erfolgreich es bisher war, ist das jedoch nicht möglich. Deshalb richtet sich der Blick derzeit gebannt nach Genf, wo der Large Hadron Collider demnächst Informationen darüber liefern soll, wie die Erweiterung dieses Modells aussehen könnte.

Auch wie sich die QCD eines Tages in eine noch ausstehende Universaltheorie des Mikro- und Makrokosmos einfügen wird, welche die Gravitation mit den Gesetzen der Quantenmechanik verbindet, ist bislang ungewiss. Immer-

hin bedeutet der Quark-Einschluss eine prinzipielle Grenze für den Reduktionismus – eine Tatsache, mit der sich theoretische Physiker nur ungern abfinden. Dennoch ist die QCD heute eine der wichtigsten Fundamentaltheorien. Schließlich beschreibt sie äußerst erfolgreich jenen Teil des Weltalls, der aus Hadronen besteht – und dazu gehört fast die gesamte sichtbare Materie.

Vera Spillner hat theoretische Physik studiert und promoviert derzeit in Philosophie.

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

Mars-Oasen auf der Spur?

Die Entdeckung von Karbonaten auf dem Mars lässt dessen Geschichte in einem lebensfreundlicheren Licht erscheinen. Zugleich nährt der Nachweis von Methanwolken die Hoffnung, dass auf dem Roten Planeten vielleicht sogar heute noch Mikroben vorkommen.

Von Thorsten Dambeck

Karbonathaltiges Gestein bildet sich, wenn Wasser mit darin gelöstem Kohlendioxid im Boden auf Elemente wie Kalzium, Magnesium oder Eisen trifft. Lange hatten Planetenforscher auf dem Mars erfolglos danach gefahndet. Jetzt haben es Bethany Ehlmann von der Brown University in Providence (Rhode Island) und Kollegen aus den USA und Frankreich endlich entdeckt – auf der Nordhalbkugel des Roten Planeten, westlich des Isidis-Einschlagbeckens (*Science*, Bd. 322, S. 828). Dort zerfurcht das Bruchsystem von Nili Fossae auf einer Länge von fast 700 Kilometern die Landschaft. Seine Entstehung reicht zu-

rück in das früheste Marszeitalter vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren.

Die Region Nili Fossae steht schon seit Längerem unter Beobachtung; denn Satelliten, die den Mars umkreisen, haben dort in den letzten Jahren so genannte Phyllosilikate aufgespürt. Auch diese Tonminerale dürften unter der Einwirkung von Wasser aus Vulkangestein entstanden sein – allerdings ohne Mitwirkung von Kohlendioxid. Karbonate fanden sich hingegen bisher nur in winzigen Mengen in Staubteilchen, die in der Gashülle des Mars schweben, oder in Einschlüssen von Meteoriten, die vom Mars zu uns gelangt sind.

Als trotz intensiver Suche auf der Marsoberfläche keine Spur von Karbo-

natgestein zu entdecken war, fragten sich die Exogeologen natürlich nach dem Grund – und fanden ihn in einem Wandel der Umweltbedingungen vor etwa 3,8 Milliarden Jahren. Bis dahin gab es auf dem Roten Planeten vermutlich für längere Zeit reichlich Wasser. Zusammen mit dem Kohlendioxid in der noch dichten Gashülle sollte es für die Verwitterung des Oberflächengesteins gesorgt haben. Dabei sind wohl größere Mengen Karbonat entstanden.

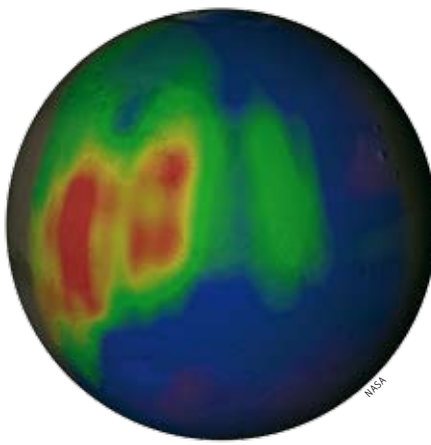
Ähnliches geschah auf der jungen Erde. Auch dort wurde der überwiegende Anteil des Kohlendioxids der Uratmosphäre in Karbonatgestein gebunden. Auf dem Mars änderten sich jedoch die Bedingungen, als ausgedehnter Vulkanis-

mus den Säuregehalt des Wassers stark steigen ließ, was auf der geologisch komplexeren und belebten Erde nicht geschah. Da Karbonate in saurem Milieu nicht stabil sind, lösten sie sich auf.

Messungen des »Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars« (CRISM) zeigen nun, dass dieses Bild nicht ganz stimmt. Das Instrument umkreist seit drei Jahren mit dem »Reconnaissance Orbiter« der US-Raumfahrtbehörde Nasa unseren Nachbarplaneten. Es registriert sichtbares sowie infrarotes Licht bei Wellenlängen zwischen 400 und 4050 Nanometern – immer auf der Suche nach der Signatur von Mineralien, die auf die frühere Gegenwart von Wasser hindeuten. Dabei erfasst CRISM nach und nach die gesamte Oberfläche.

Die nun registrierten Spektren weisen insbesondere auf Magnesiumkarbonat hin. Es könnte sowohl im Boden in heißem Grundwasser unter hohem Druck als auch an der Oberfläche in fließenden Gewässern entstanden sein – wobei Letztere bei den tiefen Temperaturen und dem geringen Luftdruck auf dem Mars heute allenfalls kurzfristig vorkommen.

Was bedeuten nun die jüngsten CRISM-Resultate? Man könnte sie als Zeichen dafür werten, dass die Gashülle des Mars, die fast nur Kohlendioxid enthält und recht dünn ist, einst erheblich



dichter war. »Bei den Karbonaten, die wir mit CRISM beobachtet haben, handelt es sich um regionale Funde und nicht um globale«, schränkt Ehlmann jedoch ein. Die Menge sei deshalb zu begrenzt, um eine dichte Uratmosphäre aus Kohlendioxid auf dem Mars zu belegen. Allerdings zeige der Fund, dass vor rund 3,5 Milliarden Jahren nicht überall saure Umweltbedingungen herrschten. Vielmehr gab es offenbar auch Stellen mit neutralem oder sogar basischem Milieu. Eine solche Vielfalt wäre günstig für die Entwicklung von Leben gewesen. »Zumindest haben wir eine Region gefunden, in der die Bedingungen lebensfreundlicher waren«, meint Ehlmann mit der vorsichtigen Zurückhaltung der Wissenschaftlerin.

Bis vor Kurzem war Nili Fossae als mögliches Zielgebiet für den nächsten Nasa-Rover in der Diskussion, das »Mars Science Laboratory« (MSL). Derzeit

Drei 2003 nachgewiesene Methanwolken enthielten insgesamt 42000 Tonnen des Gases. Sie lösten sich viel schneller auf, als mit dem Abbau durch das UV-Licht der Sonne erklärbar ist. Vielleicht wurde das Methan durch stark oxidierende Verbindungen im Marsstaub wie Wasserstoffperoxid zersetzt. Denkbar wäre aber auch, dass bislang unbekannte Mikroben das Gas abbauten.

zählt es nicht mehr zu den Topkandidaten, doch das könnte sich nun ändern. Denn nicht nur die Karbonatfunde lassen die Region wieder interessant erscheinen: Hinzu kommt die Entdeckung rätselhafter Methanemissionen.

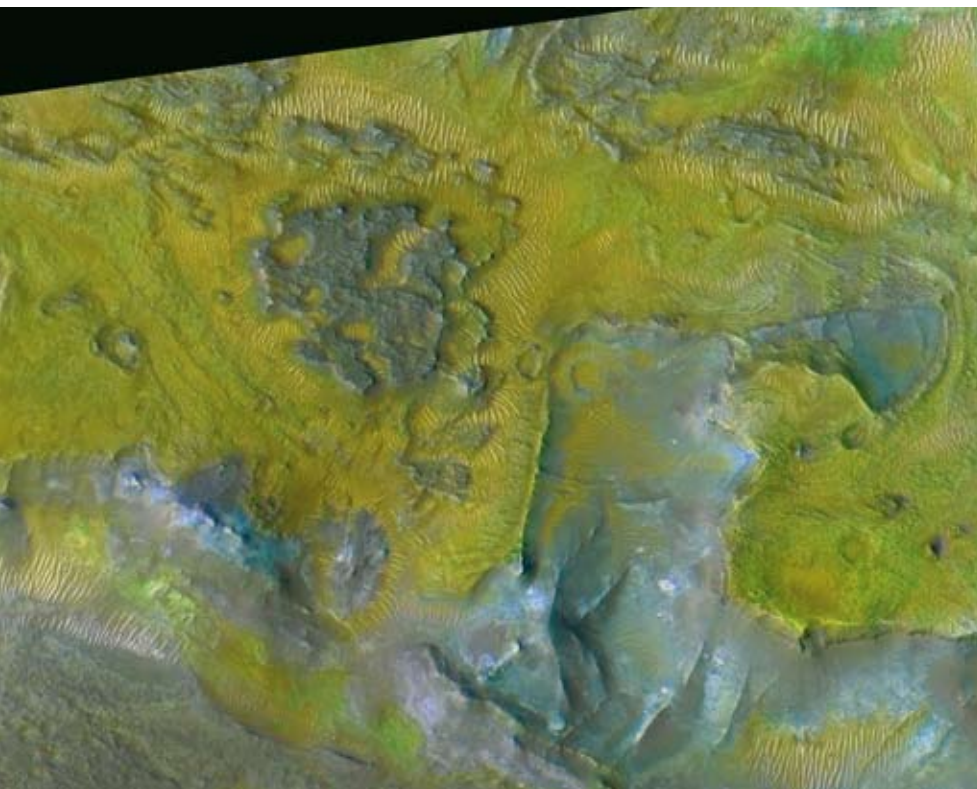
Quellgebiete für Marsmethan

Schon 2004 meldeten mehrere Wissenschaftler den Fund geringer Spuren von Methan auf dem Mars. Ein Team um Vittorio Formisano vom Institut für die Physik des Interplanetaren Raums in Rom stützte sich dabei auf Daten des europäischen Satelliten Mars-Express. Die Entdeckung war aufregend, denn Methan gilt als so genannter Biomarker, der auf biologische Aktivität hindeuten kann. So stammt dieses Gas in der irdischen Lufthülle zu etwa 90 Prozent von Lebewesen.

Für den Mars kämen sowohl die biologische Erzeugung als auch anorganische Prozesse in Frage, schreibt Michael Mumma vom Goddard-Raumfahrtzentrum der Nasa in Greenbelt (Maryland) zusammen mit US-Kollegen in einem Beitrag, der kürzlich bei »Science« erschien (*Bd. 323, S. 1041*). Außer als Stoffwechselprodukt lebender Mikroben kann Methan zum Beispiel durch vulkanische Prozesse oder bei der Oxidation von Eisen in Abwesenheit von Sauerstoff entstehen.

Durch neue Beobachtungen von der Erde aus gelang es Mummas Team, die Emissionsgebiete relativ genau zu orten.

Diese Nahaufnahme zeigt einen 2,5 Kilometer breiten Ausschnitt des zerklüfteten, 3,5 Milliarden Jahre alten Geländes von Nili Fossae. Ein hoch aufgelöstes Bild der Kamera HiRISE wurde mittels Infrarotdaten des »Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars« (CRISM) – beide Instrumente befinden sich an Bord der Nasa-Sonde »Reconnaissance Orbiter« – künstlich angefärbt. Zu sehen sind Schichten, die das Silikatmineral Olivin enthalten (gelb). Es ist meist mehr oder weniger zu Karbonat verwittert (hellgrün).



Dazu zählen außer Nili Fossae die von Kratern geprägte Hochebene Terra Sabae und die Vulkanregion Syrtis Major.

Die Forscher machten ihre Messungen mit zwei Großteleskopen auf Hawaii. Dabei schickten sie das Licht des im Fernrohr erzeugten Bildes durch einen schmalen Spalt und zerlegten es in seine Spektralfarben. Aus mindestens zwei Absorptionslinien des Methans ermittelten sie dessen jeweilige Konzentration. Mit der Zeit kamen durch die Rotation des Planeten unterschiedliche Regionen in Sicht. So entstand eine Karte der Methanverteilung, die rund 90 Prozent der Marsoberfläche abdeckt.

Die Daten erfassen einen Zeitraum von drei Marsjahren, was rund sieben Jahren auf der Erde entspricht. Laut Gerónimo Villanueva von der Catholic University of America in der US-Hauptstadt Washington sind auffällige saisonale Variationen zu beobachten. So wird Methan hauptsächlich im Frühjahr und Sommer freigesetzt, wenn die Temperaturen vergleichsweise hoch sind.

Die stärkste Aktivität trat 2003 auf: Die methanreichste Wolke enthielt damals etwa 19 000 Tonnen des Gases und erreichte eine Konzentration bis immerhin 0,045 ppm (millionstel Volumenanteilen), was etwa dem 40. Teil des ir-

dischen Durchschnittswerts entspricht. Mit weiteren Messungen wollen die Forscher die Quellgebiete nun stärker eingrenzen. Vielleicht lassen sich dann bestimmte geologische Formationen identifizieren, aus denen das Gas entweicht. Das würde genauere Rückschlüsse auf seinen Ursprung erlauben. Noch immer scheint eine anorganische Entstehung am wahrscheinlichsten. Sollte sich jedoch erweisen, dass das Methan von verborgenen Oasen des Lebens stammt, wäre die Sensation perfekt.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und freier Wissenschaftsautor in Heidelberg.

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

Mit GPS den Temperaturentrend messen

Eine Methode aus der Planetologie hilft seit Kurzem auch die Erdatmosphäre zu erkunden. Davon profitieren insbesondere die Klimaforscher.

Von Sven Titz

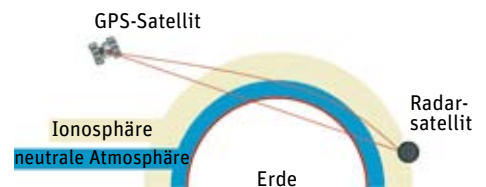
Seit vielen Jahren plagt Meteorologen ein Problem: Wollen sie präzise ermitteln, ob sich der Zustand der Luft hülle hoch über der Erde dauerhaft verändert, werden sie von ihren Messsystemen im Stich gelassen. Die Instrumente, mit denen sie die Temperatur und andere meteorologische Größen in der Atmosphäre bestimmen, sind zu ungenau. Das hat zu heftigen Auseinandersetzungen um Klimatrends geführt, die bis heute andauern. Doch nun zeichnet sich eine Lösung ab. Ein neues Messverfahren, das Signale von GPS-Satelliten nutzt, könnte die Genauigkeit von Klimabeobachtungen auf eine neue Stufe heben und so dem Streit bald ein Ende bereiten.

Der Ärger der Meteorologen mit den Klimatrends hat mehrere Gründe. Bei den Satellitenmessungen im Mikrowellenbereich, die zur Bestimmung der Lufttemperatur dienen, kommt es zu einer systematischen Drift, weil die Satelliten allmählich absinken und die Empfindlichkeit der Messsonden mit der Zeit nachlässt. Außerdem ließ sich beim Wechsel von einem künstlichen Erdtrabanten auf den nächsten bisher nicht garantieren, dass die neuen Instrumente ausreichend auf die alten abgestimmt sind, um deren Messreihen ohne Sprung

in den Daten fortzuschreiben. Wettermessungen wiederum heizen sich bei Sonnenbestrahlung auf, was ebenfalls die Temperaturmessungen verfälscht. Der Fehler lässt sich nicht vollständig herausrechnen und kann sich darum auch auf den abgeleiteten Klimatrend auswirken.

Die alternative neue Methode nennt sich Radiookkultation. Wissenschaftler in Stanford haben sie 1962 erstmals zur Erkundung der Marsatmosphäre vorgeschlagen. Später wurde damit fast jeder Planet unseres Sonnensystems untersucht – nur die Erde nicht. Erst vor einigen Jahren kam auch sie an der Reihe.

Bei der Radiookkultation nutzt man aus, dass Funksignale abgelenkt werden, wenn sie unter einem sehr flachen Winkel in die Gashülle eines Planeten einfallen. Man kann sich das ähnlich wie beim Sonnenuntergang vorstellen – nur dass hier nicht die Sonne unter den Horizont sinkt, sondern ein Satellit mit einem Funksender, der von einem anderen Satelliten »beobachtet« wird (siehe Grafik). Das Verfahren funktioniert natürlich auch beim »Aufgang« des funkenden Objekts. Die Ablenkung des Signals äußert sich in einer längeren Laufzeit und erlaubt Rückschlüsse auf die Dichte der Atmosphäre. Daraus wiederum kann man bei trockener Luft, was ab der oberen Troposphäre in sehr guter Näherung



Die Radiookkultationsmethode beruht darauf, dass die Strahlung eines Radarsatelliten von der irdischen Lufthülle abgelenkt wird, wenn er, von einem Messsatelliten aus gesehen, in der Nähe des Horizonts steht. Aus dem Ablenkungswinkel und der Zeitverzögerung des Signals lässt sich die Dichte der Atmosphäre für eine bestimmte Höhe ermitteln und daraus wiederum mit hoher Genauigkeit die Lufttemperatur ableiten.

gilt, direkt die Temperatur ableiten; in bodennahen Schichten werden dagegen Zusatzinformationen über die Luftfeuchte benötigt. Was die Erde betrifft, eignen sich die Satelliten des Global Positioning System (GPS) hervorragend für das Messverfahren, weshalb man auch von GPS-Radiookkultation spricht.

Schon 1995 fand im Rahmen der Mission GPS/MET der erste erfolgreiche Test des Verfahrens statt. Seitdem wurde es von verschiedenen Satelliten mit GPS-Empfängern vielfach erprobt und verfeinert. CHAMP, SAC-C, GRACE und Metop-A heißen einige dieser künstlichen Erdtrabanten, von denen die meisten ursprünglich für ganz andere Forschungsfragen konzipiert waren.



Spenden
Sie
Ihr
Wissen

für
Wikipedia

SPENDEN SIE IHR WISSEN FÜR WIKIPEDIA

Neue Autoren für die freie Enzyklopädie Wikipedia zu gewinnen und hochwertige Artikel zu generieren ist eine wichtige Aufgabe. Gemeinsam mit Spektrum der Wissenschaft und der Akademie der Wissenschaften und Literatur in Mainz verleiht Wikimedia Deutschland 2009 zum dritten Mal die Zedler-Medaille für herausragende neue Enzyklopädie-Artikel in den Kategorien Naturwissenschaften und Geisteswissenschaften. Benannt ist der Preis nach Johann Heinrich Zedler, dessen „Zedlersches Universallexikon“ zwischen 1732 und 1754 in 64 Bänden und vier Supplementbänden erschien und als größtes bis dahin gedrucktes Universallexikon des Abendlandes gilt. Das Zedler'sche Lexikon war die erste Enzyklopädie, an der eine Redaktion von Fachgelehrten mitarbeitete und die auch Biografien lebender Persönlichkeiten enthielt.

Sind Sie selbst Experte? Dann machen Sie mit:

TEILEN SIE IHR WISSEN MIT ANDEREN!

Ihren Beitrag können Sie bis zum 15. Oktober 2009 bei Wikimedia Deutschland einreichen. Sie stellen Ihre Arbeit unter einer freien Lizenz zur Verfügung, so dass der Artikel anschließend in der Wikipedia veröffentlicht werden kann.

Über die Vergabe des Preises entscheidet eine Jury, der Wissenschaftler der Mainzer Akademie, Mitglieder der Autorenschaft der deutschsprachigen Wikipedia sowie ein Redakteur des Verlags Spektrum der Wissenschaft angehören. Der jeweils beste Artikel aus den Kategorien „Naturwissenschaft“ und „Geisteswissenschaft“ erhält neben der Zedler-Medaille ein Preisgeld in Höhe von je 2.500 Euro.

Eine ausführliche Anleitung für das Verfassen von Wikipedia-Artikeln finden Sie unter

http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Wie_schreibe_ich_gute_Artikel.

Einige besonders gelungene Beispiele finden sich unter

http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Exzellente_Artikel.

Die Teilnahmebedingungen stehen unter

<http://www.wikimedia.de/zedler> zur Verfügung.

Wir freuen uns auf Ihren Beitrag!



Springers Einwürfe

Tierische Schmerzen

Was empfinden sprachlose Lebewesen?

Seit 1. April dürfen deutsche Schweine nur noch unter lokaler Betäubung kastriert werden, las ich und dachte erst: ein typischer Aprilscherz. Dass man seit Langem allein in Deutschland jährlich 25 Millionen Ferkeln mit einem Messer die Hoden abschneidet, war mir ebenso neu wie der Grund: Das Fleisch jedes dritten Ebers strömt sonst einen urinähnlichen Geruch aus, der den Kunden nicht schmeckt.

Die Nachricht gab mir zu denken: Reicht die lokale Betäubung aus, oder sollte man – wie in der Schweiz und den Niederlanden – die armen Schweine unter Vollnarkose kastrieren? Ist der Eingriff überhaupt nötig? Immerhin sondern zwei Drittel aller männlichen Schweine keinen Ebergeruch ab.

Die grundsätzliche Frage ist: Was wissen wir überhaupt über Schmerz und Stress bei Tieren? Sie können uns ihre Empfindungen ebenso wenig differenziert mitteilen wie ein schreiender Säugling. Doch wer je ein Schwein auf dem Weg zur Schlachtbank gesehen hat, vergisst nie, wie tierische Angst aussieht.

Sprachloses Verhalten bleibt interpretationsbedürftig, aber der Pegel des Stresshormons Cortisol im Blut ist ein objektiver Indikator. So weiß man aus einer Untersuchung an der Universität München, dass bei Schweinen, denen vor der Kastration ein Schmerzmittel verabreicht wurde, der Cortisolspiegel bei dem Eingriff nicht steigt.

Ansonsten ist über Stress bei Tieren erstaunlich wenig bekannt. Ein Bericht des National Research Council der USA weist auf enorme Lücken und seit Jahrzehnten mangelnde Förderung der einschlägigen Forschung hin (*Nature*, Bd. 458, S. 394). Das heißt nun nicht, man wüsste gar nichts über tierische Qualen und deren Linderung, doch das Wissen stammt fast ausschließlich aus medizinischen Untersuchungen von menschlichem Schmerz an Tiermodellen. Für Studien, die von vornherein das relative Wohlbefinden von Labortieren zum Ziel haben, gibt es kaum Forschungsgeld. Selbst Tierschutzorganisationen haben daran wenig Interesse, da sie prinzipiell gegen Tierversuche eingestellt sind.

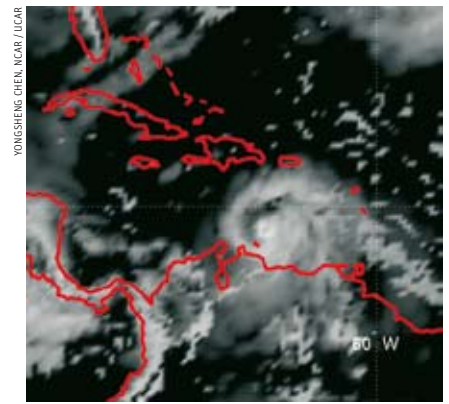
Bleibt die Hoffnung auf kommerzielle Interessen. In der Tat hat der Lebensmittelhandel die Betäubung bei Schweinekastration von sich aus eingeführt, um das Image bei den Kunden zu heben. Und die Pharmaindustrie freut sich natürlich über zusätzlichen Absatz ihrer Produkte. Darum darf man auch der Schmerzforschung an beliebten Haustieren wie Hund und Katze eine gewisse Zukunft vorhersagen – ebenso der an Hühnern, denn wir verspeisen nun einmal lieber ein Brathähnchen, das ein stressfreies Leben hinter sich hat.

Je ferner uns ein Tier steht, ob in der evolutionären Verwandtschaft oder im alltäglichen Umgang, desto mehr erlahmt freilich unser Interesse an seinem Befinden. Die Forschung an Primaten regt Tierschützer viel mehr auf – wie kürzlich an der Universität Bremen – als das eintönige Dasein unzähliger Labormäuse, und was in Salamandern, Fischen oder Würmern vorgeht, die häufig für neurologische Experimente verwendet werden, kümmert uns kaum.

Doch das ist, wie die Autoren der erwähnten Studie anmahnen, ein bornierter Standpunkt. Wenn wir Tiere nur unter dem Aspekt ihrer Menschenähnlichkeit beurteilen und als Tiermodell heranziehen, entgehen uns vielleicht wichtige Erkenntnisse. Das Erforschen des Schmerzes von Tieren um seiner – und ihrer – selbst willen verspricht Einblicke in die innere Verwandtschaft allen Lebens, die nicht nur unsere wissenschaftliche Neugier befriedigen, sondern letztlich auch helfen könnten, menschliches Leid besser zu lindern.



Michael Springer

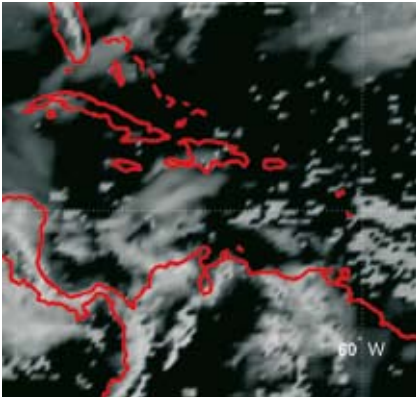


Die GPS-Radiokkultation hat mehrere Vorteile gegenüber anderen Satellitenverfahren. So ist die Abdeckung global, weil die GPS-Sender flächendeckend um den Erdball verteilt sind. Außerdem werden Radiosignale nicht durch Wolken blockiert. Entscheidend für die Klimaforschung ist aber, dass die Messwerte nicht driftet können; denn sie bestehen aus der Laufzeit zwischen Sender und Empfänger, die mit hochpräzisen Atomuhren von der Erde aus ermittelt wird.

Der Mitte 2000 gestartete deutsche Minisatellit CHAMP zählt zu den wenigen, die von vornherein auch für Radiokkultationsmessungen vorgesehen waren. Vom Deutschen Geoforschungszentrum in Potsdam entwickelt, ermittelt er so auf seiner polnahen Bahn um die Erde pro Tag rund 200 Vertikalprofile der Atmosphäre an verschiedenen Orten. Die Auflösung beträgt in der Horizontalen etwa 200 Kilometer. In der Vertikalen steigt sie mit der Höhe der Luftschicht von 200 Metern in der unteren Troposphäre bis 1,5 Kilometer in der Stratosphäre.

Andrea Steiner und Kollegen vom Wetter Center der Universität Graz haben Temperaturwerte von CHAMP zwischen September 2001 und Dezember 2006 mit Daten konventioneller Satelliten verglichen, die auf Mikrowellenmessungen beruhten. Die Übereinstimmung war hervorragend: Die Differenzen lagen fast durchweg in der Größenordnung von Zehntelgraden (*Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, Bd. 112, D22110). Prinzipiell ist die Methode der GPS-Radiokkultation somit mindestens ebenso genau wie herkömmliche Mikrowellenmessungen, dürfte ihnen bei langfristigen Klimastudien über Jahrzehnte hinweg wegen der Driftfreiheit aber überlegen sein.

Noch ist CHAMP nicht lange genug im Einsatz, als dass sich Aussagen über



Ein Computermodell berechnete am 22. August 2008 die Bewölkung, die drei Tage später um 8 Uhr abends Ortszeit in der östlichen Karibik herrschen sollte. Bei einem Durchlauf wurden 15 Dichteprofile der Atmosphäre einbezogen, die COSMIC-Satelliten mit Hilfe der Radiookkultationsmethode gemessen hatten. Nur in diesem Fall sagte das Modell die Entstehung des Hurrikans Ernesto voraus (links). Ohne die Satellitendaten wurde der sich anbahnende Wirbelsturm nicht erkannt (rechts).

Temperaturtrends aus seinen Daten ableiten ließen. Es gibt jedoch erste Resultate zur Tropopause, an der die 8 bis 16 Kilometer hohe, wetteraktive Troposphäre endet. Sie sollte sich auf Grund der globalen Erwärmung anheben, weil die bodennahen Luftschichten expandieren, während die Stratosphäre abkühlt und schrumpft.

Ein Team um Jens Wickert vom Deutschen Geoforschungszentrum in Potsdam ist dem nun nachgegangen. Dazu wertete es CHAMP-Daten zwischen Mai 2001 und Dezember 2007 aus. Für diesen Zeitraum ergab sich ein Anstieg um 26 bis 44 Meter (*Geophysical Research Letters*, Bd. 35, L11806). Wickert weist allerdings darauf hin, dass seine Studie nur ein Verfahrenstest sei. Ob sich die Tropopause langfristig wirklich so nach oben verlagere, wie die Modelle das vorhersagen, werde sich erst in den kommenden Jahren bis Jahrzehnten erweisen.

Hoffnung auf Galileo

Auch die sechs Mikrosatelliten der 2006 gestarteten amerikanisch-taiwanesischen Mission COSMIC/Formosat-3 dienen primär zur Messung der GPS-Radiookkultation. Pro Tag liefern sie heute 2000 bis 2500 Profile. Nach ersten Resultaten sind ihre Messwerte sogar noch präziser als die von CHAMP (*Bulletin of the American Meteorological Society*, Bd. 89, S. 313). Sobald das europäische Satelliten-Navigationssystem Galileo in Betrieb gegangen ist, sollte sich die Datenabdeckung weiter verbessern. Dann steigt die Zahl der GPS-Sender von 29 auf 59, was mehr als doppelt so viele Okkultationsmessungen ermöglicht.

Die anfallenden Temperaturdaten lassen sich übrigens nicht nur dazu nutzen, Klimatrends zu erkennen. So verwendet sie das Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage in Reading heute schon zur Verbesserung seiner Progno-

sen für die nächsten fünf bis zehn Tage. Wie ein Team von US-Meteorologen vor Kurzem nachwies, können Daten aus der GPS-Radiookkultation auch dazu beitragen, die Vorläuferphänomene von Stürmen früher zu erkennen – vor allem in solchen Regionen, in denen es wenig Aufstiege von Wetterballonen gibt (*Monthly Weather Review*, Bd. 136, S. 2923).

Mit der GPS-Radiookkultation lassen sich Daten bis in die Höhe der Satellitenorbits gewinnen – bei COSMIC sind das etwa 700 Kilometer. Demnach liefert das Verfahren auch Informationen über die so genannte Ionosphäre oberhalb von 80 Kilometern. In dem durch kosmische Strahlung ionisierten Atmosphärenbereich kann man per GPS-Radiookkultation die zeitlich wie räumlich variierende Elektronendichte ermitteln. Je höher sie ist, desto mehr verzögern sich die Funk-signale der GPS-Satelliten. Dieser Ionosphärenfehler führt zu Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung und muss korrigiert werden. Anhand der Radiookkultation lässt er sich berechnen, was zum Beispiel in der Zweigstelle des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Neustrelitz geschieht. Da die Temperaturmessungen in tieferen Luftschichten von einer genauen Positionsbestimmung abhängen, kommt die Ermittlung des Ionosphärenfehlers auch ihnen zugute.

Fachleute bescheinigen der GPS-Radiookkultation ein großes Potenzial. Vielleicht kann man künftig auch die an der Erdoberfläche reflektierten Signale nutzen und so etwa die Wellenhöhe in den Ozeanen ermitteln. Vorerst aber gilt die größte Hoffnung den zeitlich stabilen Temperaturmessungen in der Troposphäre – dürften sie doch so manche Frage der Klimaforscher beantworten.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und arbeitet als freier Journalist in Berlin.



wichtige onlineadressen

- ▶ **Brainlogs**
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de
- ▶ **Managementwissen**
per Fernlehre kostengünstig
ortsunabhängig erwerben
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter
www.cqa.de
- ▶ **Ingwer und Meerrettich**
zur wirkungsvollen Entzündungshemmung
bzw. Antibiose bei Pferd und Mensch
www.freenet-homepage.de/Brosig-Pferde-Ingwer/
- ▶ **Kernmechanik**
Können Sie das Rätsel der Kernstrukturen
und Dipolmomente lösen? Gewinnen Sie bis zu
1.000 Euro (Rechtsweg ausgeschlossen)!
www.kernmechanik.de
- ▶ **KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de
- ▶ **Lärm im Labor?**
Dagegen haben wir was:
www.sonation.com
- ▶ **WISSENSlogs**
Science unplugged
www.wissenslogs.de

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

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

Der Ur-Sprung des Alls

Unser Universum hat vielleicht mit einem »Big Bounce« begonnen – mit einem großen Sprung oder Rückprall. Der Urknall wäre demnach die explosive Folge einer noch früheren Implosion, verursacht durch exotische Quanteneffekte.

Von Martin Bojowald

Dass es Atome gibt, ist heute so selbstverständlich, dass wir uns kaum vorstellen können, wie radikal diese Idee einst war. Als die Naturforscher vor zwei Jahrhunderten den antiken Atombegriff wieder aufnahmen, dachten sie nicht im Traum daran, etwas so Kleines je beobachten zu können – und viele bezweifelten seinen wissenschaftlichen Charakter. Doch allmählich mehrten sich die Indizien für den atomaren Aufbau der Materie, bis Albert Einstein schließlich 1905 damit die brownsche Bewegung – das zufällige Zittern von Stäubchen in einer Flüssigkeit – erklären konnte. Dennoch dauerte es noch 20 Jahre, bis die Physiker mit der Quantenmechanik eine Theorie der Atomstruktur entwickelten, und nochmals 30 Jahre, bis der deutsch-amerikanische Physiker Erwin Wil-



PAT RAWLINGS, S&P

helm Müller einzelne Atome abzubilden vermochte. Heute beruhen ganze Industriezweige auf den charakteristischen Eigenschaften atomarer Materie.

Einen ähnlichen Weg verfolgen Physiker neuerdings, wenn sie die Zusammensetzung von Raum und Zeit verstehen wollen. Das Verhalten der Raumzeit legt nahe, dass ihr eine körnige Struktur zu Grunde liegt – entweder ein Mosaik aus raumzeitlichen »Atomen« oder eine andere filigrane Struktur. Materielle Atome sind die kleinsten unteilbaren Einheiten der chemischen Verbindungen, und ebenso bilden die hypothetischen Raumatome die kleinsten Entfernungseinheiten. Vermutlich sind sie nur 10^{-35} Meter groß – viel zu klein für die Auflösung der stärksten Instrumente, die heute bei 10^{-18} Meter Halt machen. Darum zweifeln viele Forscher, ob die Idee einer atomar strukturierten Raumzeit überhaupt wissenschaftlich genannt werden darf. Doch andere suchen hartnäckig nach Möglichkeiten, solche Atome indirekt nachzuweisen.

Am meisten verspricht dabei das Beobachten des Kosmos. Wenn wir die kosmische Expansion in Gedanken zeitlich verkehrt abspielen, schnurrt die Gesamtheit aller sichtbaren Galaxien auf einen einzigen Punkt zusammen:

die Urknall-Singularität. An diesem Punkt hat unser Universum gemäß der gängigen Gravitationstheorie – der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins – unendliche Dichte und Temperatur. Dieser Moment wird manchmal als Anbeginn des Universums ausgegeben, als Geburt von Materie, Raum und Zeit. Doch diese Deutung geht zu weit, denn die unendlichen Werte zeigen an, dass hier die allgemeine Relativitätstheorie selbst zusammenbricht. Um zu erklären, was beim Urknall wirklich geschah, müssen die Theoretiker über die Relativitätstheorie hinausgehen. Es gilt, eine Theorie der Quantengravitation zu entwickeln, welche die Feinstruktur der Raumzeit erfasst; die Relativitätstheorie ist blind dafür.

Die Details dieser Struktur kamen unter den extremen Bedingungen des urtümlichen Universums ins Spiel, und Spuren davon machen sich vielleicht in der gegenwärtigen Anordnung von Materie und Strahlung bemerkbar. Kurz gesagt: Wenn Raumzeitatome existieren, wird es nicht wie bei den materiellen Atomen Jahrhunderte dauern, Indizien dafür zu finden. Mit etwas Glück sollten wir innerhalb des nächsten Jahrzehnts Gewissheit haben.

Die Schleifen des Raums

Physiker haben mehrere Kandidaten für Theorien der Quantengravitation ersonnen, die auf jeweils unterschiedliche Art Quantenprinzipien auf die allgemeine Relativitätstheorie anwenden. Meine Arbeit konzentriert sich auf die Loop- oder Schleifen-Quantengravitation; sie wurde in den 1990er Jahren entwickelt, und zwar in zwei Schritten. Zuerst formulierten Forscher die allgemeine Relativitätstheorie so um, dass sie der klassischen Theorie des Elektromagnetismus ähnelte; die »Schleifen« der späteren Theorie sind Analogien elektrischer und magnetischer Feldlinien. Im zweiten Schritt wandten Theoretiker neuartige, teilweise mit der mathematischen Knotentheorie verwandte Quantenregeln auf die Schlei-

In Kürze

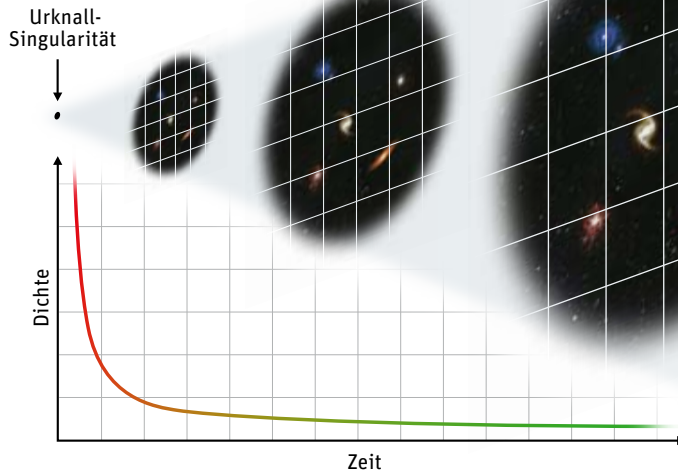
► Gemäß Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie begann das Universum mit der **Urknall-Singularität**: Die gesamte Materie konzentrierte sich in einem Punkt unendlicher Dichte. Doch diese Theorie ignoriert, dass die Konzentration der Materie und die Stärke der Gravitation durch die feine Quantenstruktur der Raumzeit begrenzt werden. Darum suchen Physiker nach einer Quantentheorie der Gravitation.

► Ein Kandidat für eine solche Theorie ist die **Schleifen-Quantengravitation**. Ihr zufolge ist der Raum in »Atome« des Volumens unterteilt und vermag nur endlich viel Materie und Energie zu speichern. Das verhindert die Existenz echter Singularitäten.

► Wenn dem so ist, kann es eine Zeit vor dem Urknall gegeben haben. Vielleicht hat das Universum einst durch einen katastrophalen Kollaps einen **Zustand maximaler Dichte** erreicht und expandierte danach. Ein großes Zermalmen könnte zunächst zu einem großen Rückprall geführt haben und erst dann zum Urknall.

DIE KLASSISCHE THEORIE DES URKNALLS

Die Idee des Urknalls beruht auf einer simplen Beobachtung: Die Galaxien im Universum bewegen sich voneinander weg. Wenn man diesen Trend zeitlich umkehrt, müssen sich alle Galaxien – oder ihre Vorläufer – vor 13,7 Milliarden Jahren eng zusammengeballt haben. Nach Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie bildeten sie sogar einen einzigen Punkt unendlicher Dichte – die Urknall-Singularität. Doch unendliche Dichte gibt es nicht; dass die Relativitätstheorie so etwas vorher-sagt, zeigt an, dass die Theorie unvollständig ist.



SAMUEL VELASCO, SW INFOGRAPHICS

Wie Einstein erkannte, liefert die Raumzeit nicht bloß die Bühne, auf der das Drama des Universums abläuft. Sie spielt selbst aktiv mit

fen an. Die daraus entstehende Schleifen-Quantengravitation – oder kurz Schleifengravitation – sagt die Existenz von Raumzeit-Atomen voraus (siehe »Quanten der Raumzeit« von Lee Smolin, Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 54).

Zwei andere Ansätze, die Stringtheorie und die so genannte kausale dynamische Triangulation, führen zwar nicht direkt zu Raumzeit-Atomen, liefern aber gleichfalls Gründe für die Unteilbarkeit kürzester Distanzen (siehe »Universen auf der kosmischen Achterbahn« von Cliff Burgess und Fernando Quevedo, Spektrum der Wissenschaft 2/2008, S. 26, und »Das fraktale Quantenuniversum« von Jan Ambjørn et al., Spektrum der Wissenschaft 2/2009, S. 24). Die Unterschiede dieser Theorien haben Kontroversen ausgelöst, aber in meinen Augen sind sie nicht Gegensätze, sondern ergänzen einander eher. Beispielsweise erweist sich die Stringtheorie als sehr nützlich für die Vereinigung der Teilchenwechselwirkungen –

inklusive der Gravitation, sofern sie schwach ist. Um herauszufinden, was an der Singularität geschieht, das heißt bei starker Schwerkraft, sind wiederum die atomaren Konstruktionen der Schleifengravitation nützlicher.

Die Stärke der Theorie besteht darin, dass sie die Veränderlichkeit der Raumzeit zu erfassen vermag. Wie Einstein erkannte, liefert die Raumzeit nicht bloß die Bühne, auf der das Drama des Universums abläuft. Sie spielt selbst aktiv mit; sie bestimmt nicht nur die Bewegungen der Himmelskörper im Universum, sondern entwickelt sich. Ein kompliziertes Wechselspiel zwischen Materie und Raumzeit entsteht. Der Raum kann wachsen und schrumpfen.

Die Schleifengravitation erweitert diese Erkenntnis bis in den Quantenbereich. Indem sie unsere gewohnten Kenntnisse über Materieteilchen auf die Atome von Raum und Zeit anwendet, liefert sie eine einheitliche Sicht unserer grundlegendsten Begriffe. Zum Beispiel beschreibt die Quantentheorie des Elektromagnetismus ein Vakuum als etwas, in dem es keine Photonen oder andere Teilchen gibt, und jede Energiezufuhr erzeugt darin ein neues Teilchen. In der Quantentheorie der Gravitation ist ein Vakuum die Abwesenheit von Raumzeit – eine so gründliche Leere, dass wir sie uns kaum vorstellen können. Die Schleifengravitation beschreibt, wie jeder Energiezuwachs in diesem Vakuum ein neues Atom der Raumzeit erzeugt.

Die Raumzeitatome bilden ein dichtes, sich immerfort wandelndes Gewebe. Neue Atome tauchen auf, während bereits vorhandene angeregt werden und ein größeres Raumstück beisteuern. Im Großen und



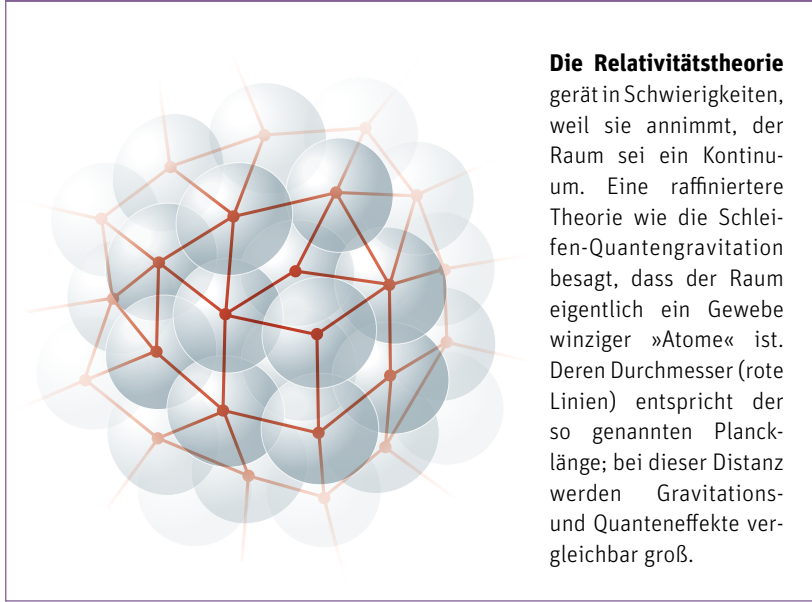
Ganzen ergibt ihre Dynamik das sich entwickelnde Universum der klassischen allgemeinen Relativitätstheorie. Unter normalen Bedingungen bemerken wir die Existenz der Raumzeitatome überhaupt nicht; das Gewebe ist so dicht, dass es wie ein Kontinuum wirkt. Doch wenn die Raumzeit derart mit Energie vollgepackt wird, wie das beim Urknall der Fall war, macht sich die Feinstruktur der Raumzeit bemerkbar, und die Vorhersagen der Schleifengravitation weichen von jenen der allgemeinen Relativitätstheorie ab.

Da die Anwendung der Theorie extrem schwierig ist, verwenden meine Kollegen und ich vereinfachte Versionen, die nur die wirklich wichtigen Eigenschaften des Universums – etwa seine Größe – berücksichtigen und weniger interessante Details ignorieren. Wir mussten auch viele mathematische Standardwerkzeuge vereinfachen. Beispielsweise beschreiben theoretische Physiker die Welt normalerweise mit Differenzialgleichungen, welche die Veränderungsrate der Dichte und anderer physikalischer Variablen an jedem Punkt des Raumzeitkontinuums angeben. Doch da die Raumzeit körnig ist, verwenden wir stattdessen Differenzgleichungen, die das Kontinuum in diskrete Intervalle aufspalten. Diese Gleichungen beschreiben, wie ein Universum, während es wächst, die Leiter der zulässigen Größen hinaufklettert. Als ich 1999 die kosmologischen Konsequenzen der Schleifengravitation zu analysieren begann, erwarteten die meisten Forscher, diese Differenzgleichungen würden einfach alte Resultate in neuem Gewand ergeben. Aber bald tauchten unerwartete Eigenschaften auf.

Abstoßende Schwerkraft

Die Gravitation ist eine typische Anziehungskraft. Ein kugelförmiges Stück Materie neigt dazu, unter seinem eigenen Gewicht zu kollabieren, und wenn seine Masse groß genug ist, überwindet die Gravitation alle anderen Kräfte und komprimiert die Kugel zu einer Singularität wie im Zentrum eines Schwarzen Lochs. Doch aus der Schleifengravitation folgt, dass die atomare Struktur der Raumzeit bei sehr hohen Energiedichten das Wesen der Schwerkraft verändert: Sie wird abstoßend. Stellen wir uns den Raum als einen Schwamm vor, und Masse und Energie als Wasser. Der porenreiche Schwamm vermag Wasser aufzunehmen, aber nur bis zu einer bestimmten Menge. Wenn er vollgesogen ist, kann er nichts mehr absorbieren, sondern stößt Wasser ab. Genauso ist ein atomarer Quantenraum porös und hat nur endlich viel Stauraum für Energie. Werden die Energiedichten allzu groß, kommen Abstoßungskräfte ins

ATOME DES RAUMS



Die Relativitätstheorie gerät in Schwierigkeiten, weil sie annimmt, der Raum sei ein Kontinuum. Eine raffiniertere Theorie wie die Schleifen-Quantengravitation besagt, dass der Raum eigentlich ein Gewebe winziger »Atome« ist. Deren Durchmesser (rote Linien) entspricht der so genannten Plancklänge; bei dieser Distanz werden Gravitations- und Quanteneffekte vergleichbar groß.

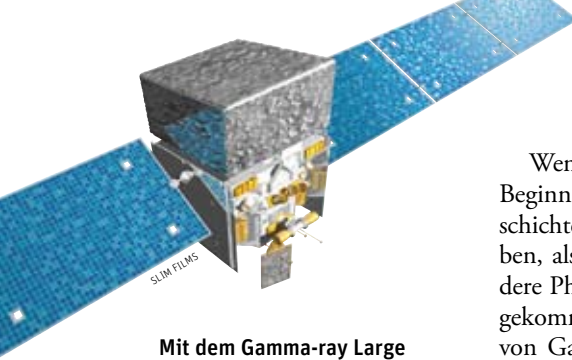
SAMUEL VELASCO, SW INFOGRAPHICS

Spiel. Hingegen vermag der kontinuierliche Raum der allgemeinen Relativitätstheorie unbegrenzt viel Energie zu speichern.

Da sich gemäß der Quantengravitation das Kräftegleichgewicht ändert, kann niemals eine Singularität – ein Zustand unendlicher Dichte – entstehen. In diesem Modell hatte die Materie im frühen Universum eine sehr hohe, aber endliche Dichte, die einer Billion Sonnenmassen in jedem Gebiet von der Größe eines Protons entsprach (die so genannte Planck-Dichte). Unter derart extremen Bedingungen wirkte die Gravitation als abstoßende Kraft und verursachte eine Expansion des Raums; als die Dichten moderatere Werte erreichten, wurde die Gravitation zu der Anziehungskraft, die wir alle kennen. Auf Grund der Trägheit ging die Expansion bis zum heutigen Tag weiter.

Die abstoßende Schwerkraft ließ den Raum sogar beschleunigt expandieren. Kosmologische Beobachtungen sprechen für eine derartige anfängliche Beschleunigungsphase, die so genannte kosmische Inflation. Während das Universum expandiert, erlahmt die treibende Kraft der Inflation allmählich. Wenn die Beschleunigung aufhört, wird die überschüssige Energie durch einen Prozess namens Wiedererwärmen (*reheating*) in gewöhnliche Materie umgewandelt, die nun das Universum zu erfüllen beginnt. Die Inflation wird den üblichen Modellen eher ad hoc hinzugefügt, um diese den Beobachtungen anzupassen, doch in der Schleifen-Quantenkosmologie folgt sie ganz natürlich aus der atomaren Beschaffenheit der Raumzeit. Die Beschleunigung tritt automatisch auf, solange das Universum klein ist und seine Körnigkeit eine Rolle spielt.

Gemäß der Quantengravitation kann niemals ein Zustand unendlicher Dichte entstehen



Mit dem Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST) können Astronomen nach Indizien für Atome der Raumzeit suchen – etwa nach winzigen Abweichungen von der Lichtgeschwindigkeit bei verschiedenen Wellenlängen.

Wenn es keine Singularität gibt, die den Beginn der Zeit markiert, könnte die Geschichte des Universums früher begonnen haben, als die Kosmologen bisher dachten. Andere Physiker sind zwar zu demselben Schluss gekommen (siehe »Die Zeit vor dem Urknall« von Gabriele Veneziano, Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 30), aber ihre – meist stringtheoretischen – Modelle lösen die Singularität selten ganz auf; in der Regel brauchen sie zusätzliche Annahmen über die Vorgänge an diesem heiklen Punkt. Hingegen vermag die Schleifengravitation zu verfolgen, was an Stelle der Singularität stattfand; diese Szenarien sind zwar vereinfacht, kommen aber ohne neue Ad-hoc-Annahmen aus.

Mit Hilfe der Differenzgleichungen können wir versuchen, die tiefe Vergangenheit zu rekonstruieren. Ein mögliches Szenario besagt, dass der anfängliche Zustand hoher Dichte entstand, als ein zuvor existierendes Universum unter der Anziehungskraft der Gravitation kollabierte. Die Dichte wuchs so stark, dass die Schwerkraft abstoßend wurde und das Universum wieder zu expandieren begann. Diesen Vorgang nennen die Kosmologen *bounce* (Rückprall).

Das erste mit Schleifenmethoden gründlich untersuchte Rückprallmodell war ein idealisierter Fall: ein hochsymmetrisches Universum, das nur eine Sorte Materie enthielt. Die Teilchen waren masselos und traten nicht in Wechselwirkung miteinander. Dieses Modell war zwar vereinfacht, ließ sich aber zunächst nur durch numerische Simulationen verstehen, die Abhay Ashtekar, Tomasz Pawłowski

und Parampreet Singh – alle an der Pennsylvania State University – erst 2006 vollendeten. Sie betrachteten die Ausbreitung von Wellen, die das Universum vor und nach dem Urknall darstellten. Wie das Modell deutlich zeigte, folgt eine Welle nicht blind der klassischen Bahn in den Abgrund einer Singularität, sondern hält an und kehrt um, sobald die Abstoßung der Quantengravitation einsetzt (siehe »Ein Kosmos ohne Anfang?« von Thomas Thiemann und Markus Pössel, Spektrum der Wissenschaft 6/2007, S. 32).

Winzige Gedächtnisspuren

Ein interessantes Resultat dieser Simulationen war, dass die notorische Unbestimmtheit der Quantenmechanik sich anscheinend während des Rückpralls ziemlich in Grenzen hielt. Eine Welle blieb während des Rückpralls lokalisiert, statt nach Art üblicher Quantenwellen zu verschmieren. Sofern man das Ergebnis für bare Münze nahm, glich das Universum vor dem Rückprall unserem heutigen aufs Haar: Es gehorchte der allgemeinen Relativitätstheorie und war vermutlich von Sternen und Galaxien erfüllt. Vermeintlich könnten wir demnach von unserem Universum auf Zustände vor dem Rückprall schließen – so wie wir die Wege von zwei Billardkugeln vor einem Zusammenstoß aus ihren Bahnen nach dem Stoß rekonstruieren können.

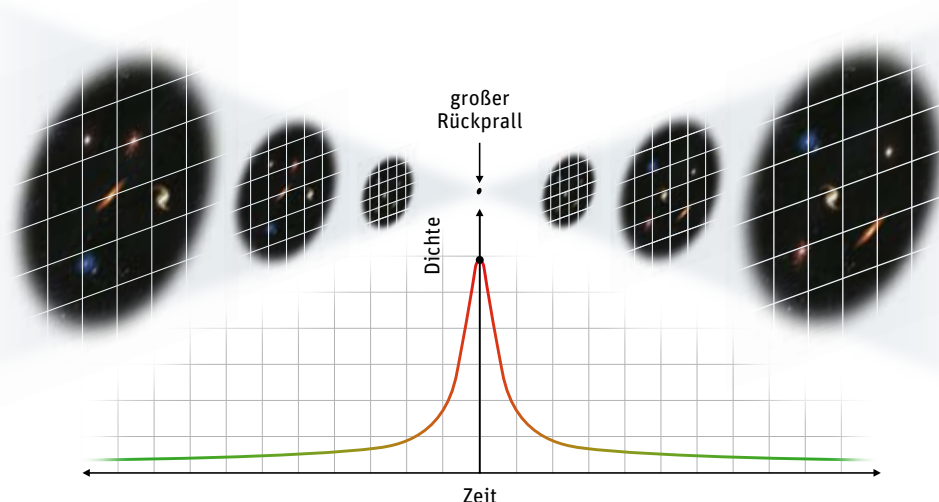
Leider zerstörte meine spätere Analyse diese Hoffnung. Sowohl das Modell als auch die in den numerischen Simulationen verwendeten Quantenwellen erwiesen sich als Sonderfälle. Wie ich herausfand, verschmieren die

ALTERNATIVEN ZUM URKNALL

Indem die Schleifen-Quantengravitation eine Grenze für die Energiemenge definiert, die sich in den Raum packen lässt, er-

setzt sie die Urknall-Singularität durch einen »großen Rückprall« (*big bounce*). Dieser Vorgang sieht wie ein Anfang aus,

In diesem Szenario existiert das Universum ewig. Es implodierte, erreichte die maximal zulässige Dichte beim Rückprall und explodierte wieder.



