

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SERIE DARWIN
(TEIL II)

EVOLUTION
DIE MISSVER-
STÄNDNISSE

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC
AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

02/09

FEBRUAR 2009

MUSIK

Was verleiht der menschlichen Stimme ihre Kraft?

SERIE MATHEMATIK (TEIL V)

Die hartnäckige ABC-Vermutung

GEOLOGIE

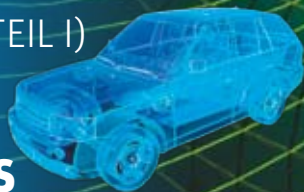
Apokalypse im Rheintal

Der fraktale Quantenkosmos

Auf der Suche nach den Quanten der Raumzeit

SERIE AUTO (TEIL I)

**MIT NANO
BESSER
UNTERWEGS**



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



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur



Gralssuche: die Quanten und der Urknall

Warum dauert das alles so lange? Auch entspannte Gemüter könnte es verwundern, dass manche Prozesse in der Forschung quälend viele Jahre brauchen. Ich meine die Suche nach dem Gral der physikalischen Forschung: die Vereinigung aller Naturkräfte, insbesondere die ausstehende Verschmelzung von Quantenphysik und Gravitation.

Dass Dinge ihre Weile brauchen, mag auf ihre Komplexität verweisen. Nicht allen Vorhaben, zu denen sich der menschliche Forschergeist genötigt sieht, ist er offenbar auch wirklich gewachsen. Dabei ging es zu Beginn des 20. Jahrhunderts eigentlich ziemlich flott los. In nur einem Jahrzehnt hatte Albert Einstein 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie im Griff, und 1927 war auch die Quantenphysik weit gehend etabliert. Selbst das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, das die elektromagnetischen mit den beiden Kernkräften vereinigt, konnten die Physiker in den 1970er Jahren einführen.

Doch kurz vor dem finalen Triumph der »Theorie für Alles«, einst von Heisenberg als »Weltformel« angekündigt, drohen Teilchenforscher im Dickicht ihrer Formeln unterzugehen. Versprechungen und Hoffnungen auf die Vereinigung aller Naturkräfte (inklusive der Gravitation) werden immer wieder geweckt, zumal von der Stringtheorie. Aber selbst nach Jahrzehnten des Schweißes der edelsten Denker dieses Planeten sind, wie es in einem Vortrag kürzlich hieß, dabei gerade mal »Baustellen« zu besichtigen; nicht zu reden von der Kritik, dass die Stringtheorie bisher kaum prüfbar Vorhersagen anbieten kann.

Ein Ziel der Quantengravitation wäre, die mathematisch unvermeidlichen, physikalisch aber inakzeptablen Singularitäten in der Raumzeit zu umgehen – doch dies scheint im Rahmen der Stringtheorie noch nicht einmal vernünftig formulierbar. Besser können das Theorien, die sich dem Thema direkter nähern, wie etwa die Schleifen-Quantengravitation. Ihr gelingt es jedenfalls inzwischen schon, die Urknallsingularität zu vermeiden und den Urknall als extremes, aber mathematisch endliches Zwischenstadium darzustellen. Fachleute sprechen vom »Big Bounce« (wörtlich »großer Rückprall«) – was selbst wieder viele neue Fragen an die Kosmologie aufwirft. Auch ein Zusammenschluss mit der Theorie der Kernkräfte steht noch aus.

Doch vielleicht existiert ein dritter Weg.

Drei Forscher – eine Deutsche, ein Däne und ein Pole – beschreiben ihn in ihrem Artikel über das »selbst organisierte Quantenuniversum«. »Wir folgen einem fast peinlich simplen Rezept«, bekennen die Theoretiker. »Ein paar einfache Zutaten«, einmal kräftig umgerührt, und »fertig ist die Quantenraumzeit«.

Das klingt verwegen, gerade nach so vielen Jahrzehnten der Quälerei mit der Quantengravitation. Die vorläufigen Resultate finde ich beeindruckend (S. 24). Aber ob sich damit schon der Königsweg auftut, kann erst die Zukunft zeigen. Vermutlich sollte man sich auch hier lieber mit Geduld wappnen. Lassen wir uns überraschen!

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



32

ASTRONOMIE & PHYSIK
Elektronenjagd mit Attosekundenblitzen



46

MEDIZIN & BIOLOGIE
Missverständnisse um die Thesen von Charles Darwin



54

MEDIZIN & BIOLOGIE
Die menschliche Stimme:
erstaunlich laut und vielseitig

AKTUELL

10 Spektrogramm

Neidische Hunde · Anlasser des Golfstroms · Immunschwäche-Virus in Affengenom · Glück ist ansteckend · Tychos Supernova neu beobachtet u. a.

13 Bild des Monats

Kuschelige Nanowürmer

14 Tiefbohrung im größten Meteoritenkrater der USA

Rekonstruktion eines Meteoriteneinschlags vor 35 Millionen Jahren

16 Wie kosmische Strahlung ausgebremst wird

Mikrowellenhintergrund verlangsamt höchstenergetische Strahlungsteilchen

21 Kalt erwischt

Ausreißer oder Trendwende? Warum das Jahr 2008 relativ kühl war

22 Springers Einwürfe

Rätsel um die Evolution des Afters

ASTRONOMIE & PHYSIK

TITEL

24 Das fraktale Quantenuniversum

Wie sich Quantenbausteine der Raumzeit wie von selbst zusammenfügen, zeigt ein neuer Ansatz zur Theorie der Quantengravitation

32 Blitze in Attosekunden

Mit ultrakurzen Laser- und Röntgenpulsen lassen sich Elektronen in Echtzeit verfolgen – Chancen für eine Geschwindigkeitsrevolution in der Computertechnik

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

42 Tycho Brahes Weltbild

Die Sonne läuft um die Erde und alle Planeten um die Sonne? Die Idee passt perfekt zur Realität – allerdings nicht zu Newtons Himmelsmechanik

MEDIZIN & BIOLOGIE

SERIE (TEIL II) EVOLUTION

46 ► Missverständnisse um Darwin

Darwins Evolutionstheorie gilt heute als Tatsache. Doch einige seiner Thesen sind immer noch umstritten. Was hat Darwin wirklich gesagt?

54 ► Das Saitenblas-Instrument

Wieso kann der Mensch mit seinem kleinen Vokaltrakt so vielseitige und auch laute Klänge erzeugen?