Wellen, und zusätzliche Quanteneffekte müssen berücksichtigt werden. Darum ist der Rückprall nicht ein kurzer Stoß durch eine abstoßende Kraft wie bei der Kollision von Billardkugeln. Vielmehr dürfte unser Universum aus einem fast unergründlichen Quantenzustand aufgetaucht sein – aus einer chaotischen, heftig fluktuierenden Welt. Selbst wenn das zuvor existierende Universum einst dem unsrigen noch so sehr glich, machte es eine längere Phase durch, in der die Dichte von Materie und Energie so stark und zufällig schwankte, dass alles durcheinandergeriet.

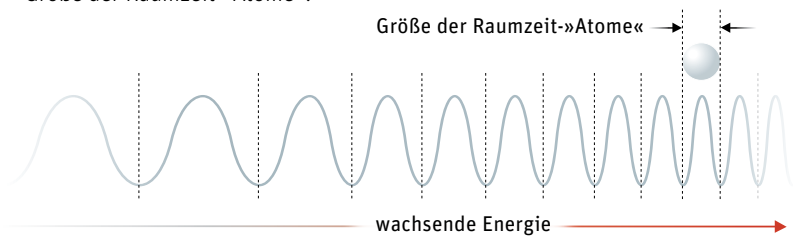
Die Fluktuationen vor und nach dem Urknall hatten wenig Ähnlichkeit miteinander. Das Universum vor dem Urknall könnte ganz anders fluktuiert haben als das danach, und diese Details wurden im Rückprall ausgelöscht. Kurz, das Universum leidet an tragischer Vergesslichkeit. Die Quanteneffekte während des Rückpralls vernichteten fast alle Spuren seiner Vorgeschichte.

Dieses Bild des Urknalls ist subtiler als das der klassischen Singularität. Während die allgemeine Relativitätstheorie an der Singularität einfach versagt, vermag die Schleifen-Quantengravitation die dort herrschenden Extrembedingungen zu kontrollieren. Der Urknall ist nicht mehr ein physikalischer Beginn oder eine mathematische Singularität, sondern setzt unserem Wissen eine praktische Grenze. Was nach ihm übrig bleibt, kann kein vollständiges Bild dessen liefern, was vorher war.

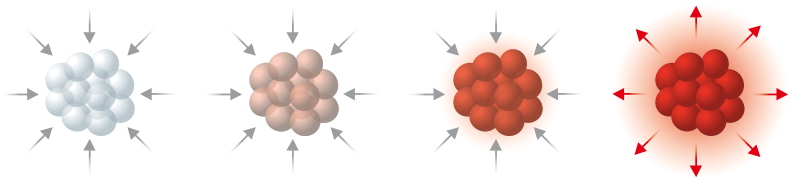
Das wirkt vielleicht frustrierend, könnte aber ein grundlegendes Problem lösen. In physikalischen Systemen wie im täglichen Le-

WENN DIE SCHWERKRAFT ABSTOSSEND WIRKT

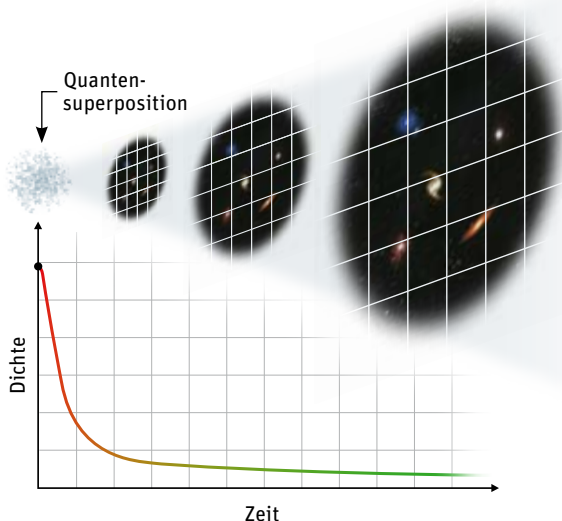
Je mehr Energie man in ein Raumvolumen packt, desto mehr schrumpft die Wellenlänge der diese Energie tragenden Teilchen; schließlich erreicht sie die Größe der Raumzeit-»Atome«.



Im Raum ist buchstäblich kein Platz mehr. Versucht man noch mehr Energie hineinzupacken, stößt der Raum sie wieder aus. Es scheint, als hätte die örtlich erzeugte Gravitation sich von einer anziehenden Kraft in eine abstoßende verwandelt.



folgt aber eigentlich aus einem vorhergehenden Zustand. Der Rückprall setzt die Expansion des Universums in Gang.



In diesem Alternativszenario war das Universum vor dem Urknall in einem fast unvorstellbaren, noch nicht raumartigen Quantenzustand, als irgendetwas den großen Rückprall und die Bildung von Atomen der Raumzeit auslöste. Welche dieser beiden Alternativen zutrifft, hängt von weiteren Details ab – und von einem besseren Verständnis für das wahre Wesen der Zeit. Daran arbeiten Physiker noch.

EIN BLICK INS SPIEGELUNIVERSUM

Trotz der Effekte, die das Universum während des großen Zermalmens durcheinanderbrachten, können die Physiker einige fundierte Vermutungen über die Zeit davor riskieren. Manche sind wirklich gewagt. Beispielsweise folgt aus den Differenzgleichungen der Schleifen-Quantengravitation, dass die Raumzeitregion, die dem Rückprall vorausging, ein Spiegelbild des Raums in unserem Universum war. Das heißt, was nach dem Urknall rechtshändig wurde, war vorher linkshändig, und umgekehrt.

Um diesen Effekt zu veranschaulichen, stelle man sich einen Ballon vor, dem die Luft ausgeht, wobei er sich aber nicht in ein schlaffes Gummihäutchen verwandelt, sondern Energie und Impuls behält. Darum kollabiert der Ballon zwar auf minimale Größe, kehrt dann aber sein Inneres nach außen und beginnt wieder zu wachsen. Was zuvor seine Außenseite war, wird zur Innenseite, und umgekehrt. Ebenso stülpt sich auch das Universum



LILA RUBENSTEIN

um, wenn die Raumzeitatome sich beim großen Rückprall überkreuzen.

Diese Umkehrung ist interessant, weil die Elementarteilchen nicht perfekt spiegelsymmetrisch sind; gewisse Prozesse ändern sich bei Spiegelung. Diese Asymmetrie muss berücksichtigt werden, wenn man verstehen will, was mit der Materie beim Rückprall geschah.

ben nimmt die Unordnung tendenziell zu. Dieses Prinzip, der so genannte zweite Hauptsatz der Thermodynamik, spricht gegen ein ewiges Universum. Hätte die Ordnung seit ewigen Zeiten abgenommen, dann müsste das Universum heute längst so desorganisiert sein, dass Strukturen, wie wir sie in Galaxien und auf der Erde sehen, ein Ding der Unmöglichkeit wären. Das rechte Ausmaß an kosmischer Vergesslichkeit kommt da sehr gelegen: Es schenkt dem jungen, wachsenden Universum einen Start als unbeschriebenes Blatt – unbeschwert von all dem Durcheinander, das sich vorher angesammelt hat.

Gemäß der herkömmlichen Thermodynamik gibt es kein wirklich unbeschriebenes Blatt; jedes System behält in der Anordnung seiner Atome stets ein Gedächtnis seiner Vergangenheit (siehe »Der kosmische Ursprung des Zeitpfeils« von Sean M. Carroll, Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 26). Doch indem die Schleifengravitation eine variable Anzahl von Raumzeitatomen zulässt, gewährt sie dem Universum mehr Freiheit zum Aufräumen als die klassische Physik.

Das soll nicht heißen, es wäre ein hoffnungsloses Unterfangen, die Periode der Quantengravitation zu erforschen. Gravitationswellen und Neutrinos sind besonders viel versprechende Werkzeuge, denn sie interagieren kaum mit Materie und durchdrangen darum das uranfängliche Plasma nahezu ohne Verlust. Diese Boten könnten uns durchaus Nachrichten aus einer Zeit kurz nach oder sogar vor dem Urknall bringen.

Gravitationswellen lassen sich anhand des Abdrucks aufspüren, den sie im kosmischen Strahlungshintergrund hinterlassen (siehe »Der Nachhall des Urknalls« von Robert R. Cald-

well und Marc Kamionkowski, Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 50). Falls eine abstoßende Quantengravitation die Inflation angetrieben hat, sollten diese Beobachtungen Indizien dafür liefern. Die Theoretiker müssen auch herausfinden, ob diese neuartige Quelle der Inflation andere kosmologische Messungen zu reproduzieren vermag – insbesondere die in der kosmischen Hintergrundstrahlung erkennbare frühe Dichteverteilung der Materie.

Zugleich können Astronomen nach raumzeitlichen Analogien zur brownischen Zufallsbewegung suchen. Zum Beispiel könnten Quantenfluktuationen der Raumzeit die Ausbreitung des Lichts über große Distanzen beeinflussen. Gemäß der Schleifengravitation kann eine Lichtwelle nicht kontinuierlich sein; sie muss auf das Raumgitter passen. Je kleiner die Wellenlänge, desto stärker verzerrt das Gitter die Welle. In gewissem Sinn schieben die Raumzeitatome sie hin und her. Infolgedessen pflanzt sich Licht unterschiedlicher Wellenlänge verschieden schnell fort. Diese Unterschiede sind zwar winzig, können sich aber über große Distanzen summieren. An fernen Quellen wie den Gammastrahlenausbrüchen (*gamma ray bursts*) ließe sich dieser Effekt am besten nachweisen (siehe »Ein Fenster zum heißen Universum« von William B. Atwood et al., Spektrum der Wissenschaft 4/2008, S. 34).

Im Fall der materiellen Atome vergingen mehr als 2500 Jahre, bis die Spekulation antiker Atomisten durch Einsteins Analyse der brownischen Bewegung zum festen Gegenstand experimenteller Forschung wurde. Bei den Atomen der Raumzeit dürfte es nicht so lange dauern. ◀



Martin Bojowald ist führend an der Erforschung der Folgen der Schleifen-Quantengravitation für die Kosmologie beteiligt. Er gehörte bis 2005 dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam an. Seitdem lehrt und forscht er am Institute for Gravitation and the Cosmos an der Pennsylvania State University (USA). 2003 und 2007 erhielt er Preise für seine Beiträge zur Gravitationstheorie.

Bojowald, M.: Zurück vor den Urknall. Fischer, Frankfurt 2009.

Bojowald, M.: Loop Quantum Cosmology. In: Living Reviews in Relativity 11(4), 2008.

Rovelli, C.: Quantum Gravity. Cambridge University Press, Cambridge 2004.

Thiemann T., Pössel, M.: Ein Kosmos ohne Anfang? In: SdW 6/2008, S. 23–41.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987527.

*Ohne den Staub, worin er aufleuchtet,
wäre der Sonnenstrahl nicht sichtbar.*

André Gide (1869–1951)



FOTOS: H. J. SCHLICHTING

Schattentheater am Himmel

Damit sich Licht- und Schattenstraßen über das abendliche Firmament erstrecken, bedarf es tief liegender Wolken und vieler Wassertröpfchen als »Leinwand«.

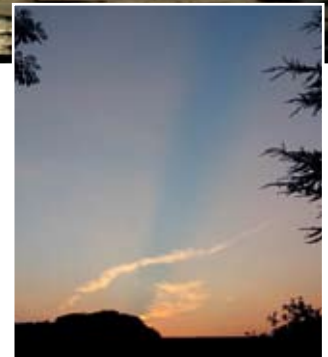
Auch den Dichter und Naturbeobachter Adalbert Stifter (1805–1868) beglückte das Phänomen: »Aus der ungeheuren Himmels-glocke, die über der Haide lag, wimmelnd von glänzenden Wolken, schossen an verschiedenen Stellen majestätische Ströme des Lichtes, (...) auseinanderfahrende Straßen am Himmelszelte bildend.« Wie das?, fragt der Physiker nun genauer nach. Stifter wird einen wolkigen Abendhimmel vor Augen gehabt haben (Bild oben). Die Sonne, bereits hinabgesunken hinter den Horizont oder eine Wolkenfront, strahlt durch einen Spalt, der sich quer durch die Wolkendecke zieht. Dabei fällt das Licht auf tiefer liegende, kleinere Wolken. Diese reißen Schattenbahnen in die Lichtfront und fächern Licht- und Schattenstraßen über das Firmament.

Wer die »Dämmerungsstrahlen« häufiger beobachtet, wird den Schattengeber – ob Wolke oder Bergspitze – gelegentlich sogar hinter dem Horizont verorten (kleines Bild). Spätestens jetzt drängt sich jedoch die Frage auf, weshalb die Straßen überhaupt zu sehen sind. Geht nicht das Licht hoch über den Kopf des Betrachters hinweg? Nicht alles. Ein Teil wird an Wassertröpfchen und anderen Partikeln gestreut und gelangt dabei auch ins Auge des Betrachters, so dass er einen aufgehellten, dunstigen Himmel sehen sollte. Blocken aber Wolken den »Lichtstrom« an einigen Stellen ab wie im vorliegenden Fall, bleibt im dahinterliegenden Schattenraum die Streuung aus, und der Blick fällt frei auf den dunk-

len Wolkenhintergrund. Der Betrachter sieht also gleichzeitig Gebiete, die Licht streuen, und solche, die dies nicht tun.

Früher behauptete man über die Erscheinung solcher Dämmerungsstrahlen auch gerne, »die Sonne ziehe Wasser«, wie etwa Johann Carl Fischer in seiner »Erklärung der vornehmsten zur Physik gehörigen Begriffe und Kunstwörter« von 1804 berichtet. Dies nicht ganz zu Unrecht, denn das Phänomen erscheint nur bei bewölktem Abendhimmel, der mit hoher Luftfeuchte einhergeht und nicht selten tatsächlich Regen erwarten lässt. Reichen die Strahlen ins Meer hinein (mittleres Bild), wirkt die Rede vom »Wasserziehen« sogar besonders einleuchtend.

Wer den Dämmerungsstrahlen indes den Rücken kehrt, weil er sie zur Genüge genossen oder analysiert hat, nimmt manchmal erstaunt zur Kenntnis, dass am gegenüberliegenden Horizont dasselbe Spektakel stattfindet. Die Rolle der Sonne übernimmt dabei der immaterielle Sonnengegenpunkt. In sehr seltenen Fällen erstrecken sich die Strahlen sogar über das ganze Himmelszelt vom einen zum anderen Horizont. Ausgehend von den sie erzeugenden Wolken laufen sie auseinander, nehmen im Zenit über dem Beobachter maximalen Abstand voneinander ein und laufen dann zum Sonnengegenpunkt hin wieder zusammen. Ihre Krümmung ebenso wie ihre Divergenz ist natürlich eine perspektivische Täuschung: In Wirklichkeit sind die Strahlen (fast) parallel wie das Sonnenlicht selbst. ◀



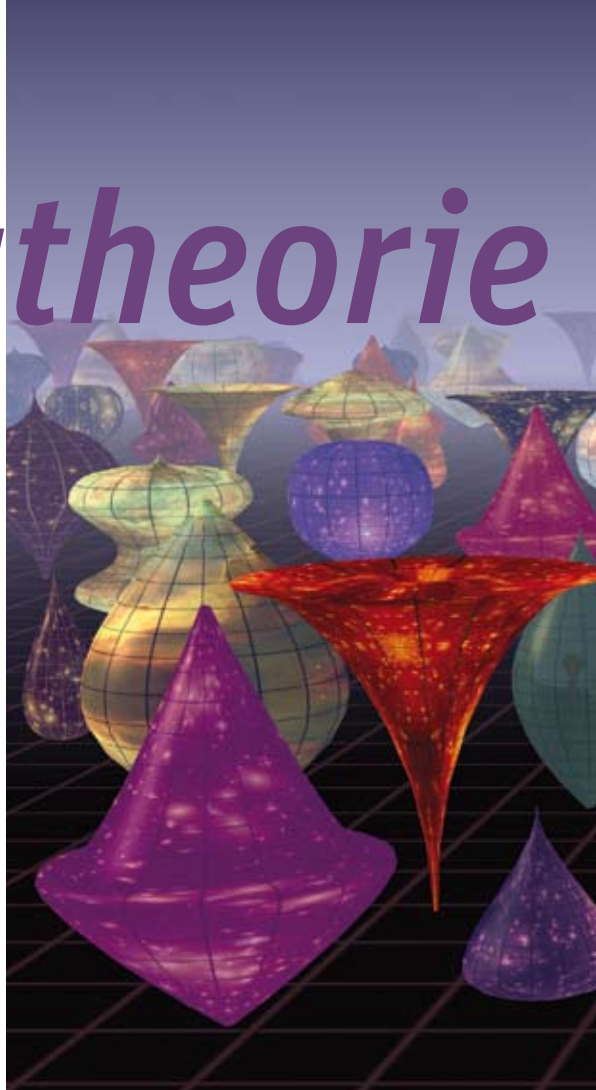
Das Netz aus Licht- und Schattenstrahlen ist nur sichtbar, weil die Sonnenstrahlen an Wassertröpfchen gestreut werden (links oben). Reicht es ins Meer (Mitte), sagt der Volksmund: Die Sonne zieht Wasser. Und kommt der Schatten aus dem Nichts, steht dem Sonnenlicht vielleicht eine verborgene Wolke im Weg (kleines Bild).



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

Ist die *Stringtheorie* noch eine Wissenschaft?

Kritiker werfen ihr vor, Dinge zu behaupten, die sich jeder Prüfung entziehen. Doch die Stringtheorie ist auf dem Weg zur Weltformel erfolgreich wie keine andere. Möglicherweise zwingt sie die Physik allmählich zu einem Paradigmenwechsel.



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

Von Dieter Lüst

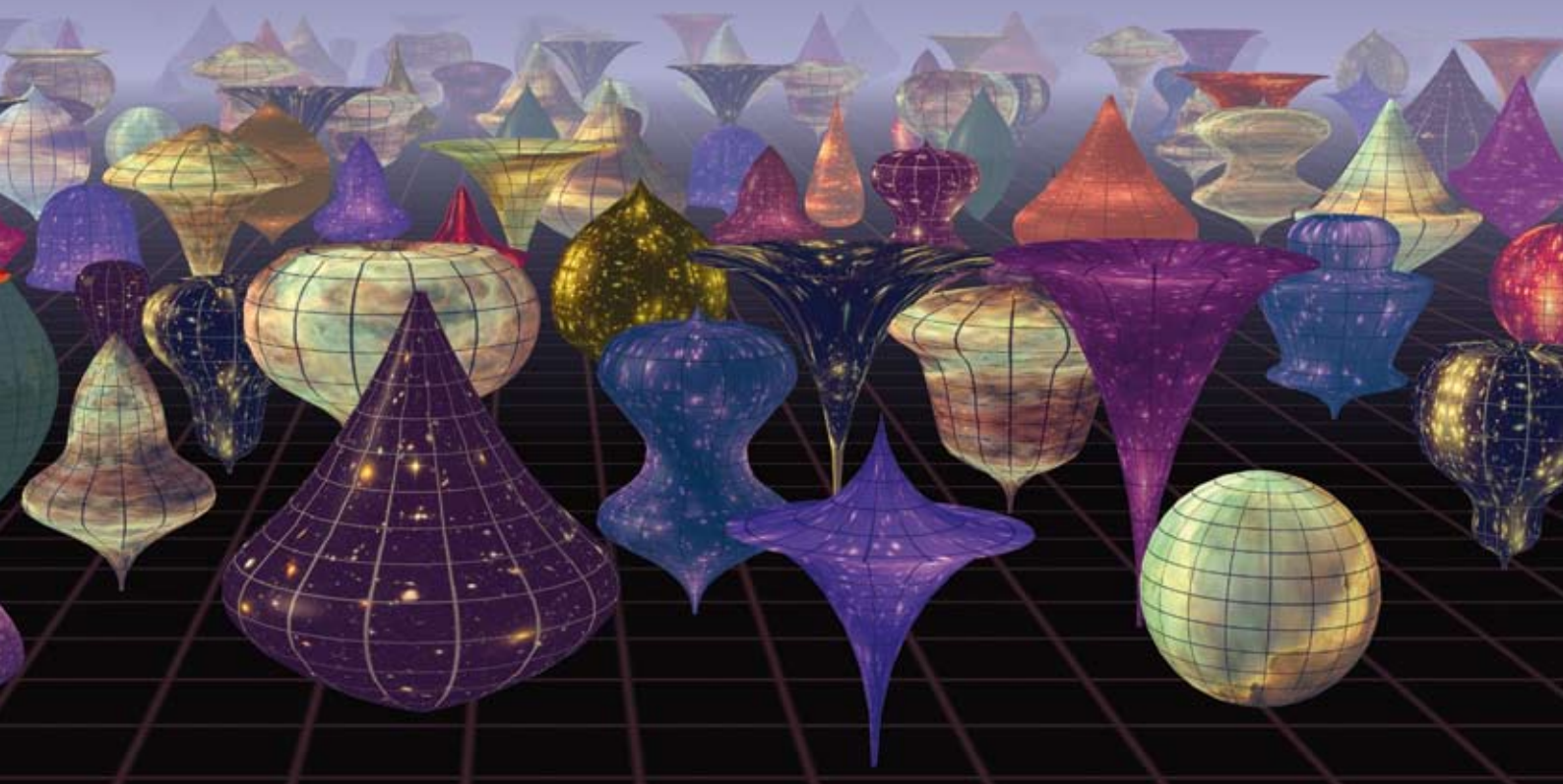
Galt der Mensch einst als Krone der Schöpfung, so musste er in den vergangenen Jahrhunderten doch eine Menge einstecken: Erst vertrieb ihn Nikolaus Kopernikus aus dem Zentrum der Welt, dann stieß Charles Darwin ihn ins Tierreich zurück. Selbst über unser Sonnensystem wissen wir mittlerweile, dass es sich durch eine reichlich randständige Region der Milchstraße bewegt. Und nun, als wäre das noch nicht genug, behaupten theoretische Physiker, dass selbst unser Universum nicht einzigartig sei, sondern nur eines von unzähligen Paralleluniversen.

Laut der Stringtheorie besitzen die zusätzlichen Welten jeweils andere Eigenschaften als die unsere. Sie beherbergen andere Elementarteilchen und werden von anderen Fundamentalkräften regiert. Und wohl nur in sehr wenigen dieser Universen blicken Beobachter wie wir ins All und stellen Fragen nach der Struktur ihrer Welt. Wenn wir die Stringtheoretiker aber fragen, wann wir diese Universen einmal zu Gesicht bekommen, sagen sie uns: Dazu wird es schwerlich kommen.

Überraschenderweise scheint der Theorie damit kein Zacken aus der Krone zu brechen. Im Gegenteil, sie ist bestens etabliert und für die meisten Physiker diejenige Kandidatin für eine »Theorie von allem«, auf welcher derzeit die größten Hoffnungen ruhen. In ihr gelten so genannte Strings als fundamentale Bausteine des Universums: winzige eindimensionale Objekte, die man sich näherungsweise als schwingende Saiten vorstellen kann und die je nach Art der Schwingung unterschiedliche Elementarteilchen repräsentieren. Besteht die Welt tatsächlich aus Strings, könnte diese Theorie eines Tages alle physikalischen Phänomene unserer ebenso wie anderer Welten mit Hilfe einer oder weniger Gleichungen beschreiben.

Kritikloser Verzicht?

Doch wie können Physiker scheinbar kritiklos auf die von Karl Popper (1902–1994) geforderte Falsifizierbarkeit wesentlicher Konsequenzen einer physikalischen Theorie verzichten? Und wie können sie Schlussfolgerungen ernst nehmen, zu denen allein mathematische Formalismen, nicht aber Beobachtungen der Natur führen? Hauptsächlich liegt dies wohl



KRISTIN RIEBE

am ungeheuren Potenzial der Stringtheorie. Als erste Theorie überhaupt hat sie sowohl die Gravitation als auch die schwache, die starke und die elektromagnetische Kraft unter einem Dach zusammengeführt. Die Gravitation wird bislang durch die Relativitätstheorie beschrieben, die in großer Übereinstimmung mit allen Beobachtungen die Prozesse kurz nach dem Urknall berechenbar macht und das Schicksal des Universums bis in ferne Zukunft voraussagt. Die anderen drei Kräfte sind im Standardmodell der Elementarteilchenphysik zusammengefasst. Es beschreibt die Welt des Mikrokosmos und beruht unter anderem auf den Gesetzen der Quantenmechanik, wie sie in den 1920er Jahren von Max Planck, Werner Heisenberg und Paul Dirac aufgestellt wurden.

Beide Theorien machen, wie Popper das forderte, falsifizierbare Vorhersagen und gelten jeweils in einem großen Anwendungsbereich. Weil sie einander aber ausschließen – was bei der Betrachtung extremer physikalischer Bedingungen etwa im Inneren von Schwarzen Löchern oder auf kleinsten Längenskalen deutlich wird –, stürzen sie die theoretische Physik in ein Dilemma. Diese nämlich sucht in reduktionistischer Weise nach einem einheitlichen

Fundament aller physikalischen Zusammenhänge. In der Stringtheorie, deren Entwicklung in den späten 1960er Jahren begann, glaubt sie, es im Prinzip gefunden zu haben. Diese nämlich hat seither den Weg gebahnt, um alle vier Fundamentalkräfte in einem gemeinsamen Rahmen zu beschreiben.

Vorhersagen statt messen

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik hält bislang zwar jedem Falsifizierungsversuch stand. Doch in ihm existieren zahlreiche freie Parameter, Größen also, die experimentell bestimmt werden müssen und erst dann in die mathematischen Gleichungen eingesetzt werden können. Dazu gehören etwa die Stärke der elektromagnetischen Anziehungskraft, aber auch die Massen der Elementarteilchen. Der Stringtheorie indessen traut man zu, diese Größen eines Tages vorherzusagen, was ihren Status als Fundamentalthorie nachdrücklich untermauern würde.

Doch trotz der Fortschritte auf diesem Weg zu einer vereinheitlichten Theorie werden zunehmend kritische Stimmen laut. Denn wer die poppersche Forderung nach Falsifizierbarkeit nicht aufgibt, wird sich mit

Laut Stringtheorie ist unser Universum nur eines von vielen. Sie existieren nebeneinander in einem Hyperraum und treten möglicherweise nie miteinander in Kontakt. Und vielleicht werden die Forscher ihre Existenz auch in Zukunft nicht nachweisen können.

Philosophische Argumente wie das anthropische Prinzip betreten das Parkett

Strings gelten in der Stringtheorie als die fundamentalen Bausteine der Materie. Man kann sie sich als schwingende Saiten vorstellen, die je nach Art der Schwingung unterschiedliche Elementarteilchen repräsentieren. Aus diesen wiederum sind die Atome und schließlich die Gegenstände der makroskopischen Welt aufgebaut. Die Ausdehnung eines Strings entspricht etwa 10^{-35} Metern.

dem, was die Stringtheorie postuliert, nicht anfreunden können. Dazu gehören zusätzliche, möglicherweise unbeobachtbare Raumdimensionen, die den dreidimensionalen Raum (beziehungsweise die vierdimensionale Raumzeit) um mindestens sechs Raumdimensionen erweitern. Dazu gehören aber auch parallele Universen. Und mehr noch: Die Stringtheorie lässt die Existenz vieler Universen nicht nur möglich erscheinen, sondern fordert sie geradezu.

Den Nachweis ihrer Existenz blieb sie aber schuldig. Ein gefundenes Fressen für Kritiker: Diese nämlich werfen den Vertretern der »Multiversums«-Theorie vor, nicht mehr Physik, sondern Metaphysik zu betreiben. Auf das Dilemma reagiert die Physik mit einem seit Jahren andeutenden Paradigmenwechsel bezüglich der Anforderungen, die an eine physikalische Theorie zu stellen sind: Plötzlich steht auch die poppersche Falsifizierbarkeit zur Debatte, und philosophische Argumente wie das anthropische Prinzip betreten das Parkett.

Von Haus aus ist die Stringtheorie zunächst eine physikalische Theorie wie das Standardmodell der Elementarteilchenphysik und die Gravitationstheorie auch. Sie besteht aus einem Satz mathematischer Gleichungen und trifft Aussagen über physikalische Größen wie beispielsweise die Energie des Vakuums. Doch dann weicht sie von bekannten Theorien ab und fordert aus mathematischen Konsistenzgründen, dass die Welt zehn Raumzeitdimensionen – neun Raumdimensionen und eine Zeitdimension – besitzen muss.

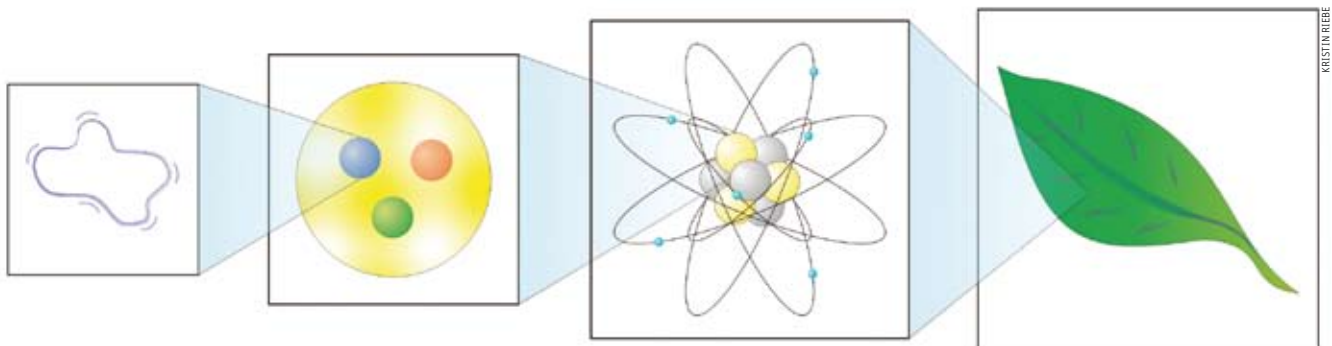
Spätestens Mitte der 1980er Jahre hatte sich zwar herausgestellt, dass in einem solchen zehndimensionalen Raum gleich fünf verschiedene Stringtheorien existieren, von denen jede einzelne unsere Welt gleich gut beschreibt. Dieser Nebeneffekt der Forschung war zunächst alles andere als erwünscht, hoffte man doch auf eine einzige Fundamentaltheorie. Im folgenden Jahrzehnt jedoch konnten Physiker das Problem beheben: Als sie ihren Modellen eine weitere Dimension hinzufügten, ließen sich die fünf Theorien zu einer einzigen, der so

genannten M-Theorie, vereinigen. Dieser bemerkenswerte Umstand ließ die Theoretiker wieder Mut schöpfen: Kann die Stringtheorie aus einem Satz fundamentaler Gleichungen vielleicht doch eindeutige Vorhersagen über unser Universum machen? Lässt sich mit ihrer Hilfe beispielsweise die Vakuumenergie berechnen und das Spektrum an Elementarteilchen beschreiben, wie wir es kennen?

Doch es kam anders – und das ist unser Wissensstand bis heute. Unsere vierdimensionale Welt lässt sich mit Hilfe einer zehndimensionalen Theorie nämlich nur dann beschreiben (und für elfdimensionale Theorien gilt Entsprechendes), wenn man sich die sechs räumlichen Extradimensionen als kompaktes, sehr kleines räumliches Gebilde vorstellt, wenn man sie also, wie Physiker sagen, kompaktifiziert. An jedem Raumzeitpunkt der vierdimensionalen Welt – entsprechend einem beliebigen Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt – »hängen« dann sechs kompakte Raumdimensionen. Sie sind zwar unbeobachtbar klein, weshalb wir sie auch nicht einfach betreten können, besitzen aber laut Stringtheorie erheblichen Einfluss. Denn je nach Art ihrer Kompaktifizierung besitzt das daraus hervorgehende vierdimensionale Universum verschieden viele unterschiedliche Elementarteilchen und wird von unterschiedlichen Fundamentalkräften regiert.

Warum existiert ausgerechnet unser Universum?

An dieser Stelle verlor die Stringtheorie ihre Eindeutigkeit. Denn wann immer eine physikalische Theorie mehr als nur eine mathematische Lösung erlaubt, muss man annehmen, dass jede davon mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit realisiert ist, sich in der Realität also tatsächlich beobachten lässt – oder erklären, warum dies eben nicht der Fall ist. Doch unerwarteterweise erwies sich eine riesige Anzahl kompaktifizierter Räume als mögliche Lösung der Stringtheorie. Mit anderen Worten: Die Theoretiker hatten in ihren mathematischen Gleichungen plötzlich eine enorme Anzahl verschiedener Universen mit jeweils un-



terschiedlichen Eigenschaften entdeckt. Jedes beschreibt gemäß der Stringtheorie ein so genanntes gültiges Vakuum, man sagt auch: einen zulässigen Grundzustand. Aber keines dieser Gebilde sticht besonders heraus, keine dieser Lösungen gibt uns Anlass dazu, sie zu bevorzugen. Damit fehlt uns Theoretikern ein Selektionsprinzip: Wir können nicht begründen, weshalb genau unser Universum – schließlich ist es nur eine Lösung unter vielen – real sein sollte und alle anderen nicht. Existiert also mehr als ein einziges Universum?

Leben in der Mulde

Die Gesamtheit aller Stringwelten, also aller möglichen Lösungen der mathematischen Gleichungen, bezeichnen die Physiker auch als »Landschaft« der Stringtheorie, geformt durch Berge und Anhöhen sowie Täler, Mulden und Rinnen. Diese stringtheoretische Fläche ist natürlich ein hochabstrakter Raum. Täler und Mulden entsprechen Stringwelten, die eine niedrige Vakuumenergie besitzen, während Berggipfel für Universen mit hoher potenzieller Energie stehen. Das Universum, in dem wir leben, entspräche in dieser Landschaft von Universen genau einer Mulde, einem bestimmten Grundzustand mit niedriger Vakuumenergie. Denn einen solchen niedrigen Wert haben unsere Kosmologen tatsächlich gemessen.

Die Darstellung von Lösungen einer Theorie durch eine Landschaft mit energetisch unterschiedlich hohen Gipfeln und Tälern ist nicht neu. Insbesondere auch in der Festkörperphysik haben wir es üblicherweise mit hochkomplexen Systemen zu tun. Deren Gleichungen lassen jeweils eine größere Anzahl von Lösungen zu, die alle realisiert sind oder zumindest realisiert sein können. Die verschiedenen Aggregatzustände etwa von Wasser – flüssig, fest, gasförmig – sind hierfür ein gutes Beispiel. Stringtheoretiker gehen allerdings darüber hinaus. Anders als Materialwissenschaftler, die unterschiedliche Zustände eines Festkörpers im selben Universum beschreiben, ordnen die Theoretiker die verschiedenen Aggregatzustände fundamentaler Strings nun verschiedenen Universen zu!

Besonders überrascht waren die Forscher, als sie in der Landschaft der Stringtheorie nicht nur einige wenige Mulden und Hügel entdeckten, sondern auf eine schier unermessliche Anzahl von ihnen stießen. Theoretische Abschätzungen der Anzahl solcher potenzieller Welten liefern die Größenordnung 10^{100} oder sogar 10^{1000} . Das ist weit mehr als etwa die Zahl der Atome in unserem Universum.

Zudem unterliegt die stringtheoretische Landschaft steter Veränderung. Verbindet man die Gleichungen, die zu ihr führen, mit jenen



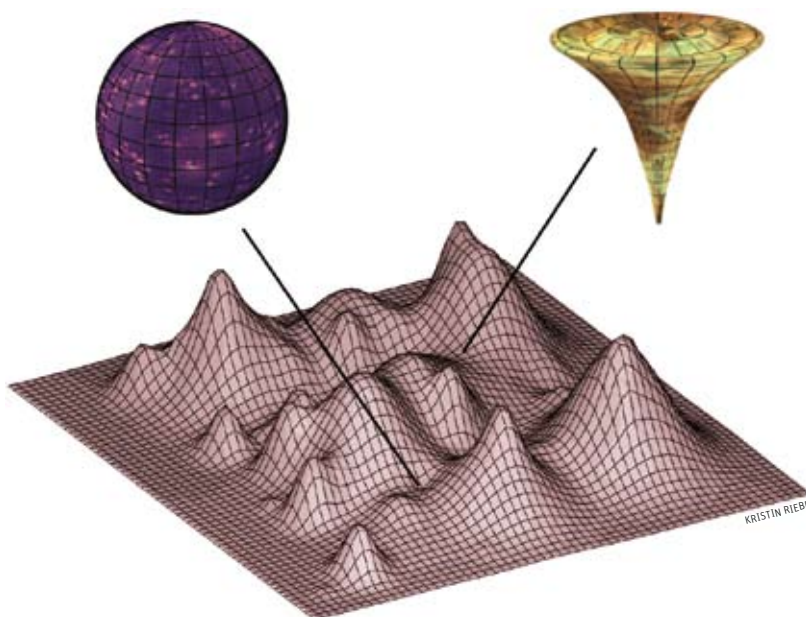
der Gravitationstheorie, erweisen sich nämlich auch spontane Übergänge als möglich. Universen können durch bestimmte Prozesse potenzielle Energie gewinnen und so aus einem Tal auf einen Hügel gelangen. Und wenn sie sich an einem Berghang befinden, streben sie üblicherweise ins nächstgelegene Tal, also in einen Zustand niedrigerer Energie. (Denn genau wie in der Alltagsphysik sind die Zustände niedriger potenzieller Energie wahrscheinlicher als solche mit hoher Energie.)

Bei einem Übergang von einem Energieniveau zum anderen aber verändert sich auch das Universum selbst – unter Umständen auf so fundamentale Weise, dass man geradezu von der Geburt eines neuen Universums sprechen kann. Möglicherweise war das, was wir als Urknall unseres Universums bezeichnen, tatsächlich nur sein Übergang von einem Zustand höherer Energie in ein energetisches Tal.

Die Suche nach einer Weltformel, die Aussagen über ein einziges Universum macht und Vorhersagen für alle unsere zukünftigen Experimente liefert, ist – so müssen wir folgern – wahrscheinlich zu naiv gewesen. Denn mit dem stringtheoretischen Bild eines Multiversums, das eine große Anzahl von Naturkonstanten und Naturgesetzen mit sich bringt, verliert die Physik zumindest einen Großteil ihrer Vorhersagekraft. So scheint die Stringtheorie alles vorherzusagen und damit letztlich nichts.

Es ist sogar sehr schwierig, in der stringtheoretischen Landschaft diejenige Lösung aufzuspüren, die unser eigenes Universum repräsentiert – also unter anderem sein Spektrum an Elementarteilchen und seine Fundamentalkräfte. Und auch wenn sich in letzter Zeit die Anzeichen dafür mehren, dass dies gelingen könnte, müssen sich Physiker dennoch fragen, ob sie überhaupt noch von einer Wissenschaft sprechen können, wenn ihre Theorie

Möglicherweise war der Urknall nur der Übergang des Universums von einem Zustand höherer Energie in ein energetisches Tal



In der Landschaft der Stringtheorie erscheinen Universen mit hoher Vakuumenergie als Hügel. Täler hingegen repräsentieren Universen mit niedriger Energie wie unser eigenes.

weder eindeutige noch überprüfbare und falsifizierbare Vorhersagen macht.

Über diese Frage brach nun vor einigen Jahren ein regelrechter Disput aus. Am heftigsten wird die Stringtheorie dafür attackiert, dass sie unüberprüfbare Aussagen über eine Unzahl von Universen macht – und auch nicht erklären kann, warum Naturkonstanten und Kraftgesetze in unserem Universum gerade so sind, wie wir sie kennen. Die Physikergemeinde zerfällt jetzt in drei Fraktionen. Eine von ihnen akzeptiert zwar die Tatsache, dass im Prinzip viele Möglichkeiten existieren, ein Universum zu modellieren, hält diese Überlegung aber für eine mathematische Spielerei. Diese Forscher suchen daher nach einem Selektionsprinzip, das unser Universum gegenüber anderen Lösungen der Stringgleichungen hervorhebt. Sie mutmaßen oder hoffen zumindest, dass ihre Theorie eines Tages eben doch erklären kann, warum unser Universum gerade so aussieht, wie wir es beobachten.

Eine andere Gruppe von Physikern lehnt die Vorstellung eines Multiversums prinzipiell ab. Sie glaubt an eine einzige real existierende Welt, die sich durch eine einzige Theorie beschreiben lässt. David Gross, Nobelpreisträger und Entdecker zweier der fünf Stringtheorien im zehndimensionalen Raum, bemerkte einmal: »The landscape idea? I hate it! Never, never, never, never give up!« (etwa: »Diese abwegige Vorstellung von einer Stringlandschaft? Ich hasse sie! Gebt euch niemals damit zufrieden!«).

Ein dritter Teil der Physiker akzeptiert schließlich die Vorstellung, dass eine Unmenge von Parallelwelten physikalisch realisiert ist, also tatsächlich existiert. Sie begründen ihre Position mit dem anthropischen Prinzip. Dieses war ursprünglich von Robert Dicke und

Brandon Carter in die Kosmologie eingeführt worden, um zu erklären, warum intelligentes Leben im Universum entstand, obwohl das extrem unwahrscheinlich zu sein scheint. Es besagt in etwa, dass das von uns beobachtete Universum für die Entwicklung intelligenten Lebens geeignet sein muss, da wir sonst nicht existierten, um es zu beobachten. Eine Variante dieses Prinzips besagt nun, dass durchaus viele Welten existieren dürfen, wir uns aber nicht wundern sollten, in genau unserem Universum zu leben. Denn ebendieses liefert die Voraussetzungen für intelligentes Leben oder, abstrakter ausgedrückt, für das Vorhandensein von Beobachtern.

Viele Physiker lehnen das anthropische Prinzip ab. Es besitze keine Vorhersagekraft, weil sich aus ihm keine Zahlenwerte für konkrete physikalische Größen ableiten lassen – es liefert also keine Erklärung für irgendeine Eigenschaft der Natur. Stringtheoretiker sollten es daher nicht missbrauchen, um ihre vielen Lösungen zu rechtfertigen, sondern besser eine einzige Lösung produzieren – ein einziges Universum, das aussieht wie das unsere.

Erklärung eines scheinbaren Wunders

Meines Erachtens ist das anthropische Prinzip jedoch mehr als nur eine philosophische Spitzfindigkeit oder gar eine Ausrede. In der Tat löst es im Rahmen der Stringtheorie zwei alte Probleme der Physik: die Frage, warum unsere Naturgesetze gerade die Form haben, die wir beobachten, und die Frage, warum unsere Naturkonstanten so fein darauf abgestimmt zu sein scheinen, dass sie Leben ermöglichen, wie wir es kennen. In beiden Fällen stützt sich das anthropische Prinzip auf das Gesetz der großen Zahlen: In einer hinreichend großen Stichprobe muss alles, was möglich ist, irgendwo realisiert sein. So ist möglicherweise auch jede Form von Naturgesetzen in jeweils einem Universum verwirklicht – aber Beobachter existieren nur in einem lebensfreundlichen Universum.

Im Fall der Naturkonstanten erweist sich diese Denkweise als besonders mächtig. Das anthropische Prinzip ist angesichts der Vorstellung eines Multiversums in der Lage, die von einigen Kosmologen behauptete Feinabstimmung des Universums zu erklären – das scheinbare »Wunder« also, dass schon leicht veränderte Naturkonstanten die Entstehung von Leben verhindert hätten. In der großen Menge von Kombinationen, die im Multiversum existieren, muss auch unser »Konstantenfenster« realisiert sein – wir brauchen uns also nicht zu wundern, gerade dieses zu beobachten.

Anders gesagt: Fische leben nun mal im Wasser. Und noch einmal anders gesagt: Unser

Konstantenfenster wird nun statistisch notwendig. Das erhöht auch die Wissenschaftlichkeit dieses Gedankengangs, denn es befreit unseren Kosmos von dem Makel, ein – aus welchen Gründen auch immer – fein abgestimmtes Kuriosum zu sein.

Trotz allem bleibt jedes Argumentieren mit dem anthropischen Prinzip insofern unbefriedigend, als es den Rückzug von einer Theorie bedeutet, die klare Vorhersagen und Erklärungen für unsere Welt liefern könnte. Doch das muss nicht immer so bleiben, zumal sich die Physiker letzten Endes doch darin einig sind, dass jede Theorie zumindest in Teilen einer Bestätigung bedarf. Um dem Dilemma der vielen Kompaktifizierungsmöglichkeiten wieder zu entkommen, verfolgen Stringtheoretiker in den letzten Jahren eine Erfolg versprechende neue Strategie. Sie betrachten Klassen von Stringkompaktifizierungen nach vier Raumzeitdimensionen, um herauszufinden, ob sie in unserem Sinn »gute« physikalische Eigenschaften besitzen.

Insbesondere überprüfen die Forscher, ob sie das Standardmodell der Teilchenphysik enthalten oder die kosmische Inflation, also die explosionsartige Ausdehnung des jungen Universums kurz nach dem Urknall. Im zweiten Schritt untersuchen sie dann, ob diese Kompaktifizierungen gemeinsame und universelle Eigenschaften besitzen, um neue Vorhersagen abzuleiten, die man in Zukunft experimentell überprüfen kann.

Für eine große Klasse von Stringkompaktifizierungen, die so genannten Intersecting-Brane-Modelle, scheint dies tatsächlich schon in Reichweite. Wie jeder anderen Variante der Stringtheorie auch liegen ihnen schwingende Strings zu Grunde. In diesen Modellen wird die Gravitationswechselwirkung durch Strings vermittelt, deren Anfang und Ende zusammengefügt sind, die also geschlossene Ringe bilden. Die anderen Fundamentalkräfte darin – wie etwa die elektromagnetische Kraft – rühren hingegen von offenen Strings her. Die Enden dieser offenen Strings liegen auf so genannten Branen, auf höherdimensionalen Ebenen, die sich in den Extradimensionen schneiden und miteinander wechselwirken.

Intersecting-Brane-Modelle sind sehr gut geeignet, das Standardmodell der Elementarteilchen zu reproduzieren. Insbesondere erlauben sie verblüffende Vorhersagen für die anstehenden Experimente am Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) in Genf. Voraussetzung dafür ist, dass die kompakten Extradimensionen, die senkrecht zu den sich schneidenden Branen liegen, sich durch einen relativ großen Raum beschreiben lassen. Dieses Szenario der großen Extradimensionen, die ei-

nen (höherdimensionalen) Durchmesser von fast einem tausendstel Millimeter erreichen, haben Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Georgi Dvali entwickelt. Trifft es zu, müssten die am LHC erreichbaren Energien ausreichen, um neue Stringteilchen zu erzeugen. Weil sie sich in seinen Detektoren auch nachweisen ließen, wäre zumindest diese Klasse von Stringmodellen überprüfbar und falsifizierbar. Intersecting-Brane-Modelle stehen zudem in engem Zusammenhang mit der möglichen Erzeugung Schwarzer Minilöcher am LHC. Das eröffnet weitere Chancen für ihre Überprüfung.

Auch Kosmologen können die Stringtheorie testen

Damit die LHC-Experimente tatsächlich zu diesen Resultaten führen, müssen zugegebenermaßen einige optimistische Annahmen zutreffen, allen voran die Existenz großer Extradimensionen. Daher dürfen entsprechende Überlegungen bislang auch nur als Spekulation gelten. Doch auch Kosmologen können die Stringtheorie testen. Sie könnten unterschiedliche Stringkompaktifizierungen mit den neuen Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung vergleichen – denn in der Theorie hat die Art der Kompaktifizierung einen Einfluss auf deren Eigenschaften. Neue Erkenntnisse über Dunkle Materie, Dunkle Energie oder Gravitationswellen versprechen zudem weitere Optionen, die Stringtheorie experimentellen Überprüfungen zu unterziehen.

Weil einige Aussagen der Stringtheorie also doch überprüfbar sind und das anthropische Prinzip gerade auch im Fall der Naturkonstanten zu mehr Wissenschaftlichkeit führt, bin ich überzeugt, dass die heutige theoretische Physik immer noch eine exakte Naturwissenschaft darstellt. Sie stellt physikalische Fragen, sucht sie zu beantworten und hat den Kontakt zum Experiment keineswegs verloren – bleibt also in weiten Bereichen falsifizierbar. Außerdem hat sie etwa mit der Schleifenquantengravitation eine Konkurrentin, gegenüber der sie weiterhin ihre Vorzüge beweisen muss.

Wer sie allerdings akzeptiert, kommt um den Gedanken nicht herum, dass die Theorie des Multiversums – nach Kopernikus und Darwin – dem Menschen vielleicht sogar seine Sonderrolle wieder zurückgibt. Denn ihr zufolge ist er nicht nur glücklicher Sprössling eines ansonsten wohl weithin unbelebten Universums, sondern stellt vielleicht sogar in einer ganzen Landschaft von Universen den extrem unwahrscheinlichen Ausnahmefall eines intelligenten Beobachters dar. Und der ließe das Phänomen des Lebens wohl noch kostbarer erscheinen, als es ohnehin schon ist. ◀



Dieter Lüst ist Professor für Mathematische Physik und Stringtheorie an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU), Direktor am Max-Planck-Institut für Physik sowie Sprecher des »Elite Master Course Theoretical and Mathematical Physics« an der LMU/TU München. Im Jahr 2000 erhielt er den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und wurde in die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften aufgenommen. Zu seinen Arbeitsgebieten gehören die Stringtheorie sowie Probleme von Eich- und Gravitationstheorien.

Mitarbeit: **Vera Spillner**. Sie studierte Theoretische Physik in Heidelberg, Minneapolis (USA) und Berlin und promoviert an der Universität Bonn in Philosophie.

Dvali, G.: Die geheimen Wege der Gravitation. In: Spektrum der Wissenschaft Dossier 1/2009, Parallelwelten, S. 42–49.

Lüst, D. et al.: The LHC String Hunter's Companion. In: Nuclear Physics B 808(1–2), S. 1–52, 11. Februar 2009.

Lüst, D.: The Landscape of String Theory. In: Fortschritte der Physik 56(7–9), S. 694–722, August 2008.

Lüst, D.: Intersecting Brane Worlds: A Path to the Standard Model? In: Classical and Quantum Gravity 21, S. 1399–1424, 20. April 2004.

Nicolai, H.: Auf dem Weg zur Physik des 21. Jahrhunderts. In: Spektrum der Wissenschaft 11/2008, S. 28–37.

Smolin, L.: Die Zukunft der Physik: Probleme der String-Theorie und wie es weiter geht. DVA, München 2009.

Vilenkin, A.: Many Worlds in One: The Search for other Universes. Hill and Wang, New York 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987527.

Mit HITZESCHOCK- PROTEINEN



Ihre neu entdeckten Funktionen in der Immunabwehr machen die Hitzeschockproteine zu wichtigen Verbündeten im Kampf gegen Krebs, Infektions- und Autoimmunkrankheiten.

gegen Krebs

Von Pramod K. Srivastava

In Kürze

- ▶ Die allgegenwärtigen Wächterproteine heißen: Hitzeschockproteine (HSPs), **Stressproteine** oder auch **Chaperone** («Anstandsdamen»). Sie sind allen Lebensformen zu eigen und überwachen in ihrer Vielseitigkeit verschiedenste zelluläre Prozesse. So sorgen sie für glatte und bedarfsgerechte Abläufe.
- ▶ Bei ihren diversen molekularen Kontakten nehmen die HSPs gewissermaßen Antigen-Fingerabdrücke vom Inhalt der Zellen zur **Begutachtung durch das Immunsystem**. In der Evolution wuchs ihnen dadurch auch eine entscheidende Funktion für Immunreaktionen gegen Krankheitserreger und Krebs zu.
- ▶ Für **medizinische Therapien** versuchen Forscher, Funktionen von HSPs gezielt zu hemmen oder zu verstärken.

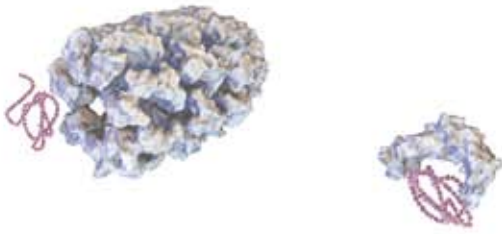
Ein Universitätslabor in Pavia im Jahr 1962: Erschrocken bemerkt der junge italienische Genetiker Ferruccio Ritossa, dass jemand versehentlich den Thermostaten des Inkubators hochgestellt hat, in dem er Taufiegen züchtet. Als er trotzdem Zellen der so misshandelten Tiere mikroskopiert, entdeckt er an ungewohnten Stellen der Chromosomen verdickte Abschnitte – was nur bedeuten konnte, dass dort Gene für Proteine abgelesen wurden (Bild S. 42). Denn die Forscher wussten damals schon, dass solche Aufblähungen, so genannte Puffs, bei Taufiegen von Gentätigkeit zeugen. In diesem Fall hatte offensichtlich die hohe Temperatur bestimmte Gene aktiviert. Tatsächlich ließ sich der Effekt reproduzieren. Deswegen erhielten jene Stellen später die Bezeichnung Hitzeschock-Loci, und ihre Produkte heißen Hitzeschockproteine, abgekürzt HSPs.

Anfangs glaubten die Genetiker, eine derartige Reaktion gäbe es nur bei Taufiegen. Erst 15 Jahre später fanden sie die betreffenden Proteine auch bei den verschiedensten anderen Organismen, einschließlich Säugtieren. Außerdem erkannten sie mit der Zeit ihre Allgegenwart und ihre erstaunlich verschiedenartigen Funktionen – was sicherlich zu den faszinierendsten Entdeckungen der modernen Biologie zählt. Heute wissen wir: Diese Proteine sind für jegliches Leben grundlegend, und zwar nicht nur auf der Zell-, sondern auch auf der Organismen-, ja selbst auf der Populationsebene.

Zwar sprechen die Forscher noch immer meist von Hitzeschockproteinen, doch eigent-

lich ist diese Bezeichnung viel zu eng. Die HSPs sind uralte. Was sie leisten, gehört zu den allerfrühesten Überlebensmechanismen, die während der Evolution stets bewahrt blieben. Sogar für die Evolution selbst sind sie nützlich. HSPs entstehen insbesondere in zellulären Stress-, also Extremsituationen – weswegen Biologen sie manchmal auch Stressproteine nennen. Das kann übermäßige Wärme sein, aber auch vieles andere, was einer Zelle nicht bekommt. Dann sorgen diese Moleküle dafür, dass die Abläufe im Zellinnern trotz der harten Bedingungen glatt weitergehen, so dass die Zellen Ausnahmesituationen möglichst unbeschadet überstehen.

Weitere wichtige Aufgaben, die Hitzeschockproteine bei höheren Organismen einschließlich des Menschen wahrnehmen, erkannten Forscher erst in den letzten zehn Jahren. Demnach sind diese Moleküle auch in die Immunreaktionen gegen Krebs und Krankheitserreger eingebunden. Diese Eigenschaft möchten Mediziner nun für diverse neue Medikamente und therapeutische Impfstoffe nutzen. Um diesen Ansatz verständlich zu machen, möchte ich zunächst aufzeigen, wie die Allroundkünstler ihren Hauptjob bewältigen: den einer molekularen Gouvernante für andere Eiweißstoffe. Nach dem englisch-französischen Wort für »Anstandsdame« heißen die HSPs auch »Chaperone«. Wie ihre Pendants in der Menschenwelt müssen auch sie aufpassen, lenken, anleiten, helfen. Letztlich haben sie für zweierlei zu sorgen: Nicht erwünschte Kontakte innerhalb und zwischen Molekülen haben sie zu unterbinden, wünschenswerte hingegen zu fördern. Auf diese Weise sorgen sie auch für stabile und produktive Bindungen zwischen Proteinpartnern.



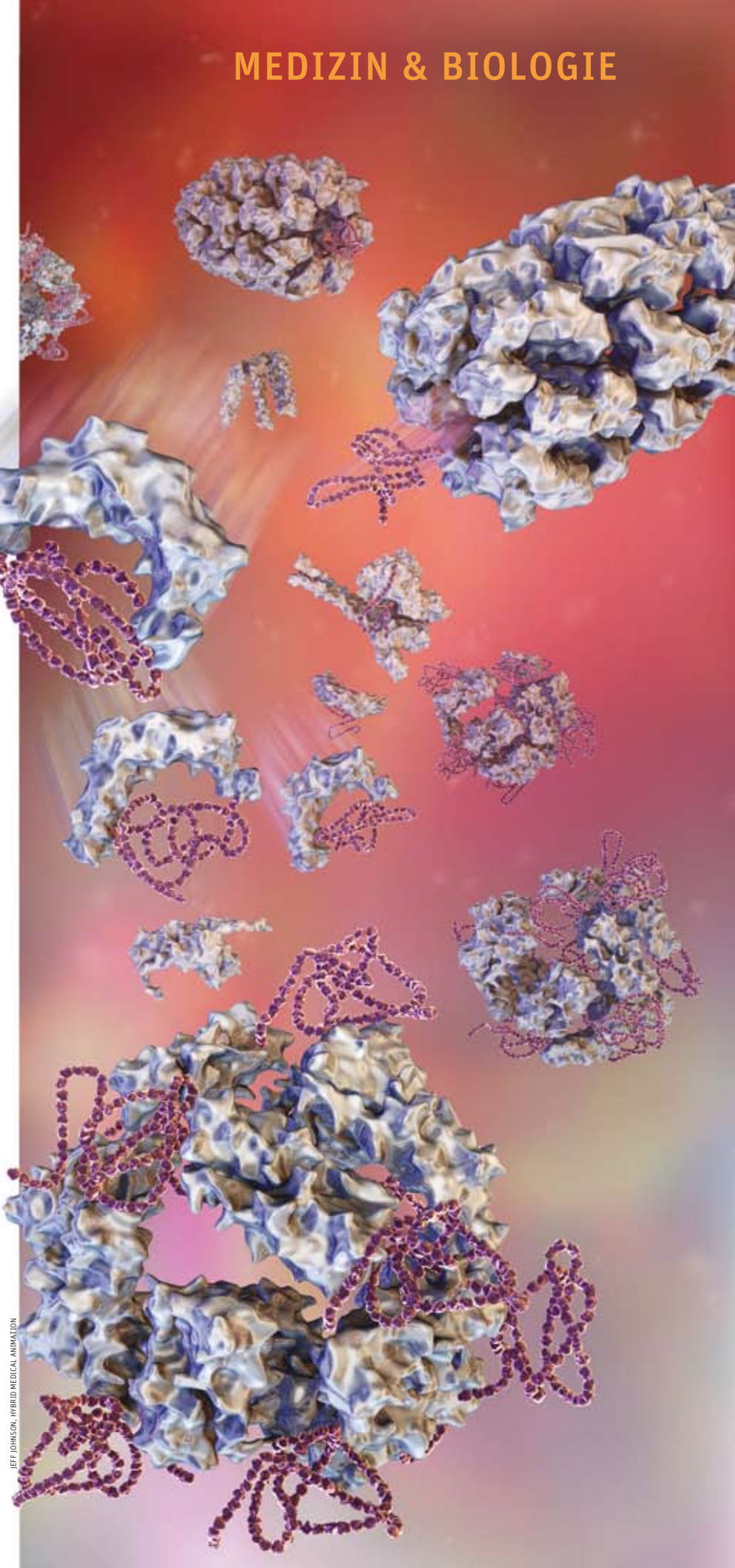
Die Hitzeschockproteine (helle Gebilde) kommen in vielen Formen daher. Zu ihren zahlreichen Aufgaben gehört, bei der Faltung von Aminosäureketten (rötliche Ketten) zu funktionstüchtigen Proteinen zu assistieren, diese zu den richtigen Reaktionsorten zu geleiten und vor Schaden zu schützen.

Für viele Proteine existieren oft nur ein oder ganz wenige passende Partner für eine effektive Interaktion. Zum Beispiel müssen ein Rezeptor und sein Ligand (Bindungspartner) wie Schlüssel und Schloss zusammenfinden. Derselbe Ligand würde bei anderen Rezeptortypen wenig bewirken, wie sich auch umgekehrt ein bestimmter Rezeptor typischerweise nur von seinem speziellen Liganden aktivieren lässt, oder höchstens noch von in ihrer Struktur ganz ähnlichen Molekülen.

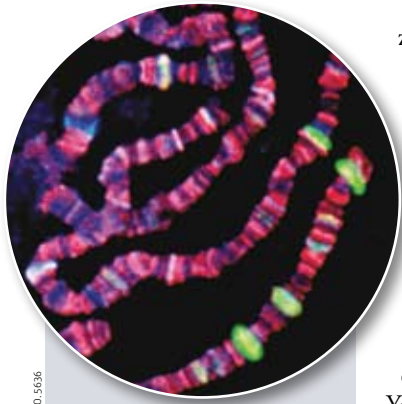
Korrekte Proteinfaltung

Die Hitzeschockproteine agieren viel weniger spezifisch: Sie pflegen die unterschiedlichsten Proteine zu bedienen. Diese Bandbreite an Kontakten erlaubt ihnen, eine enorme Fülle von Aufgaben zu meistern. Darunter kann zum Beispiel fallen: neu gebildeten Aminosäureketten zu helfen, sich korrekt zum fertigen Protein zu falten (siehe Kasten S. 43); beschädigte Proteine zu zerstören; oder Proteine zu deren Zielort zu eskortieren und sie von falschen Kontakten und Störenfrieden fernzuhalten.

Wie anspruchsvoll und wesentlich dergleichen ist, sei an einigen Beispielen verdeutlicht. Soll ein Protein die ihm zugeordneten Funktionen ausführen, muss es nicht nur zur passenden Zeit am rechten Ort sein, sondern es benötigt dazu auch eine bestimmte räumliche Struktur. Zu dieser Konformation verhelfen der frischen Aminosäurekette verschiedene Kräfte. Beispielsweise gehört zu jeder Aminosäure eine für sie typische Reaktion auf Wasser (das in Zellen reichlich vorhanden ist). So genannte hydrophobe (wasserabgeneigte) Aminosäuren streben von Wassermolekülen fort; sie suchen darum ins Innere des Proteins



JEFF JOHNSON, HYBRID MEDICAL ANIMATION



STRESSANTWORT VON CHROMOSOMEN

Erleben Taufliegen starke Hitze, zeigen sich auf ihren Chromosomen (den Riesenchromosomen der Speicheldrüsen) charakteristische so genannte Puffs. An diesen Stellen (weiß und grün) werden Gene für Stress- oder Hitzeschockproteine aktiv.

MIT FROHL. GEN. VON JANIS WERNER UND JOHN T. LIS. AUS: SCIENCE, 22. AUGUST 2003, VOL. 301, NO. 5636

Wenn Zellen in Stresssituationen um ihr Überleben kämpfen, halten Hitzeschockproteine die Lebensprozesse in Gang

zu gelangen. Dagegen bevorzugen hydrophile (Wasser liebende) Aminosäuren Außenplätze. Weil diese Reaktionen allein zur korrekten Faltung noch nicht genügen, unterstützen Hitzeschockproteine den Prozess, zum Beispiel das himbeerförmige HSP60. (Die Nummern der verschiedenen HSPs orientieren sich an ihrem Molekulargewicht.)

Unser derzeitiges Wissen über das HSP60-Chaperon verdanken wir vor allem dem Genetiker Arthur L. Horwich von der Yale University in New Haven (Connecticut). Es besteht aus mehreren kleineren Molekülen, die zusammen eine Art Käfig bilden. Weil der innere Rand stark hydrophob ist, lockt das die wasserscheuen Aminosäuren einer noch ungefalteten Kette dort hinein. Dadurch wird schließlich die ganze Kette in den Käfig gesaugt. Doch das Käfiginnere ist hydrophil. Dieser Umgebung suchen die hydrophoben Aminosäuren aber unbedingt zu entgehen, was der Kette eine andere Gestalt aufzwingt. Allerdings muss die Faltung nicht unbedingt gleich beim ersten Mal perfekt gelingen. Oft spuckt das Chaperon das neue Protein wiederholt aus und fängt es wieder ein – so lange, bis alles stimmt. Die Forscher bezeichnen HSP60 nach dem englischen Wort *fold* für falten als Foldase (Faltungshelfer). Weil HSP100 das Umgekehrte macht, heißt dieses Molekül Unfoldase. Wiederum handelt es sich um einen Ring aus mehreren Molekülen, der zusammen mit HSP70 beschädigte Proteine oder unerwünschte Proteinaggregate zerlegt und sogar komplett gefaltete Proteine dazu bringen kann, sich zu entfalten.

Die meisten Chaperone sind jedoch nicht käfigartig geformt. Sie packen ihre Zöglinge sozusagen mit den Ellenbogen. HSP70 bindet sich zum Beispiel an kurze Aminosäurefolgen – so genannte Peptide –, die auch zu der Kette eines Proteins gehören können. Seine Bindungsstelle hierfür trägt es in einem Spalt, der offen steht, wenn HSP70 mit so genanntem ATP (einem kleinen Energie liefernden Molekül) verbunden ist. Wenn kein ATP mehr vorhanden ist, schnappt eine deckelartige Struktur über dem Peptidabschnitt zu und hält so die gesamte Aminosäurekette des Proteins fest. Weil dieses Chaperon viele verschiedene Peptide ergreifen kann, vermag es bei einer Reihe von grundlegenden zellulären Prozessen mitzuwirken. So hilft HSP70 auch dabei, dass sich die frisch synthetisierten Proteine zum fertigen Molekül falten. Es assistiert zudem, wenn sich mehrere Proteine zu Komplexen zusammenfinden. Und es schützt zum Beispiel Eiweißstoffe bei überhöhter Temperatur vor dem Zerfall.

Hitzeschockproteine sind zwar auch unter Normalbedingungen aktiv, doch kann man sich leicht vorstellen, dass Zellen ihre Hilfe erst recht in Extremsituationen benötigen. Ob Hitze oder Kälte, Sauerstoffmangel, Austrocknung oder Nahrungsmangel – in solchen Notfällen kämpft eine Zelle ums Überleben. Dann gehen lebenswichtige Proteine oft rascher zu Grunde, als sie nachgeliefert werden können. Die HSPs fangen viel von dem Stress ab, indem sie solche Proteine schützen und andererseits beschädigte Moleküle abbauen und recyceln. Kurz, sie halten die Lebensprozesse so gut und reibungslos in Gang wie irgend möglich.

Tatsächlich gehört es zu den ersten Reaktionen von Zellen auf hohen Stress, ihre HSP-Produktion anzukurbeln. Davon wurde Ritossa damals Zeuge. Viele Studien haben diese Funktion seitdem weiter erhellt (siehe SdW 7/1993, S. 40). Doch hiermit erschöpft sich das Aufgabenfeld der Hitzeschockproteine noch lange nicht. Seit den 1980er Jahren ergründen die Molekularbiologen eine weitere, ganz andere Seite von ihnen. Auch auf diese Funktion sind komplexe Organismen unbedingt angewiesen.

Warum wurden Mäuse gegen ihren Krebs immun?

Als Doktorand in Hyderabad (Indien) stieß ich in den frühen 1980er Jahren auf ein Phänomen, das Forscher seit den 1940er Jahren kannten, aber nie hatten erklären können. Sie vermochten Mäuse mit deren Krebsgewebe gegen ihren eigenen Krebs zu immunisieren, wie man Menschen gegen einen Erreger impft. Nur – bei einer üblichen Impfung sind die verabreichten Proteine des Krankheitserregers dem Säugetierimmunsystem fremd, weswegen es sie als Antigene behandelt und eine Abwehrphalanx dagegen aufbaut. Doch bei Krebs handelt es sich um körpereigene Zellen. Was provoziert da die Immunreaktion?

Ich versuchte (auch noch nach meiner Promotion), solche krebsspezifischen Antigene zu isolieren. Schließlich gelang es mir, ein Protein zu identifizieren, mit dem sich tatsächlich eine Immunabwehr gegen Tumoren auslösen ließ: gp96. Dieses Molekül entpuppte sich als Mitglied der HSP90-Familie. (Von vielen Hitzeschockproteinen gibt es mehrere verwandte Formen.) Es erscheint in gesunden wie auch in Krebszellen. Ähnliches beobachteten unabhängig davon zwei Jahre später Stephen J. Ullrich und seine Kollegen von den amerikanischen National Institutes of Health in Bethesda (Maryland). Die Aminosäurefolge der gp96-Moleküle war, wie sich zeigte, in Tumorzellen die gleiche wie in gesundem Gewebe, also nicht

krebsspezifisch. Wieso konnte man die Tiere dann damit gegen Krebs impfen?

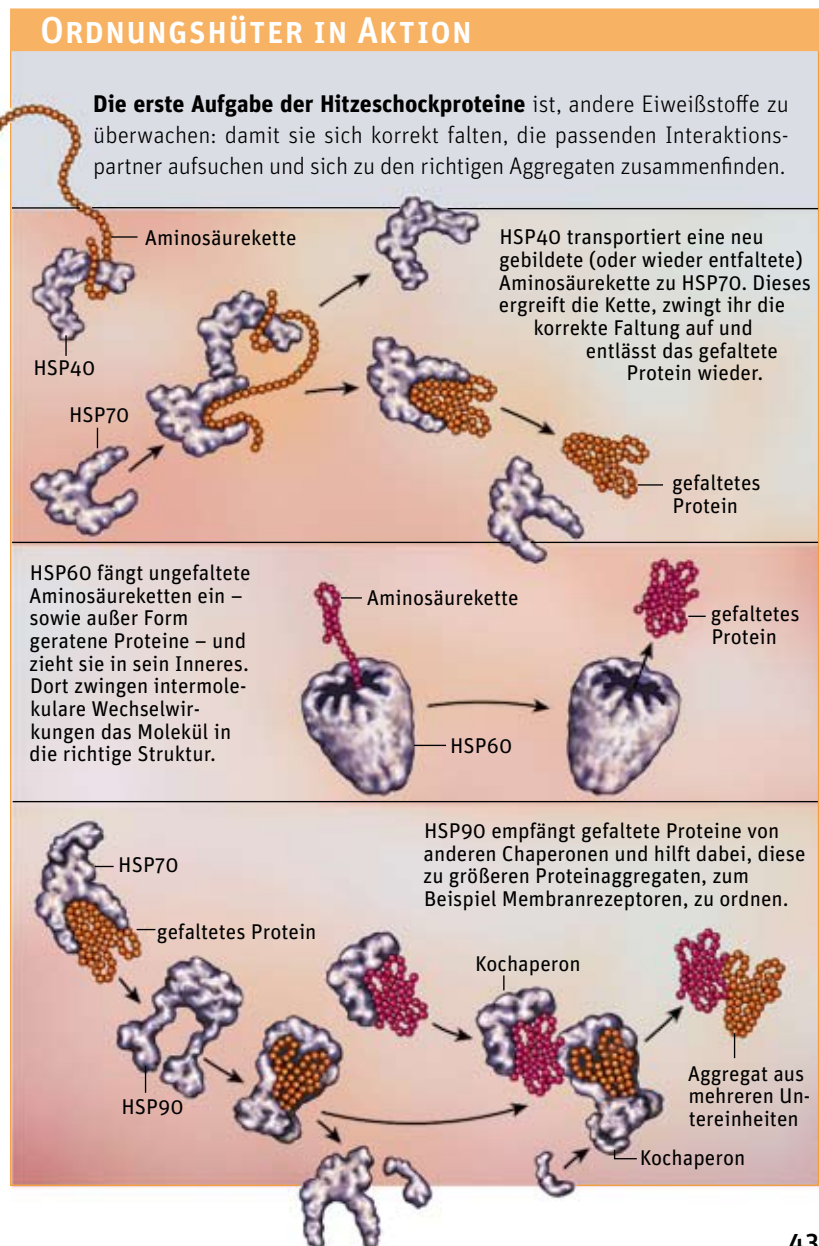
Erste Antworten zeichneten sich 1990 ab, als Heiichiro Udono, der damals als junger Forscher bei mir an der Mount Sinai School of Medicine in New York arbeitete, mit mir HSP70 aus Tumoren isolierte. Wir wollten ausprobieren, ob auch diese Moleküle eine Krebsimmunität auslösen konnten – und das gelang. Noch mehr staunten wir aber, als wir das Protein einem letzten üblichen Reinigungsschritt (einem speziellen chromatografischen Verfahren) unterzogen, bei dem es mit dem bereits erwähnten Energieträger ATP (einem kleinen Molekül) in Kontakt kam: Jetzt plötzlich verlor HSP70 sein vorheriges Immunisierungsvermögen.

Wir erkannten, dass das ATP das HSP70 veranlasste, irgendwelche Moleküle loszulassen – und zwar Peptide. In den nächsten Jahren halfen mehrere Arbeitsgruppen, das Geschehen zu enthüllen: Wenn sich HSP70 an ATP bindet, ändert es seine Konformation – und daraufhin gibt es sämtliche vorher angelegerten Peptide frei. Die entscheidende Erkenntnis für unsere Forschungen zu einer Krebsimpfung: Alle Familienmitglieder von HSP60, HSP70 und HSP90 tragen regelmäßig Peptide aus der Herkunftszelle mit sich herum. (Molekularbiologen sprechen darum von Peptide bindenden Chaperonen.) Stammen die isolierten HSP70- oder HSP90-Moleküle aus Tumorzellen, dann haben sie fast immer auch Peptide dabei, die von für die Krebszellen spezifischen Molekülen herühren – anders gesagt von deren Antigenen. Das Gleiche bei Infektionen: War die Herkunftszelle von einem Virus oder dem Tuberkuloseerreger infiziert, so tragen die HSPs Peptide von Antigenen des Erregers. Diese Peptide an den Chaperonen stellen somit einen antigenen Fingerabdruck der Zellen oder Gewebe dar, aus denen sie stammen.

Eben deswegen haben die Peptide bindenden Hitzeschockproteine entscheidende Bedeutung für eine fundamentale Immunfunktion – nämlich die, Krebszellen sowie virusinfizierte Zellen zu entdecken. Denn eine Klasse von Immunzellen, die so genannten T-Lymphozyten oder T-Zellen, erkennt derartige unerwünschte Zellen an deren Antigenen – und zwar über die so genannte Antigenpräsentation. Im Wesentlichen werden alle in einer Zelle hergestellten Antigene in Peptide zerlegt, die von Hitzeschockproteinen (Vertretern von HSP60, HSP70 oder HSP90) aufgegriffen werden. Am Ende landen diese Peptide dann bei einem anderen wichtigen Immunagenten, einem speziellen Molekül namens MHC-I, das sich in die äußere Zellmembran einbaut

und dort seine Fracht nach außen präsentiert. Die T-Zellen erkennen den Molekülkomplex mit dem Peptid – und zerstören jede Zelle, von der etwas Verdächtiges kommt, die somit krank wirkt.

Ohne die Hitzeschockproteine funktioniert der Vorgang nachweislich nicht. Denn dann bleiben die MHC-I-Moleküle leer, und die T-Zellen schöpfen keinen Verdacht. Erst die HSPs kümmern sich um die in den Zellen vorhandenen Peptide, deklarieren sie damit sozusagen zu Antigenen und machen sie dem beschriebenen Immunerkennungsmechanismus zugänglich. Der Zusammenhang, den meine Kollegen und ich 1994 vermuteten, erwies sich später als zutreffend. Weil sich bestimmte HSPs der Peptide annehmen, können wir die betreffenden Hitzeschockproteine aus entarteten oder infizierten Zellen zur Immunisierung gegen dieselbe Krankheit benutzen.



ANSTOSS EINER IMMUNANTWORT

Krebszellen und infizierte Zellen bilden abnorme Proteine. Fragmente dieser Moleküle können als Antigene Immunreaktionen hervorrufen. Allerdings müssen Immunzellen sie zunächst bemerken. Dabei helfen Hitzeschockproteine (HSPs), insbesondere Vertreter von HSP70 und HSP90. Dargestellt ist ein Immunalarm über antigenpräsentierende Zellen (AP-Zellen).

1 Hitzeschockprotein schnappt sich Antigen der kranken Zelle und übergibt es einem CD91-Rezeptor einer antigenpräsentierenden Zelle (AP-Zelle).

2 Antigenpräsentierende Zelle nimmt Antigen auf und gibt Entzündungssignale nach außen. Das ruft andere Immunzellen auf den Plan. Die AP-Zelle präsentiert das Antigen einer T-Zelle.



3 Die spezifisch aktivierte T-Zelle vermehrt sich. Ihre Abkömmlinge finden entsprechende kranke Zellen und vernichten sie.

IKEN CHRISTIANSEN

Hitzeschockproteine, genauer ihre Komplexe mit Peptiden, interagieren noch auf eine andere Art mit der Immunabwehr – und auch da wiederum, wenn auch diesmal indirekt, mit T-Lymphozyten. Für diesen Weg benutzen sie so genannte antigenpräsentierende Zellen, eine andere Immunzellsorte (siehe Kasten oben). Das sind in wohl jedem Körpergewebe auftretende, beinahe allgegenwärtige professionelle Wächter, die ihre Umgebung nach Antigenen absuchen. Was immer dergleichen ihnen begegnet, bieten sie den T-Zellen dar. Handelt es sich um etwas Gefährliches, werden diese die infizierten oder entarteten Zellen anhand von deren Fingerabdruck aufspüren und zu vernichten trachten.

Interessanterweise stellte sich heraus, dass antigenpräsentierende Zellen an ihrer Oberfläche Rezeptoren für Peptide bindende Chaperone tragen (siehe Kasten oben, Mitte). Den ersten solchen Rezeptor, CD91 genannt, identifizierte mein damaliger Doktorand Robert J. Binder, der jetzt an der University of Pittsburgh (Pennsylvania) arbeitet. Begegnet die antigenpräsentierende Zelle einem HSP-Peptid-Komplex, so holt sie ihn gewissermaßen durch die Rezeptortür ein, um ihn ihrerseits T-Zellen zu präsentieren. Das kann die T-Lymphozyten zur Vermehrung und zum Kampfeinsatz gegen die Krebszellen oder den Infektionsherd anstacheln. Vereinfacht gesagt erklärt sich durch diesen Mechanismus, wieso HSPs aus Tumoren gegen Krebs immunisieren.

Das Potenzial der Hitzeschockproteine als Hilfskräfte der Immunabwehr scheint damit allerdings noch nicht erschöpft zu sein. Offenbar können sie sogar selbst Alarm schlagen.

Wie Sreyashi Basu von der University of Connecticut School of Medicine in Farmington und ich nachwiesen, braucht man antigenpräsentierende Zellen nur mit Vertretern von HSP70 und HSP90 zusammenzubringen und erhält verschiedene wichtige Reaktionen. Zum Beispiel setzen diese Immunzellen daraufhin Signale in Gang, die Entzündungen auslösen können – was zu einer starken Abwehrreaktion gehört. Normalerweise pflegen die Hitzeschockproteine zwar im Zellinnern zu agieren. Aber wir wissen schon länger, dass gestresste Säugetierzellen einige ausgesuchte HSPs in zwar kleinen, aber doch bezeichnenden Mengen freisetzen beziehungsweise an ihrer äußeren Membran vorweisen. Möglicherweise stellt die ungewohnte Anwesenheit von Chaperonen außerhalb von Zellen einen Mechanismus dar, dem Immunsystem drohende Gefahr anzuzeigen.

Jeder Tumor ist einzigartig

Auf dieser Immunisierungsfunktion fußt meine eigene Forschung zu so genannten therapeutischen Krebsimpfstoffen. (Die meisten Impfungen erfolgen vorbeugend, doch beim therapeutischen Impfen sollen Patienten Abwehrkräfte gegen eine schon vorhandene Krankheit, in diesem Fall gegen ihre eigenen Krebszellen, mobilisieren.) Ich habe ein Herstellungsverfahren und Behandlungsschema entwickelt, HSP-Peptid-Komplexe aus Krebsgewebe von Patienten aufzureinigen und diese dann damit zu »impfen«, denn ich glaube, dass jeder Tumor bezüglich seiner Antigene einzigartig ist. Der von den patienteneigenen Krebszellen gewonnene Impfstoff soll das Im-

GESUNDER SPORTSTRESS

Bei körperlichem Training wird einem nicht nur warm. Überall im Körper erfahren Zellen dadurch auch sonst mancherlei Stress, weswegen sie bestimmte Hitzeschockproteine vermehrt bilden. Nach den vorläufigen Forschungsergebnissen könnte Sport unter anderem auch deswegen der Gesundheit dienen, weil die HSPs Schäden in Zellen mildern und allgemein die Immunreaktionen stärken.



CORBIS, ANTHONY WEST

munsystem des Erkrankten anstacheln, mit solchen Antigenen ausgestattete Zellen anzugreifen – also die Krebszellen.

Dieser Ansatz wurde in den USA und in Europa bereits in einer Reihe klinischer Studien der Phasen I und II für mehrere Krebsarten geprüft (also an gesunden Testpersonen beziehungsweise an einer kleineren Zahl Krebspatienten). Zum schwarzen Hautkrebs (Melanom) und zu einem Nierenzellkrebs liegen zudem Ergebnisse von breiter angelegten Studien der Phase III vor (mit einer größeren Zahl Erkrankter), woran Patienten aus den USA, Europa (der EU), Australien und Russland teilnahmen. Demnach überlebten bestimmte Melanompatienten bei dieser Behandlung signifikant länger als Patienten, die sich herkömmlichen Maßnahmen, auch Chemotherapien, unterzogen hatten. Und zwar zeigte sich der Effekt, wenn erstens praktisch bedingt genügend Impfstoffdosen verabreicht werden konnten, und wenn zweitens der Krebs im Körper bisher nur Haut, Lymphknoten und Lunge befallen hatte. Bei dem Nierenzellkarzinom verlängerte sich die rückfallfreie Überlebenszeit bei einigen Patientengruppen um mehr als anderthalb Jahre.

Russland genügte das, um diese Behandlungsmethode zuzulassen. Damit kommt mit dem HSP-Peptid-Komplex erstmals ein therapeutischer Krebsimpfstoff in die klinische Praxis. In der Europäischen Union ist die Zulassung beantragt. In den USA sollen noch mehr Langzeitdaten abgewartet werden. Im Übrigen spricht manches dafür, dass sich der gleiche Ansatz ebenso zur Behandlung schwerer Infektionskrankheiten wie Genitalherpes oder Tuberkulose eignen sollte. Auch dazu laufen bereits klinische Tests in verschiedenen Phasen.

Nun zurück zur zuerst entdeckten Seite und Hauptaufgabe der Hitzeschockproteine: Denn ihre Nützlichkeit in Stresssituationen müsste sich ebenfalls therapeutisch verwerten lassen. Einen bemerkenswerten Effekt dieses Schutzmechanismus zeigte schon vor Jahren eine eindrucksvolle Studie an Tauffliegen von Suzanne L. Rutherford von der University of Washington in Seattle und Susan L. Lindquist vom Whitehead Institute for Biomedical Research in Cambridge (Massachusetts): Unterdrückten die Forscherinnen die Funktionsweise von HSP90, so machte sich eine große

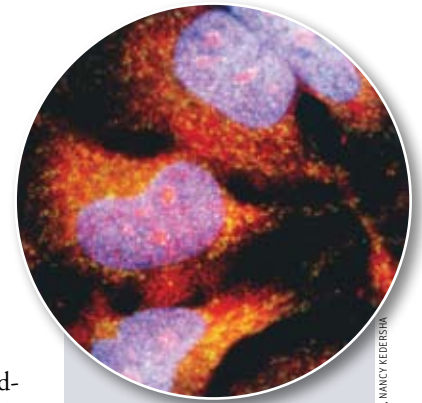


PHOTO RESEARCHERS, MANDY KEDERSHA

HILFE UNERWÜNSCHT

Krebszellen stehen wegen ihrer Abnormalität meistens unter Stress. Dadurch bilden sie auch mehr Hitzeschockproteine. Besonders HSP90 (gelblich) hilft vermutlich Krebszellen, die Belastungen zu überstehen – in gesunden Zellen macht HSP90 das auch. Ließe sich ihre Unterstützung in Krebszellen hemmen, dann wären die bösartigen Zellen vielleicht empfindlicher gegen Krebstherapien.

BEISPIELE FÜR NEUE MEDIKAMENTE IM TEST

Mediziner prüfen in klinischen Tests schon eine Reihe von Medikamenten, die an verschiedenen Funktionen von HSPs ansetzen. Manche sollen spezielle Hitzeschockproteine hemmen, andere ihre Aktivität verstärken.

WIRKUNG

- **HSP-Hemmung**
(kann Funktion von HSPs blockieren, die Krebs- oder virusinfizierten Zellen oder pathogenen Bakterien zu überleben helfen)
- **HSP-Anregung**
(Hitze oder Wirkstoffe sollen patienteneigene HSPs anregen, ein Organ während eines chirurgischen Eingriffs oder einer anderen Behandlung zu schützen.)
- **Impfung/Immuntherapie**
(Antigenführende HSPs von kranken Zellen werden aufgereinigt, und der Patient wird damit geimpft; das soll dessen Immunsystem anregen, den Krebs oder Erreger zu bekämpfen.)

HSP	SUBSTANZ (HERSTELLER)	KRANKHEIT
HSP90	● Alvepimycin (Kosan Biosciences)	Brustkrebs
	● Tanespimycin (Kosan Biosciences)	Leukämie, Lymphom, solide Tumoren
	● CNF 2024 (Biogen Idec)	
	● SNX-5422 mesylate (Serenex)	solide Tumoren
	● AUY-922 (Novartis)	
	● IPI-504 (Infinity Pharmaceuticals)	
	● BIIB021 (Biogen Idec)	Leukämie, Lymphom, solide Tumoren
HSP27	● OGX-427 (OncoGenex Technologies)	solide Tumoren
verschiedene	● Hochfrequenzbestrahlung	Melanom
HSP65	● HspE7 (Nventa Biopharmaceuticals)	Krebsvorstufen bei mit Papillomaviren infizierten Gebärmutterhalszellen
HSP70	● AG-707 (Antigenics)	Herpes simplex Typ 2
	● HSPPC-70/AG-858 (Antigenics)	chronisch-myeloische Leukämie
gp96	● HSPPC-96/vitespen* (Antigenics)	solide Tumoren

* in Russland für klinische Anwendung zugelassen

Die Lebewesen tragen offenbar zahlreiche Mutationen, deren schädliche Effekte sich aber wegen der Maskierung durch Hitzeschockproteine normalerweise nicht durchprägen



Pramod K. Srivastava ist Professor für Medizin und Direktor des Center for Immunotherapy of Cancer and Infectious Diseases an der University of Connecticut School of Medicine in Farmington. Er stieß als Erster auf die Rolle der Hitzeschockproteine im Immunsystem. Er gehörte zu den Begründern der Firma Antigenics, die Krebsimpfstoffe auf der Basis dieser Proteine entwickelt.

Dai, C. et al.: Heat Shock Factor 1 is a Powerful Multifaceted Modifier of Carcinogenesis. In: *Cell* 130(6), S. 1005–1018, 21. Sept. 2007.

Srivastava, P. K. et al.: Treating Human Cancers with Heat Shock Protein-Peptide Complexes: the Road ahead. Review in: *Expert Opinion on Biological Therapy* 9(2), S. 179–186, 2009.

Srivastava, P. K.: Roles of Heat-Shock Proteins in Innate and Adaptive Immunity. In: *Nature Reviews Immunology* 2(3), S. 185–194, März 2002.

Whitesell, L., Lindquist, S. L.: HSP90 and the Chaperoning of Cancer. In: *Nature Reviews Cancer* 5(10), S. 761–772, Okt. 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987525.

Anzahl bisher versteckter genetischer Mutationen bemerkbar, die also vorher sozusagen maskiert gewesen waren. Anscheinend hatte es das Chaperon vermocht, potenziell ungünstige Auswirkungen infolge schadhafter Erbssequenzen abzufangen. Laut Rutherford und Lindquist scheint den Lebewesen in der Natur eine große genetische Variationsbreite zu eigen zu sein – mit vielen verborgenen Mutationen, die ihr Funktionieren beeinträchtigen könnten, die sich aber normalerweise nicht durchprägen, weil HSP90 dies verhindert. Im Hintergrund könnten sich so Erbgutveränderungen unbemerkt anhäufen. Wird die Maskierung allerdings geschwächt, etwa durch hohe Temperaturen, dann treten solche Mutationen zu Tage – und die Selektion hat neues Material. Auf diese Weise, indem es der genetischen Variation Vorschub leistet, hilft das HSP90 der Evolution voran.

Lindquist und ihre Kollegen fanden überdies Hinweise auf eine Beteiligung von HSP90, wenn Organismen rasch neue Eigenschaften entwickeln – wenn bei Pilzarten zum Beispiel Multiresistenzen gegen Medikamente entstehen, die sich gegen sie richten sollen (was fatalerweise oft bei immunschwachen Patienten vorkommt). Nach Meinung der Forscherin müsste man nach Hemmstoffen gegen HSP90 suchen, die spezifisch etwa nur auf Pilze wirken – also die Molekülfunktion nur bei Pilzen unterbinden –, die dem Menschen aber nicht schaden. Dann würden die Pilmittel wieder greifen, denn die Pilze könnten sich nicht mehr gegen das Medikament »wehren«. Das wäre eine neue Generation von Antibiotika.

Etwas Vergleichbares böte sich etwa zur Krebsbekämpfung an: Man müsste spezifische HSPs außer Gefecht setzen. In entarteten Zellen häufen sich zunehmend Erbgutdefekte, ungünstige Mutationen, an. Eigentlich sollte das den Zellen schaden. Die Forscher vermuten aber, dass Hitzeschockproteine die Krebszellen schützen und so deren zunehmende Bösartigkeit sogar unterstützen und fördern. Das Chaperon HSP90 nun beeinflusst mehr Signalwege in Zellen als jeder andere seiner Proteinkollegen. Deswegen, so die Überlegung, sollte ein künstlich erzeugter Funktionsverlust von HSP90 die Krebszellen stressempfindlicher machen. Durch eine Chemotherapie müssten sie dann leichter zu vernichten sein als vorher. An Krebspatienten testen Mediziner inzwischen zunehmend spezifischere Hemmsubstanzen gegen HSP90 in Kombination mit Chemotherapien aus.

Bei meinen Studien über HSP-Peptid-Komplexe als therapeutische Krebsimpfstoffe stieß ich auf ein merkwürdiges Phänomen: In

sehr hoher Dosierung erzeugten die HSPs keine Immunität, sondern unterdrückten die Immunantworten. Wie die Forschung hierzu ergab – ein Gemeinschaftsprojekt mit Rajiv Chandawarkar von der University of Connecticut –, können Hitzeschockproteine Immunfunktionen tatsächlich sowohl anstacheln als auch hemmen. Bei Mäusen, so fanden wir, ließen sich mit hohen Dosierungen zwei Autoimmunkrankheiten, Typ-1-Diabetes und eine Form von Enzephalitis (Hirnentzündung), unterdrücken. Irun R. Cohen vom Weizmann-Institut in Rehovot (Israel) verfolgt mit seinen Mitarbeitern schon lange die Idee, dass HSP-60 und ein mit ihm assoziiertes Peptid beim menschlichen Typ-1-Diabetes als Autoantigene fungieren, das heißt einen Immunangriff auf die Insulinzellen der Bauchspeicheldrüse auslösen. Bisherige Versuche an Patienten, bei denen dieses Peptid blockiert wurde, zeigten einige Wirkung, und die klinischen Tests gehen weiter.

Seit Anbeginn des Lebens essenziell

So verlockend es erscheint, bei den verschiedensten Krankheiten die Hitzeschockproteine ins Visier zu nehmen – gerade ihre unglaubliche Vielseitigkeit macht eine Benutzung dieser Moleküle bei Therapien auch gefährlich. Allzu leicht könnten Medikamente, die HSP-Mengen manipulieren sollen, diverse nicht angezielte physiologische Systeme beeinträchtigen, welche ihrerseits ohne ebendiese Proteine nicht funktionieren können. Andererseits weist die Geschichte der Medikamentenentwicklung eine Menge Beispiele dafür auf, dass es möglich ist, wichtige Proteine zu modulieren, ohne dass die Nebenwirkungen zu stark werden. Sicherlich werden die Stressproteine in der zukünftigen Medizin in vieler Hinsicht eine zentrale Rolle spielen.

Die primitiven, allgegenwärtigen Moleküle haben seit Anbeginn des Lebens überdauert. Sie waren und sind nötig, um dessen innere Gesetzmäßigkeiten, so wie wir sie kennen, zu gewährleisten – etwa indem sie Proteine formen und abbauen helfen. Schon in der harschen, lebensfeindlichen Umwelt der Urzeit boten sie ihnen Schutz. Und nicht zuletzt können sie Zellen gegen schädliche Mutationen abschirmen. Im Zuge evolutionärer Neuerungen wie der Immunität erhielten die ohnehin in Mengen vorhandenen HSPs weitere Aufgaben. So dienen sie nun auch der Antigenpräsentation. Meines Erachtens kennen wir das Ausmaß ihrer Funktionen noch lange nicht. Wenn wir weiterhin nach Einblicken in die Grundzüge des Lebens suchen, werden uns die Chaperone noch oft überraschen.

Die Erleuchtung DES GEHIRNS

Eine raffinierte Kombination von Optik und Gentechnik versetzt Neurowissenschaftler in die Lage, Schaltkreise im Gehirn mit ungeahnter Präzision zu kartieren – und sogar zu steuern.

In Kürze

- ▶ Üblicherweise erforschen Neurophysiologen **die Funktion des Gehirns**, indem sie mit Elektroden einzelne Nervenzellen stimulieren und die ausgelöste Aktivität messen. Mit dieser indirekten Methode ist die gezielte Untersuchung kompletter Schaltkreise jedoch sehr schwierig.
- ▶ **Die neuartige Optogenetik** kombiniert Gentechnik und Lichtsensorik, um Gruppen von Nervenzellen zu beobachten und zu kontrollieren. Das erlaubt detaillierte Einblicke in die **Arbeitsweise neuronaler Netze** – eine Revolution in der Hirnforschung.

Von Gero Miesenböck

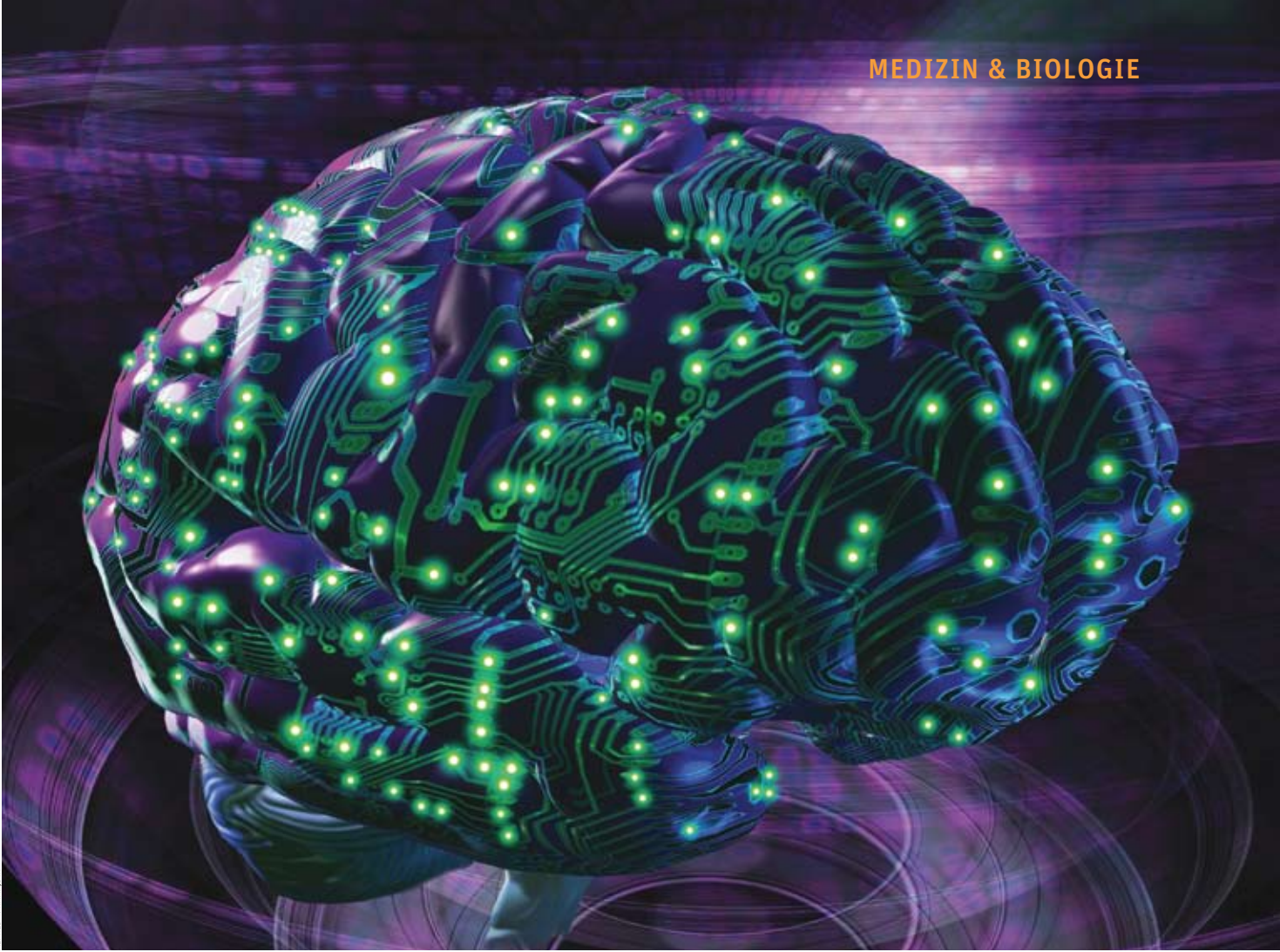
Im Jahr 1937 publizierte der berühmte Neurophysiologe Sir Charles Scott Sherrington an der University of Oxford (England) eine inzwischen klassische Beschreibung der Gehirnaktivität. Er stellte sich vor, Lichtpunkte signalisierten die Erregung der Nervenzellen und ihrer Verbindungen. Im Schlaf würden nur wenige dezentrale Hirnregionen blinken, so dass das Organ einem bestirnten Nachthimmel gliche. Beim Aufwachen jedoch wäre es, »als ob die Milchstraße einen kosmischen Tanz beginnt«, schrieb Sherrington. »Rasch verwandelt sich das gesamte Gehirn in einen verzauberten Webstuhl, in dem Millionen blitzender Schiffchen vergängliche Muster weben, voller Bedeutung, nie gleich bleibend, im steten Fluss immer neuer harmonischer Motive.«

Obwohl es Sherrington damals vermutlich nicht ahnte, enthielt seine poetische Metapher eine zukunftsweisende Idee: dass sich Hirnfunktionen durch Lichteffekte sichtbar machen lassen. Wie Nervenzellen zusammenarbeiten, um Gedanken oder Verhaltensmuster zu erzeugen, ist eine der schwierigsten offenen Fragen der Biologie – vor allem deshalb, weil

sich aktive neuronale Schaltkreise gewöhnlich nicht in Gänze beobachten lassen. Standardmethoden, die mittels feiner Elektroden die Aktivität weniger Nervenzellen erfassen, liefern nur Detailinformationen – viel zu wenig, um daraus ein Gesamtbild zu konstruieren. Könnte man jedoch ganzen Gruppen von Neuronen bei der Kommunikation zusehen, ließe sich daraus vielleicht ableiten, wie die neuronalen Schaltkreise des Gehirns verdrahtet sind und ihre Funktion ausüben.

Fernsteuerung von Neuronen

Diese verlockende Vorstellung brachte einige Neurologen dazu, an der Verwirklichung von Sherringtons Vision zu arbeiten. Daraus erwuchs ein neuer Wissenschaftszweig: die Optogenetik. Sie kombiniert die Gentechnik mit Methoden der Optik, um das Verhalten bestimmter Zelltypen sichtbar zu machen. Schon jetzt gelingt es, die Funktion verschiedenster Neuronengruppen zu visualisieren. Mehr noch: Mit dem Verfahren können Forscher Nervenzellen sogar fernsteuern, indem sie schlicht einen Lichtschalter betätigen. Diese Erfolge wecken große Hoffnungen, die Schaltkreise im Gehirn aufdecken zu können. Und höchstwahrscheinlich ergeben sich da-



ALFRED J. KAMALIAN

raus auch neue Behandlungsmöglichkeiten für Hirnerkrankungen.

Die ersten ernsthaften Versuche, Sherringtons Vision wahr werden zu lassen, reichen bis in die 1970er Jahre zurück. Wie ein Computer arbeitet das Nervensystem mit elektrischen Signalen: Neurone übertragen Informationen in Form von Spannungsimpulsen. Mit Amplituden von nur knapp einem Zehntel der Spannung gewöhnlicher Batterien veranlassen diese so genannten Aktionspotenziale Nervenzellen dazu, Botenstoffe (Neurotransmitter) freizusetzen, die dann nachgeordnete Zellen im Schaltkreis stimulieren oder hemmen.

Lawrence B. Cohen von der Yale University in New Haven (Connecticut) wollte diese elektrischen Signale sichtbar machen und testete dazu zahlreiche fluoreszierende Verbindungen auf ihre Fähigkeit, bei Schwankungen des elektrischen Potenzials Farbe oder Intensität des abgestrahlten Lichts zu ändern. Tatsächlich fand er einige Substanzen mit spannungsabhängigen optischen Eigenschaften. Indem Cohen Neurone damit einfärbte, konnte er deren Aktivität mit dem Mikroskop beobachten.

Andere Farbstoffe zeigen die Erregung von Neuronen an, indem sie auf den Einstrom elektrisch geladener Teilchen, also Ionen, rea-

gieren. Wenn ein Aktionspotenzial an einer Synapse, der Kontaktstelle zur nachgeordneten Nervenzelle, ankommt, öffnen sich dort spannungsabhängige Kanäle in der Außenmembran und lassen schlagartig Kalziumionen einströmen, was die Freisetzung von Neurotransmittern auslöst.

In den 1980er Jahren begann Roger Y. Tsien, der für seine Arbeiten 2008 den Nobelpreis für Chemie erhielt, Farbstoffe zu entwickeln, deren Fluoreszenz mit der Kalziumkonzentration zunimmt. Diese Indikatorsubstanzen haben sich als sehr wertvoll erwiesen, indem sie neue Möglichkeiten eröffneten, die Informationsverarbeitung in einzelnen Neuronen und kleinen neuronalen Netzen zu erforschen.

Synthetische Farbstoffe haben jedoch den Nachteil einer zu geringen Selektivität. Hirngewebe besteht aus vielen verschiedenen Zelltypen. So gibt es im Mäusehirn schätzungsweise mehrere hundert Sorten von Neuronen; dazu kommen zahlreiche Arten von Stütz- und Hilfszellen. Nun basiert aber die Informationsverarbeitung im Gehirn darauf, dass selektiv ganz bestimmte Neurone kommunizieren. Deshalb muss man zum Verständnis eines neuronalen Schaltkreises zunächst die beteiligten Zellen ermitteln und dann die zeit-

Mit neuen Methoden, über Lichtsignale die Aktivität von Nervenzellen zu beobachten und zu kontrollieren, lassen sich Schaltkreise im Gehirn getrennt voneinander untersuchen. Das eröffnet Wege zu einem besseren Verständnis der Hirnfunktion.

liche Abfolge ihrer Aktionspotenziale beobachten. Synthetische Farbstoffe färben alle Zelltypen gleichermaßen an, weshalb sich die optischen Signale im Allgemeinen nicht zu ihrem Urheber zurückverfolgen lassen.

Die Grundidee der Optogenetik war die Erkenntnis, dass sich dieses Problem möglicherweise mittels genetischer Manipulation lösen lässt. Alle Zellen eines Organismus enthalten die gleichen Gene. Welche davon aus- oder eingeschaltet sind, macht den Unterschied zwischen zwei Zelltypen aus. So benötigen Neurone, die Dopamin als Neurotransmitter ausschütten, die Enzyme zur Herstellung und Verpackung dieses Stoffs. Sämtliche Gene für die entsprechenden Proteine sind deshalb in dopaminergen Nervenzellen angeschaltet. In anderen Neuronen bleiben sie dagegen stumm.

Man könnte also versuchen, den natürlichen biologischen Schalter zur Aktivierung der Gene für die Dopaminsynthese an ein Fremdgen zu koppeln, das einen Farbstoff kodiert. Der würde nach Einschleusen der Schalter-Farbstoff-Kombination in das Genom eines Tiers nur in dopaminergen Neuronen erzeugt. Das böte die Chance, diese Zellen im lebenden, intakten Gehirn – sofern man hineinschauen kann, was tatsächlich möglich ist – selektiv in Aktion zu beobachten. Synthetische Farbstoffe sind dazu nicht geeignet, weil sich ihre Produktion ja nicht über genetische Schalter kontrollieren lässt, die nur in bestimmten Zellarten auf »an« stehen. Damit der Trick funktioniert, muss der Farbstoff auf einem Gen verschlüsselt sein.

Den ersten Nachweis, dass ein genkodierter Farbstoff neuronale Aktivität anzeigen kann, erbrachten vor zehn Jahren unabhängig voneinander mehrere Forscherteams unter der Leitung von Tsien, Ehud Y. Isacoff an der University of California in Berkeley und mir

selbst zusammen mit James E. Rothmann, der heute an der Yale University arbeitet. Es handelte sich um das inzwischen berühmte »grün fluoreszierende Protein« (GFP) der Qualle *Aequorea victoria*. Wir veränderten das zugehörige Gen so, dass die Produktion des Farbstoffs Potenzialsprünge, Veränderungen der Kalziumkonzentration oder die Ausschüttung von Neurotransmittern an den Synapsen anzeigt.

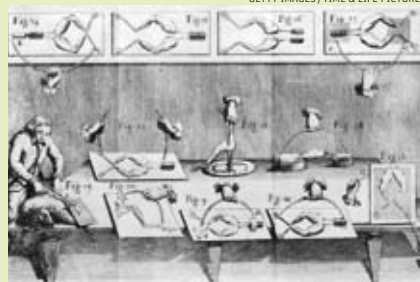
Signalverstärkung durch Rauschen

Ausgerüstet mit diesen Aktivitätssensoren erzeugten wir und andere Forscher Tiere, bei denen die Indikatorgene nur in ganz bestimmten Neuronentypen funktionieren. Versuchskaninchen waren die üblichen Lieblinge der Genetiker wie Fadenwürmer, Zebrafische und Mäuse. Als geeignetster Kandidat für optogenetische Experimente erwies sich jedoch die Taufliege *Drosophila*. Ihr Gehirn ist unter dem Mikroskop gut einsehbar und so klein, dass ganze Schaltkreise auf einmal ins Gesichtsfeld passen. Zudem fallen Genmanipulationen bei ihr recht leicht, und nach jahrzehntelanger Forschungsarbeit sind viele genetische Schalter bekannt, mit denen sich spezifische Neuronengruppen gezielt ansteuern lassen.

So war es denn auch eine Taufliege, bei der Minna Ng, Robert D. Roorda und ich – damals am Memorial Sloan-Kettering Cancer Center in New York – die ersten Bilder des Informationsflusses zwischen definierten Zellgruppen im lebenden Gehirn aufnehmen konnten. Seither haben wir viele neuartige neuronale Verschaltungen und Funktionsprinzipien entdeckt. So fanden wir 2007 im Riechsystem von *Drosophila* Neurone, die »Hintergrundrauschen« einspeisen, das vermutlich der Signalverstärkung dient: Es senkt die Wahr-

DIE ENTRÄTSELUNG DER GEHIRNFUNKTION

Schon seit Langem suchen Forscher zu ergründen, wie das Nervensystem unser Verhalten steuert. Frühe Experimente zur Stimulation und Visualisierung von neuronaler Aktivität bilden das Fundament des heutigen Wissenszweigs der Optogenetik.



1783: Der italienische Anatom Luigi Galvani zeigt, dass Elektrizität die Beinmuskeln eines toten Frosches zucken lässt.



1937: Der britische Neurophysiologe Charles Sherrington stellt sich neuronale Aktivität in Form von Lichtblitzen vor.



1963: Der spanische Physiologe José Delgado stoppt mit funkgesteuerten Impulsen einen angreifenden Stier.

1971: Entwicklung der ersten spannungsabhängigen Fluoreszenzfarbstoffe

1980: Synthese fluoreszierender Farbstoffe, die Änderungen der Kalziumkonzentration in der Zelle sichtbar machen

1700 | 1930 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980

nehmungsschwelle des Tiers für kleinste Spuren von Geruchsstoffen und verbessert so seine Fähigkeit, Futterquellen ausfindig zu machen.

Mit den Sensorgenen verfügten wir nun zwar über leistungsfähige Werkzeuge zur Beobachtung der neuronalen Kommunikation, doch stellte sich in den 1990er Jahren noch ein anderes grundlegendes Problem. Die meisten Experimente zur Funktion des Nervensystems sind ziemlich indirekt. Zum Beispiel aktivieren Forscher mit Bildern, Tönen oder Gerüchen bestimmte Areale im Gehirn eines Tiers. Um die so ausgelösten Signalströme zu beobachten, stecken sie dann Elektroden in die nachgeschalteten Regionen und registrieren dort Spannungsänderungen. Leider werden sensorische Reize im Zuge ihrer Verarbeitung jedoch stark umgeformt. Dadurch fällt es mit zunehmender Entfernung des Ableitungspunkts von Auge, Ohr oder Nase immer schwerer, Reaktionen des Gehirns einem bestimmten Signal zuzuordnen. Außerdem taugt dieser experimentelle Ansatz natürlich nicht für all die vielen Schaltkreise, die nichts mit der Verarbeitung sensorischer Reize, sondern mit Bewegung, Denken und Fühlen zu tun haben und sich nicht mit Sinnesreizen anregen lassen.

Ein »Lichtschalter« im Gehirn

Dieses Problem ließe sich umgehen, so meine damalige Überlegung, wenn es gelänge, spezifische Neuronengruppen direkt zu stimulieren – ohne externe Reizung eines Sinnesorgans. Darum fragte ich mich, ob es nicht einen Satz von Werkzeugen gäbe, der es erlaubte, Neuronengruppen nicht nur selektiv zu beobachten, sondern auch gezielt zu aktivieren.