ESSAY

62 ► Wie aus Tönen Sprache wird

Um zu verstehen, wie Menschen ihre Laute mit Inhalten verknüpfen, sollten wir zuerst verstehen, wie unser Hirn Musik verarbeitet

Titelmotiv: Jean-François Podelvin

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

TITEL

Der fraktale Quantenkosmos

24

MENSCH & GEIST

SERIE (TEIL V)
DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

70 ► Die ABC-Vermutung

Hinter der unschuldigen Gleichung $A + B = C$ verbirgt sich eine Behauptung von größter Tragweite. Aus ihr würden die schwierigsten Sätze der Zahlentheorie folgen – wenn man sie denn beweisen könnte

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Gralssuche – die Quanten und der Urknall
- 8 Leserbriefe / Impressum
- 69 Im Rückblick
- 106 Vorschau

ERDE & UMWELT

78 ► Apokalypse im Rheintal

Beim Ausbruch eines Eifelvulkans vor 12900 Jahren stauten Glutlawinen den Rhein nahe Koblenz zu einem riesigen See, der vermutlich bis nach Mannheim reichte. Als der Damm brach, schoss eine zehn Meter hohe Flutwelle durch das Flusstal

100 Rezensionen:

- Fred Pearce *Die Erde früher und heute*
- S. Dech, R. Glaser, R. Meisner *Globaler Wandel*
- Thomas und Brigitte Görnitz *Die Evolution des Geistigen*
- Stephan Schleim *Gedankenlesen*
- Thomas Bührke, Roland Wengenmayr (Hg.) *Erneuerbare Energie*
- Dan Ariely *Denken hilft zwar, nützt aber nichts*



78

ERDE & UMWELT

Vulkanausbruch blockierte den Rhein



90

TECHNIK & COMPUTER

Nanotechnologie für das Auto

TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

88 Wärmepumpen

Wie sich damit selbst bei Kälte ganze Häuser heizen lassen

SERIE (TEIL I) AUTOS DER ZUKUNFT

90 ► Wie Nano das Auto verändert

Längst haben Nanowissenschaftler vielfältige anwendungstaugliche Neuerungen für das Auto hervorgebracht – und noch viele Pläne in der Schublade

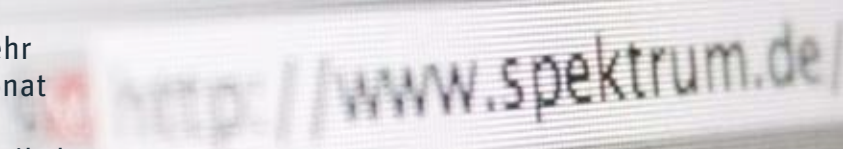
WISSENSCHAFT & KARRIERE

98 »Mit Begeisterung motivieren«

Der Vorstand und Forschungssprecher der BASF, Andreas Kreimeyer, organisiert 1250 Forscher

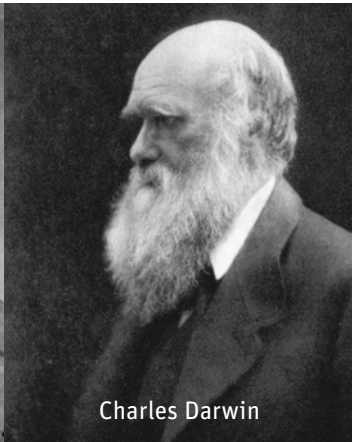
ONLINE

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!



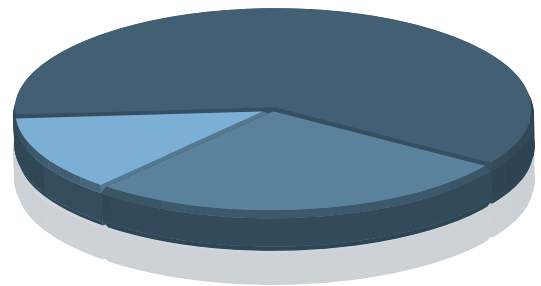
Werner Heisenberg

DEUTSCHES BUNDESARCHIV / WIKIPEDIA



Charles Darwin

JULIA MARGARET CAMERON / PUBLIC DOMAIN



Spektrum der Wissenschaft

SPEKTRUMDIREKT Die Großen der Forschung
www.spektrumdirekt.de/rueckblick

INTERAKTIV Sie haben gewählt!
www.spektrum.de/artikel/975115

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Auf der Suche nach fremden Erden

Zwar kreisen sie, wie wir erst seit wenigen Jahren wissen, in allen »Ecken« der Galaxis. Doch sie faszinieren mehr denn je: An Exoplaneten können wir unsere fortgeschrittenste Beobachtungstechnik erproben, dort finden wir Hinweise auf die Entstehung unseres eigenen Sonnensystems, und nicht zuletzt treibt die Forscher der Wunsch, eine zweite Erde zu finden

www.spektrumdirekt.de/exoplaneten

Die Großen der Forschung – gestern und heute

Wissenschaft lebt von großen Entdeckungen. Doch wer und was steckt dahinter? Anlässlich wichtiger Jahrestage wirft »spektrumdirekt« für Sie einen Blick zurück: auf Menschen, Techniken und einflussreiche Ereignisse

www.spektrumdirekt.de/rueckblick

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Im Gespräch mit Autoren und Redakteuren

Spektrum
TALK



Arvid Leyh holt die Experten ans Mikrofon und interviewt sie im »Spektrum Talk« zu ausgewählten Artikeln aus dieser Ausgabe. Hören Sie rein!

www.spektrum.de/talk

»Spektrum« und darüber hinaus

Unser Magazin kennen Sie. Doch Sie wünschen sich (noch) mehr Berichte aus Psychologie und Hirnforschung, Geschichte und Archäologie, Chemie und Medizin? Gehen Sie online: Das Wissenschaftsportal des »Spektrum«-Verlags verschafft Ihnen den vollständigen Überblick auf

www.wissenschaft-online.de



INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Sie haben gewählt!