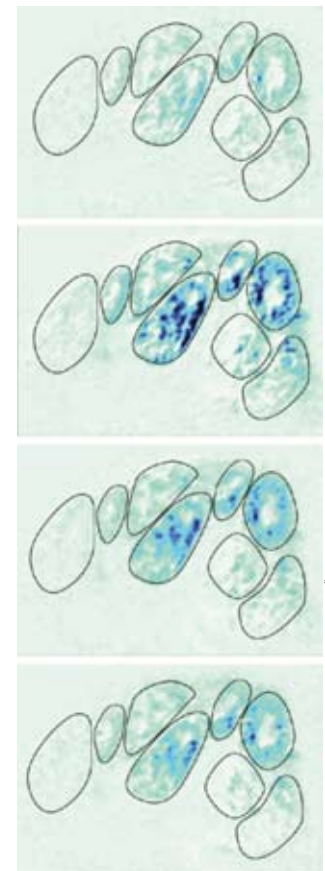
Gemeinsam mit meinem ersten Postdoc Boris V. Zemelman, heute am Howard Hughes Medical Institute in Chevy Chase (Maryland),

machte ich mich auf die Suche. Unsere Absicht war es, einen genkodierten Schalter, der auf Licht reagiert, spezifisch in bestimmte Neurone einzuschleusen. Damit sollten sich gleich mehrere Hürden überwinden lassen, die elektrische Ableitungen an neuronalen Schaltkreisen bis dahin behindert hatten. Zum Beispiel ist es schwierig, die Elektroden so einzustecken, dass sie ausschließlich Signale eines bestimmten Zelltyps erfassen. Außerdem lassen sie sich nur in begrenzter Zahl gleichzeitig in ein Tiergehirn implantieren. Deshalb kann man nicht mehr als einige wenige Neurone auf einmal beobachten und stimulieren. Und schließlich müssen die Elektroden an Ort und Stelle bleiben, wenn sich das Tier bewegt, was schwer zu erreichen ist.

Hätten wir also einen genetischen Schalter, der nur in bestimmten Neuronen auf »an« steht, und könnten wir diese Zellen dann mit Licht berührungslos anregen, müssten wir zu ihrer Untersuchung nicht mehr im Voraus wissen, wo im Gehirn sie sich genau befinden. Auch eine Positionsänderung bei Bewegungen des Versuchstiers würde keine Rolle mehr spielen. Sofern eine Stimulation von Neuronen, die den lichtempfindlichen Auslöser produzieren, eine Verhaltensänderung bewirkt, wüssten wir, dass diese Neurone an der Steuerung des betreffenden Verhaltens beteiligt sind. Trügen sie zugleich ein Sensorgen, würden sie beim Feuern aufleuchten und so ihre Position verraten. Mit transgenen Tieren, bei denen jeweils unterschiedliche Neuronentypen den lichtempfindlichen Auslöser produzieren, sollte es also möglich sein, die gesamte Signalkette von der Lichtstimulation bis zum Verhalten zu rekonstruieren und dabei alle wesentlichen Komponenten eines Schaltkreises zu erfassen. Was wir dazu bräuchten, wäre nur ein genkodierter Auslöser, der Lichtblitze in Spannungsimpulse umwandelt.

Nun gibt es Zellen, deren normale Funktion genau darin besteht, optische Reize in elektrische Signale zu transformieren. Dazu zählen etwa die Fotorezeptoren im Auge. Sie enthalten das lichtempfindliche Pigment Rhodopsin, das bei Beleuchtung Ionenkanäle in der Zellmembran öffnet oder schließt, damit den Ionenfluss verändert und so elektrische Signale erzeugt. Wir schleusten also ein Gen für Rhodopsin (und einige für seine Funktion unentbehrliche Hilfsgene) in Neurone ein, die in Zellkultur wuchsen, und untersuchten, ob sie bei Belichtung feuerten. Das Experiment funktionierte. Im Frühjahr 2002, vier Jahre nach dem ersten genkodierten Sensor für neuronale Aktivität, hatten wir nun auch einen Auslöser.

Seither wurden weitere lichtempfindliche Proteine erfolgreich für diesen Zweck er-



AUS: R.D. ROODRA, T.M. HOHLER, T. TOLEDO-CROW & G. MIESENBÖCK, »VIDEO-RATE NONLINEAR MICROSCOPY OF NEURONAL MEMBRANE DYNAMICS WITH GENETICALLY ENCODED PROBES«, IN: JOURNAL OF NEUROPHYSIOLOGY 92, S. 609-621, 03.03.2004; MIT FOL. GEN. VON GERO MIESENBÖCK

Optischer Lauschangriff: Mit molekularen Sensoren, die Licht abstrahlen, sobald Neurone aktiv werden, lässt sich der Informationsfluss in neuronalen Schaltkreisen in Echtzeit verfolgen. Diese Einzelbilder einer Videosequenz zeigen geruchsempfindliche Neurone, die bestimmte Regionen (schwarz umrahmt) in einem Fliegenhirn beeinflussen. Bei Stimulation zeigen sie eine starke Fluoreszenz (blau), die mit nachlassender Aktivität wieder abklingt.

JESPER SJÖSTRÖM UND MICHAEL HÄUSSER, UNIVERSITY COLLEGE LONDON

1997: Nachweis, dass genkodierte Farbstoffe neuronale Aktivität anzeigen können

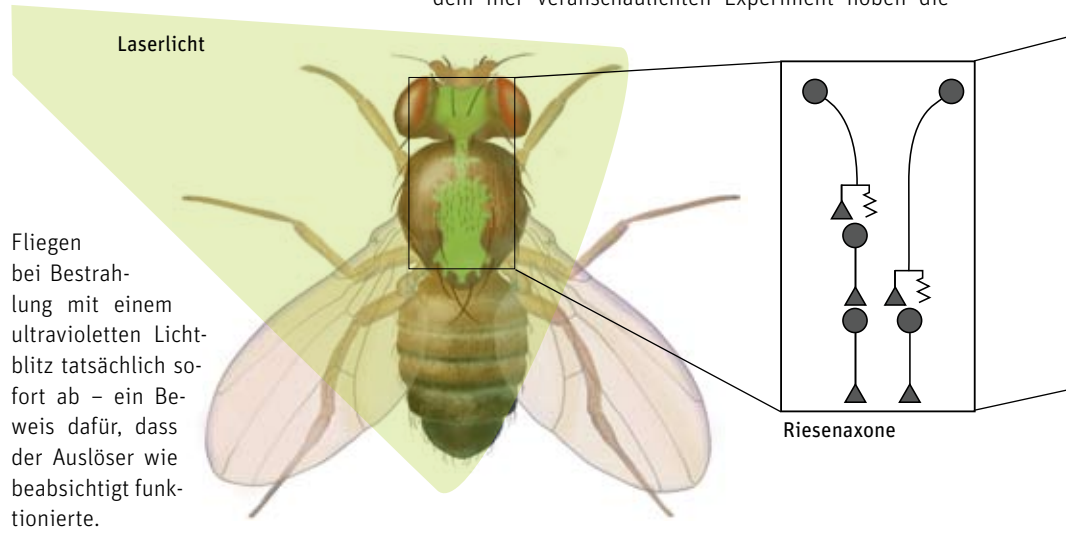
2002: Entwicklung genkodierter Schalter, die bei Bestrahlung Nervenzellen feuern lassen.

2005: Fliegen mit eingeschleustem genkodiertem Schalter werden durch Lichtimpulse gesteuert.

1990 2000

FERNGESTEUERTE FLIEGEN

Wie Experimente mit Taufliegen bewiesen, können lichtempfindliche Proteine in den Nervenzellen lebender Tiere bestimmte Verhaltensmuster auslösen. Die Insekten waren genetisch so manipuliert, dass die betreffenden Eiweißstoffe nur in den Neuronen ihres Riesenaxonsystems produziert wurden. Diese Nervenzellen lösen, wie man schon lange weiß, den Fluchtreflex aus. In dem hier veranschaulichten Experiment hoben die



Zu unserer großen Freude hoben die Fliegen sofort ab, wenn ein Laserblitz sie traf

probte – so etwa Melanopsin, das in spezialisierten Netzhautzellen dabei hilft, die innere Uhr auf den Tag-Nacht-Rhythmus abzustimmen. Als geeignet erwies sich auch, wie Georg Nagel vom Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt zusammen mit Karl Deisseroth von der Stanford University (Kalifornien) und Stefan Herlitze von der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio) zeigen konnte, das Kanalrhodopsin-2, das die Schwimmbewegungen von Algen steuert. Meine Gruppe sowie Isacoff und seine Kollegen Richard Kramer und Dirk Trauner in Berkeley haben zudem eine Reihe genkodierter Schalter entwickelt, die sich über lichtempfindliche Chemikalien betätigen lassen.

Als Nächstes galt es zeigen, dass unser Rhodopsin-Auslöser nicht nur in Zellkulturen, sondern auch im lebenden Tier funktioniert. Das übernahm meine erste Doktorandin Susana Q. Lima. Wir wählten dazu einen relativ einfachen neuronalen Schaltkreis von *Drosophila*, der nur aus wenigen Zellen besteht und ein unverwechselbares Verhaltensmuster kontrolliert: einen Fluchtreflex, bei dem das Insekt mit den Beinen abspringt, die Flügel ausbreitet und davonfliegt. Auslöser ist ein elektrischer Impuls, der von nur zwei der etwa 150 000 Nervenzellen des Fliegenhirns ausgeht. Diese beiden »Kommandoneurone« aktivieren einen untergeordneten Schaltkreis, der die Muskeln der Beine und Flügel steuert und als Muster-generator bezeichnet wird.

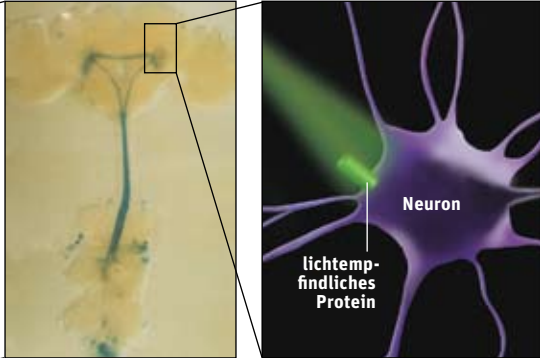
Wir fanden zwei natürliche genetische Schalter. Der eine war nur in den beiden Kommandoneuronen immer eingeschaltet. Der andere stand dort auf »aus«, in den Nervenzellen des Mustergenerators dagegen auf »an«. Mittels dieser beiden Elemente schufen wir transgene Fliegen, in denen entweder die Kommandoneurone oder die Zellen des Mustergenerators unseren lichtgesteuerten Auslöser erzeugten. Zu unserer großen Freude hoben beide Fliegentypen sofort ab, wenn wir sie einem Laserblitz aussetzten, der stark genug war, ihren Chitinpanzer zu durchdringen und das Nervensystem zu erreichen.

Dies bestätigte die Beteiligung beider Neuronentypen am Fluchtreflex und bewies zugleich, dass unsere Auslöser funktionierten. Da allein die relevanten Neurone den genkodierten Schalter produzierten, konnten auch nur sie auf den Lichtblitz reagieren. Wir mussten den Laserstrahl also nicht gezielt auf bestimmte Zellen richten. Es war, als hätten wir eine Radiobotschaft in eine Stadt mit 150 000 Haushalten gesendet, von denen nur eine Hand voll ein geeignetes Empfangsgerät besitzt; die anderen konnten die Botschaft einfach nicht hören.

Doch ein Einwand blieb. Die Kommandoneurone für den Fluchtreflex sind mit Nervenzellen verschaltet, die Signale aus den Augen übermitteln. Sie feuern bei einer plötzlichen Abdunkelung – etwa weil ein nahender Feind einen Schatten wirft. (Das kennen Sie wohl

1 Eine Taufleie mit künstlich eingebrachten lichtempfindlichen Auslösern in den Neuronen ihres Riesenaxon-systems wurde mit einem ultravioletten Laserblitz belichtet.

2 Sobald Strahlung auf das lichtempfindliche Protein in der Zellmembran eines Neurons traf, öffneten sich dort Kanäle und ließen Ionen einströmen, was die Nervenzelle zum Feuern anregte.



3 Die so aktivierten Riesenaxone veranlassten das Insekt, hochzuspringen und mit den Flügeln zu schlagen.



4 In einem weiteren Experiment zeigten enthauptete, aber noch lebende Fliegen die gleiche Reaktion auf den Lichtreiz. Das bewies, dass es die direkte Erregung des neuronalen Systems durch den Laserblitz war, die den Fluchtreflex auslöste, und nicht etwa eine visuelle Stimulation.

ILLUSTRATIONEN: LILA RUBENSTEIN; FOTO REISEAXON AUS: PAULINE PHELAN ET AL., MUTATIONS IN SHAKING¹ PREVENT ELECTRICAL SWAMPSE FORMATION IN THE DROSOPHILA GIANT FIBER SYSTEM, IN: JOURNAL OF NEUROSCIENCE, BD.16, NR.3, 01. FEB. 1996

vom Fliegenfangen: Immer wenn Sie die Hand vorsichtig über das Insekt schieben, hebt es ab.) Deshalb war auch in unserem Experiment der Fluchtrelex vielleicht nur die Folge einer visuellen Reaktion auf den Laserblitz und nicht der direkten Stimulation der Kommandoneurone oder des Mustergenerators.

Wenn kopflose Fliegen abheben

Um diese Zweifel auszuräumen, machten wir ein einfaches, wenn auch rabiates Experiment: Wir enthaupteten die Fliegen, was sie ein bis zwei Tage überleben. Der Schaltkreis zum Abruf des Fluchtrelexes befindet sich im Brustganglion der Insekten, das etwa dem Rückenmark des Menschen entspricht, und ist in den kopflosen Körpern intakt.

Die enthaupteten Fliegen rührten sich nicht mehr. Sobald sie jedoch ein Laserblitz traf, erhoben sie sich in die Luft. Zwar brachten sie nur einen taumelnden Flug zu Stande, der in spektakulären Abstürzen oder Kollisionen endete. Dennoch war damit bewiesen, dass unser Laserlicht den Mustergenerator direkt aktiviert hatte. Schließlich gab es für die geköpften Tiere keine andere Möglichkeit mehr, auf optische Reize zu reagieren.

Wir konstruierten auch Fliegen, die unsere lichtempfindlichen Schalter nur in dopaminergen Neuronen produzierten. Setzte man diese Insekten einem Laserblitz aus, wurden sie augenblicklich agiler und begannen in ihren Käfigen herumzulaufen. Vorangegangenen Un-

tersuchungen zufolge bewirkt Dopamin bei Fliegen, dass sie eine Belohnung oder Bestrafung erwarten. Unsere Befunde passten dazu: Die Tiere waren nicht nur aktiver, sondern erkundeten ihre Umgebung auch in einer speziellen Weise, als rechneten sie mit einer erfreulichen oder unangenehmen Überraschung.

Drei Tage vor dem geplanten Erscheinen unserer Forschungsergebnisse in der Fachzeitschrift »Cell« flog ich nach Los Angeles, um dort einen Vortrag zu halten. Ein Freund hatte mir als Lektüre für unterwegs den jüngsten Campusroman von Tom Wolfe »Ich bin Charlotte Simmons« mitgegeben. Er dachte wohl, die Beschreibung von Neurologen darin würde mich amüsieren, ganz zu schweigen von den Passagen, die dem Buch den »Bad Sex in Fiction Award« – einen Preis für besonders schlechte Schilderungen von Sexszenen – der Zeitschrift »Literary Review« eingetragen hatten.

Bei der Lektüre des Romans im Flugzeug stieß ich auf eine Stelle, in der Charlotte eine Vorlesung über einen gewissen José Delgado hört, der ebenfalls das Verhalten von Tieren per Fernsteuerung kontrolliert. Zur Übertragung dienen statt Lichtblitzen jedoch Radiosignale. Sie werden von Elektroden empfangen, die ins Gehirn eingepflanzt sind. Um die Wirksamkeit seiner Methode zu beweisen, habe Delgado als waschechter Spanier sein Leben riskiert, indem er einen auf ihn zurasenden Stier mitten im Angriff stoppte. Wolfes fingierter Dozent erklärt, dies sei ein Wendepunkt in der Neuro-



AUS: S. Q. LIMA & G. MISENERICK, »REMOTE CONTROL OF BEHAVIOR THROUGH GENETICALLY TARGETED PHOTOSTIMULATION OF NEURONS«, IN: CELL, 2005, BD.121, NR.1, GENEHMIGT VON ELSEVIER

Das Aktivitätsmuster transgener Fliegen, deren Dopamin produzierende Neurone auf Licht reagieren, veränderte sich dramatisch, wenn die Tiere Laserblitzen ausgesetzt wurden. Hatten sie sich zunächst kaum bewegt (oben), so begannen sie nun ihre Umgebung genau zu inspizieren (unten). Das stützt die Theorie, dass Dopamin einen Erkundungsdrang auslöst.

physiologie: eine eindeutige Widerlegung des Dualismus, wonach der Geist angeblich getrennt vom Gehirn existiert. Beide müssten eine Einheit bilden; denn sonst hätte Delgados physikalische Manipulation des Gehirns die Absichten des Tiers nicht verändern können.

Ich fiel fast aus meinem Sitz. War dieser Delgado nur eine erfundene Figur, oder existierte er wirklich? Gleich nach der Landung in Los Angeles recherchierte ich im Internet und fand ein Foto von ihm als Matador mit seiner Fernsteuerung und dem Stier. Ich erfuhr, dass er früher Professor an meinem Institut in Yale gewesen war. Er hatte 1969 ein Buch mit dem Titel »Physikalische Kontrolle des Gehirns: auf dem Weg in eine psychozivilisierte Gesellschaft« veröffentlicht. Darin fasste er seine Forschungen darüber zusammen, wie sich Bewegungen künstlich steuern, Erinnerungen wachrufen, Sinnestäuschungen hervorbringen und Freude oder Schmerz auslösen lassen. Im Schlusskapitel macht sich der Autor Gedanken darüber, was die technische Kontrolle der Hirnfunktionen für Medizin, Ethik, Gesellschaft und Kriegsführung bedeuten könnte. Daher war ich kaum überrascht, als am Tag der Veröffentlichung unserer Forschungsarbeit das

Telefon klingelte und ein US-Journalist mich fragte: »Wann werden wir denn nun in der Lage sein, ein anderes Land mit einer ferngesteuerten Armee von Fliegen anzugreifen?«

Doch das war noch nicht der Gipfel des Medieninteresses. Am nächsten Tag verdrängte im »Drudge Report«, einem Online-Nachrichtendienst, die Schlagzeile »Wissenschaftler erschaffen ferngesteuerte Fliegen« den Bericht über Michael Jacksons jüngsten Gerichtsauftritt vom ersten Platz. Es war wohl diese Quelle, die Jay Leno in seiner »Tonight Show« etwa eine Woche später zu einem Sketch inspirierte, in dem er eine ferngesteuerte Fliege in den Mund von Präsident George W. Bush steuerte.

Droht die Bewusstseinskontrolle?

Seither ist es gelungen, weitere Verhaltensmuster mit unserer Lichtschaltermethode zu kontrollieren. Deisseroth und sein Kollege Luis de Lecea aus Stanford leiteten, wie sie Ende 2007 berichteten, bei Mäusen mit einer Glasfaser Licht direkt zu den Nervenzellen, die Hypocretin produzieren. Das ist ein kleines Protein (Peptid), das als Neurotransmitter fungiert. Hunderassen, denen der Rezeptor dafür fehlt, leiden unter Anfällen von Schläfrigkeit. Deshalb wird vermutet, dass Hypocretin an der Schlafregulation beteiligt ist. Die Versuche von Deisseroth und Lecea stützten diese Annahme; denn die Stimulation der Nervenzellen, die den Neurotransmitter erzeugen, weckte schlafende Mäuse auf.

In meinem Labor in Yale konnte der Postdoc J. Dylan Clyne mit genkodierte lichtempfindlichen Schaltern Einblicke in die Verhaltensunterschiede zwischen den Geschlechtern gewinnen. Die Männchen vieler Tierarten scheuen beim Werben um Weibchen weder Mühen noch Kosten. Im Fall der Taufliege lassen sie einen Flügel vibrieren und erzeugen damit einen Gesang, den die Damen offenbar unwiderstehlich finden. Clyne wollte den neuronalen Hintergrund dieses rein männlichen Verhaltens ergründen. Dazu aktivierte er mit einem lichtempfindlichen Auslöser den Mustergenerator für den Gesang. Überraschend zeigte sich, dass auch die Weibchen über den betreffenden Schaltkreis verfügen. Ihnen fehlt nur für gewöhnlich das auslösende Signal. Demnach scheinen die neuronalen Netze in männlichen und weiblichen Gehirnen weitgehend identisch zu sein. Für die Unterschiede sorgen wohl allein strategisch platzierte Hauptschalter, die geschlechtsspezifische Verhaltensprogramme aktivieren.

Bisher wurden meist Tiere konstruiert, die entweder einen Sensor oder einen Auslöser in den interessierenden Nervenzellen besitzen. Man kann sie jedoch auch mit beidem aus-

ERKUNDUNG VON SCHALTKREISEN

In aktuellen Untersuchungen mit optogenetischen Methoden konnten Neurophysiologen verschiedene neuronale Schaltkreise orten und manipulieren und so eine Reihe von Verhaltensweisen bei Taufliegen, Würmern und Mäusen beeinflussen. Hier sind einige Beispiele aufgeführt.

	TIER	UNTERSUCHTES VERHALTEN	ERKENNTNIS
VISUALISIERUNGSEXPERIMENTE	Taufliege	Gedächtnis für Gerüche	Das mediale Neuronenpaar bildet eine Rückkopplungsschleife zur Festigung geruchlicher Erinnerungen.
	Fadenwurm	Nahrungssuche	Nahrungsentzug verursacht eine anhaltende Aktivität der so genannten AWC-Neurone, wodurch sich die Suchstrategie des Wurms ändert.
	Maus	Geschlechtserkennung	Zur Erkennung des Geschlechts dienen Zellen, die auf die Wahrnehmung männlicher oder weiblicher Pheromone spezialisiert sind.
FERNSTEUERUNGSEXPERIMENTE	Taufliege	Stressvermeidung	Die Kohlendioxidabgabe gestresster Fliegen löst bei Artgenossen ein Vermeidungsverhalten aus.
	Zebrafisch	Fluchtverhalten	Der Fluchtreflex bei Berührung lässt sich durch Sinnesreize an- und abschalten.
	Maus	Entscheidungsfindung	Über Entscheidungen, die von Wahrnehmungen abhängen, bestimmt die elektrische Aktivität von weniger als 300 Neuronen in der Hirnrinde.

HILFE FÜR PARKINSONPATIENTEN?



Unter anderem könnte die optogenetische Stimulation eines Tages vielleicht die Reizung tief gelegener Hirnareale zur Behandlung des Morbus Parkinson ablösen. Dabei stimuliert ein »Schrittmacher« über eine implantierte Elektrode die so genannten Basalganglien, die der Kontrolle von Bewegungen dienen. Dies blockiert krankhafte Nervensignale, welche das charakteristische Zittern und andere Parkinsonsymptome verursachen. Möglicherweise lassen sich mit optogenetischen Verfahren die problematischen Zellen viel präziser ansprechen. Dazu müssten jedoch Gene für lichtempfindliche Proteine in die betreffenden Neurone eingeschleust werden. Eine solche Gentherapie ist wegen Sicherheitsbedenken momentan noch nicht zulässig.



Gero Miesenböck ist gebürtiger Österreicher und hat an der Universität Innsbruck Medizin studiert. Als Postdoc ging er 1993 an das Memorial Sloan-Kettering Cancer Center in New York. Später erhielt er einen Lehrstuhl an der Yale University in New Haven (Connecticut). Seit Kurzem ist er an der University of Oxford Waynflete-Professor für Physiologie. Diesen Lehrstuhl hatte von 1913 bis 1935 Charles Sherrington inne, einer der Begründer der modernen Neurophysiologie.

statten. Und letztlich hoffen wir natürlich, Tiere zu erzeugen, die viele verschiedene Sensoren und Auslöser in sich tragen, so dass sich unterschiedliche Nervenzelltypen gleichzeitig am selben Individuum untersuchen lassen.

Die neu entdeckte Möglichkeit, neuronale Schaltkreise mit Laserlicht zu steuern, ist also ein großer Gewinn für die Grundlagenforschung. Aber hat sie auch einen praktischen Nutzen? Ich glaube ja, obwohl er gelegentlich überschätzt wird. Schon Delgado nannte mögliche Anwendungen der direkten Kontrolle neuronaler Funktionen in der Medizin. Dazu zählen die Herstellung sensorischer Prothesen – etwa einer künstlichen Netzhaut –, die Therapie von Bewegungsstörungen wie die inzwischen eingeführte Behandlung des Morbus Parkinson durch Stimulation tief gelegener Hirnareale oder die Normalisierung von Stimmung und Verhalten. Delgado sah darin die sinnvolle Weiterentwicklung bereits existierender Behandlungsmethoden und nicht den alarmierenden Vorstoß in den ethischen Treibsand der »Bewusstseinskontrolle«. In der Tat scheint es willkürlich, eine Grenze zwischen physikalischen Methoden der Gehirnsteuerung und chemischer Manipulation durch psychoaktive Medikamente zu ziehen. Im Vergleich zu Pharmaka lässt sich eine physikalische Manipulation sogar viel gezielter einsetzen und genauer dosieren.

Anwendungsmöglichkeiten der Optogenetik in der Medizin sind bereits Gegenstand von Untersuchungen. So nutzten Forscher im Jahr 2006 lichtaktivierbare Ionenkanäle, um bei

Mäusen mit einer Degeneration der Fotorezeptoren die Lichtempfindlichkeit der Netzhautneurone wiederherzustellen. Sie schleusten mit einem Virus, das sie direkt in die Augen der Versuchstiere spritzten, das Gen für Kanalrhodopsin-2 in die Zellen ein. Tatsächlich sendete die so behandelte Netzhaut lichtabhängig Signale ins Gehirn. Ob die Tiere wieder sehen konnten, blieb allerdings offen.

Auch wenn der therapeutische Einsatz der Optogenetik am Menschen in der Theorie verlockend erscheint, gibt es ein gravierendes praktisches Hindernis: Dafür müsste ein fremdes Gen – das für den lichtkontrollierten Auslöser – ins Gehirn eingeschleust werden. Erstens wirft das noch methodische Probleme auf, und zweitens gelten die damit verbundenen Risiken als unverträglich. Deshalb erlaubt zum Beispiel die US-Gesundheitsbehörde solche Eingriffe vorerst nur im Rahmen strikt regulierter Versuche.

Es gibt allerdings eine unmittelbare medizinische Anwendung für die Kontrolle von Neuronen oder anderen elektrisch erregbaren Zellen, zum Beispiel in Hormondrüsen und Muskeln. Wenn die optoelektrische Anregung der Neuronengruppen X, Y und Z ein Tier dazu bringt, zu fressen, zu schlafen oder alle Vorsicht außer Acht zu lassen, dann sind X, Y und Z potenzielle Ansatzpunkte für Medikamente gegen Übergewicht, Schlaflosigkeit oder Angstzustände. Das könnte bessere oder völlig neue Behandlungsmöglichkeiten eröffnen. Nicht nur aus diesem Grund hat die Optogenetik sicher eine glänzende Zukunft. ◀

Adamantidis, A. R. et al.: Neural Substrates of Awakening Probed with Optogenetic Control of Hypocretin Neurons. In: *Nature* 450, S. 420–424, 2007.

Clyne, J. D., Miesenböck, G.: Sex-Specific Control and Tuning of the Pattern Generator for Courtship Song in *Drosophila*. In: *Cell* 133, S. 354–363, 2008.

Lima, S. Q., Miesenböck, G.: Remote Control of Behavior through Genetically Targeted Photostimulation of Neurons. In: *Cell* 121, S. 141–52, 2005.

Ng, M. et al.: Transmission of Olfactory Information between Three Populations of Neurons in the Antennal Lobe of the Fly. In: *Neuron* 36, S. 463–474, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987524.

»Vom Mond in die Bronzezeit«

Mit Verfahren der Kosmochemie hoben Naturwissenschaftler wie Ernst Pernicka in den 1970er Jahren eine neue Wissenschaft aus der Taufe: die Archäometrie. Heute gehört Pernicka nicht nur zu den weltweit führenden Archäometallurgen, sondern leitet auch das internationale Grabungsteam in Troja.

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Tief im Herzen der Rhein-Neckar-Metropole Mannheim hat sich ein ungewöhnliches Biotop der deutschen Forschungslandschaft entwickelt: die Reiss-Engelhorn-Museen. Die Präsentation von Kulturgeschichte in der modernen Architektur des Museums Weltkulturen bildet den öffentlichkeitswirksamen Schwerpunkt der Aktivitäten. Archäologische und historische Forschung finden in den Seitenstraßen rund um den Glas- und Betonbau statt.

Wer das 1811 eingeführte System der Mannheimer Quadrate bewältigt hat, findet im zweiten Stock eines unscheinbaren Altbaus in D 6,3 das Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie. Dort surren und brummen modernste Massenspektrometer, Geräte zur Neutronenaktivierungsanalyse, Rasterelektronenmikroskope und anderes mehr. Damit untersuchen Ernst Pernicka und seine Mitarbeiter vor allem metallene Kostbarkeiten vergangener Kulturen: Ist jene aztekische Goldmaske echt? Wie wurde diese Bronzestatue gegossen? Auch Textilien werden neuerdings analysiert.

Ganz anders die Situation gut 170 Kilometer neckaraufwärts: Schloss Hohentübingen ist eine Welt der Geisteswissenschaftler. Man studiert gewichtige Werke in den Bibliotheken, vergleicht die präzisen Zeichnungen von Artefakten, forscht in Datenbanken nach Informationen zu einem Pfeilspitzentyp, einer



In seinem Labor im Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie in Mannheim demonstriert Pernicka, wie mit einem Massenspektrografen die Echtheit von Proben geprüft wird.

griechischen Inschrift: Am höchsten Punkt der Tübinger Altstadt residieren die Archäologen und Historiker der Universität. Die Hälfte der Woche ist Ernst Pernicka dort zu finden – als Professor für Archäometrie und Archäometallurgie. Außer in den Sommermonaten. Denn von Juli bis August leitet Pernicka die Grabung an einer der berühmtesten archäologischen Fundstätten der Welt: Troja.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP ROTHE



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP ROTHE

ZUR PERSON

Ernst Pernicka wurde am 5. Februar 1950 in Wien geboren. Dort studierte er ab 1968 Chemie, 1976 schloss er das Studium mit der Promotion ab. 1976 und 1977 arbeitete er als Gastwissenschaftler am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg zur Archäometallurgie. Danach baute Pernicka an der Universität Wien ein Labor zur Thermolumineszenzdatierung auf. 1979 kehrte er nach Heidelberg zurück.

Er habilitierte sich 1987 über die Herkunftsbestimmung archäologischer Metallobjekte an der Universität Heidelberg, wo er 1995 zum außerplanmäßigen Professor ernannt wurde. Von 1997 bis 2004 bekleidete Pernicka den Lehrstuhl für Archäometallurgie der TU Bergakademie Freiberg; in dieser Zeit bestätigte er die Echtheit der »Nebra-Scheibe«.

Im Oktober 2004 folgte die Ernennung zum Professor für Archäometrie/ Archäometallurgie am Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters der Universität Tübingen sowie zum wissenschaftlichen Direktor und Geschäftsführer der Curt-Engelhorn-Zentrum gGmbH Archäometrie in Mannheim, einem Institut der Universität Tübingen. Seit 2006 leitet Ernst Pernicka außerdem die Ausgrabungen in Troja.

Spektrum der Wissenschaft: Professor Pernicka, Sie sind Direktor eines Zentrums für Archäometrie, lehren dieses Fach an der Universität Tübingen und leiten zudem die Ausgrabungen in Troja – wie kommt ein Chemiker in diese Positionen?

Prof. Dr. Ernst Pernicka: Es gab in meinem Leben wohl mehrfach Weichenstellungen und Korrekturen des Berufswegs. Im Gymnasium faszinierten mich die Naturwissenschaften, auf der anderen Seite zeichnete und malte ich leidenschaftlich gern. Ich überlegte sogar, Kunstgeschichte zu studieren, entschied mich dann aber für die Chemie.

Spektrum: Gibt es den Maler Pernicka noch?

Pernicka: Leider nein. Das damalige Ausbildungssystem erlaubte mir ein Studium im Schnelldurchlauf, da blieb kaum Zeit für Hobbys.

Spektrum: Sie haben nach sieben Jahren promoviert, zu einem ungewöhnlichen Thema.

Pernicka: Das verdanke ich einem wahren Glücksfall. Am Institut für Analytische Chemie in Wien wurde vor allem Kosmochemie betrieben. Wann immer Astronauten Mondgestein zur Erde brachten, landete es dort zur Analyse. Doch in einem neuen Projekt sollten glasierte Keramiken aus Sistan charakterisiert

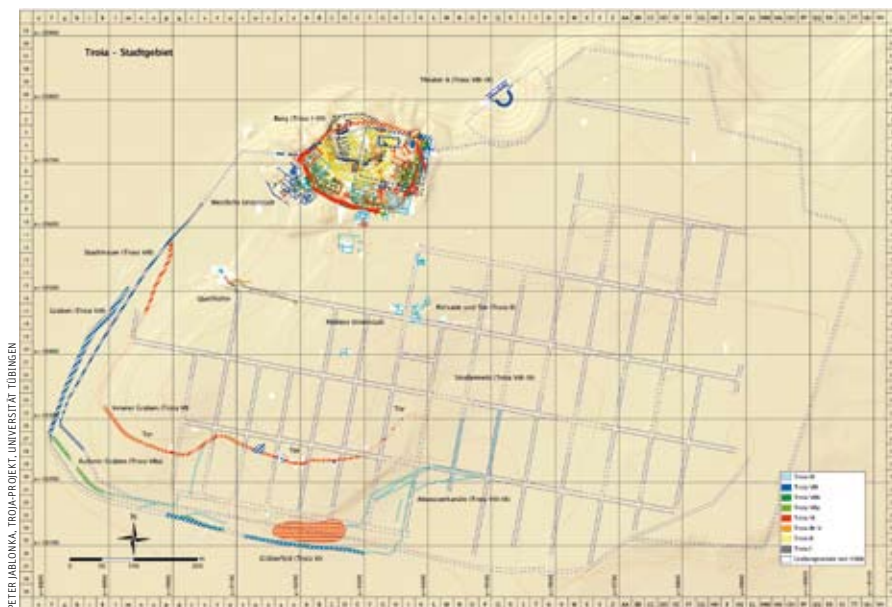
werden, einer Ruinenstätte in Südwestafghanistan. Meine Aufgabe war es, die Herstellungstechnik der Glasur und die Herkunft der Rohstoffe zu eruieren.

Spektrum: Wussten Sie ungefähr, aus welcher Zeit diese Funde stammten?

Pernicka: Allerdings: Zur Zeit des europäischen Mittelalters blühte in der Oase Sistan eine islamische Kultur, die dann entweder durch Dschingis Khans Mongolensturm oder, was ich eher glaube, auf Grund von Bewässerung und damit einhergehender Versalzung der Ackerböden unterging. Heute ist das alles Wüste.

Spektrum: Wie kam das Institut überhaupt zu archäologischen Funden?

Pernicka: (lacht) Das ergab sich nebenbei im Rahmen eines ganz anderen Projekts. Es war die Zeit der Atombombentests in der oberen Atmosphäre. Im Auftrag der Internationalen Atomenergiekommission waren Forscher des Kernforschungszentrums Seibersdorf nach Persien und Afghanistan gereist, um den radioaktiven Fall-out in Trockengebieten zu untersuchen. Sistan lag auf dem Weg – da man gerade schon einmal da war, machten die Kollegen einen Abstecher. Und weil Projektmittel übrig waren, kam jemand auf die Idee,



Nach dem aktuellen Stand der Forschung (Plan der Burg und Unterstadt 2008) umfasste das spätbronzezeitliche Troja VI eine Fläche von 40 Hektar, Troja VII möglicherweise sogar 50 Hektar.

die Mitbringsel wissenschaftlich anzugehen. Das Ganze sollte auch im Kernforschungszentrum Seibersdorf stattfinden, mit dem unser Institut kooperierte.

Spektrum: Und so konnten Sie erstmals die Grenzen zwischen Chemie und Archäologie überschreiten. Welche Methoden setzten Sie dabei ein?

Pernicka: Naturgemäß Verfahren, die dort vorhanden waren. Elektronenstrahlmikrosonde, Röntgenfluoreszenz- und Neutronenaktivierungsanalyse. Das Prinzip ist immer ähnlich: Man beschießt die Atome einer Probe mit – wie die Namen schon sagen – Elektronen, Röntgenlicht oder Neutronen und beobachtet die Reaktion. Denn die ist für das gesuchte Element charakteristisch.

Spektrum: Also eine ganz klassische Spektroskopie?

Pernicka: Erweitert um eine geisteswissenschaftliche Komponente, auf die ich damals wirklich stolz war: Ich besorgte mir die Über-

Pernicka: Ja, die Töpfer in Sistan hatten offenbar eine Technik wiederentdeckt, die schon die Ägypter im 3. Jahrtausend v. Chr. kannten: Eine Kalk-Alkali-Glasur kann man mit Kupfer leuchtend blau färben. Das Problem ist aber, dass eine solche Glasur auf gewöhnlichem Ton schlecht haftet. Ihr Trick bestand nun darin, die Zusammensetzung der Keramik anzupassen. Dazu verwendet man statt Ton Quarzpulver. Das wird beim Brennen aber nur fest, wenn man Kochsalz zugibt. Die Quarzkörnchen schmelzen dann bei etwa 700 Grad an ihrer Oberfläche auf und verbacken. Auf dieser Masse hält die Glasur vorzüglich. Im Ergebnis wirkte das Ganze ein bisschen wie chinesisches Porzellan, und vielleicht war das auch das Ziel der Sistan-Töpfer.

Spektrum: Waren Ihre Seibersdorfer Kollegen ebenfalls begeistert?

Pernicka: Einigen galt ich wohl eher als Kuriosum. Obwohl ich natürlich in die Routineaufgaben des Instituts involviert war und so manchen Meteoriten untersucht habe. Heute würde ich solchen Kollegen mit dem dezenten Hinweis begegnen, dass die erste quantitative Metallanalyse um das Jahr 1800 an einer römischen Münze vorgenommen wurde, von niemand Geringerem als Martin Heinrich Klaproth, einem Wegbereiter der Analytischen Chemie.

Spektrum: Ihr Interesse an der Archäologie war damit aber geweckt.

Pernicka: Zumindest, was die Ur- und Frühgeschichte angeht. Die Freude an der klassischen Antike hatte mir ein Lateinlehrer leider gründlich ausgetrieben. Erst ein Freund, der damals eine Grabung in Israel leitete, brachte mir bei, wie man wissenschaftlich ausgräbt. Ich bin heute noch stolz darauf, dass ich seitdem sogar Lehmziegel in Lehmschichten erkennen kann.

Spektrum: Konnten Sie bereits auf die Erfahrung anderer Grenzgänger zurückgreifen?

»EINE SPANNENDE FRAGE, DIE MICH SEIT LANGEM BEGLEITET: WOHER KAMEN DIE ROHSTOFFE?«

setzung eines zeitgenössischen Textes, der die Herstellung einer solchen Keramik schilderte. Anhand meiner Analyse konnte ich die erwähnten Substanzen identifizieren und umgekehrt meine Ergebnisse anhand der beschriebenen Techniken besser deuten. Übrigens habe ich mich bei dieser Gelegenheit in die Geschichte des Islam und der Region eingearbeitet, das kam mir vor einiger Zeit zugute.

Spektrum: Und war etwas Besonderes an diesen Keramiken?

Pernicka: Die Archäometrie steckte noch in den Kinderschuhen. Ihre Vertreter bildeten damals eine kleine, verschworene Gemeinschaft, die sich regelmäßig in Oxford traf. Dort entstand Anfang der 1970er Jahre das weltweit erste Institut für Archäometrie.

Spektrum: Zur gleichen Zeit schrieb sich die VW-Stiftung die Förderung der Archäometrie auf die Fahne.

Pernicka: Auch das gehört wohl in die Kategorie »glückliche Umstände«. Interdisziplinäre



BEDI FOTOS: CURT ENGELHORN/ZENTRUM ARCHÄOMETRIE MANNHEIM

Forschung war dieser Stiftung immer ein Anliegen. Und Wolfgang Gentner, Direktor des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Kernphysik, zeigte großes Interesse. So lernte ich in Oxford Heidelberger Forscher kennen. Dank dieser Kontakte durfte ich dort als Postdoc zwei Jahre lang antike Silbermünzen aus der Ägäis untersuchen.

Spektrum: Worum ging es bei dieser Arbeit?

Pernicka: Eine ganz spannende Fragestellung, die mich seitdem immer begleitet: Woher kamen die Rohstoffe, in diesem Fall das Silber? In Seibersdorf hatte ich die radiochemischen Methoden gelernt, die mir jetzt halfen, im Silber der Münzen und in mutmaßlichen Ausgangserzen Spurenelemente zu finden. Denn jede Mine, jede Erzader ist Teil einer chemischen Umgebung und enthält deshalb neben dem Metall in geringen, aber charakteristischen Mengen weitere Elemente. Im Fall der griechischen Münzen setzte die Gruppe obendrein erstmals die Bleisotopenanalyse ein. Auch die stammt aus der Geo- und Kosmochemie. Im Altertum wurde Silber nämlich fast ausschließlich aus Bleierzen hergestellt, und ein wenig Blei blieb im Silber erhalten. Weil nun durch den Zerfall von natürlichem Uran und Thorium in den Lagerstätten Bleisotope entstehen, liefert das Isotopenverhältnis des im Silber enthaltenen Bleis weitere Informationen über die Herkunft.

Spektrum: In Heidelberg fanden Sie also zu Ihrem Spezialgebiet – der Archäometallurgie?

Pernicka: Nach einem Intermezzo in Seibersdorf. Denn dort hatte ich sozusagen noch einen Koffer stehen: die Datierung von Keramik mittels Thermolumineszenz.

Spektrum: War das ebenfalls ein Verfahren der Kosmochemie?

Pernicka: Ausnahmsweise nicht. Im Zuge der Kernforschung war die Thermolumineszenz für die Personendosimetrie eingesetzt worden. Forscher des Oxford Institut hatten dann die Idee, das Phänomen zur Datierung zu verwenden. In Mineralen kommen auch radioaktive Isotope vor, freilich in verschwindend geringer Menge. Die Energie ihrer Strahlung kann aber in den Mineralen gespeichert werden, sichtbares Licht oder Erhitzen setzt sie als Lumineszenzlicht wieder frei. Liegt eine Scherbe über Jahrtausende im Dunkeln der Erde, wird die Strahlungsenergie akkumuliert. Mit anderen Worten: Je älter eine Keramik ist, desto stärker leuchtet sie im Labor.

Spektrum: Warum hatten Sie das nicht schon während der Promotion eingesetzt?

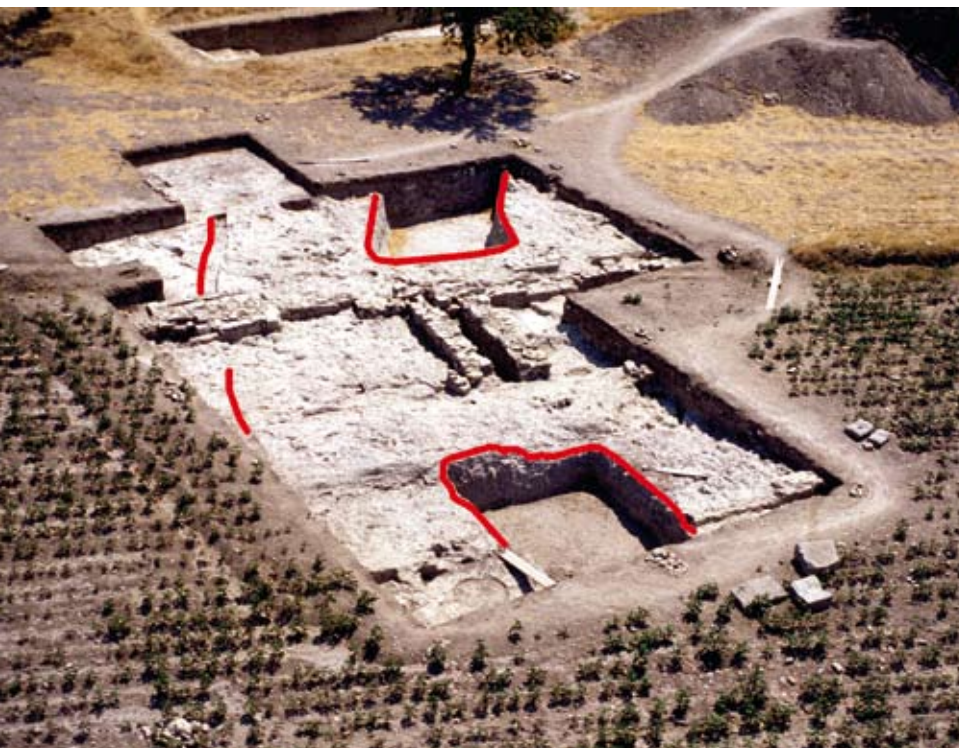
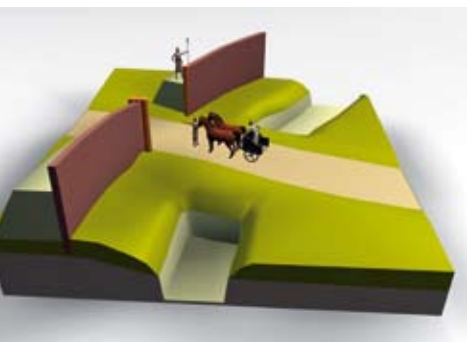
Pernicka: Das war mit den Bordmitteln nicht zu machen. Doch ich überzeugte meinen Abteilungsleiter davon, am Institut ein Thermolumineszenzlabor aufbauen zu dürfen. Und weil bei solchen Fragestellungen archäologischer Sachverstand erforderlich war, wurde der Wiener Ur- und Frühgeschichtler Richard Pittioni hinzugezogen. Während meiner Zeit in Heidelberg durchlief der entsprechende Forschungsantrag die Instanzen; als mein Vertrag am Max-Planck-Institut auslief, standen die Mittel zur Verfügung.

Spektrum: Haben Sie sich dann wieder der Sistan-Keramik zugewandt?

Pernicka: Nein. Es gab ein viel spannenderes Thema. Mit der damals noch jungen Radiokarbondatierung war der Beginn des europäischen Neolithikums neu bestimmt worden, und zwar um bis zu 2000 Jahre früher, als es die Archäologen bis dahin annahmen. Ich sollte mit einer neuen, unabhängigen Methode sozusagen als Schiedsrichter fungieren.

Dieser goldene Phönix aus einer Privatsammlung soll, so die bisherigen Angaben, im 6. Jahrhundert in China gefertigt worden sein. Um zu klären, ob es sich vielleicht um eine Fälschung aus neuerer Zeit handelt, wurde eine Probe der Korrosionsschicht genommen. Deren Zusammensetzung wird demnächst mittels Röntgen diffraktometrie ermittelt.

An diesem vor der Burg in Troja entdeckten Graben (unten, Graben und Toranlage markiert; oben: Rekonstruktion) scheiden sich seit einigen Jahren die Geister. Nach Ansicht der Ausgräber diene er als Annäherungshindernis: Der Aushub sei für eine Wallanlage verwendet worden. Kritiker erkennen darin nur einen Abwassergraben und bestreiten die aus dem mutmaßlichen Verlauf abgeleitete Berechnung zur Größe der Unterstadt.



BEIDE ABBILDUNGEN: PETER JABLONKA, TROJA-PROJEKT, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Spektrum: Tatsächlich eine gravierender Unterschied. Woher sollte eine so große Abweichung rühren?

Pernicka: Die Frühgeschichtler vertrauten auf das Netzwerk der so genannten Kulturkontaktdatierung – auch heute noch die gängigste Methode, das Alter einer schriftlosen Kultur abzuschätzen. Sie basiert vor allem auf Stilvergleichen. Grabe ich in Kreta eine ägyptische Keramik aus, kann ich diese anhand ihrer Merkmale einer ägyptischen Epoche zuweisen. Am Nil aber gab es schon sehr früh eine Schrift und einen Kalender, so dass diese Phasen datiert werden können. Und durch solche Querbeziehungen hangelten sich die Prähistoriker schrittweise von Kreta in den Ägäisraum und weiter nach Troja, von dort bis nach Südost- und Mitteleuropa.

Spektrum: Und Sie waren nun als Entscheidungsinstanz gefragt?

Pernicka: Pittioni erwartete natürlich, dass ich diese Neudatierung als Unsinn entlarvte. Schließlich passten die etablierten Datierungen zu theoretischen Modellen der Kulturentwicklung. Ich richtete das Labor ein, reiste von einer Grabung zur anderen, um frisches Probenmaterial zu besorgen, und nahm die Messungen vor. Und dann stand ich, damals Ende zwanzig, vor einem der angesehensten Prähistoriker seiner Zeit, holte tief Luft und erklärte ihm, der Weg der Menschheit von der letzten Eiszeit bis zum Aufkommen der Bronzezeit sei tatsächlich anders verlaufen als bislang gedacht. Pittioni sah mich an und meinte: Pernicka, wenn Sie mir sagen, hier ste-

he ich und kann nicht anders, dann glaube ich Ihnen. Das hat mir ungemein imponiert. Wir haben anschließend die europäische Chronologie im Licht der physikalischen Datierung mit der ja unstrittigen Abfolge der Kulturphasen abgeglichen. Diese revidierte Chronologie finden Sie heute in Lehr- und Schulbüchern.

Spektrum: Trotz dieses Erfolgs sind Sie aber wieder an das Heidelberger Max-Planck-Institut gegangen, wo Sie einerseits in der Kosmochemie arbeiteten, sich andererseits auf die Archäometallurgie spezialisierten.

Pernicka: Methodisch hat mir diese Zeit viel gebracht. Wenn man Mondgestein analysiert, muss man aus einer minimalen Probenmenge möglichst viele Informationen gewinnen – wie in der Archäometrie. Und ich hatte viel Freiheit für eigene Forschungsziele.

Spektrum: Als da wären?

Pernicka: Mich interessierten beispielsweise die Bronzefunde aus Troja, die ältesten Bronzen im Ägäisraum überhaupt. Viele Experten glaubten damals, diese Legierung sei in der Troas erfunden worden. Doch dort gab es keine großen Erzlagerstätten. Kupfer und Zinn, die beiden Hauptbestandteile, mussten importiert worden sein. Gemeinsam mit den Archäologen Hermann Parzinger und Gerd Weisgerber forschte ich nach prähistorischen Minen. Ich nahm Erzproben und versuchte charakteristische Beimengungen oder Bleisotopenverhältnisse auszumachen. Das Kupfer stammte demnach vermutlich aus Mittelasien oder von der Arabischen Halbinsel. Die Herkunft des Zinns ist noch ungeklärt, aber ich halte Zentralasien als Ursprungsort für sehr wahrscheinlich.

Spektrum: Benötigten Sie neue Methoden?

Pernicka: In erster Linie kam nun die Massenspektroskopie zum Einsatz, mit der sich die verschiedenen Isotope eines Elements nachweisen lassen. Vereinfacht gesagt werden Atome ionisiert, von einem elektrischen Feld beschleunigt und von einem Magnetfeld je nach Masse aus ihrer Bahn gelenkt. Ich muss es ja wohl kaum erwähnen: Auch diese Technik wurde in der Kosmochemie ausgiebig eingesetzt. Ich reiste sozusagen vom Mond in die Bronzezeit und wieder zurück.

Spektrum: Sie habilitierten sich 1987 in Heidelberg, 1997 folgte die Berufung auf den neu geschaffenen Lehrstuhl für Archäometallurgie an der Bergakademie Freiberg – ein langer Weg von Wien nach Sachsen.

Pernicka: Es dauerte wohl seine Zeit, aber erst Ende der 1990er Jahre war die Archäometrie auch in Deutschland reif für eine institutionelle Verankerung. Wieder war es die Volkswagen-Stiftung, die die Mittel bereitstellte. Um die Hochschullandschaft in den

neuen Bundesländern nach dem Fall der Mauer zu fördern, fiel die Wahl auf Freiberg, also auf eine Technische Universität. Um die Archäologie abzudecken, kooperierten wir mit dem Landesdenkmalamt in Dresden. Dabei lernte ich auch Harald Meller kennen, der damals dort arbeitete.

Spektrum: Den Retter der Nebra-Scheibe?

Pernicka: Ohne ihn wäre dieses fantastische Kunstwerk der Bronzezeit auf dem Schwarzmarkt verschachert worden und für die Forschung verloren gegangen. Ich weiß nicht, ob ich den Mut besessen hätte, mich an einer verdeckten Ermittlung zu beteiligen. Mir genügte es, dass wir bei diesem Archäologiekrimi mit unserer Expertise früh involviert waren.

Spektrum: Das müssen Sie uns genauer erzählen.

Pernicka: Wenn Archäologen fragen: »Wie alt ist das Artefakt?«, meinen sie mitunter: »Ist es eine Fälschung?« Metalle lassen sich leider bis heute nicht datieren. Doch es gibt einen Trick, um zumindest abzuschätzen, ob so ein Objekt älter als 100 Jahre ist. Der beruht darauf, dass das Nebengestein von Erzen stets geringe Spuren von Uran-238 und eines seiner Zerfallsprodukte enthält, Blei-210. Wird das Metall verhüttet, geht das Uran in die Schlacke, das Bleiisotop ins Metall – wie bei

traumas. Denn wer mit Troja befasst ist, kommt an Homer einfach nicht vorbei.

Spektrum: Und heute leitet der Kosmochemiker Pernicka selbst die Troja-Grabungen.

Pernicka: Das Leben nimmt wirklich manchmal seltsame Wege. Auch wenn ich in Freiberg vieles erreicht hatte, muss ich leider sagen: Die Integration der Archäometrie, eines zu einem guten Teil geisteswissenschaftlichen Fachs, in eine Hochschule der Ingenieurwissenschaften war dort gescheitert.

Spektrum: Sie selbst beantragten 2004 die Auflösung des Lehrstuhls.

Pernicka: Ja. Daraufhin war die Volkswagen-Stiftung bemüht, die Professur an einer anderen Universität zu verankern. Korfmann versuchte, sie nach Tübingen zu holen. Das Ergebnis war meine Ernennung zum Professor für Archäometrie/Archäometallurgie sowie zum wissenschaftlichen Direktor und Geschäftsführer des Curt-Engelhorn-Zentrums Archäometrie in Mannheim.

Spektrum: Worin unterscheidet sich das CEZ vom Lehrstuhl?

Pernicka: In Tübingen liegt der Schwerpunkt auf der Lehre und in der Betreuung der archäologischen Qualifikationsarbeiten, vor allem rund um Troja. Das CEZ ist ein Labor für Grundlagen- und Projektforschung in der Archäometrie. Außerdem ist es ein Geschäfts-

»IN EINER NACHTAKTION BESTÄTIGTEN WIR, DASS DIE NEBRA-SCHEIBE WOHL KEINE FÄLSCHUNG IST«

den Silbermünzen, die ich erwähnt habe. Und nun beginnt die Uhr zu ticken. Denn Blei-210 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 22 Jahren, nach etwa einem Jahrhundert ist also kein Nachweis mehr möglich. Nachdem die Schweizer Polizei die Nebra-Scheibe sicher gestellt hatte, erhielten wir eine kleine Probe und bestätigten in einer Nachtaktion mit dieser Methode, dass sie wohl keine Fälschung ist. Übrigens haben wir dieses Verfahren in Heidelberg und Freiberg entwickelt und setzen es jetzt hier in Mannheim ein – als einzige Institution weltweit.