Fünf Themen hatten wir zur Wahl gestellt. Sie haben nun entschieden, und wir haben einen Gewinner ausgelost. »Spektrum«-Chefredakteur Reinhard Breuer über das spannende Ergebnis

www.spektrum.de/artikel/975115

Plaudern über Evolution – (k)ein fischiges Vergnügen

Klein, bunt, artenreich und mit faszinierendem Verhalten: Buntbarsche haben vieles zu bieten. Und wer könnte darüber besser erzählen als der Evolutionsbiologe Axel Meyer. Ein bisschen mehr Struktur im Hörbuch »Algenraspler, Schneckenknacker, Schuppenfresser« hätte aber nicht geschadet. Lesen Sie unsere Rezension oder stellen Sie die CD selbst vor

www.spektrumdirekt.de/artikel/975778



UWE REICHERT

FÜR ABONNENTEN »Die Zyklen des Himmels entdecken«

www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Die Zyklen des Himmels entdecken«

Was ist die astronomische Ursache der Jahreszeiten? Warum geht der Mond mal im Nordosten, mal im Südosten auf? Antworten auf diese und ähnliche Fragen kann man auf spielerische Weise und spannende Art an einem Relikt des Ruhrgebiet-Bergbaus finden: der Halde Hoheward mit dem 2008 errichteten Horizontalobservatorium

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Sterne und Welt-
raum** und **epoc** kostenlos online lesen

»Echos aus der Vergangenheit«

Einem internationalen Forscherteam gelang es, das Spektrum der berühmten Supernova des Jahres 1572 im reflektierten Licht aufzunehmen und zu klassifizieren

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

www.astronomie-heute.de/artikel/977631

»Atlantis in der Nordsee«

Vor 8000 Jahren streiften unsere Vorfahren durch die fruchtbaren Wiesen von »Doggerland« – einer längst versunkenen Landbrücke zwischen England und Dänemark

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

www.epoc.de/artikel/977034



FREIGESCHALTET

»Atlantis in der Nordsee«

www.epoc.de/artikel/977034

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

Tiefer geschürft

Die Erderwärmung, die Pisa-Studie und der – natürlich streng wissenschaftlich-analytische – Vergleich zwischen dem FC Bayern und 1899 Hoffenheim waren die Themen der meistgelesenen Blogposts auf wissenslogs.de, zumindest bei Redaktionsschluss. Wer tiefer gräbt, wird ebenfalls fündig: Der Ernährungswissenschaftler Hans Konrad Biesalski von der Universität Hohenheim, der den Zusammenhang zwischen Gesundheit und Ernährung erforscht, stößt auf begeisterte Leser, die Physikerin Mierk Schwabe widmet sich Innenansichten aus dem Wissenschaftsbetrieb, und der Quantenmechaniker Joachim Schulz kommentiert am liebsten »Nature«-Beiträge und gelegentlich sogar einmal einen »Spektrum«-Artikel. Lesen Sie mit, diskutieren Sie mit – online unter

www.wissenslogs.de

www.scilogs.de

Keineswegs emissionsfrei

Ökostädte der Zukunft, Januar 2009

Masdar ist zweifellos ein interessantes Projekt. Emissionsfrei wird die Stadt allerdings nicht sein, denn sie soll durch den so genannten *Clean Development Mechanism* (CDM) des Kioto-Protokolls finanziert werden. Dafür werden die eingesparten Treibhausgas-Emissionen zertifiziert; diese *Certified Emissions Reductions* können verkauft werden und berechtigen den Käufer, dieselbe Menge Treibhausgas zu emittieren.

Um die Reduktionsleistung zu berechnen, wird geschätzt, wie viel eine »normale« Stadt in derselben Region emittieren würde. Im Fall von Masdar wird das sehr viel sein, weil die Vereinigten Arabischen Emirate der Staat mit den weltweit zweithöchsten Pro-Kopf-Emissionen sind.

Die (hypothetisch) eingesparten Emissionen Masdars werden also an anderen Orten auf der Welt (tatsächlich) freigesetzt. Weil die CDM-Methodologie Emissionsreduktionen systematisch zu hoch bewertet (da so genannte Rebound-Effekte ignoriert werden), werden unter dem Strich sogar mehr Gase emittiert als eingespart.

Dasselbe gilt für Dongtan, wobei freilich die chinesischen Pro-Kopf-Emissionen viel niedriger liegen.

Marcel Hänggi, Zürich

Bewundernswerte Cartoons

30 Jahre und kein bisschen weise
Editorial, November 2008

Im Editorial stellen Sie Prof. Oswald Huber vor, den langjährigen Cartoonisten Ihrer Zeitschrift.

Das möchte ich zum Anlass nehmen, meine Bewunderung seiner Cartoons auszudrücken:

- ▶ Insiderblick ins wissenschaftliche Milieu,
- ▶ Pointen auf höchstem Niveau,
- ▶ witzige Metaphorik, witziger Strich,
- ▶ virtuose Abstraktion,
- ▶ hinter allem aber Menschenfreundlichkeit.

Ich bleibe auch im nächsten Jahrzehnt ein Fan der OH-Cartoons!

Wolfgang Tomásek, Metten



Gefährliche Genmanipulation

Den Kode des Lebens erweitern
Januar 2009

Dieser Artikel bietet teilweise ein Horrorszenerario!

Ich finde es extrem spannend herauszufinden, wie die Natur funktioniert, und halte es durchaus für legitim, dies bis hinein in die Arbeitsweise der Gene zu erforschen, aber die Manipulationen, die hier beschrieben werden, halte ich für ä-

berst riskant und unverantwortlich. Ich zitiere die Nobelpreisträgerin Christiane Nüsslein-Vollhart in der Ausgabe der Zeit vom 31.12.08: »Das wird keinen Erfolg haben. Die Natur ist wahnsinnig gut. So raffiniert, dass wir sie bis heute nicht vollständig verstanden haben.« An etwas so Kompliziertem und noch nicht komplett Verstandenen herumzubasteln, kann gefährliche Ergebnisse bringen, die möglicherweise das über Hunderte von Millionen Jahren auskalibrierte Gleichgewicht der Natur auf unserem Planeten zerstören.

Dr. Irmgard Oberhoff-Looden,
Bad Gandersheim

Kritikfähigkeit und Zulassen von Kritik

Ratlos in die Zukunft, November 2008

Es wird beklagt, dass die Vergangenheit nicht richtig erforscht wird und dass mehr oder weniger gedankenlos das geistig übernommen wird, was einige

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistent: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
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 Könnker, 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:
 Lars Fischer, Dr. Andrea Pastor-Zacharias, 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: GWP media-marketing, 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, Brandstwierte 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephsplatzstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01.01.2008.
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, President: Steven Yee, Vice President: Frances Newburg, International Managing Director: Kevin House, 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.



Wanted: Theorie für wilde Märkte

Springers Einwüfe, Januar 2009

Theorie der selbst organisierten sozialen Systeme

Es gibt bereits eine Theorie, die die »wilden Märkte« beschreibt.

Die Theorie der selbst organisierten sozialen Systeme. Leider besagt diese, dass es immer wieder zu per se unvorhersehbaren Veränderungen kommen muss.

Es ist also so, dass alle Vermutungen, Berechnungen und alle wohl konzipierten Szenarien bestenfalls zufällig eintreffen. Was man berechnen kann, ist der ungefähre Moment, an dem unvorhersehbare Ereignisse eintreten.

Ein Experte müsste sagen: »Ich habe keine Ahnung, was passiert, es ist in der Natur der Dinge, dass etwas Unerwartetes geschieht.« Die andauernde Unfähigkeit, zutreffende ökonomische Prognosen zu treffen, ist

meiner Meinung nach ein weiterer Hinweis auf die Richtigkeit der selbstorganisatorischen Theorie.

Miles Meier, Wiesbaden

Börsenkurse wissenschaftlich präsentiert

Es gibt eine renommierte deutsche Tageszeitung aus Frankfurt, die immer wieder die Börsenkurse grafisch analysieren lässt. Da ist von »200-Tage-Linie«, von »Trendlinie«, von »Halte-Linie«, von »Erwartungslinie«, von »Seitwärtsbewegung« und schließlich, meine Lieblingsformulierung, von »Doppelbodenformation« die Rede. Das sieht alles so sehr wissenschaftlich aus, so sehr mathematisch ... und es erinnert mich doch ganz stark an die Cartoons von der Feuilletonseite.

Hans-Peter Nicolai, Herlikofen

andere (Elite) vorgeben. Da rührt der Autor an ein Kernproblem unserer Bildung: die Kritikfähigkeit und das Zulassen von Kritik. Stattdessen wird Meinungsherrschaft betrieben. Wir wissen tatsächlich über vieles wenig und füllen die Wissenslücken mit Thesen oder Annahmen, wobei ich an den Informationsfluss und die Schwachstellen im Bank- und Geldwesen hinsichtlich realer Aufsichtsmöglichkeiten denke oder an das Klima, wo die paläoklimatischen Verhältnisse in die von Politikern vertretene Ansicht eingepasst werden.

Kritik ist die Voraussetzung für Fortschritt, Killerphraseologie ihr Unter-gang. Korrekte Datenanalysen sind so lange dürftig, solange man nicht willens ist, sie auch korrekt zu verwenden. Kontrolle im Finanzwesen kann nur funktionieren, wenn eine Informationsanalyse vorliegt.

Dr.-Ing. Adalbert Rabich, Dülmen

Gut komprimierte, historisch korrekte Notiz!

70 Jahre Kernspaltung, www.spektrum.de/artikel/977380&_z798888

Ein besonderes Lob Ihrer Autorin Vera Spillner! Ihr Artikel »70 Jahre Kernspaltung« hebt sich wohltuend von dem zum Teil haarsträubenden Unsinn ab, den

man zurzeit wieder in den Blättern und im Internet lesen muss. Der Beitrag ist historisch einwandfrei, objektiv und vorurteilslos. Man spürt sofort, dass die Autorin die Primärquellen wirklich gelesen hat und sich in der Materie auskennt – im Gegensatz zu vielen wenig kenntnisreichen Journalisten oder so genannten »Historikern«, die vornehmlich voneinander abschreiben und dadurch Voreingenommenheiten und zum Teil abstruse persönliche Meinungen multiplizieren.

Otto Hahn und Lise Meitner hätten Frau Spillner ihre Anerkennung für diese Arbeit ausgesprochen, da bin ich mir ganz sicher. Ich möchte dies hier ausdrücklich betonen.

Dietrich Hahn, München (Enkel von Otto Hahn und Patensohn von Lise Meitner)

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
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

PRAKTISCHES AUS DEM
LESERSHOP

FRÜHSTÜCKSBRETTCHEN



Damit der Tag gut anfängt: Unsere Frühstücksbrettchen (2 Stück) mit wissenschaftlichen Motiven kurbeln garantiert Ihren (Bildungs-)Hunger an! Wahlmöglichkeit: zwei Brettchen mit Mathematikmotiven oder zwei Brettchen mit Astromotiven. Je Set € 9,80 (zzgl. Versand)

SAMMELKASSETTE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Die Sammelkassette von Spektrum der Wissenschaft bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).

TIERPSYCHOLOGIE

Neidische Hunde

■ Ohne Preis kein Fleiß. Und schon gar nicht, wenn man selbst leer ausgeht, während nebenan einer für dieselbe Arbeit belohnt wird. Was nur allzu menschlich klingt, trifft offenbar auch auf Vierbeiner zu. Das haben Friederike Range von der Universität Wien und ihre Kollegen jetzt herausgefunden.

Bei ihren Experimenten mit insgesamt 29 Hunden setzten sie immer zwei nebeneinander, die abwechselnd Pfötchen geben mussten. Im ersten Versuch erhielt jeweils einer Futter als Belohnung, während der andere in die Röhre guckte. Auch der zweite Durchgang war nur wenig fairer: Hier gab es karges Schwarzbrot für den einen Hund und leckere Würstchen für seinen Kollegen.



FRIEDERIKE RANGE, UNIVERSITÄT WIEN

Würden die Vierbeiner die ungerechte Behandlung übel nehmen? In der Tat erwies sich ein bevorzugter Nachbar als extrem demotivierend. In seiner Gegenwart verweigerte der Hund noch schneller Pfote und Blickkontakt, als wenn er einzeln um seinen Lohn geprellt wurde.

Ansonsten waren die Tiere nicht wählerisch – selbst wenn einer schmackhafteres Essen bekam als der andere, blieben sie beide folgsam. Dies unterschied sie von Primaten, die auch dann in Streik treten, wenn sie sehen, dass ein anderer eine bessere Belohnung erhält als sie selbst.

Nicht mit mir! Weil der linke Hund gesehen hat, dass sein Partner eine Belohnung bekam, die ihm versagt blieb, verweigert er nun die Pfote und vermeidet den Blickkontakt mit dem Versuchsleiter.

Empfindlich auf ungerechten Lohn zu reagieren halten Wissenschaftler für einen wichtigen evolutionären Schritt zur Kooperation. Möglicherweise verdanken Hunde diese Fähigkeit aber auch nur der langen Domestikation durch den Menschen.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

KLIMA

Anlasser des Golfstroms



MARUM, UNIVERSITÄT BREMEN

Im Labor untersucht Cristiano Chiessi einen Teil des Sedimentkerns, der aus 657 Metern Wassertiefe vor der südamerikanischen Küste entnommen worden war.