Spektrum: In dieser Zeit arbeiteten Sie bereits eng mit dem Tübinger Prähistoriker Manfred Korfmann zusammen.

Pernicka: Als Korfmann 1988 die Leitung der Grabungen in Troja übernahm, saß ich schon mit im Boot. Die Naturwissenschaften in die Forschung miteinzubinden, gehörte von Anfang an zu seinem Konzept. Ich habe ihn beraten und den Part der Archäometallurgie übernommen. Ihm und Troja verdanke ich die Überwindung meines Lateinlehrer-

betrieb, der zum Beispiel Echtheitsprüfungen als Dienstleistung anbietet. Zurzeit entwickeln wir ein Verfahren, um angeblich antike Goldobjekte beurteilen zu können.

Spektrum: Kommen wir zur Troja-Grabung.

Pernicka: Als Manfred Korfmann 2005 überraschend einem Krebsleiden erlag – es war für uns alle ein großer Schock –, musste ein Nachfolger für Troja gefunden werden, denn die Grabungslizenz war und ist personen gebunden. Auch der neue Grabungsleiter sollte, so die türkische Regierung, Inhaber eines Lehrstuhls sein. Die Wahl fiel auf mich. Dass ich mich während meiner Promotion mit islamischer Keramik befasst hatte, kam mir bei den folgenden Verhandlungen zugute.

Spektrum: Können Sie denn auf drei Hochzeiten gleichzeitig tanzen?

Pernicka: Das ist in der Tat regelrecht körperlich anstrengend. In Sachen Troja bin ich deshalb dem Tübinger Archäologen Peter Jablonka und dem ganzen Troja-Team für ihren Einsatz sehr dankbar. Was mich nicht davon entbindet, während der Grabungskampagne



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP ROYHE

vor Ort zu sein – eine explizite Forderung der türkischen Regierung. Abwesenheiten muss ich sogar beantragen. (*schmunzelt*) Dennoch wäre das kaum zu schaffen, wenn Troja immer noch eine große Grabungsstätte wäre. Korfmann hatte ja 2003 beschlossen, nur noch bestimmten Fragen nachzugehen und sich ansonsten der Auswertung aller Befunde zu widmen. Damals habe ich diesen Plan sehr unterstützt. Zu meinem eigenen Erstaunen stelle ich ihn nun selbst in Frage.

Spektrum: Sie entwickeln also Ambitionen als Archäologe?

Pernicka: Wie schon gesagt: keine halben Sachen. Aber im Ernst, dürfen wir einen Platz wie Troja wirklich aufgeben? Natürlich gibt es andere Orte, die in ihrer Zeit bedeutsamer und prächtiger waren. Doch Troja war in vieler Hinsicht einmalig und ist deshalb für die Archäologie von besonderem Wert. Sie haben dort ein regionales Zentrum, das über Jahrhunderte hinweg an einer Schnittstelle zwischen Europa und dem Orient lag. Troia VI beispielsweise, der Kandidat für den sagenumwobenen Krieg, zeigt Merkmale der mykenischen wie der hethitischen Kultur, ging aber offenbar einen ganz eigenen Weg.

Spektrum: Gießen Sie damit nicht Öl in das noch glimmende Feuer des Troja-Streits?

Pernicka: Die Diskussion um die Bedeutung von Troia VI wird inzwischen auf der Sachebene geführt, und das ist gut so. Zu den Themen, die ich gern vertiefen möchte, gehört beispielsweise der Graben um die Unterstadt. Wir kennen einen großen Teil seines Verlaufs durch Sondagen und Magnetometrie, den Rest würde ich gern auch ermitteln. Die umschlossene Fläche ist schließlich ein Anhaltspunkt für die Größe der Unterstadt. Bisher deutet alles darauf hin, dass sie weitläufiger war als selbst von Korfmann angenommen – bis zu 40 Hektar. Inzwischen haben wir sogar Anhaltspunkte für ein zweites, noch weiter von der Burg entferntes Grabensystem aus Troia VIIa. Die Unterstadt wäre also in dieser Phase um gut zehn Hektar gewachsen.

Spektrum: Wie reagiert Ihr Tübinger Kollege Manfred Kolb auf diesen Befund? Er hatte Korfmanns Interpretationen stark kritisiert.

Pernicka: Er meint, dass innerhalb einer solchen Befestigung auch einfach nur Weiden und Äcker gelegen haben können. Das ist zwar prinzipiell denkbar; ich halte es aber für äußerst unwahrscheinlich, und wir finden auch immer mehr Hinweise, dass die Unterstadt tatsächlich besiedelt war. Doch genau wissen wir es erst, wenn wir großflächig graben und nachsehen, ob unterhalb der griechisch-römischen Bebauung bronzezeitliche Siedlungsreste zu finden sind. Man muss sich

vor Augen halten, dass wir von dem in Frage kommenden Bereich weniger als fünf Prozent erforscht haben.

Spektrum: Für solche weiterführenden Ausgrabungen aber fehlt dem Projekt die Finanzierung, und die Kritik an der Deutung des Troja-VI-Grabens als Verteidigungsanlage hilft da wohl nicht?

Pernicka: Die kommt nur von einigen wenigen, die unsere Grabungsbefunde nicht zur Kenntnis nehmen. Schwieriger sind da schon die knappen Mittel der öffentlichen Hand. Deshalb versuchen wir derzeit, Fördermittel bei Stiftungen einzuwerben. Natürlich sind wir auch für jede Spende an das Troja-Projekt dankbar. Zunächst aber hoffe ich, dass bald ein Traum Korfmanns wahr werden wird: ein Museum am Standort Troja.

Spektrum: Wozu braucht die berühmte Ruinenstätte ein Museum?

Pernicka: Die meisten Besucher sind Pauschaltouristen, die von Ephesos über Pergamon kommend für zwei Stunden bei uns Halt machen. Und dann stehen sie auf einem komplexen Ruinenhügel, den sie trotz aller Lehrtafeln und Beschilderungen nur schwer verstehen. In einem Museum könnten wir mit Hilfe multimedialer Technik die Zusammenhänge besser vermitteln. Auch der Region käme das zugute. Denn ein solches Angebot würde natürlich dazu einladen, dort zu übernachten. Und uns Wissenschaftlern wären unsere Funde ganzjährig zugänglich.

Spektrum: Das war bislang nicht der Fall?

Pernicka: Das Meiste lagert rund um das Grabungshaus in Containern, die wichtigsten Funde aber verwahrt ein Depot im Museum Canakkale. Den Schlüssel dazu hat ein örtlicher Beamter, und der steht uns nur im Sommer während der zweimonatigen Kampagne zur Verfügung – wenn er nicht, wie im vergangenen Jahr, sechs Wochen an einer anderen Grabung teilnimmt und danach Urlaub hat. Das war schon eine betrübliche Situation (*lacht*). Deshalb ist ein Museum in Troja für mich ein dringender Wunsch.

Spektrum: Und womit könnte eine gute Fee Ihnen sonst noch eine Freude machen?

Pernicka: Nach allem, was mir Fortuna schon beschert hat, bin ich eigentlich ganz zufrieden. Aber natürlich würde ich gern endlich herausfinden, woher das Zinn der trojanischen Bronze stammt. Auch die Herkunft des Goldes in prähistorischen Kunstgegenständen ist für die Archäologie ein großes Rätsel. Also: Woher stammt das Gold der in Mykene ausgegrabenen Agamemnon-Maske? Oder des in Ur gefundenen Schmucks? Oder das des Priamos-Schatzes? Und damit wären wir, verzeihen Sie, wieder bei Troja. ◀



Klaus-Dieter Linsmeier (links) ist Redakteur von »Spektrum der Wissenschaft«. Er führte das Gespräch zusammen mit Chefredakteur Reinhard Breuer (Mitte).

Korfmann, M. O. (Hg.): Troia – Archäologie eines Siedlungshügels und seiner Landschaft. Philipp von Zabern, Mainz 2006.

Latacz, J. et al.: Homer. Der Mythos von Troia in Dichtung und Kunst. Katalog zur gleichnamigen Ausstellung. Hirmer, München 2008.

Wagner, G. A. (Hg.): Einführung in die Archäometrie. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2007.

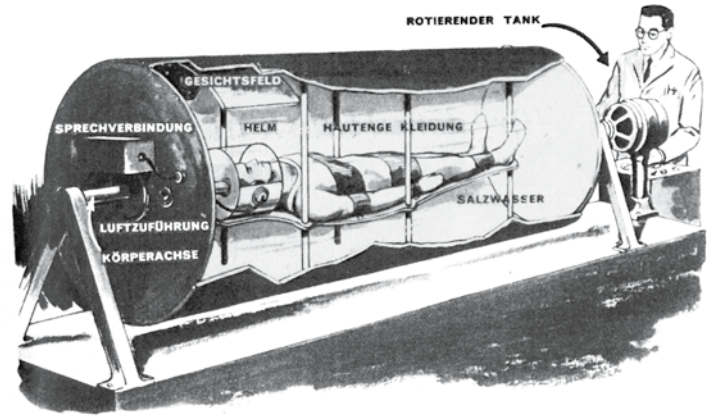
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987522.

1959

Schwerelos im Tank

»Ohne teuren Geräteaufwand und Raumflüge können Wissenschaftler in Versuchen das Gefühl der Schwerelosigkeit in einem Labor erzeugen. ...

Die Versuchsperson trägt dabei hautenge Kleidung und wird in einen Tank mit Salzlösung gebracht ... Der Tank dreht sich um eine waagerechte Achse, um das Gleichgewichtsorgan im Ohr außer Funktion zu setzen. ... Dadurch, daß die Versuchsperson immer dieselbe Stelle der Wand sähe, hätte sie auch keinerlei Gefühl einer Bewegung.« *Populäre Mechanik*, 4. Jg., Nr. 44, Mai 1959, S. 35



Künstliche Schwerelosigkeit im rotierenden Tank

Thermonukleares Kraftwerk

»Die in den USA ausgelöste Explosion einer 1,7-kto-Bombe in einer Tiefe von etwa 300 Metern unter der Erdoberfläche ... hat ergeben, daß die Energie der Bombe sich fast vollständig als Wärme in einer dünnen Kugelschale um den Explosionsherd wiederfindet. ... Es ist denkbar, nach der Explosion durch bereits vorher verlegte Leitungen Wasser in den Hohlraum einströmen zu lassen und zu verdampfen. Der Dampf wird über Tage einer Turbine zugeführt, die einen Generator antreibt.« *Die Umschau*, 59. Jg., Nr. 10, 15. Mai 1959, S. 294

Antibiotika aus Fliegenlarven

»Die englischen Biochemiker E.R. Pavillard und E.A. Wright ... konnten aus den Larven der Schmeißfliege *Phormia terraenovae* einen Wirkstoff von Antibiotikum-artigem Charakter gewinnen. Er entfaltet eine kräftige bakterizide Wirkung auf die blut-

vergiftenden Streptokokken sowie auf die als Pneumokokken bezeichneten Erreger der Lungenentzündung. Die chemische Enträtselung dieses neuartigen Maden-Antibiotikums ist bisher noch nicht gelungen.« *Kosmos*, 55. Jg., Nr. 5, Mai 1959, S. 182

Alternative zum Zeppelin

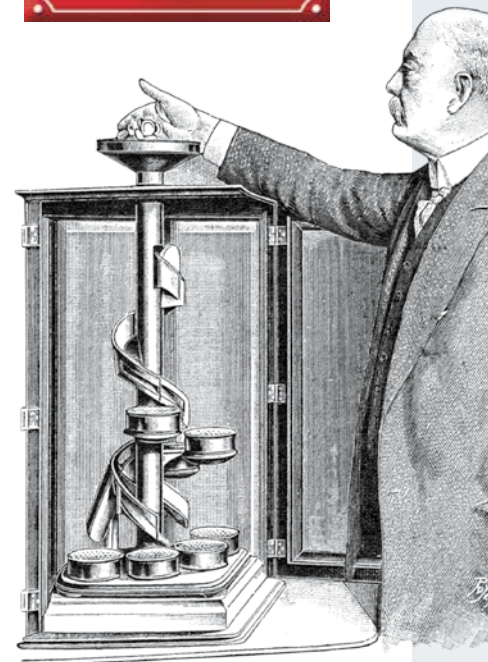
»Einen zerlegbaren Lenkballon hat der Offenbacher Ingenieur Weissenburger entworfen und im Modell ausgeführt. Das über sechs Meter lange Modell ... besteht aus acht gleichen Teilballons, deren jeder in aufgestelltem Zustande die Form eines Zylinders ... besitzt und schirmartig durch eine Kurbel zusammengelegt werden kann. ... Jeder Teilballon kann ... als kleiner Fesselballon für Militärzwecke

und als Sportballon benützt werden. Auch kann durch Einsetzen eines kleinen Motors in die Gondel aus einem Teilballon ein kleiner Lenkballon geschaffen werden. ... Das Zusammensetzen der Teilballons zu einem großen Lenkballon könnte nach der Meinung des Erfinders durch eine Luftschiffertruppe in zwei Stunden bewerkstelligt werden.« *Die Umschau*, 13. Jg., Nr. 19, Mai 1909, S. 411

Automatischer Geldsortierer

»Wie die Abbildung zeigt, befindet sich in einem Gehäuse ... eine hohle Säule, die nach oben in einen Einfülltrichter ausläuft. Von der Säule geht eine Art von spiralförmigem Führungsweg ab. ... In diesem sind Schlitze mit abführenden Kanälen angeordnet, und zwar sind im oberen Teil die Schlitze für die kleinsten Münzen, dann diejenigen für Markstücke u. s. w. bis zum Fünfmärkstück herunter. Die herabrollenden Münzen benutzen nun mit Sicherheit den ersten Schlitz, der sich ihnen bietet, um seitlich abzugehen, und während des Niederganges sortiert sich der Münzenstrom ... sauber aus. Die Maschine hat sich in der Praxis bisher gut bewährt und findet ... eine schnelle und weitgehende Verbreitung.« *Das Neue Universum*, 30. Jg., Mai 1909, S. 178

1909



Automatischer Geldsortierer – Münzen auf der Reise nach unten

Kohlensäure in der Wäscherei

»In der Chemisch-Wäscherei findet nach F. J. Farrell die Barbé-Maschine Eingang, in welcher das Waschen und Spülen mit Benzin und das Zentrifugieren in einem Zylinder unter Kohlensäure mit Ausschluss von Luft stattfindet. Nachdem das Benzin abgelassen und geschleudert ist, wird der Apparat durch einen Dampfmantel erwärmt und heisse Kohlensäure eingeblasen, um alles Benzin abzutreiben. Die Kohlensäure und das Benzin werden, soweit möglich, wiedergewonnen.« *Zeitschrift für die gesammte Kohlensäure-Industrie*, 15. Jg., Nr. 9, Mai 1909, S. 312

Die mathematische Zähmung des **STANDARD- MODELLs**

Die moderne Theorie der Elementarteilchen, die Quanten-Yang-Mills-Theorie, vermag die experimentellen Befunde mit unerhörter Genauigkeit wiederzugeben, es fehlt ihr jedoch bisher ein solides mathematisches Fundament. Über dessen Gestalt gibt es nur sehr nebelhafte Vorstellungen.

Von Christian Bär und Christoph Stephan

Bevor ein mathematisches Problem zu Weltruhm gelangt, hat es in aller Regel schon eine lange Vorgeschichte hinter sich. Große Geister haben sich, zum Teil jahrhundertlang, vergeblich daran versucht, dabei das Problem von allem Nebensächlichen entkleidet und es in die kürzeste und eleganteste denkbare Form gebracht, so dass es – wie im Fall der fermatischen Vermutung – auf den Rand einer Buchseite passt. Oft ist es schon in Form einer Vermutung formuliert: »Alle nichttrivialen Nullstellen der riemannschen Zetafunktion haben den Realteil $1/2$ « (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86), oder noch kür-

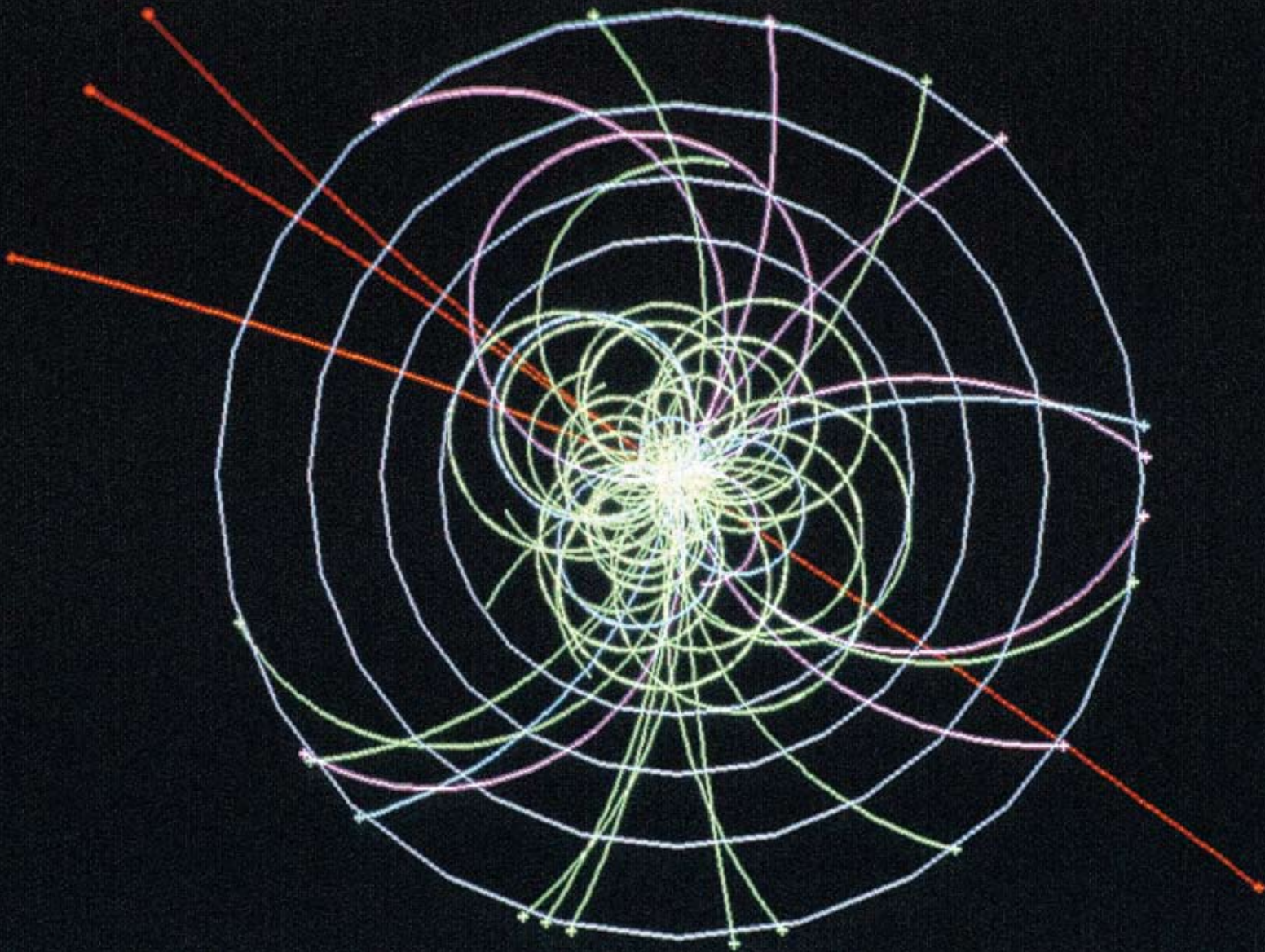
zer: » $P \neq NP$ « (Spektrum der Wissenschaft 10/2008, S. 74), und das Einzige, was fehlt, ist ein Beweis.

Von den sieben Millenniumsproblemen, auf deren Lösung das Clay Mathematics Institute einen Preis von jeweils einer Million Dollar ausgesetzt hat, liegen fünf in dieser Reinform vor. Nur die beiden Probleme, die ihren Ursprung in der Physik haben, sind noch nicht so ausgereift. Bei der Theorie der Navier-Stokes-Gleichungen (Spektrum der Wissenschaft 4/2009, S. 78) werden bereits »wesentliche Fortschritte« prämiert, weil die Mathematiker keine hinreichend konkrete Vorstellung davon haben, wie diese Fortschritte aussehen könnten. Und beim Yang-Mills-Problem ist es noch schlimmer.

Die Aufgabe besteht aus zwei Teilen. Im ersten Schritt ist ein mathematischer Unterbau für eine Klasse von Theorien zu finden, die in der Elementarteilchenphysik viel und erfolgreich angewendet werden. Leider beruhen diese Quantenfeldtheorien in wesentlichen Teilen auf Konzepten, die mathematisch nicht definiert sind, wie zum Beispiel viele der so genannten Pfadintegrale, und liegen obendrein nur als Störungstheorien vor, das heißt nur als eine Annäherung an die »echte«, noch unbekannte Theorie. Diese Theorie muss nicht nur mathematisch fundiert sein, sondern auch die experimentellen Befunde richtig wiedergeben und darüber hinaus gewisse Eigenschaften haben, welche die Physiker als unerlässlich empfinden.

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



CERN

In einem zweiten Schritt ist nachzuweisen, dass die so gefundene Theorie einen speziellen Befund der Physiker richtig wiedergibt, die so genannte Massenlücke. Dies ist nun eine mathematisch klar fassbare Aufgabe. Die größere Hürde dürfte aber im ersten Teil bestehen.

Klassische Feldtheorie

Der klassischen newtonschen Mechanik liegt die Vorstellung zu Grunde, dass zwei voneinander entfernte physikalische Körper eine unmittelbar wirkende Kraft aufeinander ausüben. »Die Anziehungskraft ist proportional dem Kehrwert des Abstandsquadrats der beiden Körper« und wirkt vor allem ohne Zeitverzug.

Spätestens seit Albert Einsteins (1879–1955) spezieller Relativitätstheorie wissen wir, dass man diese Vorstellung nicht ganz für voll nehmen darf. Kein Signal kann schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden, auch nicht die Wirkung einer Massenverlagerung. Wäre das newtonsche Kraftgesetz in seiner ursprünglichen Form gültig, dann könnte man Nachrichten verzögerungsfrei von der Erde zum Mars übertragen, indem der Absender auf der Erde einen Massenkörper hin- und herschwenkt und der Empfänger auf dem Mars die dadurch bewirkte Kraftänderung misst.

In einer relativistischen, das heißt mit der speziellen Relativitätstheorie verträglichen,

Ein Higgs-Boson entsteht durch die Kollision zweier Protonen mit der Energie 14 Teraelektronvolt und zerfällt alsbald in vier Myonen (rote Spuren). Das Bild zeigt eine Simulation; erst der Large Hadron Collider (LHC) wird Protonen auf diese Energien beschleunigen können. Von den Ergebnissen solcher Experimente erwartet man sich eine weitere Bestätigung des Standardmodells, dessen theoretische Fundierung noch aussteht.

In Kürze

► Die **klassische Yang-Mills-Theorie** ist eine gut fundierte geometrische Theorie. Sie hat zu wichtigen Durchbrüchen in der Topologie geführt.

► Die **Quanten-Yang-Mills-Theorie** wird in der Elementarteilchenphysik sehr erfolgreich angewendet. Als mathematische Theorie existiert sie aber bisher allenfalls in Ansätzen. Die Konstruktion einer mathematisch fundierten Quanten-Yang-Mills-Theorie wäre ein großer Durchbruch.

► Die physikalischen Daten zeigen, dass Teilchen, die durch nichtabelsche Quanten-Yang-Mills-Theorien beschrieben werden, eine gewisse positive Mindestmasse haben. Der mathematische Grund für diese **Massenlücke** ist noch unbekannt.

Und Gott sprach:

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho$$

$$\nabla \times B = \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi j$$

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$

Und es ward Licht.

Die vier hier wiedergegebenen Zeilen sind die Maxwell-Gleichungen; B bezeichnet die magnetische, E die elektrische Feldstärke, ρ die Ladungsdichte und j die elektrische Stromdichte. Der Scherz aus einem Vortrag von Lorenzo Sadun hat eine Vorgeschichte: Ludwig Boltzmann pries, Goethes »Faust« zitierend, die Maxwell-Gleichungen mit dem Ausruf »War es ein Gott, der diese Zeilen schrieb?«

Theorie muss man also diesen Kraftbegriff aufgeben. An seine Stelle tritt das Konzept des Kraftfelds. Man stellt sich vor, dass die Masse oder die elektrische Ladung eines Körpers den Zustand des Raums an jedem Punkt in ihrer Umgebung verändert. Diesen abstrakten, ortsabhängigen Zustand nennt man ein (Schwere- beziehungsweise elektrisches) Kraftfeld. An jedem Punkt des Raums ist eine mathematische Variable, die Feldstärke, definiert, die angibt, welche Kraft das Feld auf andere schwere beziehungsweise elektrisch geladene Körper in diesem Punkt ausübt. Da jede Änderung des Kraftfelds sich höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, können auch Signale nicht schneller übermittelt werden.

Für Elektrizität und Magnetismus gab es eine relativistische Theorie interessanterweise bereits vor der speziellen Relativitätstheorie. Es handelt sich um die von dem schottischen Mathematiker und Physiker James Clerk Maxwell (1831–1879) vollendete Elektrodynamik. Sie ist in der Tat mit Newtons Mechanik unvereinbar, und dieser Widerspruch gab Einstein den Anstoß, die spezielle Relativitätstheorie zu entwickeln. Nicht umsonst trägt seine grundlegende Arbeit zum Thema den Titel »Zur Elektrodynamik bewegter Körper«.

Es stellte sich bald heraus, dass man die maxwellschen Gleichungen – ebenso wie die der klassischen Mechanik – viel eleganter und der Behandlung zugänglicher formulieren kann, indem man an Stelle der physikalisch relevanten Feldstärken so genannte Potentiale einführt. Für die maxwellschen Gleichungen ist das Potenzial ein orts- und zeitabhängiger Vektor, der in der Regel mit A bezeichnet wird. Die Feldstärken sind aus den Potentialen durch Differenzieren zu errechnen.

Mit dem modernen Differenzialformenkalkül kann man die Eleganz der Darstellung auf die Spitze treiben. Man definiert nicht allzu komplizierte mathematische Objekte namens d , das »äußere Differenzial«, und $*$, den »Hodge-Stern-Operator«. Nachdem man das elektrische Feld E und das magnetische Feld B zu einem elektromagnetischen Feld F zusammengefasst hat, schreiben sich die maxwellschen Gleichungen als

$$dF=0$$

$$d*F=J,$$

wobei J die Quelle des elektromagnetischen Felds, das heißt ruhende und bewegte elektrische Ladungen, beschreibt. Mit dem Vektorpotential A reduzieren sich diese beiden Gleichungen auf

$$d*dA=J$$

mit der Berechnungsvorschrift

$$F=dA.$$

Bei der Wahl des Potentials zu einer gegebenen Feldstärke hat man gewisse Freiheiten. Deren einfachste Form ist die Wahl des Nullpunkts beim elektrischen Potential. Physikalische Bedeutung haben nicht die Werte dieses Potentials an sich, sondern nur Potentialdifferenzen (elektrische Spannungen).

Bei der Wahl des Vektorpotentials hat man noch größere Freiheiten. Man darf zu A den Gradienten einer skalaren Funktion f addieren, ohne dass das Feld sich ändert; das heißt, man hat in jedem Punkt der Raumzeit eine reelle Zahl frei, allerdings nicht ganz nach Belieben, weil die gewählten Zahlen zusammen eine differenzierbare Funktion ergeben müssen. In Formeln: Man kann A durch $A' = A + df$ ersetzen; dann gilt $dA' = dA +ddf = dA = F$, da bei Differenzialformen stets $dd = 0$ ist.

Da alle diese Umrechnungen auf eine Festlegung von Nullpunkten hinauslaufen, nennt man das Vektorpotential auch ein Eichfeld (*gauge field*) in Analogie zur Eichung eines Messgeräts, die ebenfalls einer Festlegung des Nullpunkts (und zusätzlich einer Maßeinheit) gleichkommt.

Bislang scheint es so, als wäre das Potenzial A nichts weiter als eine der Bequemlichkeit halber eingeführte Rechengröße. Es hat jedoch eine überraschende geometrische Interpretation. Dafür ist zunächst der Begriff der Parallelverschiebung zu erweitern.

Verschiebt man einen Vektor in der euklidischen Ebene in der üblichen Weise längs einer geschlossenen Kurve parallel, so endet man mit demselben Vektor, mit dem man begonnen hat. Dies liegt daran, dass die euklidische Ebene nicht gekrümmt ist.

Auf einer – gekrümmten – Kugeloberfläche sieht die Sache anders aus. Es gilt nämlich die Zusatzbedingung, dass der Vektor unterwegs stets tangential an die Kugeloberfläche bleiben muss (Kasten rechts). Nach einem Umlauf um die Kurve ist der parallelverschobene Vektor gegenüber dem Ausgangsvektor gedreht. Wie groß der Drehwinkel ist, hängt dabei von der Kurve ab.

Gehen wir noch einen Schritt weiter. Wir projizieren die Kugeloberfläche oder einen Teil von ihr zurück in die Ebene, so wie man das bei der Erstellung von Landkarten tut. Dabei übertragen wir die Parallelverschiebung von Vektoren auf der Kugeloberfläche mit in die Ebene. Dann haben wir eine neue Vorschrift zum Paralleltransport von Vektoren in der Ebene, bei der im Gegensatz zur üblichen Vorschrift das Ergebnis von der Wahl der um-

laufenden Kurve abhängt. Die Ebene hat die Krümmung der Kugeloberfläche geerbt. Es gibt viele weitere Möglichkeiten, Paralleltransport von Vektoren in der Ebene oder auch in höherdimensionalen Räumen zu definieren.

Das Vektorpotenzial A aus der Elektrodynamik kann nun als eine Vorschrift zur Parallelverschiebung von Vektoren in einer Ebene längs Kurven in der Raumzeit aufgefasst werden. Das elektromagnetische Feld F ist dann die zugehörige Krümmung.

Bemerkenswerterweise ist dieser geometrische Aspekt auch in der relativistischen Feldtheorie der Gravitation, besser bekannt als Einsteins allgemeine Relativitätstheorie, von zentraler Bedeutung. Das Schwerefeld manifestiert sich als Krümmung der Raumzeit selbst. Raum und Zeit sind damit nicht länger nur die Bühne für die physikalischen Vorgänge, sondern ihre Geometrie nimmt selbst am physikalischen Geschehen teil, indem sie Kräfte überträgt. Das ist nicht etwa nur eine neue Interpretation bekannter Gesetze. Die allgemeine Relativitätstheorie macht gewisse von der klassischen Theorie abweichende Vorhersagen, zum Beispiel zur Lichtablenkung an der Sonne, und konnte deswegen experimentell bestätigt werden.

Vom Potenzial zur Eichgruppe

Ganz allgemein bilden die Transformationen, die man durch Parallelverschiebung entlang geschlossener Kurven bekommt, eine Gruppe im mathematischen Sinn (Kasten S. 71). Im Fall der Kugeloberfläche ist dies die ebene Drehgruppe.

Ein Eichfeld A bestimmt also auf dem Weg über die geometrische Interpretation eine Gruppe, die so genannte Eichgruppe. Es stellt sich heraus, dass diese Gruppe (im Wesentlichen) nicht von dem speziellen Eichfeld abhängt, sondern eine Eigenschaft der Theorie ist, in unserem Fall der Elektrodynamik mit den Maxwell-Gleichungen. Es handelt sich um die ebene Drehgruppe, also eine abelsche (kommutative) Gruppe. Daher nennt man die Elektrodynamik eine abelsche Eichtheorie.

Der Tatsache, dass die Eichgruppe abelsch ist, entspricht eine Eigenschaft der Maxwell-Gleichungen: Sie sind linear (Kasten S. 70). Damit gilt das Superpositionsprinzip: Die elektrischen Felder zweier Ladungen addieren sich, und die Feldstärke des gesamten Systems ist einfach die Summe der Feldstärken der einzelnen Komponenten. Eine weitere Konsequenz dieser Linearität ist, dass elektromagnetische Wellen im Vakuum einander störungsfrei überlagern. Daher durchdringen sich zum Beispiel die Lichtkegel zweier Taschenlampen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.



LINKS: SHAW PRIZE 2008; RECHTS: OHIO STATE UNIVERSITY

Cheng Ning Yang, geboren 1922 in Hefei (China), ging nach dem Studium in seinem Heimatland 1946 an die University of Chicago, wo er eng mit Enrico Fermi und Edward Teller zusammenarbeitete. Ab 1965 war er Professor an der State University of New York at Stony Brook. Im Jahr 1957 erhielt er gemeinsam mit Tsung-Dao Lee den Nobelpreis »für grundlegende Forschungen über die Gesetze der Parität, die zu wichtigen Entdeckungen über die Elementarteilchen führten«. Robert L. Mills (1927–1999) studierte an der Columbia University in New York und war ab 1956 Professor an der Ohio State University. Gemeinsam mit Yang entwickelte er 1954 am Brookhaven National Laboratory die nach ihnen beiden benannte Theorie.

Sowie aber die Eichgruppe nicht mehr abelsch ist, werden auch die zugehörigen Feldgleichungen nichtlinear. Dann ist es vorbei mit dem Superpositionsprinzip, und wenn das Licht nichtlinear wäre, würde der eine Taschenlampen-Lichtkegel das Licht des anderen streuen und umgekehrt.

Nun hätte ein Physiker des 19. Jahrhunderts für nichtlineare Feldgleichungen keine Verwendung gehabt, da kein Naturphänomen bekannt war, das sich derart hätte beschreiben lassen. Das änderte sich erst mit der zweiten Revolution, die ab dem Anfang des 20. Jahrhunderts die Physik erschütterte: der Quantenmechanik.

So, wie sie unter anderem Niels Bohr (1885–1962), Werner Heisenberg (1901–1976) und Erwin Schrödinger (1887–1961) in den 1920er Jahren formuliert haben, ist die Quantenmechanik eine nichtrelativistische Theorie. Sie erlaubt es zwar, den Aufbau von

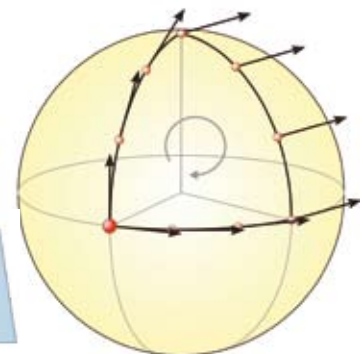
PARALLELTRANSPORT

Ein Vektor, den man in einer Ebene entlang einer Kurve parallel verschiebt, sieht am Ende genauso aus wie zuvor (links). Verschiebt man ihn dagegen auf einer gekrümmten Oberfläche, zum Beispiel der einer Kugel (rechts), so zeigt er hinterher im Allgemeinen in eine andere Richtung; ein Java-Applet von John Sullivan (siehe die Webhinweise zu diesem Artikel) demonstriert das in bewegten Bildern.

Das wäre nicht der Fall, wenn der Vektor beim Verschieben seine Orientierung in dem die Kugel umgebenden Raum beibehalten dürfte. Für die abstrakten Flächen, von denen in diesem Artikel die Rede ist, gibt es den umgebenden Raum jedoch nicht, und man kann ihn nicht einmal in jedem Fall widerspruchsfrei hinzudefinieren. Dagegen kann man die Tangentialvektoren in jedem Punkt der Fläche sinnvoll definieren. »Parallelverschiebung auf der Fläche« ist also so zu verstehen, dass der verschobene Vektor stets tangential zur Fläche bleibt.



KRISTIN RIEBE





Steven Weinberg (* 1933) und Abdus Salam (1926–1996) erarbeiteten die Vereinigung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung. Sie erhielten den Nobelpreis für Physik 1979 gemeinsam mit Sheldon Glashow.

BEBE/FOTOS: TEXAS A&M UNIVERSITY, COMMERCE

Atomen äußerst präzise zu beschreiben, behandelt allerdings das elektromagnetische Feld als klassisches Hintergrundfeld. Ein Atom, das von einem angeregten Zustand in den Grundzustand übergeht, strahlt zwar ein endliches Energiepaket namens Lichtquant oder Photon ab; aber von diesem Moment an gilt dieses als Lichtwelle und wird dementsprechend mit Mitteln der klassischen Theorie weiterverfolgt.

Experimentell hat sich diese Beschreibung der Natur allerdings als nicht präzise genug herausgestellt. Mit der Entdeckung des so genannten Lamb-Shifts, einer kleinen Abweichung in den Spektrallinien des Wasserstoffatoms, die nicht von der herkömmlichen Quantenmechanik erklärt werden konnte, entstand die Notwendigkeit, die Quantenmechanik auch auf das Licht selbst, also auf Eichtheorien, auszudehnen.

Dies wiederum erzwingt die Vereinheitlichung von Quantenmechanik und spezieller Relativitätstheorie. Einen entscheidenden Schritt hin zu einer relativistischen Quantenmechanik unternahm, ebenfalls in den 1920er Jahren, Paul Dirac (1902–1984), wenn auch mit einer anderen Motivation. Dirac sagte mit seiner Theorie zu jedem Teilchen ein Antiteilchen mit gleicher Masse, aber entgegengesetzter elektrischer Ladung vorher. Wenige Jahre später, 1932, lieferte Carl David Anderson (1905–1991) mit der Entdeckung des Positrons (des Antiteilchens zum Elektron) dafür eine glänzende Bestätigung.

In der relativistischen Quantenmechanik können sich ein Teilchen und sein Antiteilchen gegenseitig vernichten, wobei ihre Energie in Form eines Photons abgestrahlt wird. Aber auch in dieser Theorie wird das Photon beziehungsweise das elektromagnetische Feld

LINEARITÄT

Eine Funktion f heißt **linear**, wenn für alle Argumente x, y und alle Zahlen c gilt:

$$f(x + y) = f(x) + f(y),$$

$$f(c \cdot x) = c \cdot f(x).$$

In diesem Fall gilt für die Lösungen der Gleichung $f(x) = 0$ das Superpositionsprinzip: Sind x und y Lösungen, so auch $x + y$, denn $f(x + y) = f(x) + f(y) = 0 + 0 = 0$.

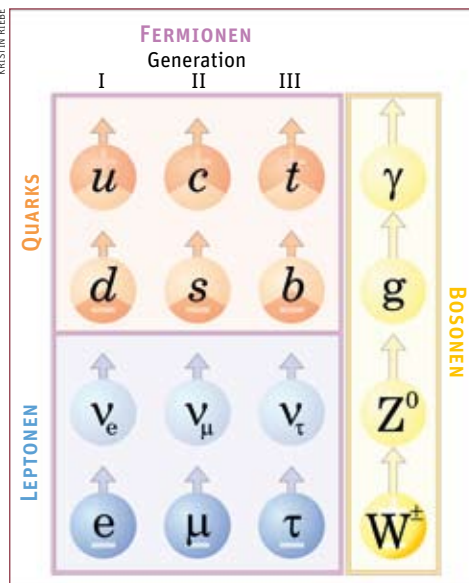
Die Funktion f kann sehr kompliziert sein (solange sie linear bleibt). So darf man die linke Seite der Maxwell-Gleichungen als eine lineare Funktion auffassen, die auf das Paar (E, B) der Feldstärken angewandt wird (E und B sind ihrerseits Funktionen von Raum und Zeit). In Abwesenheit elektrischer Ladungen und Ströme, das heißt, wenn die rechte Seite der Maxwell-Gleichungen gleich null ist, gilt das Superpositionsprinzip: Die Summe zweier Lösungen der Maxwell-Gleichungen ist wieder eine Lösung.

immer noch als klassische Größe betrachtet. Diracs Theorie bietet allerdings die Möglichkeit, auch das elektromagnetische Feld zu quantisieren, und wird damit zur Quantenelektrodynamik (QED), die nunmehr die Wechselwirkung von Licht mit geladener Materie beschreibt.

Als Richard Feynman (1918–1988), Julian Schwinger (1918–1994) und Shin'ichirō Tomonaga (1906–1979) in den 1940er Jahren die QED entwickelten, schenkte man der Tatsache, dass es sich bei der Elektrodynamik um eine abelsche Eichtheorie handelt, und besonders der Möglichkeit zur Verallgemeinerung auf nichtabelsche Eichtheorien keine große Beachtung. Heutzutage gilt die QED als wahres Kronjuwel unter den physikalischen Theorien, da sie das Verhalten elektrisch geladener Teilchen und ihre Wechselwirkung mit den »Teilchen des Lichts«, den Photonen, mit der phänomenalen Genauigkeit von $1 : 10^{11}$ beschreibt.

In der QED erscheint wie in der klassischen Elektrodynamik die elektromagnetische Feldstärke als die physikalisch relevante Größe. Erst Werner Ehrenberg (1901–1975) und Raymond Siday (1912–1956) sowie unabhängig von ihnen Yakir Aharonov (* 1932) und sein Doktorvater David Bohm (1917–1992) zeigten Ende der 1940er Jahre bis Mitte der 1950er Jahre, dass auch das elektro-

Das Standardmodell führt die ganze Vielfalt der Materie auf wenige, übersichtlich in einer Tabelle sortierte Teilchen zurück. Im täglichen Leben begegnet man nur den Materieteilchen aus der ersten Spalte (»Generation I«): dem Elektron e , seinem Neutrino ν_e und den beiden Quarks u (»up«) und d (»down«), aus denen sich Proton und Neutron zusammensetzen.



KRISTIN BEBE

GRUPPEN UND SYMMETRIEN

Das mathematische Konzept der Gruppe formalisiert das Rechnen in einem sehr allgemeinen Sinn. Eine Gruppe besteht aus Elementen sowie einer Vorschrift, die je zwei Elementen a und b ein neues Element $a \circ b$ zuordnet derart, dass die folgenden Regeln (die »Gruppenaxiome«) gelten:

(G1) Für je drei Elemente a, b und c gilt stets $(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$.

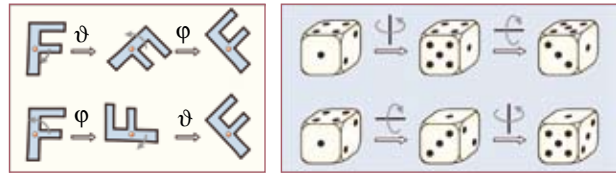
(G2) Es gibt ein Element e , genannt neutrales Element, so dass für jedes Element a gilt $e \circ a = a \circ e = a$.

(G3) Zu jedem Element a gibt es ein so genanntes inverses Element a^{-1} mit der Eigenschaft $a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = e$.

Beispiele:

- Die ganzen Zahlen zusammen mit der Addition bilden eine Gruppe. Dann schreibt man $+$ statt \circ , 0 statt e und $-a$ statt a^{-1} .
- Auch die positiven reellen Zahlen mit der Multiplikation bilden eine Gruppe. Hier ist $e = 1$ und $a^{-1} = 1/a$.
- Die positiven ganzen Zahlen mit der Multiplikation bilden keine Gruppe, da der Kehrwert einer ganzen Zahl im Allgemeinen keine ganze Zahl ist. Axiom (G3) ist hier nicht erfüllt.

Gruppen benutzt man häufig zur Beschreibung geometrischer Symmetrien. Betrachten wir die Drehungen in der Ebene um einen festen Punkt. Sie bilden ebenfalls eine Gruppe wobei die Gruppenverknüpfung \circ hier die Hintereinanderausführung zweier Drehungen bezeichnet.



Alle bislang genannten Beispiele sind kommutative oder auch abelsche Gruppen. Sie erfüllen nämlich ein weiteres Axiom:

(G4) Für je zwei Elemente a und b gilt $a \circ b = b \circ a$.

Die ebene Drehgruppe ist abelsch: Drehen wir erst um den Winkel $\vartheta = -45^\circ$ und anschließend um den Winkel $\varphi = 90^\circ$, dann ist das Ergebnis dasselbe, wie wenn wir die Drehungen in umgekehrter Reihenfolge vollziehen (linkes Bild). Das neutrale Element e ist hier die Drehung um den Winkel 0 (das Nichtstun).

Die meisten Gruppen sind allerdings nicht abelsch. Betrachten wir zum Beispiel die Drehungen im dreidimensionalen Raum um irgendwelche Achsen, die durch einen festen Punkt gehen. Auch sie bilden mit der Hintereinanderschaltung eine Gruppe. Hier kommt es jetzt allerdings auf die Reihenfolge an. Man kann sich dies an einem Spielwürfel klar machen, den man nacheinander um zwei aufeinander senkrecht stehende Achsen dreht. Vertauscht man die Reihenfolge der beiden Drehungen, so ergibt sich ein anderes Ergebnis (rechtes Bild).

magnetische Potenzial eine messbare physikalische Größe ist (Spektrum der Wissenschaft 10/ 1998, S. 66). Es tritt in Interferenzexperimenten mit geladenen Teilchen zu Tage, in denen das elektromagnetische Feld F verschwindet, aber das elektromagnetische Potenzial A ungleich null ist. Im Experiment entsteht ein solches elektromagnetisches Potenzial außerhalb einer sehr langen Spule. Klassisch spüren geladene Teilchen außerhalb der Spule keinen Einfluss des Felds, quantenmechanisch macht sich das elektromagnetische Potenzial aber in Form von Verschiebungen der Interferenzlinien bemerkbar.

Yang-Mills-Theorie

Mit der QED hatten die Physiker zumindest für eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen – starke und schwache Kernkraft, Elektromagnetismus und Gravitation – ein leuchtendes Vorbild für eine Quantenfeldtheorie gefunden. Da war die Aussicht verlockend, diesen phänomenalen Erfolg auf die anderen beiden Kräfte im Atom zu übertragen, nämlich die schwache Kraft, die für den radioaktiven Betazerfall des Neutrons verantwortlich ist, und die starke Kraft, welche die Atomkerne zusammenhält.

Es stellte sich heraus, dass keine abelsche Eichtheorie diese Kräfte beschreiben kann. Also mussten die Feldgleichungen nichtlinear

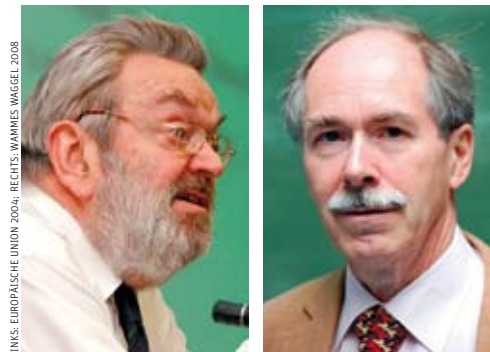
sein, und die QED musste auf nichtabelsche Eichtheorien erweitert werden.

Das ist 1954 Chen Ning Yang (* 1922) und Robert L. Mills (1927–1999) in einem Geniestreich besonderer Art gelungen. Nach ihnen werden diese allgemeineren Eichtheorien Yang-Mills-Theorien genannt, oder im Fall der dazugehörigen Quantenfeldtheorie Quanten-Yang-Mills-Theorien.

Allerdings konnten Yang und Mills die Physiker mit ihrem Modell nicht wirklich zufrieden stellen. Erst 1971 konnten Martinus Veltman (* 1931) und Gerardus 't Hooft (* 1946) zeigen, dass die Quanten-Yang-Mills-Theorie überhaupt von physikalischem Interesse ist, indem sie das Renormierungsproblem (siehe unten) lösten. Steven Weinberg (* 1933) und Abdus Salam (1926–1996) gelang es in den 1960er und 1970er Jahren, die schwache Kraft im Rahmen der Quanten-Yang-Mills-Theorie, unter Zuhilfenahme des so genannten Higgs-Felds, zu erklären. Es folgte auch die starke Kraft, deren Theorie sich als Prototyp einer nichtabelschen Quanten-Yang-Mills-Theorie erweist.

Mathematische Fundierung

Die heutige Elementarteilchenphysik, die im so genannten Standardmodell drei der vier Grundkräfte – die elektromagnetische, die starke und die schwache – einheitlich be-



Der Niederländer Martinus J. G. Veltman (* 1931) und sein Schüler Gerardus 't Hooft (* 1946) fanden ein Verfahren zur Renormierung der Yang-Mills-Theorie. Dafür gab es 1999 den Nobelpreis für Physik.

AXIOME DER QUANTENFELDTHEORIE

Arthur Wightman (* 1922; Bild rechts), Lars Gårding (* 1919), Rudolf Haag (* 1922), Daniel Kastler (* 1926) und andere haben in den 1950-er und 1960er Jahren verschiedene Axiomensysteme vorgeschlagen. Das bekannteste System bilden die **Wightman-Axiome**. Sie drücken sehr allgemeine Forderungen an mögliche physikalische Modelle in mathematisch präziser Form aus, was im Folgenden nur unvollkommen wiederzugeben ist:

► Eine physikalisch akzeptable Quantenfeldtheorie muss mit der **speziellen Relativitätstheorie** verträglich sein.

► Sie soll genau einen **Vakuuzustand** enthalten, also einen Zustand, der keine Teilchen oder Felder enthält. Dieses Vakuum soll für jeden Beobachter gleich aussehen.

► **»Lokale Kommutativität«**: Es soll möglich sein, das Quantenfeld zur selben Zeit an zwei verschiedenen Orten zu messen, ohne dass diese Messungen einander im Sinn der heisenbergschen Unschärferelation beeinträchtigen.

Trotz ihrer großen Allgemeinheit lassen sich aus diesen und weiteren ähnlichen Axiomen wichtige physikalische Gesetze folgern, die sogar den Status von mathematischen Sätzen genießen, zum Beispiel das **Spin-Statistik-Theorem**, nach dem sich Bosonen (Wechselwirkungsteilchen) gerne in ein und demselben Zustand sammeln, was zur Bose-Einstein-Kondensation führt, während Fermionen (Materieteilchen) sich meiden wie die Pest. Dies ist das nach Wolfgang Pauli benannte Ausschließungsprinzip, das letztendlich für die Stabilität der Materie verantwortlich ist.



MIT FOTOLEN VON RAYMOND F. STREATER, LONDON, 2000

Arthur Wightman (* 1922) war bis zu seiner Emeritierung Professor an der Princeton University.

schreibt, hat somit ihr Fundament in der Quanten-Yang-Mills-Theorie. Diese hat sich im Rahmen der physikalischen Anwendung als äußerst erfolgreich erwiesen, auch wenn bisher die Gravitation als Quantentheorie nicht in das theoretische Gebäude integriert werden konnte. Die QED ist die mit Abstand präziseste physikalische Theorie, und das Standardmodell hat bisher jeden experimentellen Test bestanden. Was will man mehr?

Es mangelt an einer sauberen mathematischen Fundierung. Es ist den Physikern bisher weder gelungen, die Theorie exakt zu formulieren, noch eine vollständige Lösung der aus der Theorie hervorgehenden Differenzialgleichungen anzugeben.

Man kann zwar die Werte berechnen, welche die Theorie für gewisse physikalisch messbare Größen vorhersagen würde, aber das gelingt bisher nur mit Hilfe von Näherungsverfahren. Darüber hinaus werden gewisse Terme in den Rechnungen unendlich. Den theoretischen Physikern ist es gelungen, diese unerwünschten Unendlichkeiten durch geschickte mathematische Kniffe, die so genannte Renormierung, in den Griff zu bekommen und endliche Messgrößen zu extrahieren, die auf beeindruckende Weise mit den Experimenten übereinstimmen. Aber bislang ist die Renormierung durch nichts gerechtfertigt als dadurch, dass sie funktioniert.

Heute vermutet man, dass die mathematische Fundierung – und damit der erste Teil einer Lösung des Millennium-Problems – auf axiomatischem Weg zu finden sein wird. Nach dem Vorbild der Mathematiker stellt man am Anfang ein System von Spielregeln auf, die Axiome. Aus diesen – und nur aus diesen – versucht man durch logisch korrekte Schlüsse eine ganze Theorie herzuleiten.

Derartige Axiomensysteme sind bereits formuliert worden; das bekannteste Beispiel sind die Wightman-Axiome (Kasten links). Nur ist die Liste der Quantenfeldtheorien, die in dieses System passen, ernüchternd kurz.

Wie sich herausstellt, kommt es dabei entscheidend auf die Dimension der Raumzeit an. Nur die einfachste Quantenfeldtheorie, die Theorie freier Teilchen, lässt sich in beliebigen Dimensionen formulieren. Aber in dieser Theorie gibt es eben nur die freien Teilchen und keine Eichfelder, die Wechselwirkungen zwischen ihnen vermitteln könnten, von der Erzeugung und Vernichtung von Teilchen ganz zu schweigen. Eine Theorie, in der die Teilchen nur umherfliegen können, ohne voneinander Notiz zu nehmen, ist physikalisch uninteressant.

Eine weitere Klasse von Theorien, die sich axiomatisch korrekt formulieren lässt, kann zusätzlich eine kleine Wechselwirkung zwischen den Teilchen beschreiben. Es handelt sich allerdings immer noch nicht um eine Eichtheorie, denn die Wechselwirkung wird nicht durch Eichfelder übertragen, sondern die Teilchen können sozusagen nur direkt miteinander zusammenstoßen. Allerdings muss die Wahrscheinlichkeit für eine solche Kollision sehr klein sein (wie klein, lässt sich mathematisch genau fassen).

Obendrein lässt sich diese Theorie bisher nur in zwei und in drei Raumzeitdimensionen formulieren, und in fünf und mehr Dimensionen kann es eine solche Theorie nachweislich nicht geben. Ausgerechnet der physikalisch interessante vierdimensionale Fall erweist sich als äußerst widerspenstig. Hier sind nur Teilergebnisse bekannt, selbst für ein stark vereinfachtes Modell mit nur einer Teilchensorte und einer kleinen Wechselwirkung.

Die oben beschriebene QED entzieht sich bisher jeder Axiomatisierung. Und dabei handelt es sich hierbei noch um den einfacheren Fall einer abelschen Eichtheorie. Welche Schwierigkeiten für den interessanteren – und komplizierteren – Fall einer nichtabelschen Eichtheorie noch zu überwinden sein werden, ist heute kaum abzuschätzen.

Quanten-Yang-Mills-Problem, Teil 1:

Konstruiere zu jeder relevanten Eichgruppe eine Quanten-Yang-Mills-Theorie in vier Dimensionen, die gewissen physikalischen Mindestanforderungen genügt.

Was eine »relevante« Eichgruppe sein soll, ist dabei genau definiert. Der Mathematiker spricht hier von »kompakten einfachen Lie-Gruppen«. Diese sind stets nichtabelsch. Was die »physikalischen Mindestanforderungen«

sein sollen, ist jedoch nicht genau festgelegt. Möglicherweise muss man beweisen, dass die Theorie aus den Wightman-Axiomen oder einer Variante von ihnen folgt, vielleicht bedarf es aber auch eines vollkommen neuen Rahmens.

Massenlücke

Beim zweiten Teil des Problems geht es darum, dass die zu findende Theorie eine Eigenschaft reproduzieren soll, die den Elementarteilchenphysikern nur allzu geläufig ist. Es gibt – zum Beispiel in der Theorie der starken Wechselwirkung – nur ein begrenztes Sortiment an Teilchen, und diese haben alle eine von null verschiedene Ruhemasse. Das ist die Masse, die das Teilchen in einem Bezugssystem hat, in dem es ruht. Bewegt es sich, so hat es zusätzlich kinetische Energie, die nach Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ die Masse des Teilchens erhöht. Die Masse eines Teilchens kann also größer sein als seine Ruhemasse m_0 , aber niemals kleiner.