■ Der Golfstrom ist die Warmwasserheizung Europas. Erlahmt er, wird es eiszeitlich kalt. Dagegen ließ sein Wiedererstarken vor rund 15 000 Jahren, als Gletscher große Teile Europas bedeckten, die Temperaturen innerhalb weniger Jahrzehnte um bis zu 9 Grad Celsius ansteigen. In Gang brachte ihn damals wohl die von Neuem einsetzende

Umwälzpumpe im Nordatlantik, wo stark salzhaltiges Wasser aus den Tropen in arktische Regionen strömt, dort erkalte und auf den Meeresgrund sinkt. Doch was ließ die Zirkulation nach Zehntausenden von Jahren plötzlich wieder anspringen?

Forscher um Cristiano Chiessi von der Universität Bremen fanden in einem 7,7 Meter langen Sedimentkern, den sie aus 657 Metern Wassertiefe vor der südamerikanischen Küste stachen, nun eine mögliche Antwort. Er dokumentiert nicht nur einen kräftigen Temperatursprung vor 14 700 Jahren im Atlantik, sondern auch einen raschen Anstieg des Salzgehalts an der Meeresoberfläche. Die Ursache könnte im Indischen Ozean liegen. Dort transportiert der Agulhasstrom warmes und salzreiches Wasser die Küste Afrikas entlang nach Süden. Wirbel, die sich von ihm abschnüren und in den Atlantik wandern, beeinflussen noch heute den Golfstrom.

Den Einfluss dieser Wirbel auf das Ende der letzten Vereisung belegen vor der südwestafrikanischen Küste entnommene Sedimentkerne aus derselben Zeit. Sie enthalten Überreste von Muscheln, die damals eigentlich im Indischen Ozean lebten und offensichtlich mit dem Agulhasstrom um die Südspitze Afrikas befördert worden waren.

Geology, Bd. 36, S. 919

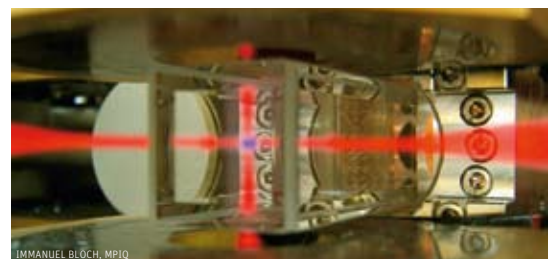
PHYSIK

Vom Leiter zum Isolator im Lichtkristall

■ Oft macht erst die radikale Vereinfachung eines Vorgangs die Gesetzmäßigkeiten dahinter sichtbar. Auch Immanuel Bloch vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und seine Kollegen folgten diesem Prinzip, als sie eines der spektakulärsten elektronischen Phänomene untersuchten: den schlagartigen Verlust der Leitfähigkeit eines Festkörpers.

Aus Licht und ultrakalten Kaliumatomen erschufen die Forscher einen künstlichen Kristall. Darin entsprachen die Knotenpunkte kreuzweise überlagerter stehender Laserwellen den Atomrümpfen.

In der abgebildeten Ultrahochvakuumzelle werden die Kaliumatome gekühlt und in einen Lichtkristall aus sich kreuzenden Laserstrahlen gebracht. Die blaue Wolke im Zentrum symbolisiert die gefangenen Atome.



IMMANUEL BLOCH, MPIQ

ASTRONOMIE

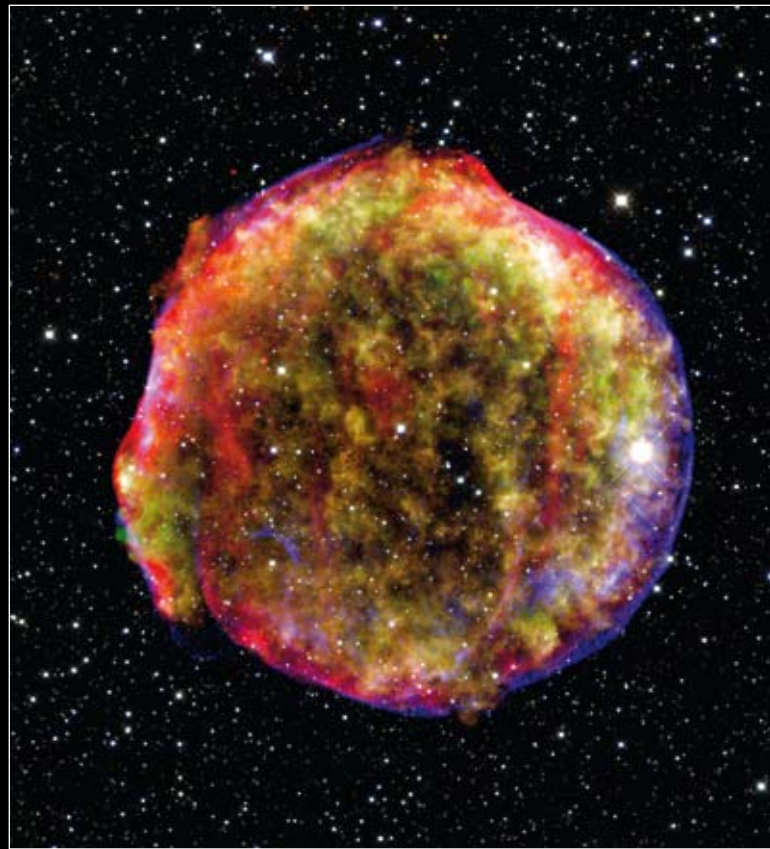
Tychos Supernova neu beobachtet

■ Im Herbst 1572 erschien ein neuer Stern am Himmel, der selbst am Tag zu sehen war. Zwei Jahre später verschwand er wieder. Die Erscheinung war damals ebenso aufsehenerregend wie rätselhaft, und Zeitzeugen wie der dänische Astronom Tycho Brahe hinterließen präzise Aufzeichnungen davon. Nach den beschriebenen Lichtkurven und Farbentwicklungen handelte es sich um eine Supernova: eine Sternexplosion. Ihr Überrest ließ sich inzwischen aufspüren (Bild). Offen blieb jedoch, welche Art von Vorläuferstern einst in einem Feuerwerk endete. Jetzt konnte ein internationales Forscherteam um Oliver Krause vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg diese Frage beantworten.

Der Hauptteil des Lichts der Supernova erreichte die Erde zwar im Jahr 1572, doch ein kleiner Prozentsatz nahm einen Umweg über Staub- und Gaswolken, an denen es reflektiert wurde. Anhand dieses Lichtechos, das erst jüngst bei uns eintraf, konnten Krause und seine Kollegen das damalige Geschehen quasi noch einmal beobachten. Dabei ergab eine spektroskopische Analyse, dass das ausgestoßene Material keinen Wasserstoff, aber Silizium und Eisen enthielt.

Demnach handelte es sich um eine Supernova vom Typ Ia. Solche Sternexplosionen haben eine genau definierte Leuchtkraft, so dass sie als »Standardkerzen« zur Vermessung des Kosmos dienen. Allerdings fehlen Messpunkte in unserer kosmischen Nähe, weil seit Beginn der modernen Astronomie Typ-Ia-Supernovae nur in fernen Galaxien zu sehen waren. Die nun als Echo beobachtete Sternexplosion könnte, da sie in unserer heimatlichen Milchstraße stattfand, diese Lücke schließen helfen.

Nature, Bd. 456, S. 617



OLIVER KRAUSE, MPA

Infrarot- und Röntgenaufnahmen des Überrests von Tychos Supernova sind hier zu einem Falschfarbenbild kombiniert.

Die anschließend eingespeisten Kaliumatome fungierten als bewegliche Elektronen. Ein solcher Kristall ist frei von störenden Nebeneffekten durch Gitterfehler oder weit reichende Coulomb-Wirkungen, die bei natürlichen Festkörpern auftreten.

An diesem Modell untersuchten die Forscher den bislang nur theoretisch beschriebenen Übergang vom Leiter zum »Mott-Isolator«. Wenn Elektronen sich im Gitter abstoßen, wirkt das wie eine Erhöhung der Potenzialwälle zwischen den Atomrümpfen. Am Ende bleiben die Elektronen so in den Potenzialtöpfen gefangen, und die Leitfähigkeit geht verloren.

Mit der Versuchsanordnung ließen sich Atomdichte und Wechselwirkungsstärke unabhängig voneinander variieren. So konnte die Theorie des Mott-Isolators erstmals experimentell verifiziert werden. Das Ergebnis trägt zum grundlegenden Verständnis der Festkörperphysik und möglicherweise der damit eng verbundenen Hochtemperatursupraleitung bei.

Science, Bd. 322, S. 1520

MORALPSYCHOLOGIE

Reines Gewissen

■ »Dem Reinen ist alles rein«, heißt es in der Bibel. Und in der Tat: Wer seine Hände wäscht oder ein Gefühl von Sauberkeit hat, bevor er ein moralisches Urteil fällt, wertet milder. Das haben Forscher um Simone Schnall von der University of Plymouth in England jetzt herausgefunden.

In einem ersten Experiment erhielten 40 Studenten Listen mit 40 Folgen aus jeweils vier ungeordneten Wörtern, aus denen sie Sätze bilden sollten. Die Begriffe waren entweder zufällig zusammengestellt oder enthielten viele mit körperlicher Sauberkeit verbundene Ausdrücke wie »gewaschen«, »flecklos«, »picobello« oder »rein«.

Anschließend waren sechs moralisch diffizile Sachverhalte zu bewerten, in denen es von Unaufrichtigkeit über Sodomie bis Kannibalismus ging. Wie sich zeigte, legten diejenigen Teilnehmer, bei denen

Assoziationen an Sauberkeit evoziert worden waren, weniger strenge ethische Maßstäbe an als die Mitglieder der Vergleichsgruppe.

Noch stärker zeigte sich der Effekt in einem zweiten Versuch, in dem Studenten zunächst einen Ekel erregenden Film sehen mussten. Anschließend durfte sich die Hälfte von ihnen die Hände zu waschen. Diese Gruppe beurteilte moralische Verfehlungen in der nachfolgenden Befragung deutlich weniger hart als die übrigen Teilnehmer.

Offenbar färbt das Gefühl körperlicher Reinheit auf unser Denken ab, und wir stufen auch ethisch fragwürdige Handlungen als weniger schmutzig ein. Das unterstreicht einmal mehr, wie stark moralische Bewertungen von unbewussten Empfindungen gesteuert sind.

Psychological Science, Bd. 19, S. 1219

SOZIOLOGIE

Glück ist ansteckend

■ Geteilte Freude ist doppelte Freude. Was der Volksmund weiß, bestätigt nun auch die Wissenschaft. James Fowler von der University of California in San Diego und Nicholas Christakis von der Harvard Medical School in Boston rekonstruierten aus Daten der Framingham Heart Study, in der Personen unter anderem auf einer vierstufigen Skala ihr Glücksempfinden angeben mussten, ein soziales Netzwerk mit knapp 5000 Mitgliedern. Die grafische Auswertung des Beziehungsgeflechts offenbarte ein faszinierendes Gruppenphänomen: Das Glück der Einzelnen pflanzte sich in einer Kettenreaktion durch das Netz fort und beeinflusste Individuen sogar noch über zwei Ecken hinweg. Negative Gefühle breiteten sich dagegen weniger stark aus.

In Zahlen ausgedrückt, beträgt das Ausmaß, in dem jedes glückliche oder unglückliche Mitglied eines sozialen Netzes die Chance auf eigenes Glück erhöht oder senkt, im Mittel neun beziehungsweise sieben Prozent. Die direkte Bekanntschaft

Grafische Darstellung des untersuchten sozialen Netzes. Blau steht für traurig und gelb für glücklich, während Grünschattierungen Grade dazwischen repräsentieren.

mit einem glücklichen Menschen steigert die Glückswahrscheinlichkeit um 15 Prozent. Eine Über-Eck-Verbindung – der glückliche Freund eines Freundes – erhöht sie um zehn und selbst eine Bekanntschaft über zwei Ecken noch um sechs Prozent.

Am glücklichsten wäre demnach eine Person mit vielen Freunden, die ihrerseits einen großen Freundeskreis haben. Dass solche Netzwerke nicht nur sprichwörtlich Gold wert sind, zeigt der Vergleich mit einer Studie von 1984. Wie sie ergab, macht ein 5000-Dollar-Geschenk den Empfänger durchschnittlich nur um zwei Prozent glücklicher.