Unter allen denkbaren Zuständen der Welt gibt es – per Axiom – den eindeutig bestimmten Vakuumzustand; in ihm ist die Gesamtmasse der Welt gleich null. Fügt man diesem Vakuumzustand ein Teilchen hinzu, so ist diese Gesamtmasse – mindestens – gleich m_0 . Dazwischen gibt es nichts. Es gibt keinen Weltzustand, das heißt keine Lösung der Feldgleichungen, dessen Gesamtmasse zwischen 0 und m_0 läge. Entweder ist gar kein Teilchen vorhanden oder mindestens eins, denn halbe Teilchen gibt es nicht. Das ist die Massenlücke.

Quanten-Yang-Mills-Problem, Teil 2:

Zeige mathematisch, dass alle in Teil 1 konstruierten nichtabelschen Quanten-Yang-Mills-Theorien eine Massenlücke haben.

In der Elektrodynamik gibt es auch Teilchen mit Ruhemasse null, zum Beispiel die Photonen, aus denen das Licht besteht. Sie beziehen ihre Masse aus ihrer Energie, und die ist nach Max Plancks (1858–1947) berühmter Formel $E = h\nu$ proportional der Schwingungsfrequenz ν des Photons. Nun gibt es aber Photonen mit beliebig kleiner Schwingungsfrequenz, also auch beliebig kleiner Masse, denn die ist über die Energie der Schwingungsfrequenz proportional. Es klafft also keine Lücke zwischen dem masselosen Zustand und dem Zustand, der ein Teilchen enthält. Diese Theorie – die Elektrodynamik – hat keine Massenlücke.

Das heißt allerdings nicht, dass die Forderung von Teil 2 unerfüllbar wäre, denn die Eichgruppe der Elektrodynamik ist abelsch.

Interessanterweise gibt es aber für klassische Yang-Mills-Theorien mit nichtabelscher Eichgruppe durchaus masselose Zustände. Wenn es die in Teil 2 des Problems geforderte Massenlücke tatsächlich gibt, handelt es sich hierbei um ein echtes Quantenphänomen.

Dass die Eichfelder der schwachen und der starken Kernkraft eine Massenlücke haben, ist physikalisch von großer Bedeutung. Die von null verschiedene Mindestmasse sorgt dafür, dass diese Kräfte, im Gegensatz zur elektromagnetischen und der Gravitationskraft, eine sehr kurze Reichweite haben. Deswegen merken wir in unserer Alltagserfahrung nichts von diesen Kräften.

Von einem besseren mathematischen Verständnis von Quanten-Yang-Mills-Theorien erhofft man sich noch weitere Fortschritte, zum Beispiel eine Erklärung für das *quark confinement*. Darunter versteht man die Tatsache, dass man Quarks niemals einzeln beobachtet, sondern stets im Verbund, wie zum Beispiel bei Protonen und Neutronen, die aus jeweils drei Quarks zusammengesetzt sind.

Mathematische Anwendungen

Wenn es den Mathematikern gelingen sollte, die beschriebene Fundierung für das Quanten-Yang-Mills-Problem zu erarbeiten, dann würden sie damit nicht nur den Physikern einen unschätzbaren Dienst erweisen. Die zu entwickelnden Konzepte würden auch die Mathematik weit voranbringen. Bereits die Entwicklung der klassischen Yang-Mills-Theorie, um die sich Mathematiker und Physiker zunächst parallel bemühten, ohne voneinander zu wissen, hat zu unerwarteten Anwendungen in der Topologie geführt.

Anfang der 1980er Jahre gewann Simon Donaldson (* 1957) mit Hilfe der Yang-Mills-Theorie tief liegende Einsichten in die Theorie der vierdimensionalen Räume. Daraus folgt zum Beispiel, dass es auf dem vierdimensionalen euklidischen Raum eine so genannte exotische differenzierbare Struktur gibt: Für Funktionen von vier Veränderlichen kann man eine Differenzialrechnung konsistent einführen, die sich von der üblichen ganz wesentlich unterscheidet. In allen anderen Dimensionen kann es eine solche Struktur nicht geben. Donaldson erhielt 1986 für diese Resultate die höchste mathematische Auszeichnung, die Fields-Medaille.

Einen weiteren Schub erhielt die vierdimensionale Topologie 1994 durch eigentlich physikalisch motivierte eichtheoretische Arbeiten von Nathan Seiberg und Edward Witten. Welche mathematischen Einsichten aus einer echten Quanten-Yang-Mills-Theorie folgen könnten, ist noch gar nicht absehbar. ◀



Simon Donaldson (* 1957) fand mit Hilfe spezieller Lösungen der Yang-Mills-Gleichungen exotische differenzierbare Strukturen auf vierdimensionalen Mannigfaltigkeiten. Das brachte ihm 1986 die Fields-Medaille.



Christian Bär ist Professor für Geometrie an der Universität Potsdam und Vizepräsident der Deutschen Mathematiker-Vereinigung. Er forscht auf den Gebieten der Differentialgeometrie, Spektralgeometrie und globalen Analysis mit einem besonderen Fokus auf Anwendungen in der mathematischen Physik. **Christoph Stephan** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe von Christian Bär. Er promovierte 2005 in theoretischer Physik an den Universitäten von Kiel und Marseille. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der mathematischen Grundlagen des Standardmodells, der nichtkommutativen Geometrie sowie ihrer Anwendung in der Physik.

Feynman, R.: QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. Piper, München 2008.

Gell-Mann, M.: Das Quark und der Jaguar. Piper, München 1995.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987519.

GEOMETRIE

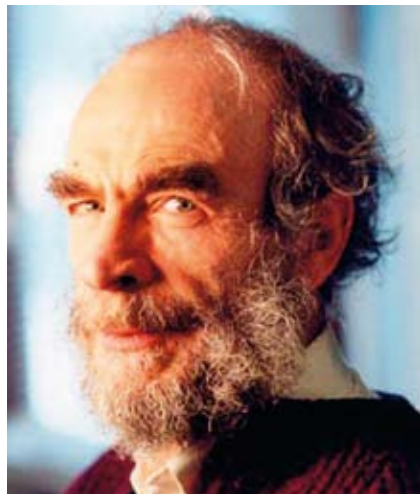
Abelpreis für Mikhail Gromov

Der russisch-französische Mathematiker erhält die einem Nobelpreis ähnliche Auszeichnung »für seine revolutionären Beiträge zur Geometrie«.

Von Michael Joachim

Das eine Extrem der Mathematik hat der eine oder andere auf der Schule zu fürchten gelernt: eine sture Schreibübung für Pedanten, die nicht nach dem Sinn dessen schauen, was sie tun, und für die ein falsches Vorzeichen oder eine verrutschte Klammer bereits einer Katastrophe gleichkommt. Der diesjährige Abelpreisträger Mikhail Gromov verkörpert das andere Extrem.

Ich hatte das Vergnügen, ihn und seine unkonventionelle Herangehensweise an die Dinge 1993 in seinem Seminar an der University of Maryland zu erleben. Alle Mitglieder des mathematischen Instituts, die in irgendeiner Form mit Differentialgeometrie, Gromovs Hauptarbeitsgebiet, zu tun hatten, waren gekommen. Vorne an der Tafel sprühte er vor Begeisterung über die wunderbaren Ideen, die er vermitteln wollte. Nicht Kleinigkeiten, sondern das ganz große Bild hinter den Dingen wollte er erklären. Dazu malte er zu Einfällen oft noch spontan ein Bild neben ein bestehendes oder sprang von einer Seite der Tafel zur anderen, um dort



noch eine Grafik zu ergänzen. Wer den Vortrag nicht gehört hatte, hätte mit dem Tafelbild kaum etwas anfangen können, und selbst die großen Meister der Differentialgeometrie im Publikum haben mit Sicherheit nicht jedes einzelne Detail verstanden. Aber die Begeisterung sprang über, und das große Bild wurde fassbar.

Dem Mathematiker Gromov sind vor allem neuartige Ideen und Konzepte ein Anliegen. In der Begründung für die

Mikhail Gromov (links) macht mit seinem Humor vor der eigenen Person nicht halt. Auf seiner Website am IHES stellt er sich mit einem Bild vor (rechts), das ihm nur entfernt ähnlich sieht.

Nominierung zum Abelpreis heißt es dazu treffend: »Gromov ist immer auf der Suche nach neuen Fragen und entwickelt ständig neue Ideen zur Lösung noch ungelöster bekannter Probleme.«

ABSTRAKTE GRUPPEN

Die ersten Gruppen, mit denen die Mathematiker Gruppentheorie betrieben, bestanden aus geometrischen Transformationen wie Drehungen und Spiegelungen. Man kann sie umkehren, wodurch wieder eine Transformation aus der Gruppe entsteht. Wenn man zwei von ihnen – nennen wir sie a und b – hintereinander ausführt, ergibt sich wieder ein Element der Gruppe, das man das Produkt von a und b nennt und als $a \cdot b$ oder ab bezeichnet.

In der modernen Gruppentheorie sieht man von den Eigenschaften der einzelnen Gruppenelemente – in diesem Fall der Transformationen – ab und kümmert sich nur noch um die Beziehungen unter ihnen. Von einer Drehung um 30 Grad um den Nullpunkt der Ebene – nennen wir sie a – bleibt nur die dürre Gleichung $a^{12} = 1$ übrig, das heißt: Dieses Gruppenelement, zwölfmal hintereinander angewendet, ist gleich der identischen Abbildung, so als ob man nichts getan hätte.

Die Abstraktion geht noch weiter. Es ist erlaubt, irgendwelche Symbole wie a, b, c, \dots herzunehmen und zu jedem von ihnen eine Umkehrung (das »Inverse«) namens a^{-1}, b^{-1}, \dots zu definieren, ohne sich über die Bedeutung dieser Symbole irgendwelche Gedanken zu machen. Dann darf man jede endliche Folge dieser Symbole zu einem Gruppenelement (einem »Wort«) erklären. Das Produkt zweier Wörter entsteht einfach durch Zusammenschreiben: $ab \cdot ac = abac$. Das Produkt aus einem Element und seinem Inversen ist gleich dem »leeren Wort«, das mit 1 bezeichnet wird und innerhalb eines Worts stets weggelassen werden darf: $ab^{-1} \cdot bc = ab^{-1}bc = a1c = ac$. Und schon hat man eine Gruppe definiert. Ihre Individualität gewinnt die Gruppe durch Relationen wie $a^{12} = 1$, die man ebenfalls im Wesentlichen nach Belieben setzen darf. Die »Urelemente« a, b, c, \dots , aus denen die ganze Gruppe entsteht, heißen »Erzeuger« der Gruppe.

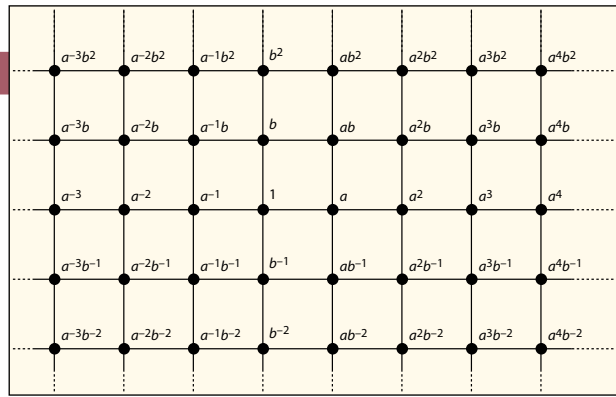
GEOMETRISIERUNG DER GRUPPENTHEORIE

Wie kann man einer abstrakten Gruppe, die durch nichts weiter gegeben ist als endlich viele erzeugende Elemente und möglicherweise noch Relationen zwischen ihnen, eine geometrische Struktur verleihen? Am schönsten wäre es, wenn man die Gruppenelemente an gewisse Plätze im Raum setzen könnte, derart dass einander ähnliche Elemente eng benachbart sind und allgemein die räumliche Anordnung die Gruppenstruktur wiedergibt. Das gelingt zum Beispiel mit der Gruppe über zwei Erzeugern a und b und der einzigen Relation $ab=ba$, der »freien abelschen Gruppe vom Rang 2« (Bild rechts).

Ohne diese Relation (die Kommutativität) sind ab und ba zwei verschiedene Elemente, entsprechend bab und b^2a und so weiter. Für diese Wörter muss zusätzlich Platz geschaffen werden, und das umso mehr, je länger sie sind. Also muss die Ebene mit zunehmender Entfernung vom Nullpunkt immer geräumiger werden.

Das leistet die so genannte hyperbolische Geometrie, in der die Winkelsumme im Dreieck stets kleiner ist als 180 Grad. Ihre klassische Veranschaulichung in zwei Dimensionen ist die poincarésche Kreisscheibe (Bild unten und Ausschnitt rechts daneben). In ihr sind die Geraden Kreisbögen, die auf dem Rand der großen Kreisscheibe senkrecht stehen.

Im Allgemeinen ist die Geometrie einer Gruppe jedoch viel abstrakter. Die absolute Minimalanforderung an eine Geometrie ist ein Abstandsbegriff. Zu je zwei Punkten muss man deren Entfernung voneinander angeben können. Für die Elemente einer abstrakten Gruppe definiert man den Abstand zweier Wörter, die sich nur um einen Buchstaben am Ende unterscheiden, als 1. Der Abstand zweier beliebiger Wörter ist gleich der Länge des kürzesten Wegs vom einen Wort zum anderen, wobei ein Schritt im Weglassen oder Einfügen eines Buchstabens am Wortende besteht. Das lässt sich im so genannten Cayley-Graphen veranschaulichen: Die Ecken dieses Graphen sind die Gruppenele-



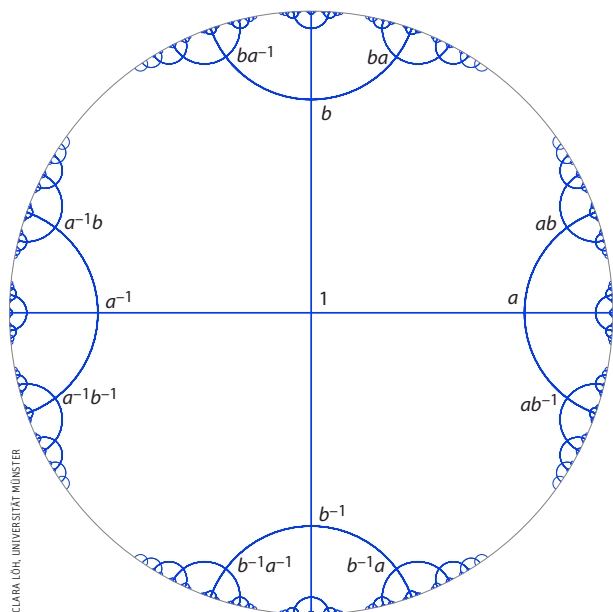
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH POPPE

mente, und die Kanten verbinden jeweils zwei Ecken, die sich nur um einen Erzeuger (Buchstaben) unterscheiden.

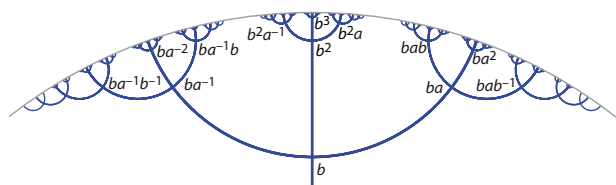
Damit die Gruppenelemente nicht gänzlich unverbunden nebeneinanderstehen, fügt man ihnen gewissermaßen die Kanten des Cayley-Graphen hinzu. Es gibt jetzt also zwischen je zwei benachbarten Gruppenelementen einen Weg der Länge 1, den man kontinuierlich ablaufen kann.

Mehr braucht man nicht für die Geometrisierung einer Gruppe. Denn nun gibt es Dreiecke: drei »Ecken«, die sowohl auf Gruppenelementen als auch auf den Wegen dazwischen liegen dürfen, sowie die »Seiten« des Dreiecks, das sind kürzeste Verbindungen zwischen je zwei Ecken. Es schadet nicht, dass es im Allgemeinen mehrere gleich lange kürzeste Verbindungen zwischen zwei Ecken gibt und dass häufig ein kürzester Weg von A nach B und einer von A nach C ein Stück Wegs gemeinsam haben.

Bei so viel Abstraktion ist es erstaunlich, dass die Dreiecke im Cayley-Graphen einer Gruppe häufig über eine scheinbar anschauliche Eigenschaft verfügen: Sie sind sämtlich schlank, oder genauer gesagt: Sie sind an keiner Stelle dicker als eine Konstante Δ , die nicht von dem jeweiligen Dreieck, sondern nur von dem Cayley-Graphen abhängt. Noch genauer ausgedrückt: Zu jedem Punkt auf einer Dreiecksseite gibt es einen Punkt auf einer der anderen Dreiecksseiten, der in einer Entfernung von höchstens Δ liegt. »Entfernung« ist dabei immer noch entlang einem kürzesten Weg im Cayley-Graphen zu verstehen.



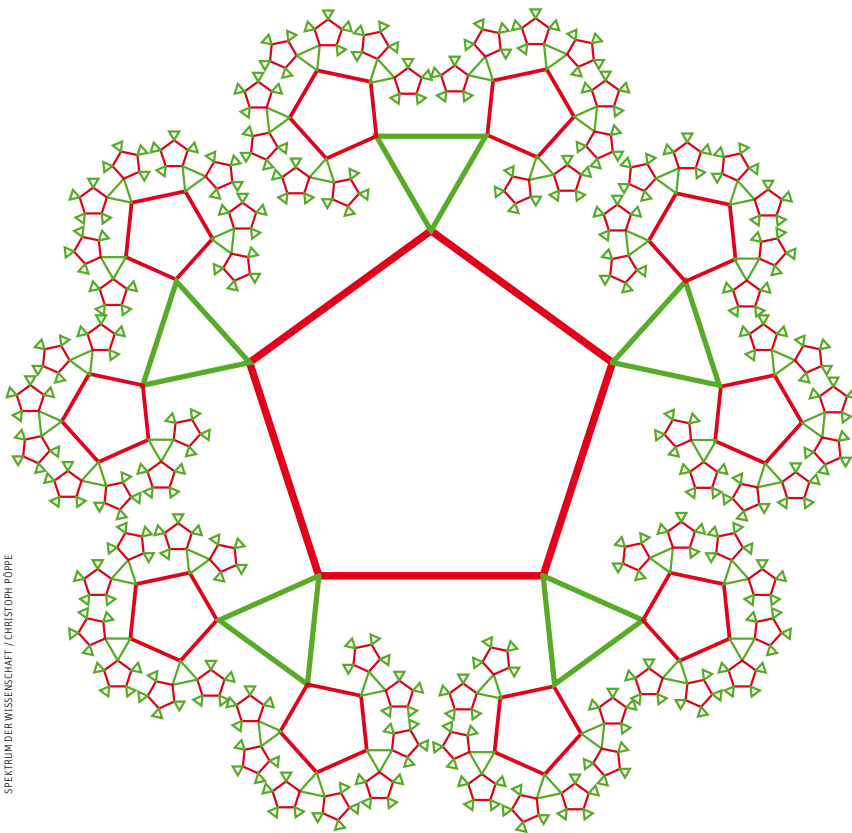
CLARA LÖH, UNIVERSITÄT MÜNSTER



In unserer euklidischen Welt ist zu einem vorgegebenen Δ zwar jedes hinreichend kleine Dreieck schlank; aber diese Eigenschaft geht unweigerlich verloren, wenn man es vergrößert. In der hyperbolischen Geometrie dagegen sind alle Dreiecke schlank. Denn wenn man dort ein Dreieck groß macht, werden seine Winkel unweigerlich spitzer und seine Seiten dadurch stärker nach innen gekrümmt, wodurch sie einander näher kommen. Dieser Effekt macht die Wirkung der Vergrößerung wieder wett.

Schlank Dreiecke sind die begriffliche Brücke zwischen Gruppen und der hyperbolischen Geometrie. Gromov nennt eine Gruppe hyperbolisch, wenn alle Dreiecke in ihrem Cayley-Graphen schlank sind. Diese weit hergeholtte Gemeinsamkeit genügt, um die Geometrie für die Gruppentheorie fruchtbar zu machen – und umgekehrt.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH POPPE



Der Cayley-Graph zu der (nicht kommutativen) Gruppe aus den Erzeugenden a und b mit den Relationen $a^5 = 1$ und $b^3 = 1$. Rote Linien verbinden Gruppenelemente, die sich um den Faktor a unterscheiden, entsprechend grüne Linien für den Faktor b . Das Muster muss man sich mit immer kleineren Fünfecken und Dreiecken bis ins Unendliche fortgesetzt vorstellen.

In der Einleitung einer 295 Seiten langen Arbeit zur geometrischen Gruppentheorie schreibt er, die Leser dieses Artikels sollten keine neuen mathematischen Sätze in der Arbeit erwarten, noch nicht einmal halb bewiesene Aussagen, aber sie würden einige interessante Fragestellungen kennen lernen. Und obwohl viele mathematische Aussagen hier nur in den Raum gestellt und nicht – wie an sich im Wissenschaftsbetrieb üblich – mit der Veröffentlichung auch bewiesen werden, ist gerade dieser Artikel von Gromov inzwischen von zentraler Bedeutung für das Gebiet.

Er selbst sagte einmal: »Die Leser meiner Arbeiten schauen sich immer nur die einzelnen Aussagen an, manchmal zwar auch technische Beweise, aber fast immer studieren sie die Inhalte nicht tief genug, um den grundlegenden Gedanken zu verstehen.«

Michail Leonidowitsch Gromow wird am 23. Dezember 1943 in Boksitogorsk,

einer kleinen Stadt in der Nähe des heutigen Sankt Petersburg, geboren. Als er in dieser Stadt seine mathematische Ausbildung beginnt, heißt sie noch Leningrad. Mit 22 Jahren erhält er dort seinen ersten Abschluss, vier Jahre später seinen Dokortitel. Wiederum vier Jahre später vollendet er in Leningrad seine zweite Promotion, die ungefähr einer Habilitation entspricht, und verbringt dort noch sieben Jahre als Assistenzprofessor.

Im Jahr 1974 reist er in die USA aus und läuft dort zu Höchstform auf. An der State University of New York (SUNY) in Stony Brook, an der er von 1974 bis 1981 eine Professur innehat, findet er mit seinem Kollegen Blaine Lawson bahnbrechende Ergebnisse zum Begriff der Skalarkrümmung. Außerdem entstehen viele Forschungsarbeiten über Räume mit negativer Schnittkrümmung, die den Räumen mit hyperbolischer Geometrie (Kasten S. 75) verwandt sind. Seit dieser Zeit schreibt er seinen Namen, den amerikanischen Bräuchen entsprechend, als Mikhail (oder Misha) Gromov.

Im Jahr 1981 beruft ihn das Institut des Hautes Études Scientifiques (IHES) nach Frankreich. Im gleichen Jahr erscheint in der institutseigenen Zeitschrift Gromovs wahrscheinlich wichtigstes Einzelergebnis, eine erstaunliche Charakterisierung der so genannten Gruppen mit polynomialem Wachstum.

Ein Jahr später erhält er am Institut eine permanente Professur. Daneben hat er seit 1996 noch eine zweite Professur am Courant Institute of Mathematics der New York University, das sich damit dreier Abelpreisträger rühmen kann: Peter D. Lax 2005, Srinivasa Varadhan 2007 und Gromov. Seit 1992 ist er französischer Staatsbürger.

In den 1980er Jahren treibt er die geometrische Gruppentheorie maßgeblich voran. Mit dem von ihm geschaffenen Begriff der hyperbolischen Gruppe revolutioniert er dieses Gebiet und eröffnet die Möglichkeit, viele Resultate und Methoden aus dem Bereich der hyperbolischen Geometrie für das Studium dieser Gruppen zu nutzen (Kasten S. 75). Andererseits erhält man über das Verständnis der hyperbolischen Gruppen wiederum Aussagen über die Geometrie. Die hier geleistete grundlegende Arbeit zählt sicher zu den wichtigsten Beiträgen Gromovs überhaupt.

In der symplektischen Geometrie, die auch in der theoretischen Physik eine Rolle spielt, erzielt er 1985 ein weiteres seiner gefeierten Einzelresultate, das »Non-Squeezing Theorem«. In den weiteren Jahren ist Gromov in der Forschung immer präsent und auch jetzt noch bemerkenswert aktiv.

Obwohl viele seiner wesentlichen Leistungen in irgendeiner Form mit den Begriffen Abstand und Krümmung zu tun haben, hat er letztlich in sehr verschiedenen Bereichen der theoretischen Mathematik damit fundamentale Ergebnisse erzielt. Dennis Sullivan von der SUNY drückt das so aus: »Es ist einfach unglaublich, was Mikhail Gromov alles mit der einfachen Dreiecksungleichung erreichen kann.«



Michael Joachim ist Dozent und zurzeit Prodekan am Fachbereich Mathematik und Informatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

Gromov, M.: Groups of Polynomial Growth and Expanding Maps. In: Publications mathématiques de l’IHES 53, S. 53–73, 1981.

Gromov, M.: Asymptotic Invariants of Infinite Groups. In: Geometric Group Theory Vol. 2. London Mathematical Society Lecture Note Series 182. Cambridge University Press 1993, S. 1–295.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/989104.

Bodenschutz durch **Verzicht auf Pflügen**

Seit 35 Jahren pflügt der amerikanische Farmer John Aeschliman sein Land nicht mehr. Er wollte der Erosion Einhalt gebieten – und gewann viele weitere Vorteile.

Ackerboden zu bestellen, ohne ihn umzupflügen, bringt viele Vorteile. Weltweit stellen sich immer mehr Landwirte auf diese Methode der so genannten Direktsaat um. Auch bei uns gewinnt sie langsam Zuspruch.

Von David R. Huggins und John P. Reganold

Auf seinem Land im Osten des US-Staates Washington wirft der Farmer John Aeschliman eine Schaufel voll Mutterboden um. Die schwarze Erde krümelt gut, ist stark poredurchsetzt, enthält reichlich organisches Material und viele Regenwürmer – eine gesunde Krume, in der Ackerpflanzen gut wurzeln können.

Vor 35 Jahren hätte Aeschliman hier kaum Regenwürmer gefunden. Damals pflegte er seine Äcker noch vor jeder Aussaat zu pflügen. Das sollte die Reste der letzten Frucht unterarbeiten und den Grund für den nächsten Anbau vorbereiten. So hatten es die Bauern in dieser fruchtbaren hügeligen Region jahrzehntelang gemacht. Aber die Maßnahme forderte ihren Tribut: Erosion in alarmierendem Ausmaß. John Aeschliman wollte nicht akzeptieren, dass es da keinen Ausweg gab. Im Jahr 1974 beschloss er, eine damals aufkommende neue Methode auszuprobieren – die pfluglose Bodenbearbeitung oder so genannte Direktsaat.

Weltweit setzen die meisten Bauern den Pflug ein, damit die neue Saat gute Bedingungen vorfindet. Nicht nur Reste der letzten Kultur, auch Mist und Unkräuter arbeiten sie ein.

KLleine Geschichte der Ackerbautechnik

Säen mit und ohne Pflügen reichen beide weit zurück. Die Erfindung und Weiterentwicklung des Pflugs ließ das Lockern und Umwerfen des Bodens zur gängigeren Methode werden. Moderne Geräte und Unkrautmittel machen heute die Direktsaat auch ökonomisch vertretbar.

<p>8000 v. Chr. Grabstock, früheste Art der pfluglosen Bodenbearbeitung</p>	
<p>Hakenpflug erster Pflug überhaupt; die bedeckende Pflanzenschicht wird geöffnet und eine Furche für die Samen gezogen</p>	
<p>6000 v. Chr. Zugtiere ersetzen die Menschenkraft</p>	
<p>3500 v. Chr. Pflugschar (Pflugmesser), ein scharfer Keil an einem langen Stiel</p>	
<p>1100 n. Chr.? Wendepflug (Streichbrett-, später -blechpflug) mit gebogener Schneide, die den Boden auch wendet und so Pflanzen(reste) vergräbt</p>	
<p>Mitte 19. Jahrhundert selbstreinigender Stahlpflug für Prärie-boden</p> 	
<p>Anfang 20. Jahrhundert Traktoren ziehen mehrere Pflüge auf einmal</p>	
<p>1940er bis 1950er Jahre Herbizide wie Atrazin und Paraquat erlauben Unkrautbekämpfung ohne oder mit weniger Umpflügen</p>	
<p>nach 1960 Direktsämaschinen öffnen nur kleine Furchen für die Samen, ohne den Boden sonst zu stören</p>	

In Kürze

- ▶ Konventionell mit dem Pflug bearbeitetes Ackerland ist **erosionsgefährdet** und **verliert an Qualität**.
- ▶ Manche Landwirte stellen inzwischen auf die nachhaltige Methode um, Felder nicht mehr zu pflügen: **die so genannte Direktsaat**.
- ▶ Dass sich der pfluglose Ackerbau nur langsam durchsetzt, liegt auch an der **heiklen Umstellungsphase**. Die Bauern müssen sich ein ganz neues Knowhow aneignen, und sie benötigen andere Maschinen.

So wird der Boden belüftet und erwärmt sich besser. Leider aber macht diese Behandlung die Krume verletzlich für den Abtrag durch Wind und Wasser. Tatsächlich ist das Pflügen eine Hauptursache dafür, dass Ackerböden vielerorts immer schlechter werden – eines der bedrohlichsten globalen Umweltprobleme überhaupt. Vor allem in armen und dicht besiedelten Regionen von Entwicklungsländern gefährdet die Degradation der Böden die Nahrungsmittelproduktion und Existenzgrundlage von ländlichen Bevölkerungen (siehe Kasten S. 84). In der erwähnten Gegend im Nordwesten der USA war durch Erosion in den späten 1970er Jahren auf einem Zehntel der Anbaufläche aller Mutterboden verloren gegangen, auf weiteren 60 Prozent war er zu einem bis drei Viertel verschwunden. Zudem kann Pflügen auch den Eintrag von Sedimenten, Düngern und Pestiziden in Gewässer fördern, mit bedeutsamen ökologischen Folgen (siehe auch SdW 8/2006, S. 80).

Bei der Direktsaat wird die Bodenstruktur kaum gestört. Nach der Ernte verbleiben die Pflanzenreste auf dem Acker – als schützende Mulchschicht, die zudem die Produktivität des Bodens fördert. Besondere Sämaschinen bringen die Samen unter die verrottenden Pflanzenreste in den Boden.

Mit dem Bevölkerungswachstum und steigenden Nahrungsbedarf expandierte und intensivierte sich der Ackerbau in die Richtung, wie wir ihn heute kennen. Das belastete Umwelt und Gesundheit sowie die Artenvielfalt. Soweit wir die Kapazität dieser unserer Erde heute einschätzen können, müssen wir uns gestehen: Es reicht nicht, genug Nahrung zu produzieren – sondern dies sollte auch nachhaltig geschehen, also unter Bewahrung der natürlichen Ressourcen. Die Anforderungen sind groß: Schließlich sollen die Bauern trotz alledem genügend Produkte hoher Qualität erzeugen (siehe auch »Nachhaltige Landwirtschaft«, SdW 8/1990, S. 122). Der pfluglose Anbau kann dazu beitragen, sich dieser Vision zu nähern. Wie bei allen Neuerungen gibt es auch bei der Umstellung auf die Direktsaat Schwierigkeiten und Rückschläge. Dennoch verzichten inzwischen in der ganzen Welt immer mehr Landwirte auf den Pflug.

Ackerbau betreiben Menschen seit rund 10 000 Jahren. Anfangs richteten einige Jäger und Sammler bei ihren Behausungen kleine Felder ein. Teils bohrten sie mit einem Stock Löcher, in die sie Samen legten und die sie mit Erde bedeckten – praktisch die früheste Form von Direktsaat. Teils wandten sie schon eine Vorform des Pflügens an: Sie kratzten mit einem Stock eine Rille in den Boden, in die die Samen kamen. In Entwicklungsländern benutzen viele Bauern beide Verfahren noch heute.

Nach der Erfindung eines einfachen Pflugs Jahrtausende später setzte es sich vielerorts allmählich durch, Boden, der Saatgut aufnehmen sollte, vorher mechanisch zu bearbeiten und so gleichzeitig des Unkrauts besser Herr zu werden. Verhältnismäßig wenige Menschen konnten nun mit ihrer Arbeit viele andere ernähren. Den Anfang machte der hölzerne Hakenpflug aus einem nach unten gerichteten, in einer Rahmenkonstruktion befestigten Stock, den man durch die obere Bodenschicht zog. Dieser Pflug lockerte den Boden, wendete ihn aber nicht. Wahrscheinlich arbeiteten die Menschen zu zweit: Der vordere zog das Gerät, der hintere führte es. Später setzte man dafür Zugtiere ein. Die Mesopotamier hielten vielleicht schon vor 8000 Jahren Ochsen.

Den nächsten wichtigen Schritt markiert die Erfindung der Pflugschar – des Pflugmessers – um 3500 v. Chr. in Ägypten und Sumer.

Das keilförmige hölzerne Blatt trug eine Schneide aus Eisen, die das Erdreich zerschnitt und lockerte. Einen weiteren Fortschritt, der in manchen Kulturen recht früh aufkam, sich in Mitteleuropa aber erst im Mittelalter durchsetzte, bedeutete ein Pflug mit einem hinter das Messer gesetzten gebogenen so genannten Streichbrett (später Streichblech), das den Boden nach dem Aufbrechen noch wendete.

Als der Ackerboden des Korngürtels davonwehte

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts ermöglichten weitere Innovationen die rasche Ausweitung des Ackerbaus auf viele bislang unkultivierte, teils vorher sogar unkultivierbare Flächen. In Osteuropa, Südafrika, Kanada, Australien, Neuseeland und den Vereinigten Staaten kamen nun weite Steppen- und Prärieregionen unter den Pflug, insbesondere für Mais oder Weizen. Im amerikanischen Mittleren Westen hatte sich bis dahin der klebrige Boden der Langgrasprärie der Bearbeitung widersetzt. Doch im Jahr 1837 erfand John Deere, ein Schmied aus Illinois, einen stählernen, selbstreinigenden Streichblechpflug, für den so schwierige Bodenverhältnisse kein Hindernis mehr darstellten. Heute zählt der nordamerikanische Korngürtel zu den produktivsten Agrargebieten der Welt.

Im frühen 20. Jahrhundert setzte sich die Mechanisierung des Ackerbaus weiter fort. Immer neue Entwicklungen – etwa von Traktoren, die mehrere Pflugscharen gleichzeitig zogen – erlaubten eine zunehmend intensivere Bewirtschaftung des Bodens. Doch nun geriet langsam auch die Praxis des Pflügens in die Kritik. Welch extremer Schaden dadurch entstehen kann, mussten die US-Farmer der Südstaaten des Mittleren Westens mit ansehen, als ihre Ackerkrume in den extrem trockenen Jahren von 1931 bis 1939 buchstäblich davongebblasen wurde. Die anhaltende Dürre mit ihren Missernten bedeutete für viele den Ruin (Bild im Kasten S. 84).

Damals entstand in Amerika die Bewegung zur Erhaltung des Bodens. Agrarwirte begannen mit sanfteren Pflügemethoden zu experimentieren, bei denen die Ernterückstände zum Schutz auf dem Feld verbleiben. Antrieb erhielt die Sache auch durch das 1943 erschienene berühmt gewordene Buch »Plowman's Folly« (Torheit des Bauern) des Agrarwissenschaftlers Edward Faulkner, der die radikale Ansicht vertrat, Pflügen sei verzichtbar. Diese heftig umstrittene Auffassung gewann nach dem Zweiten Weltkrieg Anhänger auch dank nun entwickelter Herbizide. Dazu gehörte das heute in Deutschland verbotene Atrazin (das die Fotosynthese hemmt) oder Paraquat, das

Unkräuter vertrocknen lässt. Seit den 1960er Jahren begannen auch Wissenschaftler, Studien über pfluglosen Ackerbau durchzuführen. (Auch Forscher in Deutschland lieferten maßgebliche Beiträge auf diesem Gebiet.)

Natürlich bedeutete es eine enorme Herausforderung, plötzlich ohne Pflug auszukommen, nachdem sich der Ackerbau ganz auf ihn eingestellt hatte. Fast alles in der Agrarproduktion musste nun neu erfunden werden. So entwickelten Ingenieure ab den 1960er Jahren für die Direktsaat spezielle Saatmaschinen. Zu den erforderlichen entscheidenden Neuerungen gehören nicht zuletzt auch die modernen Herbizide.

Ein herkömmlicher Streichblechpflug wirft eine bis zu 30 Zentimeter dicke Schicht des Bodens vollständig um und begräbt hierdurch die meisten Ernterückstände. Dagegen lockern so genannte Grubber die Erde nur auf, je nach Gerät unterschiedlich tief, so dass mehr Pflanzenreste oben liegen bleiben. Die Direktsaat manipuliert den Boden noch weniger. Pro Pflanzreihe wird lediglich eine wenige Zentimeter breite Rille gezogen, wo die Samen hineinfallen. Das US-Landwirtschaftsministerium stuft die pfluglose Bodenbearbeitung als eine von mehreren konservierenden Methoden ein. Zu denen zählt die Behörde alle Vorgehensweisen, bei denen nach der Aussaat Rückstände der Vorfrucht wenigstens 30 Prozent der Oberfläche bedecken. Solche Maßnahmen haben tatsächlich eine beträchtliche Schutzwirkung. Nach den Datenverzeichnissen ging die Erosion durch Wasser und Wind auf den Feldern der USA zwischen 1982 und 2003 um 43 Prozent zurück, und zwar größtenteils dank konservierender Bodenbearbeitung. (Auch zunehmend mehr Landwirte in Deutschland wenden verschiedene die Bodenstruktur konservierende Methoden an. Die Direktsaat hat sich hier allerdings, mit

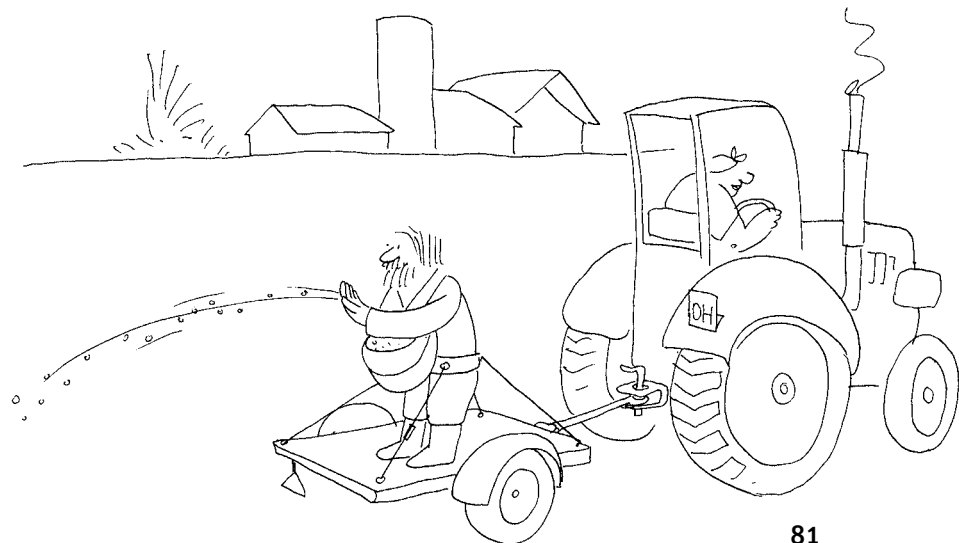


GETTY IMAGES / NATIONAL GEOGRAPHIC/DEAN CONGER

HÜRDEN BEI DER UMSTELLUNG

An sich eignet sich die Direktsaat für fast alle Böden. Die Spezialgeräte und Unkrautmittel kann mancher Kleinbauer aber zunächst nicht bezahlen. Viele arme Bauern benötigen Pflanzenrückstände oder auch anfallende Viehdung als Brennstoff. Ökonomisch haben sie nicht den langen Atem für die Umstellung.

Rund 85 Prozent der über eine halbe Milliarde Farmen der Welt sind kleiner als zwei Hektar. Die meisten davon (87 Prozent) liegen in Asien, 8 Prozent in Afrika. In diesen Gegenden wird die Direktsaat fast nicht angewendet – obwohl die Methode gerade dort von großem Wert wäre.



ARBEIT SPAREN BEI DIREKTSAAT

Ein Beispiel vom Korngürtel der USA: Mais und Sojabohnen im jährlichen Wechsel – die Direktsaat erfordert die wenigsten Arbeitsgänge.

- | | | |
|---|---|--|
| <p>DIREKTSAAT</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Herbizidanwendung 2. Aussaat 3. Herbizidanwendung 4. Ernte | <p>KONSERVIERENDE BODENBEARBEITUNG</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Untergrundlockerung, Einarbeiten von bis zur Hälfte der Pflanzenrückstände 2. Bodenbearbeitung mit Grubber 3. Aussaat 4. Herbizidanwendung 5. Hacken 6. Ernte | <p>KONVENTIONELLE BODENBEARBEITUNG</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Bodenbearbeitung mit Pflug, Einarbeiten von bis zu 90 Prozent der Pflanzenrückstände 2. Scheibenegge, Einebnen der Oberfläche 3. Bodenbearbeitung mit Grubber zur Saatbettbereitung 4. Scheibenegge zur Saatbettbereitung 5. Aussaat 6. Herbizidanwendung 7. Hacken 8. Ernte |
|---|---|--|

Reste von Soja oder Mais verbleiben auf dem Acker; hochgradige Bedeckung verringert Wasserverdunstung; Boden-erosion geht um 70 bis 100 Prozent zurück.

Nach der Ernte bieten verbleibende Pflanzenstängel und verstreute Körner Tieren Schutz und Nahrung (Fasan übergroß gezeichnet).

Sojapflanzenreste bedecken den Boden zu 30 Prozent; halb so starke Erosion.

nackter Boden; vor Wind- und Wasser-erosion ungeschützt

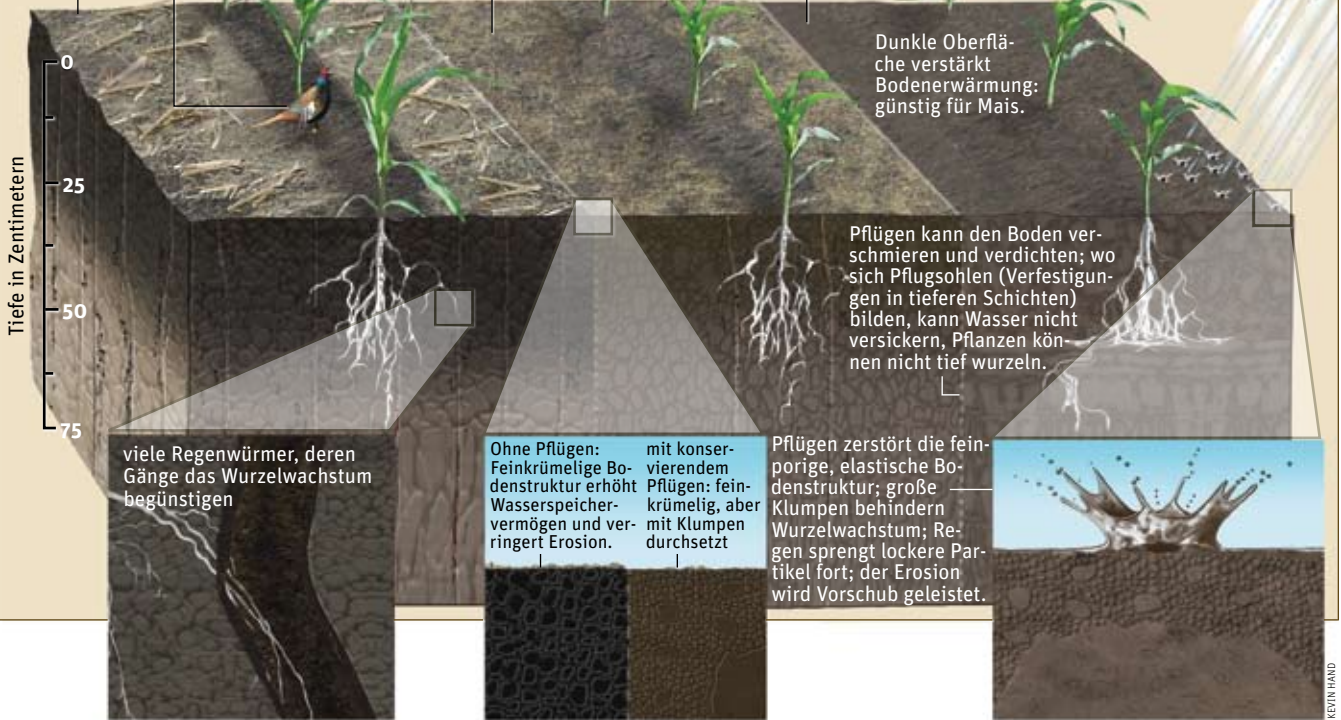
Dunkle Oberfläche verstärkt Bodenerwärmung; günstig für Mais.

Pflügen kann den Boden verschmieren und verdichten; wo sich Pflugsohlen (Verfestigungen in tieferen Schichten) bilden, kann Wasser nicht versickern, Pflanzen können nicht tief wurzeln.

viele Regenwürmer, deren Gänge das Wurzelwachstum begünstigen

Ohne Pflügen: Feinkrümelige Bodenstruktur erhöht Wasserspeichervermögen und verringert Erosion. mit konservierendem Pflügen: feinkrümelig, aber mit Klumpen durchsetzt

Pflügen zerstört die feinporige, elastische Bodenstruktur; große Klumpen behindern Wurzelwachstum; Regen sprengt lockere Partikel fort; der Erosion wird Vorschub geleistet.



schätzungsweise rund einem Prozent der Ackerflächen, bisher noch viel weniger durchgesetzt als etwa in den USA und in manchen Ländern Südamerikas, wo sie schon einen hohen Anteil ausmacht.)

Mit einer Mulchschicht schützt sie nicht nur vor Erosion. Ein so behandelter Boden kann auch mehr und länger Wasser speichern und es in tieferen Schichten halten. Dadurch gelangen weniger Sedimente, Dünger und Pestizide in die Gewässer – auch ins Grundwasser (SdW 8/2006, S. 80). Außerdem geht weniger Feuchtigkeit durch Verdunstung verloren. In Gegenden, wo Wasser den Anbau limitiert, kann die Umstellung die Ernten steigern, ja sogar noch andere Kulturen ermöglichen als bisher.

Zudem wird der Boden wieder gesünder. In ihm gedeihen bald unzählige kleine bis kleinste Lebewesen – auch Regenwürmer. Die Kulturpflanzen profitieren davon. Denn eine Ackerkrume mit reichem Bodenleben liefert ihnen mehr organische Stoffe, hat eine stabilere Struktur und lässt sie wegen der vorhandenen Poren tiefer wurzeln. Auch das steigert die Bandbreite der Kulturen und macht sie widerstandsfähiger gegen ungünstige Wachstumsbedingungen. Selbst die notwendigen landwirtschaftlichen Arbeiten setzen einem gesunden Boden weniger zu. Gerade in hügeligem Gelände, selbst noch in recht schwierigen steilen Lagen mit erhöhter Erosionsgefahr, ermöglicht die Methode eine nachhaltige Bewirtschaftung.

Natürlich nützt der Verzicht auf den Pflug auch manchen größeren Tieren. Viele Arten finden auf Stoppelfeldern Deckung und Nahrung. Eine Studie in Iowa vom Jahr 1986 zählte auf solchen Äckern zwölf darauf nistende Vogelarten – auf herkömmlich bewirtschafteten Flächen fanden die Forscher nur drei.

Des Weiteren hilft die Methode, das Treibhausgas Kohlendioxid in der Atmosphäre zu reduzieren, denn das Mulchen hält wesentlich mehr Kohlenstoff im Boden zurück als das Pflügen. Feldkulturen entnehmen der Luft eine Menge Kohlendioxid, wenn sie Fotosynthese betreiben und wachsen. Ihre verrottenen Reste einschließlich der Wurzeln bestehen zu 58 Prozent aus Kohlenstoff. Vom gesamten Potenzial der Anbauflächen der USA, dieses Treibhausgas aufzunehmen, dürfte ungefähr die Hälfte den konservierend bewirtschafteten Flächen zuzuschreiben sein, also auch dem pfluglosen Anbau.

Nicht zuletzt sparen Bauern durch die Direktsaat Zeit und Geld. Gepflügte Felder müssen mindestens siebenmal befahren werden, mit Direktsaat bearbeitete höchstens noch viermal. Die Methode benötigt 50 bis 80 Prozent weniger Treibstoff und erfordert 30 bis 50 Prozent weniger Arbeit, verringert somit die Produktionskosten deutlich. Natürlich sind die Spezialmaschinen teuer. Da aber andere, bisher übliche Geräte nun nicht mehr benötigt werden, kann auch dieser Kostenpunkt unter Umständen bis auf die Hälfte sinken.

Eine konservierende Bodenbearbeitung eignet sich für viele Klimabedingungen und Böden. Bei den meisten Anbaupflanzen funktioniert auch die kontinuierliche Direktsaat ohne jedes Pflügen. Ausnahmen sind Nassreis und Wurzel- oder Knollengemüse, etwa die Kartoffel. Trotzdem wandten Landwirte eine Direktsaat im Jahr 2004 weltweit gesehen auf nicht einmal sieben Prozent der Ackerflächen an.

In jenem Jahr fiel der größte Anteil des ohne Pflügen bewirtschafteten Landes auf die USA, gefolgt von Brasilien, Argentinien, Kanada und Australien. Davon lagen 85 Prozent in Nord- und Südamerika. 1990 wurden in den USA 26 Prozent der Agrarflächen mit konservierenden Methoden bearbeitet; 2004 waren es schon 41 Prozent, wobei der meiste Zuwachs auf Direktsaat beruhte, deren Flächen in dem Zeitraum mehr als verdreifacht worden waren und nun 22 Prozent des Farmlands der Vereinigten Staaten umfassten. Zweifellos trugen zu dem Anstieg auch Anreize unter anderem durch staatliche Programme bei, die konservierende Bodenbearbeitung subventionieren. In Südamerika wiederum geschah die Umstellung recht schnell dank der gemeinsamen Anstrengungen von Agrarwissenschaftlern und

bäuerlichen Gemeinden. Bei Schulungen und mit wissenschaftlicher Unterstützung erarbeiteten die Mitwirkenden Anbauverfahren, die zu den örtlichen Gegebenheiten passen.

Dagegen werden den Boden konservierende Methoden in Europa (zu etwa einem Prozent), Afrika sowie weiten Teilen Asiens noch wenig praktiziert. Gerade in den Entwicklungsländern Afrikas und Asiens erweist sich die Umstellung als schwierig. Die dortigen Bauern benötigen die Ernterückstände meist für andere Zwecke, etwa als Brennmaterial oder Viehfutter. Außerdem sind die besonderen Saatmaschinen oft nicht erhältlich oder für die Bauern unerschwinglich. Gleiches gilt für die benötigten Unkrautvernichtungsmittel. In Europa wiederum fehlen unter anderem Anreize von Seiten der Politik, und die Verwendung von Pestiziden unterliegt hier recht strikten Beschränkungen.

Radikale Abkehr vom Gewohnten

Zum pfluglosen Anbau zu wechseln ist nicht so einfach. Abgesehen von den zu erwartenden Übergangsschwierigkeiten schrecken viele Landwirte davor zurück, weil sie Verdiensteinbußen und Missernten fürchten. Naturgemäß begreifen Landwirte ihren Beruf als risikobehaftet. Doch nun müssten sie ein neues Verfahren einführen, das noch mehr Unsicherheit mit sich bringt. Auf Direktsaat umzustellen heißt radikale Abkehr vom Gewohnten und bedeutet einen harten Lernprozess. Nicht nur muss sich der Bauer mit den neuen Verfahren erst vertraut machen, sondern er sieht sich oft auch mit anderen Unkräutern, Schädlingen und Pflanzenkrankheiten konfrontiert als bisher. Zum Beispiel kann der feuchtere Boden Pilzbefall fördern. Auch ein paar neue Pflanzenkrankheiten sind mitunter schon aufgetaucht.

Manches davon zeigt sich vielleicht erst nach Jahren oder sogar Jahrzehnten. Der Bauer muss die Entwicklung darum stets aufmerksam beobachten und auf neue Situationen flexibel reagieren – die bedingt sein können etwa durch die sich verändernden Bodenverhältnisse, die verbleibenden Pflanzenreste oder das Düngeschema. In der Umstellungsphase besteht wirklich Gefahr für Missernten oder schlechtere Erträge. Aus diesem Grund haben im Staat Washington einige Farmer die Direktsaat frustriert wieder aufgegeben, nachdem sie es damit in den 1980er Jahren versucht hatten. Unser Rat: Wer auf pfluglose Bearbeitung umstellen möchte, sollte anfangs nur höchstens 10 oder 15 Prozent seines Landes umwidmen.

Es hat sich bewährt, vor allem in der ersten Zeit erfahrene Betriebe zu besichtigen, immer wieder Beratung zu suchen und sich mit ande-

FÜR UND WIDER

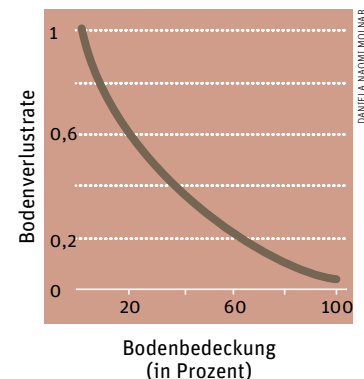
VORTEILE

- weniger Erosion
- bessere Bodenfeuchtigkeit
- gesünderer Boden
- weniger Arbeits- und Benzinkosten
- weniger Sediment- und Düngereintrag in Gewässer
- günstigere CO₂-Bilanz

NACHTEILE

- Umstellung auf Direktsaat anfangs schwierig
- Ausrüstung zunächst teuer
- mehr Herbizide
- auftretende Unkräuter, Krankheiten, Schädlinge nicht unbedingt vorher-sagbar
- anfangs oft mehr Stickstoffdünger nötig
- Pflanzen können langsamer keimen; dadurch vielleicht geringerer Ertrag

ZUM BODENERHALT



Schon bei einer Bedeckung von 30 Prozent sinkt die Erosion auf die Hälfte. Ist der Boden immer mindestens zu 50 (und oft wesentlich mehr) Prozent bedeckt, wie bei der Direktsaat, gibt es schließlich kaum noch Erosionsverluste.

ren auszutauschen, vielleicht in Verbänden oder kleinen Gruppen. Leider bestehen nicht überall genügend Möglichkeiten dazu, etwa weil noch kaum jemand im Umkreis die neue Technik anwendet. Dann sind die erhältlichen Informationen unter Umständen lückenhaft oder widersprüchlich, was sich bei mangelnder eigener Erfahrung oder ungenügender Ausrüstung mitunter fatal auswirken kann. Falls eine Gemeinde die Direktsaat für besonders riskant hält, kann es zudem vorkommen, dass Geldinstitute Kredite dafür verweigern. Zudem erleben Pächter manchmal, dass der Landeigner die Umstellung nicht gutheißt, da er um die

Pachtzahlungen fürchtet. Es dürfte noch einige Zeit brauchen, bis der Informationsaustausch zwischen Landwirten, Forschungseinrichtungen, Agrarwirtschaft und Politik so gut funktioniert, dass solche Hürden abgebaut sind.