BMJ, Bd. 337, a2338

VIROLOGIE

Immunschwäche-Virus in Affengenom

■ Lentiviren wie der Aids-Erreger HIV können nicht nur Körperzellen infizieren, sondern ihr Erbgut auch in Keimzellen einschleusen und auf diesem Weg weitervererbt werden. Mit jeder Generation setzen dem Virus jedoch immer mehr Mutationen zu, und oft verliert es so schließlich seine Virulenz. Im aufgeschlüsselten Genom des Grauen Mausmaki (*Micocebus murinus*) fanden Wissenschaftler nun völlig überraschend solche verstümmelten Lentivirus-Reste.

Schon vor 75 Millionen Jahren trennten sich die Halbaffen nach der Besiedlung Madagaskars geografisch von anderen Primaten. Dennoch entdeckten Forscher um Robert Gifford von der Stanford University School of Medicine beim Mausmaki ähnliche Lentiviren, wie sie in afrikanischen Primaten vorkommen. Auf Grund des Grades der Mutationen und der verbliebenen Übereinstimmungen schätzen die Forscher, dass die Tierart seit 85 Millionen Jahren eine spezielle Form der SIV genannten Affenversion von HIV vererbt. Diese war bisher ausschließlich von afrikanischen Primaten bekannt. Gifford vermutet jetzt, dass asiatische und Neuweltaffen zwar keine aktiven Lentiviren mehr verbreiten, sie allerdings schon vor zig Millionen Jahren in ihr Erbgut übernommen haben könnten. Damit wäre SIV viel älter als bisher vermutet. Die lange Zeit der Koevolution mit den Affen würde erklären, warum diese normalerweise nicht an Aids erkranken.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

ARCHÄOLOGIE

Händler statt Piraten

■ Anfang 2007 fanden sich in einem Fluss zwischen dem heutigen Kroatien und Bosnien-Herzegowina versunkene Überreste von 16 mit Weinamphoren beladenen, 2000 Jahre alten Booten. Damals vermutete Snjezana Vasilj von der Universität Mostar einen Angriff der Römer auf illyrische Piraten, die nach antiken römischen Berichten die Adria einst unsicher machten.

Doch der Fundort Desilo liegt etwa 20 Kilometer landeinwärts. Die Vorstellung, dass es sich um einen Piratenstützpunkt handelte, erschien Marina Prusac von der Universität Oslo deshalb kaum glaubhaft. Vielmehr vermutete sie einen Umschlagplatz für Handelsgüter. Tatsächlich fand sie mit ihrem Team bei Grabungen nun nicht nur die Überreste einer Hafenanlage, sondern auch die dazugehörige Siedlung und weitere mit Amphoren beladene Schiffe.

Zwar ist die Piratentheorie damit nicht unbedingt widerlegt. Immerhin waren alle Boote gesunken und die Amphoren zer-



Jetzt unter Wasser entdeckte illyrische Schiffe mit zerbrochenen Amphoren waren wohl Opfertgaben ans Meer und nicht Opfer der Piratenjagd durch die Römer.

trümmert. Doch die Schiffe gingen genauen Datierungen zufolge nicht gleichzeitig unter, sondern nacheinander über einen Zeitraum von hundert Jahren hinweg. Außerdem stammen die Gefäße aus der Region Dalmatien, von wo aus Wein ins Römische Reich exportiert wurde. Warum sollten die Römer den für sie bestimmten Rebensaft versenken?

Auch Snjezana Vasilj geht jetzt von einem rituellen Hintergrund aus. Da außer den Amphoren auch Tierknochen und -zähne sowie Äxte und Speere gefunden wurden, könnte es sich um eine Opfertgabe zur Besänftigung des Meeres handeln.

Pressemittteilung der Universität Oslo

Mitarbeit: Sandra Czaja und Vera Spillner



Grauer Mausmaki (*Micocebus murinus*)

LENNART PYRLITZ

Kuschelige Nanowürmer



BILD DES MONATS

JOHANNA KLEBERG, HARVARD UNIVERSITY

Nein, es sind keine echten Würmer, die sich da aneinanderschmiegen und dicht zusammendrängen. Die nur etwa 500 Nanometer dicken Härchen bestehen aus einem gummiartigen Polymer. Boas Pokroy und Kollegen von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) erzeugten sie auf einer Kunststoffunterlage. Dann befeuchteten sie die Minibürste mit einem Lösungsmittel und ließen es kontrolliert verdampfen. Kapillarkräfte bewirkten dabei, dass die benetzten Härchen aneinanderklebten (aus dem gleichen Grund ist nasses Haar strähnig). In einem erstaunlichen Prozess von Selbstorganisation wickelten sich zudem Gruppen von Borsten zu wirbelartigen Strukturen umeinander, die unter bestimmten Bedingungen alle dieselbe Drehrichtung hatten. Diese spontane Entstehung eines gleichsinnigen Schraubenmusters durch Symmetriebrechung ist theoretisch höchst interessant. Die Miniwirbel könnten aber auch dazu dienen, winzige Objekte – etwa Nanokapseln mit Arzneimitteln – kontrolliert festzuhalten.

Tiefbohrung im größten Meteoritenkrater der USA

Als vor 35 Millionen Jahren an der Ostküste Nordamerikas ein Meteorit mit mehreren Kilometern Durchmesser einschlug, hinterließ er einen 85 Kilometer großen Krater. Eine Tiefbohrung in dessen Zentrum lieferte nun ein detailliertes Bild des Aufpralls und der Folgen.

Von Christian Koeberl

Der größte bisher entdeckte Einschlagkrater in den Vereinigten Staaten liegt unter der Chesapeake Bay im US-Bundesstaat Virginia. Er misst 85 Kilometer im Querschnitt und ist vor etwa 35 Millionen Jahren – am Ende des Eozäns – durch den Aufprall eines riesigen Meteoriten von schätzungsweise 2 bis 5 Kilometer Durchmesser entstanden. Allerdings zeigt sich an der Oberfläche keine Spur von ihm; denn der Krater wurde in der Zwischenzeit völlig mit jüngeren Gesteinen verfüllt und zugedeckt.