Selbst ein erfahrener Bauer hat beim pfluglosen Anbau unter Umständen aber auch einige Nachteile. Gerade feinkörnige Böden, die schlecht entwässern, schaffen oft Probleme. In nördlichen Breiten liegen die Erträge mancher Getreide dann um fünf bis zehn Prozent niedriger als bei konventionellem Anbau. Auch erwärmt sich ein mulchbedeckter Boden im Frühjahr langsamer; die Saat keimt

DER FLUCH DES PFLÜGENS

Neuer Boden entsteht zu langsam. Von David R. Montgomery

Wird Land konventionell umgepflügt, droht der Ackerboden langfristig durch Erosion verloren zu gehen, weil seine obere Schicht schutzlos Wind und Wasser ausgesetzt wird. Das gilt besonders für abschüssiges Gelände, wo zudem jedes Pflügen einen Teil der Krume hangabwärts schiebt. Wie schnell die Erdschicht schwindet, hängt auch davon ab, in welchem Maß aus dem Grundgestein neuer Boden sozusagen nachwächst.

Als der Soil Conservation Service (heute Natural Resources Conservation Service) des US-Landwirtschaftsministeriums in den 1950er Jahren anfang, noch zulässige Erosionsmengen für Ackerland festzusetzen, lagen über Bodenbildungsraten kaum Daten vor. Das Amt bestimmte deswegen Toleranzwerte (T-Werte) anhand dessen, was Farmer eines konventionellen Betriebs erreichen konnten, wenn sie sich um möglichst wenig Erosion bemühten, und zwar ohne »unzumutbare wirtschaftliche Einbußen«. Als tolerierbar wurde ein Abtrag von bis zu zweieinhalb Zentimetern (ein Inch) in 25 Jahren festgelegt. Das ist allerdings wesentlich mehr, als nach heutigen Forschungsergebnissen an neuem Boden von unten her wieder entsteht.

Nach Erkenntnissen aus den letzten Jahrzehnten lässt sich die Bodenbildungsrate direkt an der Konzentration bestimmter Isotope ablesen. Damit fanden der Geologe Arjun Heimsath von der Arizona State University in Tempe und seine Kollegen in klimatisch gemäßigten Küstenregionen Kaliforniens und Südostaustraliens Werte zwischen 0,00118 und 0,00315 Inches im Jahr. Ein Inch Boden aus dem Grundgestein entsteht dann erst in 300 bis 850 Jahren. Weltweit gesehen ist die Neubildung nach einer von mir durchgeführten, 2007 veröffentlichten Zusammenstellung sogar nur halb so hoch.

Im groben Durchschnitt beträgt die Bodendicke von unberührtem hügeligem Gelände in gemäßigten und tropischen Breiten ein bis drei Fuß (30 bis 90 Zentimeter). Da lässt sich leicht ausrechnen, dass beim Ackerbau mit dem Pflug in einigen hundert bis höchstens etwas über 1000 Jahren das Grundgestein erreicht ist. Diese Zeitspanne spiegelt die Bestandsdauer größerer Agrarkulturen bemerkenswert gut. Mit

Ausnahme der Zivilisationen in fruchtbaren Flusstälern, wo der Ackerbau begann, blühten solche Kulturen meist zwischen 800 und 2000 Jahre. Tatsächlich fanden Geoarchäologen einen Zusammenhang des Niedergangs mit Bodenerosion.

Das heißt im Klartext: Wollen wir künftigen Generationen Ressourcen bewahren, dann benötigen wir auch alternative Landbaumethoden. Bei Verzicht auf den Pflug geht deutlich weniger Boden verloren, schon weil der Grund selbst ihn nun viel besser hält. Schon vor 15 Jahren maßen Forscher der University of Kentucky in Lexington dabei 98 Prozent weniger Erosion. Auch eine neuere Studie an der University of Tennessee in Knoxville ergab, dass die Direktsaat den Bodenverlust um über 90 Prozent mindert. Sicher hängt das Ausmaß von den örtlichen Gegebenheiten ab, etwa dem Bodentyp und der Kulturpflanze. Doch

immerhin kann die Erosion so gering werden, dass die Bodenbildungsrate dies ausgleicht.

Mitte der 1990er Jahre schätzten Wissenschaftler der Cornell University in Ithica (New York), dass die USA jährlich 44 Milliarden Dollar aufbringen müssten, um durch Bodenerosion verursachte Schäden zu beheben. Sechs Milliarden im Jahr würde es kosten, um die Erosionsmenge von Anbauflächen so weit einzudämmen, dass die Bodenbildungsrate den

Verlust kompensiert. Mit jedem in die Bodenerhaltung investierten Dollar spart die Gesellschaft nach dieser Analyse über fünf Dollar. Einmal abgetragene Erde aufs Land zurückzubringen, ist praktisch unerschwinglich. Besser, man lässt sie gleich auf dem Acker. Das ist am billigsten.

David R. Montgomery ist Professor für Geomorphologie an der University of Washington in Seattle.

Literaturhinweis:

Montgomery, D. R.: Dirt: The Erosion of Civilizations. University of California Press, Berkeley 2007.



In der Dust-Blow-Ära, als es im Süden der USA über Jahre fast nicht regnete, zeigten sich die Nachteile des Pflügens: Bodenabtrag durch Wind.

GETTY IMAGES / AMERICAN STOCK

dadurch später, und Pflanzen, die einen langen Sommer brauchen, wie Mais, gedeihen nun im Norden nicht so gut. Für manche Anbaupflanzen sind in den ersten vier bis sechs Jahren bis zu 20 Prozent mehr Stickstoffdünger nötig als vorher, weil die erst reichende Mulchschicht Nährstoffe zunächst bindet.

Außerdem müssen zur Unkrautkontrolle mehr Herbizide ausgebracht werden. Inzwischen treten auf nicht gepflügtem Land zunehmend gegen die Spritzmittel resistente Unkräuter auf. Eine Direktsaat über Jahre mit Erfolg durchführen zu können hängt somit sehr von neuen, noch besseren Herbizidformulierungen und anderen Verfahren der Unkrauteindämmung ab. Denn abgesehen von den höheren Kosten: Die vermehrt ausgebrachten Chemikalien schaden möglicherweise schützenswerten Tieren oder Pflanzen, und sie können zudem Wasser, Luft und Boden verschmutzen.

Fruchtwechsel gegen Schädlinge

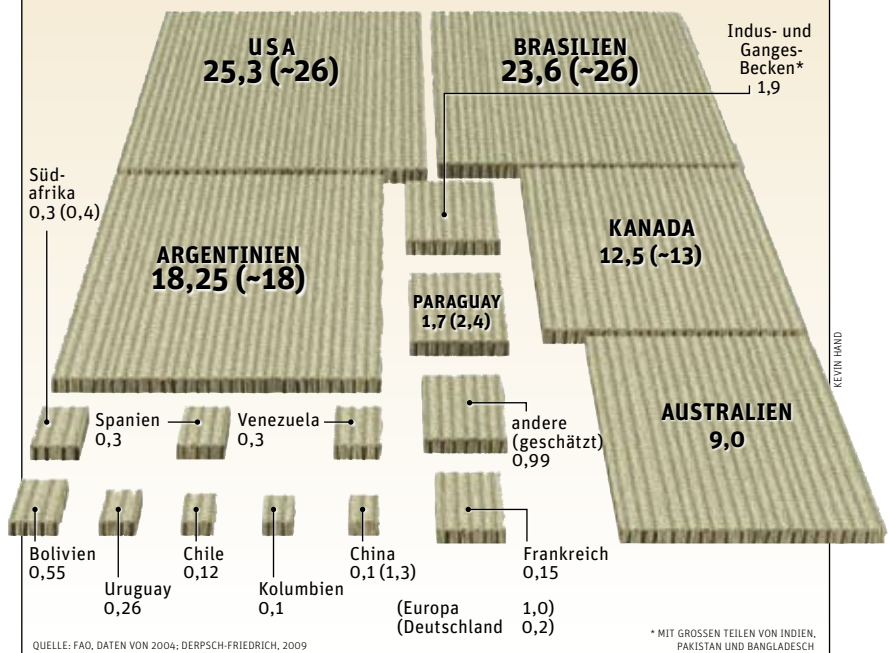
Andererseits bietet die pfluglose Bodenbearbeitung durchaus eine Menge Vorteile, die in der heutigen Welt anstrengenswert erscheinen angesichts der Herausforderungen von Bevölkerungswachstum, Energiekostensteigerung, Umweltzerstörung, Klimawandel und manchem mehr. Trotzdem ist die Methode kein Allheilmittel – das gibt es beim Ackerbau nicht. Die Direktsaat fügt sich allerdings in ein größeres Wunschbild, das sich nun allmählich entwickelt: die Vision von einer nachhaltigen Landwirtschaft, in der diese Methode ebenso Platz hat wie etwa der ökologische Anbau. Verschiedene solche Ansätze sollten sich in gesunder Weise mischen und ergänzen. Unserer Meinung nach müsste jeder Landwirt konservierende Verfahren mit integrieren und sofern möglich auch die Direktsaat auf einem Teil seiner Felder dazunehmen.

Wie schon erwähnt, erfordert der Verzicht auf das Umpflügen zukünftig ein breiteres Spektrum der Schädlings- und Unkrautbekämpfung. Dazu gehören, um die Resistenzgefahr einzudämmen, neben chemischen auch biologische und mechanische Maßnahmen. Erfahrungen aus dem biologischen Anbau können hier wertvoll sein. Heute schon erweist sich beim pfluglosen Prinzip Fruchtwechsel als günstig, weil das hilft, Entwicklungszyklen von Unkräutern, Schädlingen und Pflanzenkrankheiten zu unterbrechen.

Die Direktsaat erlaubt die Kultur einer Reihe ökonomisch rentabler Pflanzen. Diese Vielfalt auszunutzen, könnte die Akzeptanz des Verfahrens unter den Landwirten verbessern und es verbreiten helfen. Dagegen stehen augenblicklich aber Anreize wie im Fall von Nordamerikas Korngürtel des Mittleren Wes-

DIREKTSAAAT WELTWEIT

2004 wurden knapp 7 Prozent (95,5 Millionen Hektar; 2008: 106) der Ackerflächen in Direktsaat bewirtschaftet. Davon liegen rund 85 Prozent in Nord- und Südamerika. (Anggegeben sind Millionen Hektar; in Klammern neuere Zahlen)



tens, für Biotreibstoff auf Riesensflächen Jahr für Jahr die immer gleiche Kultur anzupflanzen, etwa Mais. Dort dürfte sich ein pflugloser Ackerbau momentan schwer durchsetzen lassen. Noch ist in Expertenkreisen nicht ausdiskutiert, ob man Farmland zur Erzeugung von Biosprit nutzen soll. Falls wir uns entscheiden, diesen Weg weiter zu verfolgen, müssen wir auch darüber nachdenken, wie dies nachhaltig geschehen kann. Dann wäre die Direktsaat mit Fruchtwechsel in Erwägung zu ziehen. Es bietet sich an, Biospritzpflanzenarten für minderwertiges Land zu entwickeln. Hierfür kämen auch mehrjährige Pflanzen wie die in Amerika schon für verschiedene Zwecke genutzte Rutenhirse in Frage (das Switchgras der amerikanischen Prärien, ein in Deutschland beliebtes Ziergras). Nicht zuletzt sollten auch die ausdauernden, also mehrjährigen Ackergetreide, die Züchter derzeit zu entwickeln versuchen, dazu beitragen, den Ackerbau ohne Pflug zu ergänzen und zu fördern (siehe SdW 12/2007, S. 88).

Der amerikanische Farmer John Aeschliman bewirtschaftet heute seine sämtlichen Felder ohne Pflug. Vor über 30 Jahren begann er damit vorsichtig in kleinen Schritten und konnte so Rückschläge gering halten. Er gehört zu der wachsenden Zahl von Groß- und Kleinbauern, die den Lohn des pfluglosen Ackerbaus ernten und mithelfen, die Landwirtschaft nachhaltig zu gestalten



David R. Huggins (links) und **John P. Reganold** sind Agrarwissenschaftler. Huggins arbeitet beim US-Landwirtschaftsministerium beim Dienst für Agrarforschung, Landmanagement und Wasserschutz in Pullman (US-Bundesstaat Washington). Reganold hat an der Washington State University in Pullman die Regents-Professur für Bodenwissenschaft inne.

Baker, C. J. et al.: No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture. CABI Publishing, 2. Aufl. 2007.

Küster, H.: Macht euch die Natur untertan? In: Spektrum der Wissenschaft, Spezial 2/2007: Raumschiff Erde, S. 52–59.

Van der Ploeg, R. R. et al.: Schwerlast auf dem Acker. In: Spektrum der Wissenschaft 8/2006, S. 80–88.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987518.

AUFZÜGE

101. Stock, bitte!

Neue Antriebe und Computer sparen Strom und verbessern die Logistik in Bürotürmen.

Von Mark Fischetti

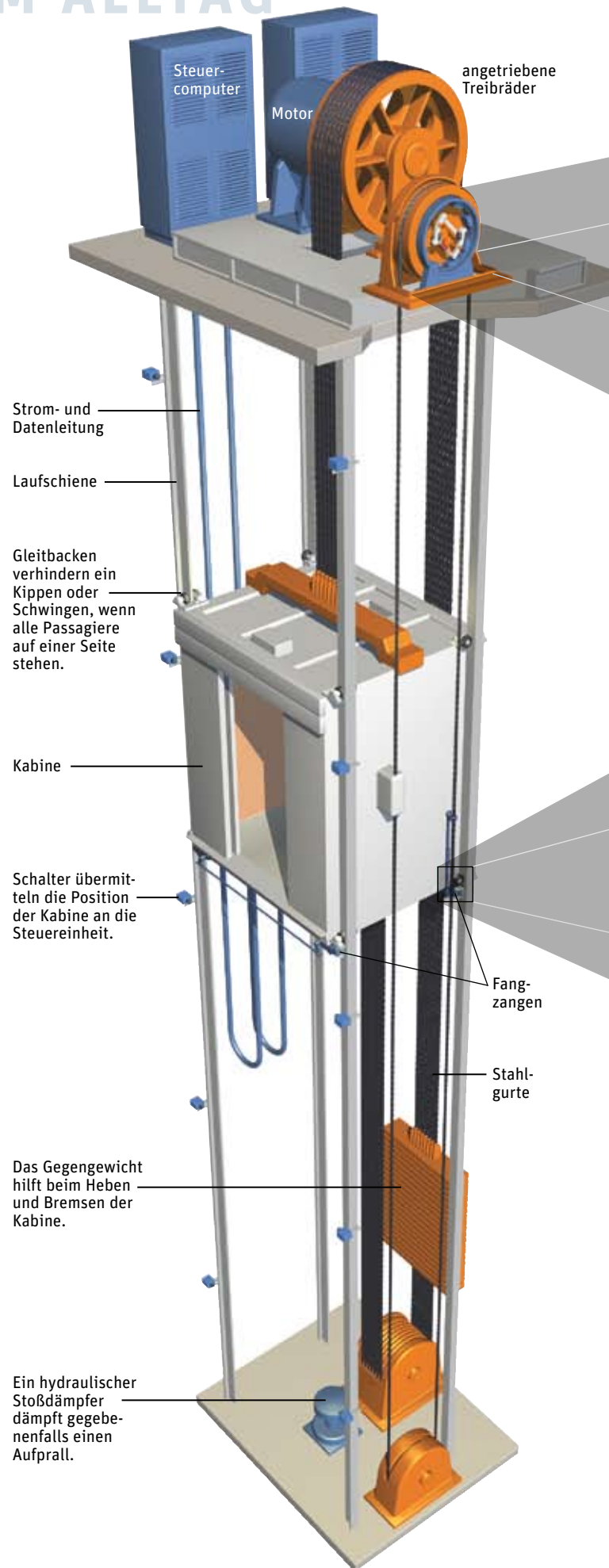
Treppensteigen ist zwar gesund, doch bei mehr als vier Stockwerken ziehen viele die bequeme Fahrt in einem Aufzug vor. Dessen Bausweise hat sich seit dem 19. Jahrhundert kaum verändert: Ein Elektromotor dreht über ein Getriebe – neuere Aufzüge kommen auch ohne aus – ein so genanntes Treibrad, worüber das Trage-seil läuft; an dessen einem Ende hängt die Kabine, am anderen ein Gegengewicht. Fahren die Passagiere nach oben, senkt es sich und umgekehrt.

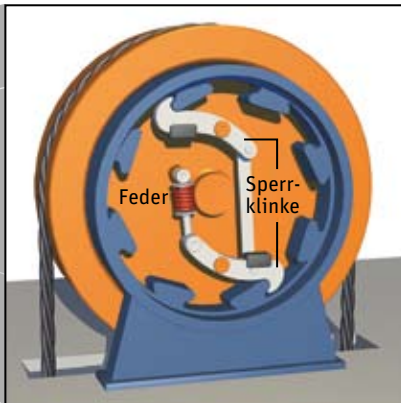
Doch elektrische Energie wird immer teurer und Büro- oder Wohnraum ist inzwischen ein kostbares Gut. Deshalb suchen Ingenieure nach Wegen zur Optimierung. Normalerweise beansprucht die Antriebseinheit einen Raum über oder neben dem Aufzugschacht. Das Ziel ist nun, die gesamte Maschinerie so zu verkleinern, dass sie in den oberen Teil des Schachts oder in eine seiner Seitenwände passt und somit keine anderweitig nutzbare Fläche verloren geht. Permanentmagnet-Elektromotoren sind inzwischen genauso leistungsstark wie die sonst üblichen Asynchronmotoren, jedoch deutlich kleiner (beide Motoren erzeugen in den Spulen eines Stators ein Magnetfeld wechselnder Polarität, das beim ersten Typ einen Dauermagneten rotieren lässt, beim zweiten wird das Rotorfeld durch Induktion erzeugt). Einige Hersteller verwenden außerdem flache, nur rund zwei Millimeter dicke Stahlgurte statt verdrehter, gut dreimal so dicker Stahlseile. Das Treibrad lässt sich dann verkleinern, denn Biege- und Wechselbeanspruchungen verlangen einen Mindestdurchmesser, der in der Regel 40-mal so groß ist wie der Durchmesser des Trage-seils. Dann genügt aber auch ein kleinerer Motor, das spart wieder Platz und obendrein auch Energie.

Das Gegengewicht wird so ausgelegt, dass es dem Gewicht einer zu 40 bis 45 Prozent beladenen Kabine entspricht. Im Idealfall beschleunigt der Motor dann nur, muss aber keine Hubenergie aufbringen. Fährt ein Aufzug jedoch leer nach oben, muss der Motor das Gegengewicht bremsen, ist die Kabine voll beladen und fährt abwärts, drosselt er deren Geschwindigkeit. Herkömmlicherweise führen elektrische Widerstände die überschüssige Energie als Wärme ab. Neue Antriebe wandeln sie über so genannte Frequenzumformer wieder in Strom um, den sie ins Stromnetz einspeisen.

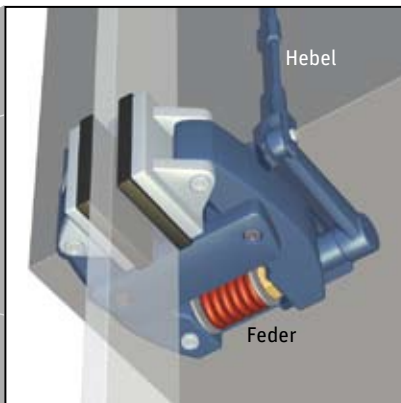
Um Aufzüge in Hochhäusern besser auszunutzen, kommen zunehmend auch Bildschirme mit Nummernanzeigen oder Touchpads in Gebrauch, auf denen ein Passagier das gewünschte Geschoss angeben kann. Ein Computer errechnet dann, welchen der Aufzüge er nehmen sollte, damit möglichst viele Personen mit dem gleichen Ziel gemeinsam ohne Zwischenstopps befördert werden können. Das verringert nicht nur Wartezeiten, sondern auch den Energieverbrauch.

MARK FISCHETTI ist Redakteur bei »Scientific American«.

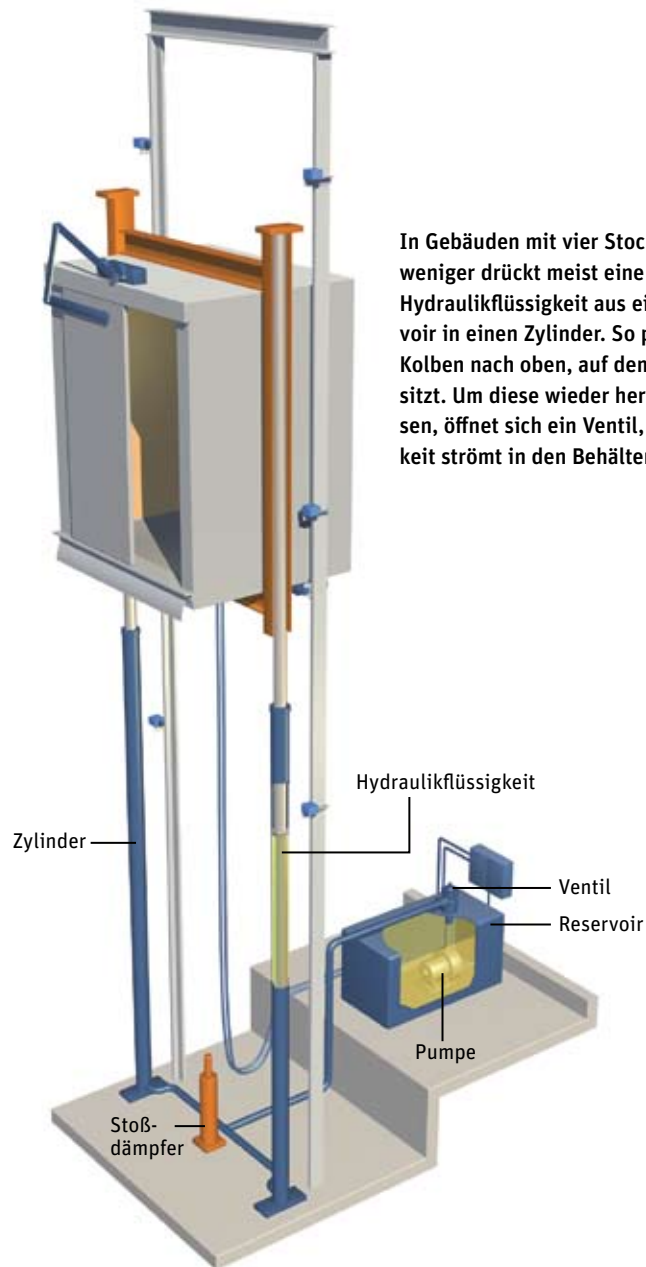




Sollte ein abwärtsfahrender Aufzug zu schnell fallen, schwingen Sperrklinken auf Grund der Zentrifugalkräfte gegen den Widerstand einer Feder nach außen und blockieren mit ihren Haken das Treibrad.



Über einen Hebel löst jeder Fliehkraftregler zudem eine Fangzange aus. Diese packt die Führungsschiene und hält so die Kabine.



In Gebäuden mit vier Stockwerken oder weniger drückt meist eine Pumpe Hydraulikflüssigkeit aus einem Reservoir in einen Zylinder. So presst sie den Kolben nach oben, auf dem die Kabine sitzt. Um diese wieder herunterzulassen, öffnet sich ein Ventil, die Flüssigkeit strömt in den Behälter zurück.

WUSSTEN SIE SCHON?

- ▶ **Schnelle Tatsachen:** Toshiba Elevator nimmt für sich in Anspruch, den schnellsten Personenaufzug der Welt gebaut zu haben: Für die 101 Stockwerke des Wolkenkratzers Taipei 101 in Taiwan benötigt er bei einer Geschwindigkeit von rund 60 km/h kaum mehr als 26 Sekunden. Ein Verdichter passt den Luftdruck im Innern der Kabine an, so dass der Druck auf die Ohren minimiert wird.
- ▶ **Vorsicht ist die Mutter der Porzellankiste:** Die Kabel für einen Aufzug sind so ausgelegt, dass sie 125 Prozent des Höchstgewichts einer vollbesetzten Kabine tragen können. Die meisten Fahrstühle werden von fünf oder mehr Kabeln gehalten. Die ver-

wendeten Stahlseile sind inzwischen so stabil, dass ein 1,25 bis 1,6 Zentimeter dickes Seil eine für mittelhohe Gebäude typische Last von über 1,5 Tonnen tragen kann. Die neuen, flachen und hochfesten Stahlbänder mit einer vergleichbaren Tragkraft sind kaum dicker als sechs Millimeter.

- ▶ **Auf der schiefen Bahn:** Manche Aufzüge bewegen sich nicht nur nach oben, sondern gleichzeitig zur Seite, um der Struktur eines außergewöhnlich gebauten Gebäudes zu folgen. Kabel ziehen beispielsweise im pyramidenförmigen Luxor-Hotel in Las Vegas Kabinen auf um 39 Grad zur Horizontalen geneigten Schienen. Auch im Eiffelturm in Paris geht die Fahrt schräg nach oben.

Intelligente SICHERHEITS- SYSTEME

Künftige Sicherheitstechnik wird Autofahrern immer mehr Entscheidungen abnehmen. Wissenschaftler und Ingenieure glauben, auf diese Weise Fahrfehler verhindern und die Zahl der Unfälle reduzieren zu können.

In Kürze

- ▶ Immer mehr **intelligente Sicherheitssysteme** unterstützen Fahrer aktiv dabei, kritische Verkehrssituationen zu meistern oder zumindest deren Folgen zu mildern.
- ▶ Befördert wird dieser Trend durch **wachsende Sicherheitserwartungen** der Kunden, gesetzliche Regelungen und zunehmenden Straßenverkehr, aber auch durch die veränderte Altersstruktur der Bevölkerung und weniger robuste Leichtbaufahrzeuge.
- ▶ Unterdessen werden auch robotische Fahrzeuge entwickelt. Kombiniert man sie mit Techniken zur Unfallvermeidung, könnten eines Tages auch **fahrerlose Autos** auf den Straßen unterwegs sein.

Von Steven Ashley

Die Autobahn ist leer, so weit das Auge reicht, und erstreckt sich schnurgerade bis zum Horizont – alles also im grünen Bereich. Mein Blick wandert hinunter auf die elektronische Anzeige in der Zentralkonsole des Wagens. Dann blicke ich wieder durch die Windschutzscheibe und sehe – nichts. Uplötzlich hat dichter Nebel die Straße vor mir verschluckt, ich fahre völlig blind. Noch bevor mein Fuß die Bremse findet, taucht auf der Frontscheibe ein rotes Bremslicht auf: Mein Auto warnt mich! Fluchend, aber ohne zu zögern, trete ich hart auf die Bremse. Unmittelbar vor einem abrupt aus dem Nebel auftauchenden Fahrzeug, das wohl mit einer Panne liegen geblieben ist, kommt mein Gefährt zum Stehen.

Noch sitzt mir der Schock in den Knochen, da gehen rings um mich herum helle Lichter

an. Ich sitze im VIRTTEX, einem Fahrzeugsimulator des Ford-Forschungszentrums in Dearborn im US-Bundesstaat Michigan. Der große, eiförmige Aufbau des Virtual Test Track Experiment erlaubt Testfahrten in einer virtuellen, aber durchaus überzeugenden Realität. Und im Kontrollraum lachen die Techniker und amüsieren sich über mein so gar nicht virtuelles Unbehagen.

In der vorangegangenen Viertelstunde haben sie mir demonstriert, wie gefährlich es ist, sich beim Fahren ablenken zu lassen. Die letzte meiner Aufgaben: Ich sollte auf die elektronische Anzeige blicken und die dort erscheinenden Zahlen vorlesen, ohne die Kontrolle über den Wagen zu verlieren. Denn wenn ein Fahrer seinen Blick länger als zwei Sekunden von der Fahrbahn abwendet, verdoppelt sich die Wahrscheinlichkeit für einen Unfall oder Beinahe-Unfall.

Davor bewahrt hatte mich der visuelle Alarm eines Kollisionswarners von Volvo, wie

SERIE: AUTOS DER ZUKUNFT

- | | | |
|-----------|--|--------------------|
| Teil I: | Wie Nano das Auto verändert | SdW 02/2009 |
| Teil II: | Die Zukunft fährt elektrisch | SdW 03/2009 |
| Teil III: | Elektroautos – die rollenden Stromspeicher | SdW 04/2009 |
| Teil IV: | Intelligente Sicherheitssysteme | SdW 05/2009 |

Eine virtuelle »Sicherheitsblase« könnte künftige Autos und ihre Fahrer schützen. Kritische Situationen im Straßenverkehr würden durch intelligente Sensorsysteme erkannt, die im Fall des Falles automatisch eingreifen.



Automatische Systeme zwingen die Fahrer, einen Teil der Kontrolle über ihr Fahrzeug abzugeben

mir der technische Leiter des VIRTTEX-Labors Mike Blommer erklärt. Dieser elektronische Schutzengel überwacht den Verkehr vor dem Fahrzeug mit Radarsignalen und Kameras. Droht Gefahr, spiegelt er ein optisches Signal ähnlich einem Bremslicht auf die Scheibe: »Dessen Bedeutung ist jedem erfahrenen Fahrer intuitiv sofort klar«, sagt Blommer.

Der Kollisionswarner ist nur ein Beispiel aus der jüngsten Generation von Sicherheitsgeräten, die uns vor Unfällen im Straßenverkehr bewahren sollen. Viele Fahrzeuge der oberen Preisklassen sind schon damit ausgestattet, und allmählich finden sie ihren Weg auch in Mittelklasseautos und Lkws. Noch erheblich effektiver dürfte indessen der nächste Entwicklungsschritt werden. Künftige Antikollisionssysteme sollen die Bremsen automatisch auslösen, ohne dass der Fahrer überhaupt noch reagieren muss.

Läuten solche Entwicklungen ein neues Zeitalter des Automobils ein? Die Bereitschaft der Fahrer, automatische Systeme zu akzeptie-

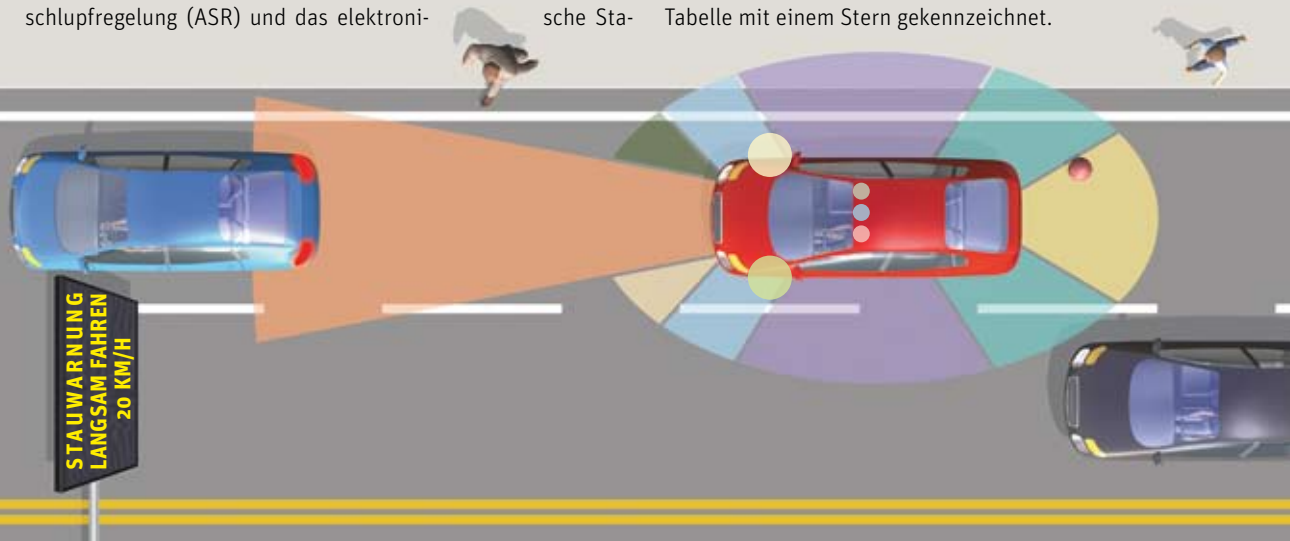
ren, wächst langsam, aber beständig – obwohl sie gezwungen sind, die Kontrolle über ihr Fahrzeug mehr und mehr an ein robotisches System abzugeben. Experten sind allerdings davon überzeugt, dass viele Autos in wenigen Jahrzehnten in der Lage sein werden, den Großteil der Kollisionen auf der Straße zu vermeiden. Es wird sogar der Tag kommen, an dem sie keinen Fahrer mehr brauchen.

Bei sechs Millionen Verkehrsunfällen, die im Jahr 2007 in den USA stattfanden, starben fast 41 000 Menschen. In Deutschland kam es im letzten Jahr zu 2,3 Millionen polizeilich erfassten Unfällen, fast 4500 Tote waren zu verzeichnen. Immerhin nimmt die Zahl der jährlichen Verkehrstoten auf Grund vieler Faktoren kontinuierlich ab. In Deutschland sinkt sie seit 1970 fast stetig, unter anderem dank der Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit auf Landstraßen, der Anschnallpflicht und der Senkungen der Promillegrenze für den Blutalkoholspiegel. Mehr und mehr tragen dazu aber auch Sicherheitstechniken wie etwa Airbags bei.

FAHREN IN DER SICHERHEITSBLASE

Aktive Sicherheitssysteme könnten Sicherheitszonen um Fahrzeuge errichten, um Kollisionen mit anderen Autos oder auch Menschen zu verhindern. Antiblockiersystem (ABS), Antischlupfregelung (ASR) und das elektroni-

sche Stabilitätsprogramm ESP ermöglichen schon heute, dass sich Fahrzeuge in gefährlichen Situationen besser lenken und schneller abbremsen lassen. Noch nicht verfügbare Techniken sind in der Tabelle mit einem Stern gekennzeichnet.



GEORGE RETSECK

ANTIBLOCKIERSYSTEM (ABS) verbessert bei abruptem Bremsen die Lenkbarkeit und verkürzt den Bremsweg	SICHERHEITSBREMSASSISTENT verstärkt die Bremswirkung bei Notbremsungen	AUFFAHRWARNER warnt vor drohendem Zusammenstoß	AUTOMATISCHES BREMSYSTEM* erkennt drohenden Zusammenstoß und löst selbstständig die Bremse aus
ANTISCHLUPFREGELUNG (ASR) verhindert, dass Fahrzeuge die Bodenhaftung verlieren	TOTWINKELASSISTENT warnt vor Fahrzeugen im toten Winkel	SPURHALTEASSISTENT warnt, wenn das Fahrzeug die Spur verlässt	SPURWECHSELASSISTENT verhindert Spurwechsel, wenn sich in der benachbarten Spur ein Fahrzeug von hinten nähert
ELEKTRONISCHES STABILITÄTSPROGRAMM (ESP) verhindert Rutschen und Schleudern des Wagens	RÜCKFAHRWARNER* warnt beim Zurücksetzen des Fahrzeugs vor Hindernissen und bremst gegebenenfalls	VERKEHRSZEICHENERKENNUNG informiert über Verkehrsregeln wie zum Beispiel Tempolimits	AUTOMATISCHE FUSSGÄNGERERKENNUNG warnt vor Fußgängern oder Tieren auf der Fahrbahn

Wie Unfallstatistiken belegen, gelten Fahrfehler als größtes Risiko auf den Straßen. Im Jahr 2007 waren in Deutschland Fehler beim Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren sowie Ein- und Anfahren für die meisten Unfälle mit Personenschaden verantwortlich. Erstmals nach vielen Jahren war »nicht angepasste Geschwindigkeit« nur die zweithäufigste Unfallursache. Sie wird jedoch ein wichtiger Faktor bleiben. »Beispielsweise kann ein Fahrer nur schwer einschätzen, wie stark er bremsen muss, wenn das Fahrzeug vor ihm plötzlich langsamer wird«, erklärt Jörg Breuer, Leiter Aktive Sicherheit bei Mercedes-Benz. »Der Versuch, die Gefahr richtig einzuschätzen, kostet wertvolle Millisekunden, so dass viele Fahrer zu spät, zu schwach oder gar nicht bremsen.« Ein automatischer Bremsassistent, an dem Mercedes und auch andere Autohersteller arbeiten, könnte das Problem abschwächen.

Spielt der Kunde mit?

Für eine stärkere Automatisierung von Autos sprechen neben der Häufigkeit von Fahrfehlern auch zwei vergleichsweise junge Trends. Zum einen wächst in vielen Ländern das durchschnittliche Alter der Fahrer. Das bedeutet: Die körperlichen und geistigen Fähigkeiten des durchschnittlichen Fahrers lassen nach. Die Technik könnte also einspringen, um Fahrzeuginsassen ebenso wie »gegnerische« Verkehrsteilnehmer zu schützen. Der zweite Trend ist weniger offensichtlich. Die immer weiter verbreiteten Ökomodelle sind oft auch leichter als bislang übliche Pkws. Diesen Vorteil erkaufen Autohersteller nicht selten durch weniger robuste Fahrzeugstrukturen, die im Fall von Kollisionen weniger Schutz bieten. Auch hier könnten elektronische Fahrassistenten einen Ausgleich schaffen.

Allerdings erobern neue Sicherheitstechniken den Markt nicht allzu rasch. Zum einen sind sie noch immer sehr teuer. Auch fürchten die Hersteller Schadensersatzforderungen im Versagensfall, möglicherweise müssten sie gar für Todesfälle einstehen. Und schließlich genießen noch immer viele Autofahrer das Gefühl, die volle Kontrolle über ihr Fahrzeug zu besitzen. Welcher Hersteller würde wagen, ihnen das von heute auf morgen zu nehmen?

Die Kunden müssen also allmählich Vertrauen in die Fähigkeiten der neuen Systeme gewinnen. Passive Vorrichtungen wie Sicherheitsgurte, Airbags und Knautschzonen wurden längst akzeptiert. Aber auch mit einigen aktiven Sicherheitssystemen sind die Kunden bereits vertraut. Eine Premiere war die Einführung von Antiblockiersystemen (ABS) im Jahr 1978. Sie verbessern die Lenkbarkeit von Autos und verkürzen deren Bremsweg bei



Vollbremsungen: »Damit hatten wir zum ersten Mal einem Sensor erlaubt, eine kritische Fahrsituation zu erfühlen und eine automatische Reaktion auszulösen«, sagt Breuer.

Der nächste große Schritt war die Antischlupfregelung (ASR) oder »Traktionskontrolle«. Sie verhindert, dass die Räder beim Beschleunigen durchdrehen, so dass der Fahrer, auch wenn er zu viel Gas gibt, die Kontrolle über sein Fahrzeug behält. Schließlich folgte auch das Elektronische Stabilitätsprogramm. ESP überwacht kontinuierlich den Lenkwinkel und die Richtung der Fahrzeugbewegung. Zur Bestimmung Letzterer messen Sensoren die Querschleunigung des Autos, den Winkel des Wagens relativ zur Hochachse und die Drehgeschwindigkeit der Reifen. Gerät das Fahrzeug ins Rutschen, bremst das ESP gezielt einzelne Räder ab, um es wieder in Fahrtrichtung zu orientieren. Außerdem kann es den Motor drosseln, so dass sich das Auto selbst wieder »fängt«.

Studien von Mercedes und Toyota deuten darauf hin, dass ESP die Zahl der Unfälle, an denen keine anderen Fahrzeuge beteiligt sind, um 29 bis 35 Prozent reduziert. Um 15 bis 30 Prozent nimmt die Zahl der Frontalzusammenstöße ab. Auf Erkenntnisse wie diese hat die Europäische Union schon reagiert: Sie schreibt vor, dass alle neuen Pkw- und Nutzfahrzeugmodelle ab November 2011 mit ESP ausgerüstet sein müssen. (In Deutschland waren im ersten Halbjahr 2008 bereits 81 Prozent aller neu zugelassenen Pkws damit ausgestattet.) Ab 2012 fordert aber auch die US-Straßenverkehrsbehörde NHTSA (National Highway and Traffic Safety Administration) ESP-Systeme für die meisten Fahrzeuge.

Kay Stepper von der Robert Bosch Vehicle Motion and Safety Division im US-Bundesstaat Michigan hält ESP überdies für den Schlüssel zu vernetzten Sicherheitssystemen,

TOD AUF DER STRASSE

Die Zahl der Verkehrsteilnehmer, die auf deutschen Straßen ums Leben kommen, sinkt.

► **Im Jahr 1907** war das auf den Fahrzeugbestand bezogene Risiko, bei einem Verkehrsunfall ums Leben zu kommen, 62-mal so hoch wie heute.

► Im Vergleich zum Jahr 1970 hat sich die Zahl der Verkehrstoten pro Jahr heute auf ein Viertel reduziert. Der Trend zeigt weiterhin nach unten.

Doch die Straßen bleiben gefährlich:

► Rund **410 000 Verletzte** zählte das Statistische Bundesamt Deutschland im Jahr 2008. Etwa jeder fünfte von ihnen wurde schwer verletzt.

► Im selben Jahr kamen 4467 Menschen bei Unfällen ums Leben.

Global zeigt sich allerdings eine andere Entwicklung. Der Bericht der Weltgesundheitsorganisation (WHO) von 2004 über die Prävention von Unfällen im Straßenverkehr prognostizierte:

► Die jährliche Zahl der **Verkehrstoten weltweit** wird von 0,99 Millionen 1990 auf 2,34 Millionen 2020 steigen.

► In reichen Ländern wird ihre durchschnittliche jährliche Zahl um 30 Prozent sinken, in ärmeren Ländern um über 80 Prozent zunehmen.

Zum ersten Mal wurde einem Sensor erlaubt, eine automatische Reaktion auszulösen

die von der Zusammenarbeit verschiedener Sensoren, aktiver Systeme und dem Computer an Bord eines Fahrzeugs profitieren. Die Daten nämlich, die ESP über die Bewegung des Wagens gewinnt, könnte es auch einer zentralen Überwachungseinheit liefern. »Noch bis vor Kurzem haben die Sicherheitssysteme in einem Fahrzeug unabhängig voneinander gearbeitet«, erläutert Stepper. »Jetzt sind die Komponenten vernetzt, sie reden miteinander.« So lässt sich das Gesamtsystem optimieren und gegebenenfalls sogar die notwendige technische Ausstattung reduzieren.

Außerdem kommen dadurch gänzlich neue Funktionen hinzu. Das Seitenairbag-System von Bosch etwa registriert seitliche Zusammenstöße mittels zweier unabhängiger Sensoren, einem Drucksensor in der Tür und einem Beschleunigungsmesser des Stabilitätskontrollsystems. »Sicherheitshalber müssen Sensoren aber auf die Bestätigung durch ein anderes System warten, bevor sie aktiv werden und beispielsweise die Airbags auslösen«, sagt Stepper. »Und das kostet wertvolle Millisekunden.« Auf ihrem Weg zu vernetzten Systemen arbeiten Entwickler daher mittlerweile mit einer zentralen »Black Box«, die den Bewegungszustand des Fahrzeugs kontinuierlich überwacht. Vom ESP empfängt sie Informationen

über eine eventuelle Drehung des Wagens um seine vertikale Achse, die Gierbewegung also, die ein seitliches Rutschen des Fahrzeugs anzeigt. In diesem Fall kann die Black Box die Seitenairbags vorwarnen, so dass diese beim Ansprechen des Türsensors sofort auslösen.

Nur ein Kanaldeckel. Oder doch ein Auto?

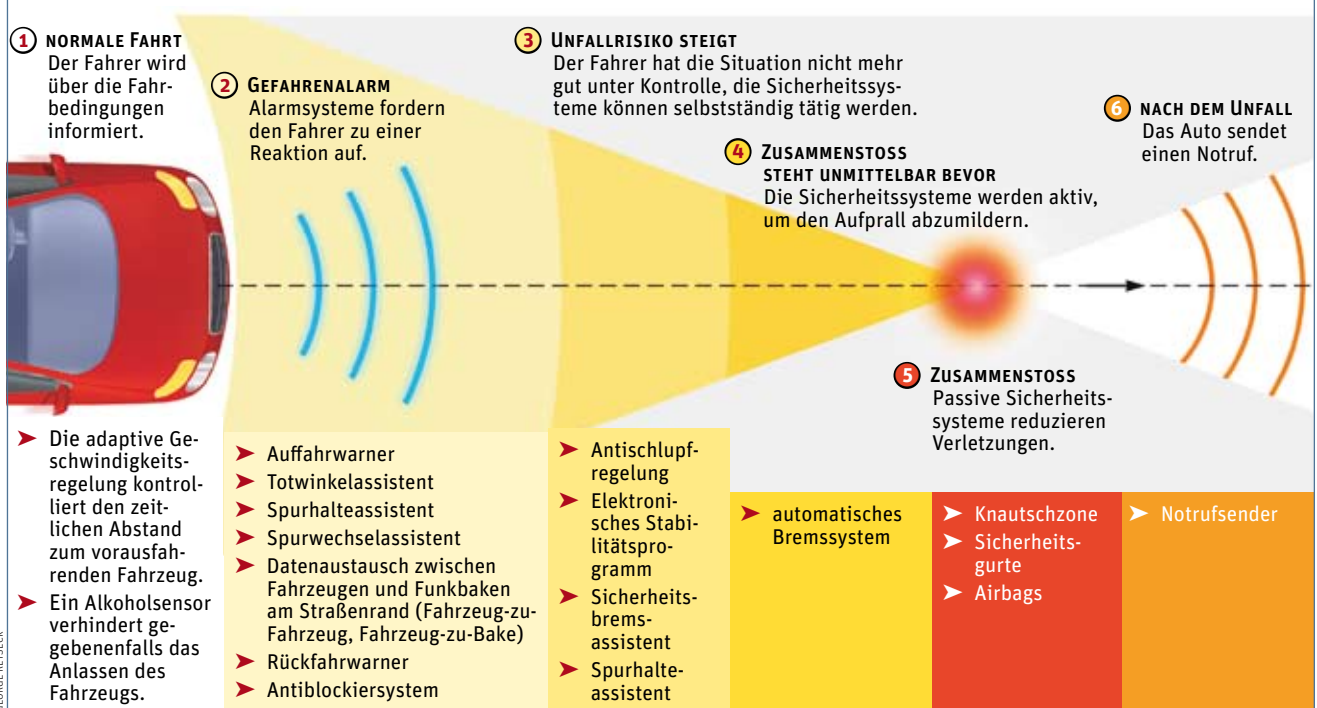
Faszinierend sind auch Kollisionswarner. Sie basieren auf adaptiven Geschwindigkeitsreglern, die auf Basis von Radardaten den gewünschten (zeitlichen) Abstand zum Vorderfahrzeug einhalten. Auch Stop-and-go-Geschwindigkeitsregler auf Basis einer Kamera und eines ausgeklügelten Steuerungsprogramms existieren inzwischen. Indem sie das Verhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs analysieren, erleichtern sie die Fahrt im Stau oder in der Autokolonne vor der Ampel.

Häufig kommen Radargeräte und optische Kameras gleichzeitig zum Einsatz. »Das Radar registriert ein mögliches Hindernis und misst die Entfernung zu ihm«, erklärt Dean McConnell von Continental Automotive Systems in Michigan. »Aber es findet nicht so leicht heraus, worum es sich dabei genau handelt. Ein Videokamerasystem dagegen unterscheidet zwischen wichtigen und unwichtigen Dingen,

SECHS PHASEN BIS ZUM CRASH

Experten für Fahrzeugsicherheit unterteilen Zusammenstöße in sechs Ablaufphasen. In jeder von ihnen können unterschiedliche Sicherheitssysteme zum Zuge kommen.

Geschieht der Unfall dennoch, reduzieren passive Systeme wie Sicherheitsgurte, Airbags und Knautschzonen die Verletzungsgefahr.





Ein in die Windschutzscheibe eingespiegelter roter Lichtstreifen weist im VIRTTEX-Simulator auf potenzielle Hindernisse hin (links). Rundumblicke auf die Verkehrssituation erlauben Weitwinkelkameras, die ihre Aufnahmen auf Navigationsbildschirme übertragen (rechts).

etwa einem Fahrzeug und einem Kanaldeckel.« Erst wenn man die Technologien kombiniert, können sie Situationen zuverlässig einschätzen.

Entsprechende Systeme seien üblicherweise mit einem langreichweitigen 77-Gigahertz-Mikrowellenradar ausgestattet, das 120 bis 200 Meter weit vorausblickt. Ein 24-Gigahertz-Radar scannt außerdem den Bereich einige zehn Meter vor dem Fahrzeug. Hinzu kommt eine Weitwinkel-Videokamera, mit ihr lassen sich Objekte im Abstand von bis zu 50 Metern identifizieren. Stellt das Warnsystem fest, dass sich das Auto einem vorausfahrenden Fahrzeug zu schnell nähert, rüttelt es am Bremspedal oder lässt eine Warnlampe aufleuchten. Außerdem bereitet es die Notbremsung vor, indem es die hydraulischen Bremsleitungen unter Druck setzt. Reagiert der Fahrer trotz allem nicht, tritt es selbst ein wenig auf die Bremse, um zumindest den Aufprall abzumildern.

Kollisionswarner der Zukunft werden Fahrzeuge wohl vollautomatisch abbremsen oder in die Spur zurücklenken, um Unfälle zu vermeiden. Noch aber stellt die entsprechende Technik – zumal sie bei allen Geschwindigkeiten funktionieren muss – die Ingenieure vor große Herausforderungen. Sie rechnen mit Entwicklungszeiten von fünf bis zehn weiteren Jahren. Der schwedische Autobauer Volvo hat aber bereits einen ersten Schritt hin zu einem automatischen Bremsystem unternommen. »City Safety« soll Zusammenstöße im Geschwindigkeitsbereich von bis zu 30 Kilometern pro Stunde verhindern oder abmildern. Todesfälle in diesem Stadtverkehrsszenario sind zwar selten, Schleudertraumen jedoch häufig, sagt Volvo-Ingenieur Thomas Broberg. Die Schuld tragen meist abgelenkte Fahrer.

Das schon serienmäßig in den Volvo XC60 integrierte »City Safety«-System ist mit einem Infrarotlaser ausgestattet, der den Bereich von sechs bis acht Metern vor dem Fahrzeug auf

Reflexionen hin scannt. Es bestimmt die Geschwindigkeit, mit der sich Fahrzeug und Objekt aufeinander zubewegen, und bereitet gegebenenfalls die Notbremsung vor. »Reagiert der Fahrer nicht, bremst das Fahrzeug automatisch«, so Broberg. Ohne Vorwarnung: »Das würde den Fahrer nur verwirren.«

Allerdings ist es leicht, einen Wagen automatisch abzubremsen. »Die Kunst besteht darin«, sagt der Ingenieur, »dafür zu sorgen, dass dies nicht unnötigerweise geschieht.« Volvo und andere Autofirmen ebenso wie Lieferanten von Sicherheitssystemen testen ihre Systeme darum wieder und wieder, um möglichst hohe Zuverlässigkeit zu erreichen. Sie installieren sie beispielsweise in Fahrzeugen, die irgendwo auf der Welt in ganz unterschiedlicher Umgebung unterwegs sind. Dort aber bleiben die Geräte meist passiv und werten lediglich Daten aus – auf diese Weise lässt sich gefahrlos prüfen, ob die Systeme jeweils die korrekte Entscheidung getroffen hätten.

Doch Bremsen ist nicht die einzige Möglichkeit, kritische Verkehrssituationen zu entschärfen. So existieren auch Systeme, die den Fahrer vor unbeabsichtigten Spurwechseln warnen. Ihre Schlüsselkomponenten sind Kameras, die – meist an den Rückspiegeln montiert – in Fahrtrichtung blicken, um Fahrbahnmarkierungen zu verfolgen. Als eines der ersten Unternehmen führte Nissan eine solche Technik ein und plant nun eine verbesserte Version: »Unser neues System betätigt die Bremse auf nur einer Fahrzeugseite«, sagt Sicherheitsingenieur Alex Cardinali von Nissan North America, »und erzeugt so eine Gierbewegung, die das Fahrzeug in die Spur zurückbringt.« Außerdem berücksichtigt es die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Lenkbewegungen des Fahrers.

Einen ähnlichen Assistenten konnte ich bereits selbst testen. Nahe dem amerikanischen Bosch-Testgelände südlich von Detroit fuhr ich vor einiger Zeit gemeinsam mit drei Bosch-

UNERWÜNSCHTER EINGRIFF?

Künftige Fahrzeugsicherheitstechnik dürfte erheblich in **unser Fahrverhalten eingreifen**.

Manchmal schützt sie uns schlicht vor **teils folgenreichen Unachtsamkeiten**. Dazu dürften viele jener Fehler gehören, die Fahrerinnen etwa beim Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren, Ein- und Anfahren unterlaufen. Sie gehörten im Jahr 2007, als das Statistische Bundesamt 4609 Unfälle mit tödlichen Folgen zählte, in neun Prozent der Fälle zu den (oft mehreren) Unfallursachen.

Andere Ursachen hingegen zeugen in stärkerem Maß von **bewusster Missachtung von Risiken**: Überholvorgänge (8 Prozent), Alkohol (10), Verstöße gegen das Rechtsfahrgebot (11), Missachtung der Vorfahrt (11) und nicht angepasste Geschwindigkeit (39).

Doch werden Autofahrer akzeptieren, dass ihr Wagen am Stoppschild automatisch abbremst, sie auf der Autobahn sanft auf die rechte Spur steuert oder gar ein **eingebauter Alkoholsensor** die Zündung blockiert?

VORSICHTIGES HERANTASTEN

Die Einführung automatischer Sicherheitssysteme in Autos wirft für die Herstellerfirmen **schwer wiegende Fragen** auf. Als beispielsweise die ersten Airbags eingeführt wurden, erkannte niemand die Gefahren, die Kindern durch die sich explosionsartig aufblasenden Prallsäcke drohten. Viele Gerichtsprozesse wurden geführt, bis sich sicherere Methoden durchgesetzt hatten. Und gerade in den USA existieren extrem strenge Gesetze zur Produkthaftung.

Um unerwünschte Folgen zu begrenzen, werden neue Systeme heute über Jahre hinweg ausgiebig getestet. In den USA wird vor ihrer Markteinführung unter anderem die Billigung der Straßenverkehrsbehörde NHTSA abgewartet, in Deutschland stimmen sich die Hersteller etwa innerhalb von Branchenorganisationen wie dem deutschen Verband der Automobilindustrie (VDA) oder der European Automobile Manufacturers Association (ACEA) ab.

Ingenieuren durch die sanft hügelige Landschaft. Wir folgten einer nahezu leeren und pfeilgeraden zweispurigen Straße, bis kein anderes Fahrzeug mehr in Sicht war. Dann aktivierte der Forscher auf dem Beifahrersitz das System, und ich durfte mir ein Vergnügen daraus machen, vom Weg abzukommen. Aber sofort begannen Steuerrad und Sitz zu rütteln, als ob wir über ein Waschbrett fuhren. Die Botschaft war eindeutig: zurück in deine Spur!

Fahren in der Badewanne

Alternativ brachte der Assistent auch Warntöne hervor oder ließ Lampen auf dem Armaturenbrett aufleuchten. Betätigte man den Blinker, schaltete sich das System ab. Mir selbst sagte übrigens der »Badewannen-Modus« am meisten zu. Dabei spürte ich jedes Mal, wenn ich den Wagen aus der Spur lenkte, eine leichte Gegenkraft am Lenkrad, die das Auto wieder zurücksteuerte.

Benachbarte Fahrspuren können die elektronischen Schützlinge mittlerweile ebenfalls überwachen und vor Fahrzeugen im toten Winkel warnen – in Bereichen also, die der Fahrer nur mit Mühe oder gar nicht einsehen kann. Dabei kommen Ultraschall- oder Radarsensoren zum Einsatz. Der Totwinkelassistent im Mercedes CL etwa ist mit dem Abstandsregeltempomaten gekoppelt. Er fragt dessen Radarsensoren ab und lässt im Gefahrenfall ein Warndreieck im jeweiligen Außenspiegel aufleuchten. Totwinkelassistenten gewinnen an Popularität, sagt McConnell von Continental Automotive Systems, dürften sich zunächst aber eher im kommerziellen Markt durchsetzen, denn gerade für Lkw-Fahrer »ist der tote Winkel besonders groß«.

Spurwechselassistenten erweitern diese Technik noch. Nähert sich in einer benachbarten Spur ein Fahrzeug rasch von hinten, weisen sie darauf hin, dass der Spurwechsel gefährlich werden könnte und verhindern ihn teilweise sogar. Die Radarsysteme im Audi A8

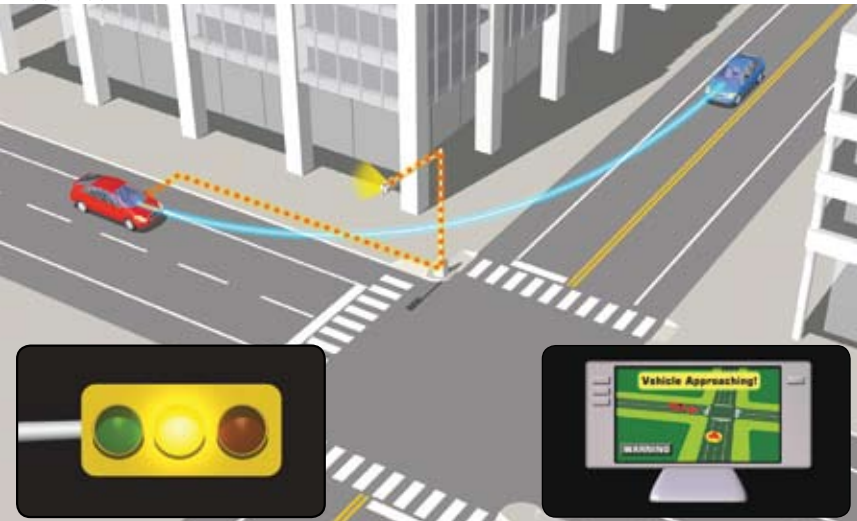
und im VW Touareg beispielsweise können Fahrzeuge hinter dem eigenen Auto bereits im Abstand von 50 Metern erkennen, also weit über den eigentlichen toten Winkel hinaus. Mit ähnlicher Technik lassen sich Fahrer beim Zurücksetzen in der Grundstückseinfahrt etwa auf ein spielendes Kind aufmerksam machen.

McConnell rechnet für die Zukunft mit Sicherheitssystemen, die Fußgänger und Tiere selbst nachts erkennen. Eine Verkehrszeichenerkennung könnte zudem verhindern, dass wir Stoppschilder oder Ampeln übersehen. Und BMW hat schon 2006 den Prototyp eines Kurvenwarners vorgestellt. Er basiert auf hochpräzisen Navigationsdaten, die mit der Fahrgeschwindigkeit verknüpft werden, und warnt, wenn Fahrer zu schnell auf eine enge Kurve zusteuern. Vernetzt man all diese Systeme miteinander, könnten sie das Fahrzeug in eine regelrechte »Sicherheitsblase« einhüllen. Dieses Vorhaben ist allerdings hochkomplex und dürfte mehr kosten, als die meisten Autobesitzer zu zahlen bereit wären.

Darum verfolgt eine Reihe von Autoherstellern, unter anderem aber auch das Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) einen ergänzenden Ansatz. Dabei werden Fahrzeuge drahtlos untereinander oder mit fest montierten Funkbaken beispielsweise an Kreuzungen verbunden. Informationen über die Umgebung, so Alan Taub, Chef von General Motors Research and Development, können schließlich auch andere Fahrzeuge und nahe Verkehrszeichen liefern.

Die Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug (*car-to-car, c2c*) oder Fahrzeug zu Funkbake (*car-to-infrastructure, c2i*), bei der die Übertragungsraten nicht viel höher als beim SMS-Versand per Handy sein müssten, »lässt Fahrer über den Horizont hinwegblicken«, sagt Taub. »Nehmen wir an, dass ein anderes Auto hinter einer für Sie als Fahrer nicht einsehbaren Kurve stehen geblieben ist. Das be-

GEORGE RETSECK



Ein sechster Sinn für den Fahrer: Fahrzeughersteller wie Toyota und General Motors, aber auch das Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) testen Sicherheitssysteme, die drahtlos Gefahrenmeldungen zwischen Fahrzeugen und fest installierten Funkbaken beispielsweise an Kreuzungen austauschen. Die Daten umfassen Geschwindigkeiten und Positionen von Autos sowie Informationen über Bremsvorgänge in einem Umkreis von mindestens einigen 100 Metern. Gegebenenfalls wird ein Fahrer durch Ton- oder Lichtsignale gewarnt (kleine Bilder). Reagiert ein Fahrer trotzdem nicht, können die Bordsysteme sein Auto automatisch abbremsen. Auf dem DLR-Versuchsgelände in Oberpfaffenhofen wird beispielsweise auch das Kolonnenfahren mehrerer Fahrzeuge getestet, das sowohl die Sicherheit als auch die Effizienz der Straßennutzung erhöhen soll.



GENERAL MOTORS



CALIFORNIA PATH, BILL STONE

merken weder Sie selbst noch Ihre Assistenzsysteme, andere Fahrzeuge in der Nähe vielleicht aber doch.« Ein weiteres Beispiel: Funkbaken an Kreuzungen könnten unaufmerksame Fahrer darauf hinweisen, dass sie gleich bei Rot über eine Ampel fahren, oder sogar veranlassen, dass der Wagen abgebremst wird. Das Grundkonzept kommt mit vergleichsweise simpler Technik aus: mit GPS-Geräten, einem Computerprozessor und standardisierten kurzreichweitigen Sendern und -empfängern. Schon wenn nur fünf bis zehn Prozent der Autos so ausgerüstet seien, sagt Taub, erhöhe sich die Sicherheit für alle.

Wie viel Zeit benötigt der große Plan?

Allerdings würde dieser Plan erfordern, dass sich die Automobilhersteller auf einen einheitlichen Kommunikationsstandard einigen – und das wird dauern. Immerhin arbeitet die IEEE, ein weltweiter Berufsverband von Ingenieuren, bereits an einem entsprechenden Funkstandard. Für die flächendeckende Installation von c2i-Funkbaken allein in den USA würde jedoch die gigantische Summe von rund 1000 Milliarden US-Dollar fällig, wie Experten schätzten. Dennoch tauschen sich Unternehmen wie Toyota, General Motors und Nissan bereits über die c2c-Technik aus, und neben dem DLR testen vor allem auch japanische und chinesische Forschungsorganisationen c2c- und c2i-Prototypen.

Noch befinden sich viele fortgeschrittene Sicherheits- und autonome Navigationssysteme in der Entwicklung. Und auch diejenigen von ihnen, die bereits auf dem Markt sind, lassen sich noch verbessern. Mal reagieren sie vergleichsweise spät, mal sind sie nur in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen zuverlässig. Oder sie erkennen zwar angezeigte Tempolimits, nicht jedoch andere Verkehrszeichen. Doch die Probleme reichen noch weiter. Laut Wiener Straßenverkehrskonvention von 1968, die in 80 bis 90 Staaten anerkannt wird (nicht allerdings in den USA), muss jeder Fahrer zu

jeder Zeit in der Lage sein, uneingeschränkte Kontrolle über sein Fahrzeug auszuüben. Auch aus diesem Grund argumentiert etwa BMW, dass seine Sicherheitssysteme dem Fahrer lediglich erweiterte Fähigkeiten einräumen, ihm das eigentliche Fahren aber weiterhin überlassen sei. Ein Grenzfall ist allerdings schon erreicht, wenn ein Auto autonom auch nur in die Garage fährt – denn laut Konvention muss sich der Fahrzeugführer im fahrenden Auto jederzeit am Lenkrad befinden.

Am schwersten wiegen jedoch ethische Dilemmata, die auch eine neue Konvention nicht würde lösen können. Beispiele sind schnell gefunden. Bremsen ein Fahrzeug an einer roten Ampel automatisch ab, kann sein Fahrer dem Rettungswagen nicht mehr den Weg freimachen. Und registriert das Auto in Fahrtrichtung gar ein auf die Straße rennendes Kind, während von hinten ein Zehn-Tonnen-Lkw naht – welcher Algorithmus könnte diese Situation bewältigen?

Doch schon im Jahr 2007 navigierten ein technisch hochgerüsteter Chevrolet mit dem Spitznamen »Boss« (Foto oben links) und weitere fahrerlose Fahrzeuge erfolgreich durch eine Stadtkulisse im kalifornischen Victorville. Dort waren auch weitere Autos mit Fahrern unterwegs, es kam sogar zu »Verkehrsstaus«. Die Wagen nahmen am »Urban Challenge« zur Demonstration der Fähigkeiten robotischer Fahrzeuge teil. Dieser Wettbewerb, der von einer Behörde des US-Verteidigungsministeriums durchgeführt wird, dient zwar in erster Linie militärischen Zwecken. Doch auch im zivilen Leben könnten die gewonnenen Erkenntnisse Wirkung entfalten. Nach dem letzten Wettbewerb vor zwei Jahren erklärte zumindest Rick Wagoner, bis vor Kurzem Vorstandsvorsitzender von General Motors, sein Unternehmen werde binnen zehn Jahren ein automatisches Fahrzeug auf den Markt bringen. Mittlerweile hat GM zwar andere Probleme – abwegig scheint Wagoners Überlegung aber schon lange nicht mehr. ◀

Das robotische Fahrzeug »Boss« (links) gewann 2007 den US-Wettbewerb »Urban Challenge«. Vorläufer künftiger fahrerloser Personen- und Lastkraftwagen wurden auch schon beim Fahren in Formation getestet (rechts).



Steven Ashley ist Redakteur bei »Scientific American« und freier Autor.

Festag, A. et al.: Network on Wheels: Project Objectives, Technology and Achievements. In: Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), Hamburg, März 2008. Download unter: www.network-on-wheels.de/downloads/WIT-2008_now-achievem_festag-et-al.pdf

CAR 2 CAR Communication Consortium: www.car-2-car.org

Fahrerassistenzsysteme (Informationen des Deutschen Verkehrssicherheitsrats): www.bester-beifahrer.de

Informationen und Videos des Bundesverkehrsministeriums: www.in-zukunft-leben.de/verkehr.html

i2010-Initiative »Intelligentes Fahrzeug« der Europäischen Kommission: <http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l31103.htm>

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987517.



SCHOTT AG

»Verantwortung für Menschen übernehmen«

Prof. Dr.-Ing. Udo Ungeheuer ist seit 2004 Vorstandsvorsitzender des Glas- und Technologiekonzerns Schott. Beim Interview trägt er ein Sakko in Firmenfarben mit aufgenähtem Namen. Wer ihn nicht kennt, könnte ihn auch für einen Schichtleiter an einer der Glaswannen halten, auf die er aus seinem Büro im fünften Stock des Verwaltungsgebäudes blicken kann.

Prof. Dr.-Ing. Udo Ungeheuer

Vorsitzender des Vorstandes der Schott AG

- ▶ geb. 1950
- ▶ 1979: Abschluss Diplomingenieur für Maschinenbau an der RWTH Aachen
- ▶ 1983: Werkzeugmaschinenlabor RWTH Aachen, Geschäftsführender Oberingenieur, Leitung der Forschungsgruppe »Montage und Fertigungstechnik«
- ▶ 1985: Promotion zum Dr.-Ing. (Thema: Problematik der Erarbeitung von Produkt- und Produktionsstrukturen für die Werkzeugmaschinenindustrie und den Anlagenbau)
- ▶ 1986: Beginn der Laufbahn in der freien Wirtschaft bei BMW (zuletzt Leiter der Logistik, der Technischen Planung und des Versuchsfahrzeugbaus)
- ▶ 1994: Eintritt bei der Schott AG als Mitglied der Konzernleitung
- ▶ 1995: Berufung in den Schott-Vorstand
- ▶ 2004: Vorsitzender des Vorstandes des Technologiekonzerns Schott
- ▶ 2006: Honorarprofessor der Fachhochschule Mainz

Spektrum der Wissenschaft: Was hat Sie eigentlich veranlasst, Maschinenbau zu studieren?

Prof. Dr.-Ing. Udo Ungeheuer: Etwas anderes kam damals eigentlich gar nicht in Frage. Ich war immer technisch interessiert, die Berufsaussichten waren gut, und obendrein wusste ich, dass Ingenieure in Unternehmen ganz vielfältige Möglichkeiten haben. Sie entwickeln Strategien und setzen die dann auch um.

Spektrum: Vor dem Studium absolvierten Sie den Wehrdienst.

Ungeheuer: Man wies mich einem Elitebataillon zu, dort hatte ich eine so anspruchsvolle Aufgabe, dass ich mich für weitere zwei Jahre verpflichtete und als Leutnant der Reserve ausschied.

Spektrum: UND was war das für eine Tätigkeit?

Ungeheuer: Ich war dort Zugführer im Panzerbataillon 14.

Spektrum: Warum lag Ihnen so viel daran, Verantwortung zu übernehmen?

Ungeheuer: Mein Vater starb, da war ich acht Jahre alt. Als der älteste Sohn musste ich seine Rolle teilweise übernehmen, auch Geld verdienen und Entscheidungen treffen. Das hat mich nachhaltig geprägt.

Spektrum: Machte sich diese Neigung auch während des Studiums bemerkbar?

Ungeheuer: Ja, ich habe mich stark in der Fachschaft Maschinenbau engagiert. Allerdings waren wir ziemlich konservativ und hatten mit den linken Studen-

tengruppen nichts am Hut. Einmal haben wir sogar einen Unistreik beendet: Alle 1200 Maschinenbaustudenten folgten unserem Aufruf ins Audimax und stimmten gegen eine Weiterführung.

Spektrum: Zwei Jahre nach dem Diplom wurden Sie Geschäftsführender Oberingenieur und Leiter der Forschungsgruppe »Montage und Fertigungstechnik« an der Hochschule. War das nicht eigentlich der Startschuss für eine Karriere an der Universität?

Ungeheuer: Das wäre sicher möglich gewesen, aber das wollte ich nie. Ein Büro im Elfenbeinturm – das passt nicht zu mir. Ich wollte schon immer gemeinsam mit anderen neue Entwicklungen in Gang bringen, die auch in Produkte münden. Ich war am Lehrstuhl für Produktionssystematik, und der finanzierte sich zu 30 Prozent durch Industrieaufträge. Damals lernte ich viel über Produktionssystematik und Betriebsorganisation, wovon ich mein ganzes Leben lang profitierte, mehr als von manchem Fachwissen. Für mich war es natürlich auch Glück, dass ich diese Stelle bekam und schon für 700 Mitarbeiter verantwortlich war, bevor ich den Dokortitel trug.

Spektrum: Sie sind dann 1986 zu BMW gegangen. Was veranlasste Sie dazu?

Ungeheuer: Ich habe mich gefragt, welchen Landstrich in Deutschland kennst du noch nicht (*lacht*). Nein, im Ernst: BMW galt als dynamisches Unternehmen mit guten Zukunftsaussichten. Und es



SCHOTT AG

In der Nähe von Granada (Spanien) hat das erste kommerzielle solarthermische Parabolrinnenkraftwerk Europas nach zwei Jahren Bauzeit den Testbetrieb aufgenommen. »AndaSol 1« wird von einem Gemeinschaftsunternehmen der spanischen ACS-Cobra-Gruppe und der Solar-Millennium-Gruppe, Erlangen, betrieben. Der internationale Technologiekonzern Schott hat mit den Receivern das Herzstück für das Kraftwerk geliefert. Schott ist weltweit Technologie- und Marktführer bei dieser Schlüsselkomponente. Sie wird in Deutschland und Spanien gefertigt, ab diesem Jahr auch in den USA. Das Kraftwerk »AndaSol 1« soll pro Jahr rund 180 Millionen Kilowattstunden klimafreundlichen Solarstrom produzieren. Das entspricht dem Bedarf von 50 000 Haushalten beziehungsweise 200 000 Menschen.

war die richtige Entscheidung, denn Jahr für Jahr durfte ich in den verschiedensten Bereichen immer mehr Verantwortung übernehmen. Ich leitete die technische Planung, die Logistik und den Versuchsfahrzeugbau. Wir haben viel Neues eingeführt, etwa den Leichtmetallbau, also Aluminiumlegierungen in Fahrwerk und Karosserie.

Spektrum: Also doch Forschung und Entwicklung?

Ungeheuer: Ja, aber ich sehe mich mehr als den Manager der Innovation, ich bringe Forscher zusammen und motiviere sie.

Spektrum: Aber dann haben Sie die Automobilbranche verlassen und wechselten zu einem Glashersteller. Ist das nicht ein ungewöhnlicher Schritt?

Ungeheuer: In der Tat, die Regel lautet: einmal Automobilbranche, immer Automobilbranche. Und ich hatte sehr gute Vorgesetzte und Kollegen. Aber ich kannte auch alles inklusive der Tricks, um etwas durchzusetzen. Und dann habe ich mich einfach gefragt: Willst du das auch die nächsten 20 Jahre machen? Und die Antwort war ganz klar: Nein.

Spektrum: Was war anders bei Schott?

Ungeheuer: Ich kam in ein traditionsreiches Stiftungsunternehmen mit eher langsamen Entscheidungsprozessen. Vor mir hatten nur Chemiker oder Glasexperten Führungspositionen inne. Die neue Situation war für beide Seiten erst einmal gewöhnungsbedürftig. Und einige hatten

wohl wirklich Zweifel, ob ich hier zu recht kommen würde. Man übertrug mir auch die Verantwortung für die Fernsehglasproduktion, die dann leider wirklich schließen musste, weil sie nicht mehr rentabel lief. Schott war noch nicht dynamisch genug auf neue Märkte ausgerichtet. Aber es gab auch unglaublich viel Wissen und Potenzial für Innovationen.

Spektrum: Und was konnten Sie daraus machen?

Ungeheuer: Das Tolle hier ist, dass ich immer ganz direkt sehen kann, wie aus Ideen Produkte werden, bei BMW hatte der Erfolg oft viele Väter. Schott hat sich in den vergangenen Jahren zu einem internationalen Technologiekonzern entwickelt. Unsere Innovationskraft ist explodiert, wir haben vorhandene Produkte für den Markt neu ausgerichtet. Wie zum Beispiel unsere in den 1970er Jahren entwickelten Ceran-Glaskeramikochflächen. Diese sind nicht nur für konventionelle Elektroherde, sondern auch für Induktion und Gas geeignet. Mit vielfältigen Designmöglichkeiten und Bedienoptionen gehören sie zum Standard moderner Küchen. Und: Dank weiterer Innovationen sind wir weltweit die Einzigen, die sie umweltfreundlich herstellen. Natürlich gibt es längst ganz andere Aktivitäten, etwa im Bereich thermischer Solaranlagen, für die wir die Receiver herstellen, also die Glasröhren mit einem Thermoöl, auf die Spiegel die Sonnenstrahlen lenken. Man kann bei

Schott viel bewirken und steckt dann auch gerne mal einen Misserfolg weg.

Spektrum: Sie sind jetzt Honorarprofessor an der Mainzer Fachhochschule. Ist das nun doch wieder eine Rückkehr in den Elfenbeinturm?

Ungeheuer: Nein, es ist vor allem eine Managementaufgabe. Ich wirke an der Ausbildung mit, gebe mein Praxiswissen weiter, vermittele Studenten Kontakte zu Unternehmen.

Spektrum: Und was raten Sie jungen Leuten, die noch nach dem richtigen Studium suchen?

Ungeheuer: Wichtig ist natürlich, sich über die eigenen Stärken und Schwächen klar zu werden. Betriebs- und Ingenieurwissenschaften haben viele Vorteile: Sie sind zukunftssicher und erlauben es, sich erst relativ spät zu spezialisieren. Wer weiß schon mit 19 ganz genau, wohin die Reise gehen soll?

Spektrum: Ich danke Ihnen vielmals für das Gespräch.

(Das Tonband wird abgeschaltet. Die Sekretärin schaut herein und erinnert ihn an seinen nächsten Termin.)

Ungeheuer: Und hatten Sie sich das Gespräch so vorgestellt?

Spektrum: Ja, durchaus, ich habe erfahren, was ich wollte.

Ungeheuer: Oh nein! Ich habe lediglich Ihre Erwartungen erfüllt! ◀

Die Fragen stellte **Bernhard Gerl**, freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.

400 Jahre fern sehen

Der offizielle Band zum Internationalen Jahr der Astronomie erzählt die Geschichte des Teleskops.

Schon 1608 hatten Optiker in den Niederlanden die ersten funktionsfähigen Fernrohre gebaut. Das älteste bekannte Dokument dazu ist der Patentantrag des deutschstämmigen Jan Lipperhey für sein »Instrument, um in die Ferne zu sehen«.

Zunächst waren die Fernseh-Geräte primär für die militärische Verwendung gedacht; die Niederlande befanden sich schon seit Jahrzehnten im Krieg mit Spanien. Als jedoch Galileo Galilei in Padua von den Instrumenten erfuhr, muss er sogleich ihre Bedeutung für die Himmelsbeobachtung erkannt haben. Er optimierte die Optik für seine Zwecke und richtete 1609 ein Fernrohr

Zwei Augen sehen mehr als eines: Die beiden 8,4-Meter-Spiegel des Large Binocular Telescope im Mount Graham International Observatory in Arizona erreichen via Interferometrie das Auflösungsvermögen eines 22,8-Meter-Teleskops.

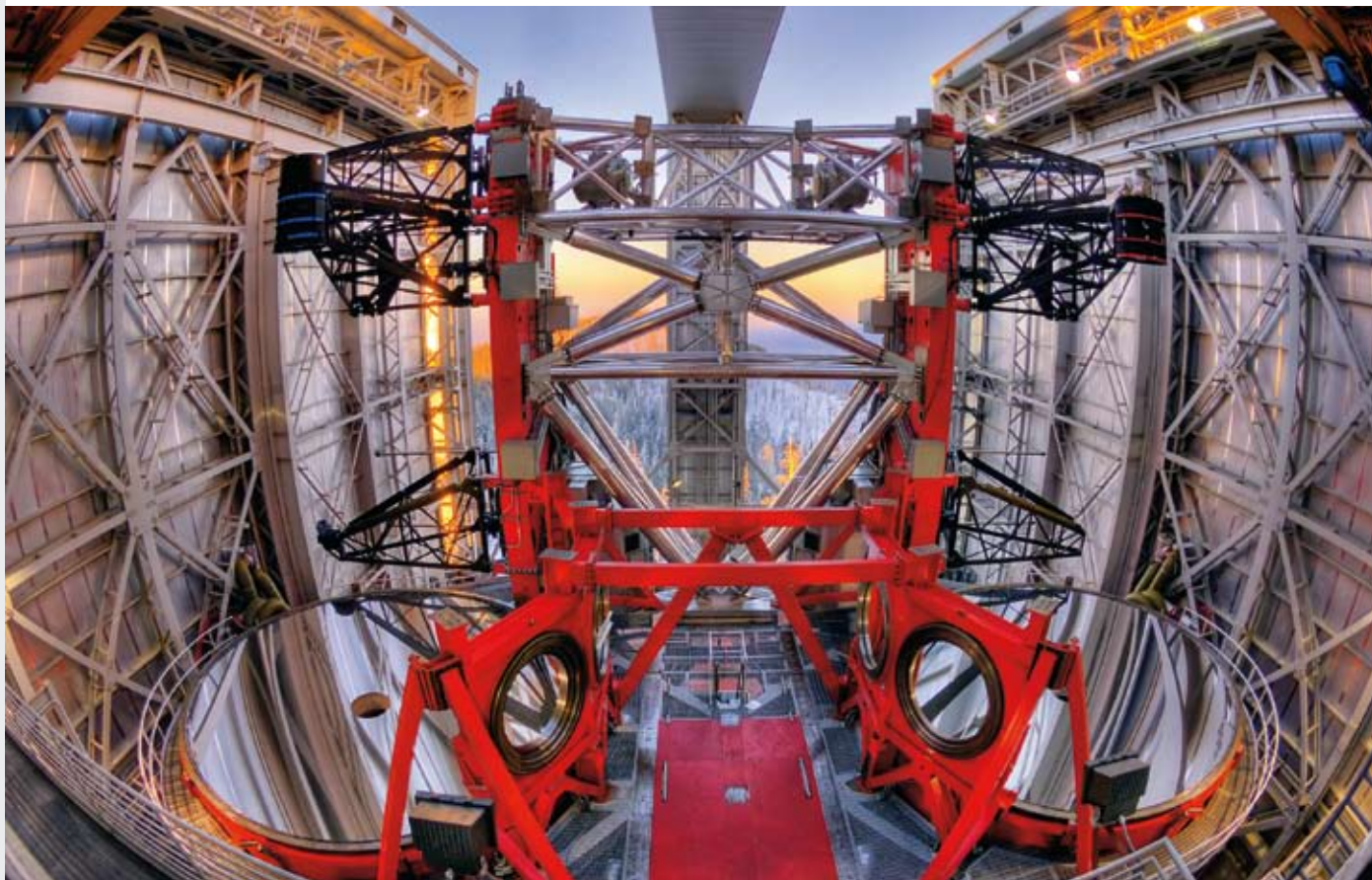
zunächst auf den Mond, wenig später auf die Planeten und erblickte dabei nie zuvor Gesehenes: Strukturen auf dem Mond, Phasen der Venus, vier Monde um Jupiter und die Henkel des Saturns, die sich später als Ringsystem herausstellten.

Die UNESCO nahm dies zum Anlass, 2009 zum Jahr der Astronomie zu deklarieren (www.astronomie2009.de). Die Internationale Astronomische Union (IAU) wählte den vorliegenden Band als offizielle Publikation aus, ebenso wie die darin enthaltene DVD, deren Inhalt dem des Buchs weitestgehend folgt. Sieben Kapitel beschreiben die Erfindung des Teleskops, seine Perfektionierung bis an die Grenzen des – zur jeweiligen Zeit – technisch Machbaren, den Sprung ins digitale Zeitalter, die Erweiterung auf andere Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums sowie Bau und Einsatz von Weltraumteleskopen und die Pläne für die Giganten der kommenden Jahrzehnte.



Buch und DVD richten sich an den interessierten Laien. Sie legen weder Wert auf Vollständigkeit, noch sind sie als Nachschlagewerke oder gar als Lehrmittel gedacht. Vielmehr beweist sich der bekannte niederländische Astronomiejournalist Govert Schilling einmal mehr als versierter Geschichten-erzähler. Großformatige Bilder begleiten die einzelnen Episoden, die DVD glänzt mit fantastischen Zeitrafferaufnahmen. Im Buch befassen sich kleine Infokästen mit speziellen Fassetten des Themas.

Insgesamt wird dem halbwegs kundigen Leser auffallen, dass an mehreren Stellen wichtige Beiträge deutscher Forscher und Instrumentenbauer nicht gewürdigt werden, von Johannes Kepler (1571–1630) über Joseph von Fraunhofer (1787–1826) bis hin zu Bernhard Schmidt (1879–1935), dessen Name nur bei der Nennung einzelner Teleskope im Buch auftaucht. Die Übersetzung hätte dringend der redaktionellen Bearbeitung bedurft. An zahlreichen Stellen hält der Text zwanghaft an amerikanischen Floskeln des Originals fest; neben einigen »false friends« tauchen manchmal Begriffe oder Eigennamen auf, bei denen die falschen Wortbestandteile übersetzt oder fälschlich im Original belassen wurden; in zahlreichen Passagen wird der ursprüngliche Sinn ver-



zerrt oder zumindest missverständlich wiedergegeben.

In diesem Punkt hinterlässt die etwa einstündige DVD einen besseren Eindruck. Sie stammt von demselben Team, das bereits 2005 mit einer Produktion zum 15-jährigen Dienstjubiläum des Weltraumteleskops Hubble eine hervorragende Arbeit abgeliefert hat.

Präsentator ist ein Astronom mit dem Spitznamen »Doctor J«, der dem Publikum bereits als Moderator der beiden Podcast-Reihen über das Hubble-Teleskop (wo übrigens auch die Kapitel aus der genannten Jubiläums-DVD zweitverwertet wurden) und von der europäischen Südsternwarte ESO bekannt ist. Es handelt sich um Joe Liske vom ESO Science Office für das E-ELT, das geplante europäische Riesenteleskop. In den Studiosequenzen spricht er englisch, während der Erzähler, der auch die weiteren Bilder und Filme erläutert, ihn simultan übersetzt. Eine rein deutsche Fassung besäße sicher einen höheren Genussfaktor – und wäre prinzipiell möglich gewesen, denn Joe heißt eigentlich Jochen und ist gebürtiger

Deutscher. Jedenfalls macht er seine Sache hervorragend: Mimik, Gestik und Intonation halten sich in sehr angenehmen Grenzen und wirken nicht so übertrieben und gekünstelt wie bei manchem Profimoderator.

Letztlich ist es das überwältigende Bildmaterial, das die DVD zu einem Erlebnis macht. Die schon erwähnten Zeitriffaufnahmen, aufwändige Animationen und faszinierende Bilder von Teleskopen an den besten Standorten der Erde und im Welt- raum ziehen den Betrachter in ihren Bann. Hierbei stehen das Wann, das Wo und das Wie im Vordergrund, die Erklärungen bleiben auf Einsteigniveau. Auf die zu Grunde liegende Physik wird weitestgehend verzichtet, auch der eigentlichen Astronomie und Astrophysik bleibt eher die Rolle als Bildgeber vorbehalten. Die Natur der einzelnen Objekte und die bei ihnen ablaufenden Prozesse werden nur flüchtig angerissen, ihre Vielzahl wird für den Leser oder Zuschauer kaum überschaubar.

Interessierte Laien oder gar Amateurastronomen, die sich neue Erkenntnisse oder ein Nachschlagewerk erhoffen, werden vom

Informationsgehalt des Werks enttäuscht sein, aber diesen Anspruch erhebt es auch nicht. Vielmehr soll die breite Öffentlichkeit einen Einblick in die Faszination der Astro- nomie als Forschungsbranche erhalten, wie – ansatzweise – auch als Hobby. Dieses Ziel wird sicher erreicht, nicht zuletzt durch die DVD, die in den meisten Belangen den Ver- gleich mit aufwändig produzierten BBC-Dokus nicht zu scheuen braucht.

Oliver Dreissigacker

Der Rezensent ist promovierter Astrophysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Mannheim. Falls es das Wetter im Oberrheingraben zulässt, richtet er gerne ein Kepler-Fernrohr, einen Fraunhofer-Refraktor, einen Newton-Reflektor oder ein Schmidt-Cassegrain-Teleskop gen Himmel.

Govert Schilling, Lars Lindberg Christensen

Unser Fenster zum Weltraum

400 Jahre Entdeckungen mit Teleskopen

Aus dem Englischen von Sybille Otterstein.

Wiley-VCH, Weinheim 2009.

132 Seiten, mit DVD-ROM, 24,90 €.

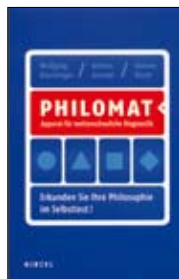
Website zum Buch und zur DVD:

www.eyesontheskies.org

PHILOSOPHIE

Erkenne dich selbst – ganz automatisch

Philosophie per Multiple-Choice-Verfahren funktioniert überraschend gut.



Eine Flut von »-O-maten« überschwemmt das Internet. Das Prinzip ist immer dasselbe: Beantworte ein paar Fragen, und ich sage dir, wer du bist. Der Wahl-O-Mat der Bundeszentrale für politische Bildung zeigt, welche Partei den eigenen Interessen entspricht, der Love-o-mat sagt, wie es in der Liebe aussieht, und der Ausred-O-Mat hilft, wenn sonst gar nichts mehr hilft. Und nun auch noch der Philomat, allerdings als Buch. Mit Multiple Choice zur philosophischen Selbstdiagnose. Das ist nicht so abwegig, wie es zunächst klingt; schließlich bediente sich bereits Sokrates der Mäeutik, der Methode, durch die richtige Frage die Wahrheit ans Licht zu bringen.

Wolfgang Buschlinger, Bettina Conradi und Hannes Rusch lehren in Braunschweig Philosophie und wollen mit ihrem Buch mehr Menschen für ihr Fach begeistern. Basis ihrer Analyse sind vier zentrale Fragen Kants. Diese teilen die Autoren wiederum in

zwölf konkrete Themengebiete, von der Frage nach der Existenz Gottes über das Verbot des Tötens bis hin zum Wesen der Sprache. Pro Thema erwarten den Leser zehn Fragen, bei denen er sich für eine der vorgegebenen Antworten entscheiden muss. Mit jeder Antwort gibt er ein wenig mehr über seine Grundeinstellungen preis. Ist er der hehre Idealist oder doch etwas mehr konsequenzialistisch veranlagt, als er sich eingestand? Was die Diagnose bedeutet, lässt sich so- dann in einem ausführlichen Glossar am Ende des Buchs nachlesen.

Dafür jedoch muss der Leser seine Antworten in – positive und negative – Punktzahlen umsetzen und diese aufaddieren. Was bei einem elektronischen Fragebogen ein Computerprogramm erledigt, gerät zu einem sehr umständlichen Münzenverschieben auf einer mitgelieferten Diagnosetafel, was den Lesefluss und damit auch den Spaß der Lektüre erheblich schmälert.

Doch wer sich auf das System einlässt, wird reich belohnt. So mischen die Autoren theoretische Fragen mit ganz konkreten Beispielen aus dem Alltag. Jeder wird grundsätzlich bereitwillig das Lügen missbilligen, aber wenn er eine Begründung dafür liefern soll, offenbart er doch einiges über sein individuelles Wertesystem. Was ist mit einer kleinen Notlüge? Ist diese nach dem Öffnen eines missratenen Geschenks nicht sogar angebracht, um den Schenker nicht zu brüskieren? Mehr noch als die zehn Fragen und möglichen Antworten regen die Diagnosen zum Reflektieren an. So vorläufig sie unvermeidlich sind, zeigen sie doch häufig, dass Selbstbild und tatsächliche Position auseinanderliegen – eine Erkenntnis, die nicht unbedingt schmerzlich sein muss, sondern auch neue Horizonte eröffnen kann.

Die Qualität des Diagnosesystems ist allerdings, abhängig vom Themenfeld, sehr gemischt. Naturgemäß ist es einfacher, die Ethik des Benutzers auf ihre Authentizität abzuklopfen, als seine Position bezüglich der Existenz der Seele in ein Fragenkorsett zu zwängen. Auch funktioniert das Wechselspiel zwischen theoretischen Fragen und konkreten Beispielen nicht immer reibungslos. Um zu sehen, wie der Leser das Strafmaß für einen Pädophilen bemessen würde, müssen die Autoren nicht den Namen eines

aktuellen Falls nennen. Sie hätten auch in einigen Fällen die klassischen Beispiele der Philosophie anführen können, so zur Fehlerbarkeit der Sinneswahrnehmung, die Platon zeitlos eingängig illustriert hat: Wenn ein Stock in einem Eimer Wasser steckt, scheint er geknickt zu sein.

Das Literaturverzeichnis ist gelungen, und das Glossar birgt wahre Schätze, wie eine süffisante Definition des Nihilismus oder die Erklärung von »Ontologie« anhand von Mobilien. Aber das Niveau schwankt noch stärker als im Diagnoseteil. Die Autoren bringen umgangssprachliche Definitio-

nen von Egoismus und Pragmatismus, lassen aber Termini wie Intersubjektivität oder Fatalismus unerklärt.

Wer sich auf den Philomaten einlässt, lernt einiges über sich selbst. Unweigerlich bleiben bei einem derart anspruchsvollen Thema Fragen offen; aber der Leser bekommt das Rüstzeug mitgeliefert, ihnen nachzugehen.

Ein Automat ist etwas Mechanisches; das griechische *mechanasthai* bedeutet »künstlich verfertigen«, aber auch »listig ersinnen« und »vortäuschen«. Der »Philomat« täuscht aber nichts listig vor, ganz im

Gegenteil, er hilft bei der Selbsterkenntnis. Trotz mancher Kritikpunkte lösen die Autoren ihren Anspruch ein, ihre Begeisterung für die Philosophie weiterzugeben.

Stefan Keilmann

Der Rezensent hat Philosophie und Germanistik studiert; er ist freier Journalist in Hamburg.

Wolfgang Buschlinger, Bettina Conradi und Hannes Rusch

Philomat

Apparat für weltanschauliche Diagnostik
Hirzel, Stuttgart 2009. 232 Seiten, € 24,-

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Ein Monumentalwerk mit Briefmarken

Hans Wußing kultiviert in seiner großen Geschichte der Mathematik auch die kleinformigen Bildwerke.

Nach »4000 Jahre Algebra« von Heinz-Wilhelm Alten und anderen wirkte »5000 Jahre Geometrie« von Christoph Scriba und Peter Schreiber im Jahr 2005 auf den ersten Blick wie der Versuch, den

Geometrische Muster zeugen von dem Einfluss persischer Mathematiker. Das Bild zeigt eine Mihrab (Gebetsnische) in der Lutfullah-Moschee in Isfahan.

Titel des vorher erschienenen Bands zu übertreffen: Die Algebra mag ja alt sein, aber die Geometrie ist noch älter ... Wenn nun, noch einmal drei Jahre später, abermals im Springer-Verlag »6000 Jahre Mathematik« erscheint, mag dies kurios erscheinen. Aber zutreffender hätte der Titel kaum gewählt werden können.

Die Neuerscheinung, deren erster Band »eine kulturgeschichtliche Zeitreise von den Anfängen bis Leibniz und Newton« ent-

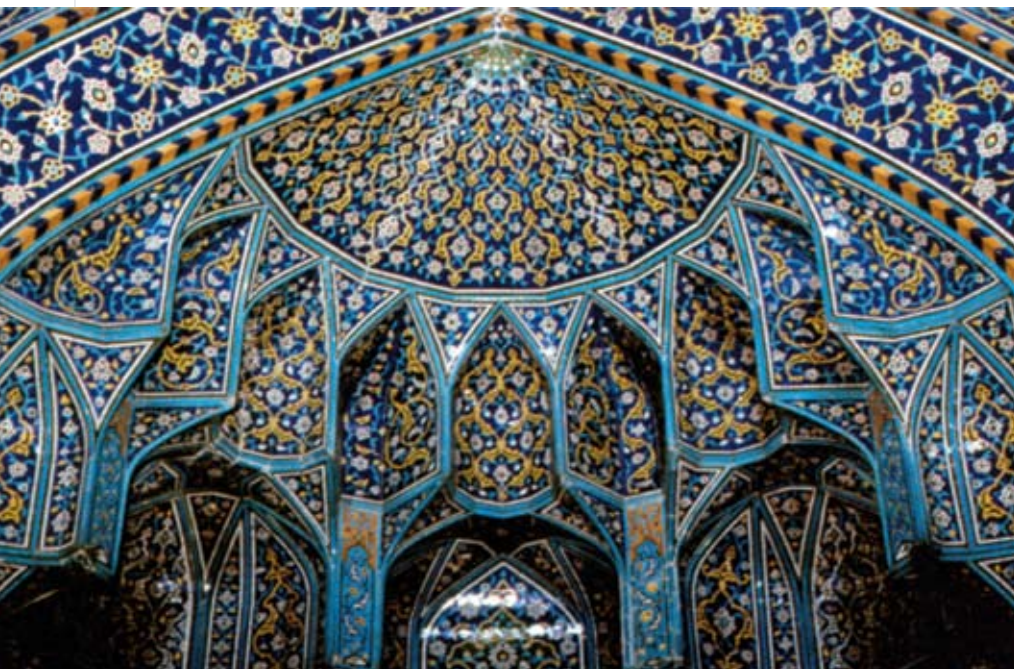


hält, beschäftigt sich eben nicht nur mit der Entwicklung der Algebra und der Geometrie, sondern auch mit anderen Gebieten, wie beispielsweise der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Der international bekannte und anerkannte Mathematikhistoriker Hans Wußing, Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften, hat mit »6000 Jahre Mathematik« so etwas wie die Krönung seines Lebenswerks vorgelegt.

Ich kannte ihn von seiner »Wissenschaftsgeschichte en miniature«, die er gemeinsam mit Horst Remane 1989, unmittelbar vor der »Wende«, im VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften veröffentlicht hatte. Mit »en miniature« waren die Darstellungen auf Briefmarken gemeint; ich gestehe, dass mich dieses Vorbild zu meinen monatlich unter www.spektrum.de erscheinenden Kalenderblättern angeregt hat. Diese besonderen Zeugen der Wissenschaftsgeschichte finden sich in großem Umfang auch in »6000 Jahre Mathematik«, in hervorragender Qualität und sorgfältig dokumentiert.

Man wird beim Durchblättern sicherlich an den Briefmarken hängen bleiben, vielleicht, weil man sie schon selbst verklebt hat; aber ebenso faszinierend sind die zahlreichen, meist farbigen Abbildungen von Persönlichkeiten und Gebäuden, Karten, historischen Mess- und Zeichengeräten sowie Zeichnungen geometrischer Figuren. Die Ausstattung des Buchs mit Bildern ist ungewöhnlich und erfreulich großzügig: Eine Abbildung erregt die Aufmerksamkeit, man studiert die Bildunterschrift, sucht den Bezug zum Text und hat schon vergessen, dass man eigentlich nur blättern wollte ...

Einerlei, wo man anfängt zu lesen, es ist stets ein spannendes Vergnügen; man erfährt etwas über die Zeit, über die handelnden Personen, über die Einflüsse und Bedin-



gungen, unter denen sie ihre schöpferischen Leistungen erbrachten.

»6000 Jahre Mathematik« gibt nicht nur einen umfassenden Überblick über die Geschichte dieser Wissenschaft, sondern zeigt abwechslungsreich ihre Wechselwirkung mit der kulturellen und gesellschaftlichen Entwicklung auf, ebenso ihre Beziehung zur Astronomie, zur Architektur und zur bildenden Kunst. Dem im Untertitel formulierten Anspruch »kulturgeschichtlich« wird dieses Buch uneingeschränkt gerecht.

Wußing geht in seinem Buch nicht durchgehend chronologisch vor; vielmehr beschäftigen sich die ersten Kapitel mit den Azteken, Maya und Inka, den Chinesen, Japanern und Indern, bevor er zu den Anfängen »unserer« Mathematik in Ägypten und Mesopotamien kommt. Nach der Mathematik in griechisch-hellenistischer Zeit, in den Ländern des Islam und im europäischen Mittelalter folgen Kapitel über die Mathematik während der Renaissance und während der wissenschaftlichen Revolution.

Am Kapitel »Mathematik in den Ländern des Islam« sei beispielhaft die Vielfalt der behandelten Aspekte dargestellt. Eine Zeitafel zählt wichtige historische Ereignisse auf, von der Hedschra im Jahr 622 bis zum Untergang des maurischen Königreichs auf spanischem Boden 1492 und der Eroberung Kairos durch die Türken 1517. In dem folgenden »historischer Überblick« beschreibt Wußing die Entstehung des Islam ebenso wie die Entwicklung des arabischen Groß-

reichs und seine Zersplitterung in Teilreiche. Die übliche Bezeichnung »arabische Mathematik« sei gleichwohl nicht angemessen, weil sie die Beiträge der »Perser, Usbeken, Tadschiken, Turkmenen, Juden und anderer Völker« vernachlässige.

Zu Beginn des 9. Jahrhunderts wurde in Bagdad das »Haus der Weisheit« gegründet. Es folgten weitere kulturelle Zentren wie der »Wohnsitz der Weisheit« um 1000 in Kairo sowie in späteren Jahrhunderten Zentren der Wissenschaft in Isfahan, Buchara, Samarkand, Córdoba und Toledo.

Das nächste Teilkapitel widmet Wußing den für diese Zeit typischen Universalgelehrten, von al-Kindi (um 800 – um 870) bis Ibn Chaldun (1332 – 1406), bevor er sich mit Muhammad Ibn Musa al-Hwarizmi (um 780 – um 850), seiner Algebra sowie seiner Übernahme des indischen Zahlensystems beschäftigt. Omar Khayyam (um 1048 – um 1131), al-Tusi (um 1135 – 1213) und al-Kashi (um 1380 – 1429) entwickelten über die Jahrhunderte die Algebra fort.

Weitere Teilkapitel gehen auf die Entwicklung des Zahlbegriffs und die Beiträge islamischer Mathematiker zur Geometrie ein. Den Abschluss bilden Hinweise auf neuere Forschungsergebnisse und eine Zeitafel mit Angabe der wichtigsten mathematischen Themen, mit denen sich islamische Mathematiker beschäftigten.

Natürlich gibt es zahlreiche Überschneidungen mit den beiden oben genannten Werken zur Mathematikgeschichte; bei ge-

nauem Hinsehen findet man auch etliche wörtliche Übernahmen – nicht verwunderlich, denn Hans Wußing war Mitautor der »4000 Jahre Algebra«.

Das Buch ist übersichtlich gegliedert; am Ende oder am Anfang jedes Kapitels findet man Tabellen zur ersten Orientierung oder zur Zusammenfassung. Hilfreich für die Suche und für weitere Lektüre sind das umfangreiche Literaturverzeichnis, das Verzeichnis der Abbildungen, ein Sachverzeichnis sowie ein Personenverzeichnis mit Lebensdaten.

Wußings Absicht war es nicht, ein Lehrbuch zur Geschichte der Mathematik zu verfassen, sondern er wollte mit dem Buch auch andere Interessierte ansprechen. Dies ist ihm, auf teilweise sehr unterhaltsame Weise, gelungen.

Inzwischen ist der zweite Band von »6000 Jahre Mathematik« erschienen. Damit ist deutlich geworden, dass das hohe Niveau des ersten Bands aufrechterhalten werden konnte.

Heinz Klaus Strick

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

Hans Wußing

6000 Jahre Mathematik

Eine kulturgeschichtliche Zeitreise
1. Von den Anfängen bis Leibniz & Newton
Springer, Berlin 2008. 529 Seiten, € 29,95

www.fischerverlage.de

Martin Bojowald liest und erklärt:
11. Mai, Berlin, Urania, 19.30 Uhr
13. Mai, Tübingen, Kupferbau, 20.00 Uhr

Es gab keinen Urknall

Bislang war der Urknall der Anfang des Universums. Doch nun ist es dem jungen deutschen Physiker Martin Bojowald gelungen, Einblick in die Zeit davor zu erhalten. Was war vor dem »big bang«? Wie sah das Universum aus? Und was bedeutet das für seine Zukunft? Ein spektakuläres Buch, das unsere Vorstellung vom Universum und seinem Anfang revolutioniert.

352 Seiten, gebunden, € (D) 19,95; sFr. 34,90 (UVP) Ein Buch von S. FISCHER



MARTIN BOJOWALD

ZURÜCK
VOR
DEN URKNALL
Die ganze Geschichte
des Universums

S. FISCHER



ZOOLOGIE

Das abenteuerliche Leben der Honigbienen

Summs erzählt den Menschenkindern ihr ganzes Leben, vom Ei bis zur Winterruhe.

Es gibt gute Gründe, Kindern die Biologie der Honigbiene frühzeitig nahezubringen. Unzweifelhaft ist das Thema von großer ökologischer und wirtschaftlicher Bedeutung, auch wenn Honig heute nicht mehr das einzige Süßungsmittel ist. Manche Kinder können die Imkerei auch in der eigenen Familie erleben, denn mehr als 80 Prozent der Imker in Deutschland betreiben ihr Geschäft nebenberuflich und sind von dem großräumigen Bienensterben der letzten Jahre unmittelbar betroffen. Vor allem aber verfügen Kinder gerade im Grundschulalter über große Neugier und gute Beobachtungsgabe, so dass schon in diesem Alter die Basis für das Verständnis biologischer Zusammenhänge gelegt werden kann – so es denn kindgemäß präsentiert wird.

In dieser Hinsicht hat Vera Trachmann ein wahres Musterstück vorgelegt. »Summs und die Honigbienen« ist weder ein trockenes Sachbuch noch ein Märchen nach dem Vorbild der »Biene Maja«; aber es steckt voller spannender Geschichten, und zwar aus dem echten, abenteuerlichen Leben jeder Honigbiene. Aus der Sicht der Biene Summs können die Kinder das Leben einer Honigbiene über ein ganzes Jahr verfolgen, von der Ablage eines Eis durch die Bienenkönigin im Frühjahr bis zur Winterruhe des Bienenvolks. Summs berichtet über ihre wechselnden Aufgaben im Stock, von ihrer Arbeit als Putz-, Ammen- und Wächterbiene bis hin zur Sammlerin und Kundschafterin. Auch auf den Hochzeitsflug einer jungen Königin nimmt uns die Erzählerin mit und berichtet zum Schluss von der Kooperation zwischen Imker und Bienenvolk.

Damit ein Kind sich mit der erzählenden Biene identifizieren kann, sind gewisse Vermenschlichungen nicht zu vermeiden. So wird das Leben im Bienenstock mit dem von



Summs wird Baubiene und baut Waben: »Kleine ... Wachsplättchen, die aus meinem Unterbauch kommen, nehme ich mit den Beinen auf und bringe sie an den Mund.«

Familien in einem Mehrfamilienhaus und ihren täglichen Arbeiten verglichen. Schön und sogar biologisch korrekt ist die Beschreibung, wie Summs versucht, für ihre Aufgabe als Wächterbiene so richtig gefährlich auszusehen, oder wie sie sich auf ihre erste Landung am Stock vorbereitet, um sich nicht mit einer Bruchlandung zu blamieren. Manchmal schummelt sie auch bei ihrer Erzählung ein bisschen, um sich selbst in ein gutes Licht zu setzen, wird dann aber von einem mahnenden Zwischenkommentar auf den Boden der Tatsachen zurückgeholt.

Eingestreut in den erzählenden Text finden sich Kästen, die das Handeln der Bienen biologisch erklären. Einen solchen Kasten hätte ich mir auch in dem wichtigen Kapitel zum Stechen zu Beginn des Buchs gewünscht: zur Wirkung des Bienengifts.

Sehr schöne Fotos unterstützen die Erzählungen. Vermisst habe ich hier nur das Foto einer Biene beim Tanz, die von den sie umgebenden Bienen mit den Fühlern verfolgt wird.

Das Buch ist hervorragend zur Unterstützung des Sachkundeunterrichts in der Grundschule geeignet. Immer wieder stellt Summs nach einer längeren Erzählung Fragen, mit denen die Lehrerin den soeben gebrachten Stoff abprüfen kann. Auch wenn eine Schule bei diesem Preis schwerlich einen ganzen Klassensatz anschaffen wird,

kann man es im Unterricht mit wenigen Exemplaren durch Vorlesen und auch »Nachspielen« einzelner Episoden didaktisch geschickt einsetzen. Die Zweisprachigkeit des Buchs – auf jeder Seite stehen sich deutscher und englischer Text gegenüber – macht das Buch besonders geeignet für den Einsatz in Schulen, die Englisch als Fremdsprache vermitteln.

An manchen Stellen schießt das – zweifellos notwendige – Bemühen um kindgerechte Vereinfachung über das Ziel hinaus. Ausgerechnet der Würzburger Bienenforscher Jürgen Tautz, der es besser wissen müsste, behauptet im Vorwort, dass es ohne Blüten keine Bienen und ohne Bienen keine Blüten gäbe. Auch wenn bei uns heute etwa 84 Prozent aller Blütenpflanzen von Bienen befruchtet werden, können auch andere Insekten und sogar Vögel und Fledertiere als Bestäuber dienen, und die entwicklungsgehistorisch ersten Tiere, die solches taten, waren wahrscheinlich Pollen fressende Käfer. Ohne die Koevolution mit der Biene würden die Blüten wohl anders aussehen – aber es gäbe sie bestimmt dennoch. Und auch die Albert Einstein zugeschriebene Aussage »keine Bienen mehr, keine Bestäubung mehr, keine Pflanzen mehr« würde nur auf Blütenpflanzen zutreffen und verschleiert obendrein die Tatsache, dass das wichtigste Grundnahrungsmittel des Menschen, das Getreide, vom Wind bestäubt wird.

Natürlich gibt es auch kleine Unstimmigkeiten innerhalb der Texte: So kann Süßes auch von der Biene nicht über weite Entfernungen »gerochen« werden; und der Text spricht von »Blütenstaub und Pollen«, als ob das zweierlei wäre.

Solche kleinen Schnitzer tun der Qualität des Buchs insgesamt jedoch keinen Abbruch. Hier wird für Kinder im Grundschulalter biologisches Wissen auf unterhaltsame und spannende Weise vermittelt – und sicher werden auch manche Eltern davon profitieren.

Irmgard Meißl

Die Rezensentin hat über das Lernen von Düften durch Honigbienen promoviert und war lange Jahre Lektorin in dem naturwissenschaftlich ausgerichteten Aula-Verlag.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Vera Trachmann

**Summs und die Honigbienen /
Buzz and the Honeybees**

Übersetzung in das Englische von Ros Mendy.
Schlauberger, Rheine 2008.
132 Seiten, € 23,90

Enceladus – Saturns seltsamster Mond

Der Eistrabant hat aktive Geysire und vermutlich einen verborgenen See, in dem Leben gedeihen könnte



RON MILLER

WEITERE THEMEN IM JUNI

Was ist Mathematik?

Der Wissenschaftsphilosoph Bernulf Kanitscheider untersucht die Frage, ob Mathematik eine Geistes- oder eine Naturwissenschaft ist

Limantepe

Südlich von Troja, auf der Halbinsel vor dem heutigen Izmir, entstand die erste Hafenstadt Kleinasiens im Ballungsraum der Bronzezeit

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



FOTO: DAVID BHMITE; PHOTOLLUSTRATION: GEORGE RETSECK

Quantencomputer mit Ionen

Forscher entwickeln erste Schritte für ultrastarke Computer auf Basis der Quantenphysik. Ihr Verfahren stützt sich auf einzelne Ionen, mit denen sie die Berechnungen durchführen



MISHA GRAYENOR

Meister der Illusion

Zauberer nutzen seit Jahrhunderten Schwächen der menschlichen Wahrnehmung und Aufmerksamkeit für ihre Tricks. Was können Neurowissenschaftler von ihnen lernen?