Deshalb ist er auch erst seit Anfang der 1990er Jahre bekannt. Damals entdeckten

Wissenschaftler des U.S. Geological Survey die Struktur durch geophysikalische Messungen und Bohrungen. Kurz danach begann meine Zusammenarbeit mit den amerikanischen Kollegen. Schon 1996 konnten wir klare Einschlagspuren nachweisen, die einen vulkanischen Ursprung ausschlossen. So entdeckten wir in Bohrkernen »geschockte« Minerale, die von einem plötzlichen gewaltigen Stoß in ihrer Kristallstruktur völlig verändert wurden und so genannte Schocklamellen aufweisen. Solche Minerale treten in der Natur ausschließlich in Einschlagkratern und deren Auswurfmaterial auf.

Außerdem stellten wir fest, dass der Chesapeake-Bay-Krater der Ursprungsort

des Nordamerikanischen Tektitstreufelds ist. Tektite sind glasige Objekte von bis zu mehreren Zentimetern Durchmesser. Wie sich erst im Lauf der letzten Jahrzehnte herausstellte, handelt es sich um erstarrte Tropfen von Gesteinsschmelze, die bei der Bildung von Einschlagkratern davongeschleudert werden (Spektrum der Wissenschaft 11/1978, S. 44). Bisher sind vier Streufelder in verschiedenen Gebieten der Erde bekannt; ihr Alter liegt zwischen 0,8 bis 35 Millionen Jahren.

Diese ersten Erkenntnisse machten deutlich, dass der Chesapeake-Bay-Krater eine hochinteressante Struktur ist, die eine genauere Untersuchung verdient. Deshalb bewilligten das International



In der Satellitenaufnahme der Chesapeake Bay deutet nichts darauf hin, dass hier der größte Meteoritenkrater der USA verborgen ist. Er wurde deshalb auch erst Anfang der 1990er Jahre durch geophysikalische Messungen und Bohrungen entdeckt. Die Karte zeigt seine Lage.

SATELLITENFOTO: NASA; KARTE: CHRISTIAN KOEBERL

Continental Scientific Drilling Program (ICDP) und der U.S. Geological Survey im Jahr 2004 die finanziellen Mittel für eine Tiefbohrung nahe an seinem Zentrum. Neben Gregory S. Gohn vom U.S. Geological Survey, Kenneth G. Miller von der Rutgers University in Piscataway (New Jersey) und Wolf Uwe Reimold vom Humboldt-Museum für Naturkunde in Berlin war ich einer der Leiter dieses großen internationalen Projekts.

Allein die Bohrung, die im Herbst 2005 und Frühjahr 2006 durchgeführt wurde, kostete fast zwei Millionen Euro. Sie erwies sich teils als recht schwierig; wiederholte Wechsel der Gesteinsarten und schwellende Tonminerale erzwangen mehrere Unterbrechungen. Doch schließlich konnten die Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden. Am Ende hatten wir Bohrkerne bis zu einer Tiefe von etwa 1,8 Kilometern in Händen. Es folgten zwei Jahre, in denen wir die Gesteine akribisch untersuchten und die erhaltenen Daten auswerteten. Kürzlich nun konnten wir erste Ergebnisse veröffentlichen (Science, Bd. 320, S. 1740).

Der Chesapeake-Bay-Krater wurde im flachen Kontinentalschelf bei nur wenigen hundert Meter Wassertiefe gebildet. Dadurch erhielt er eine sehr ungewöhnliche Form, die wie ein umgekehrter Sombbrero aussieht. Solche Strukturen gibt es bei Einschlagkratern ganz selten; andere Beispiele sind der viel kleinere Lockne-Krater in Schweden und der Unterwasserkrater Mjölmir zwischen Norwegen und Spitzbergen.

Die Sombbrero-Form rührt von der unterschiedlichen Nachgiebigkeit der drei Schichten her, die im Schelfbereich von oben nach unten aufeinanderfolgen: Meerwasser, Sedimente und Kristallgestein. Letzteres ist am härtesten, so dass der aufprallende Meteorit nur einen relativ schmalen Trichter darin hinterlässt: die Hutspitze. Im Sediment entsteht beim Einschlag ein wesentlich breiterer Krater. Einen noch größeren Radius hat der Bereich, in dem das Meerwasser verdrängt wird; es flutet jedoch zurück und führt dabei große Mengen Schutt mit, die es im Zentrum abgelagert. Der Rand dieses Schuttkegels bildet die Hutkrempe.

In der etwa 35 bis 40 Kilometer breiten Zentralregion des Kraters finden sich so genannte Brekzien: Gesteinstrümmen unterschiedlichster Herkunft, die beim Einschlag chaotisch zusammengemischt wurden. Auch sie sind ein typisches Er-



kennungsmerkmal von Impaktkratern. Das gilt vor allem für eine spezielle Art von ihnen: die Suevite. Sie enthalten außer verschiedensten Gesteinsfragmenten auch erstarnte Schmelzen und geschockte Minerale.

Bei der Untersuchung der Bohrkerne machten wir eine ebenso interessante wie ungewöhnliche Entdeckung: In manchen Brekzien war Salzwasser eingeschlossen, das seit 35 Millionen Jahren unverändert geblieben ist. Da sich im Bereich des Kraters mehrere große Städte befinden, in denen über zwei Millionen Menschen wohnen, ist diese Feststellung von einiger Bedeutung. Für die Wasserversorgung der lokalen Bevölkerung sind inzwischen immer tiefere Bohrungen nötig. Dabei kam letztthin überraschend ungenießbares Brackwasser zu Tage. Unser Fund liefert eine Erklärung dafür und hilft, Stellen zu ermitteln, an denen das Grundwasser nicht versalzen ist.

Spuren einer Tsunamiwelle

Eine Überraschung war auch, dass wir bei der Bohrung auf einen riesigen Granitblock stießen, der sich als kompakter Brocken zwischen den Trümmergesteinen befindet. Er ist mehrere hundert Meter dick und vermutlich über einen Kilometer lang. Dieser Block kann nicht ursprünglich an dieser Stelle gelegen haben, weil die nächsten Granitvorkommen rund sechs Kilometer entfernt sind. Außerdem muss er die beträchtliche Strecke innerhalb von Sekunden bis Minuten zurückgelegt haben – bevor das verdrängte Meerwasser zurückgeflutet ist. Er befindet sich nämlich direkt über den lokal zerbrochenen Gesteinen des Grundgebirges und unter dem Material, das vom zurückströmenden Wasser ab-

Gebohrt wurde am Chesapeake-Bay-Krater bei Cape Charles auf der Halbinsel Delmarva im US-Staat Virginia, wie diese Nachtaufnahme illustriert, rund um die Uhr.

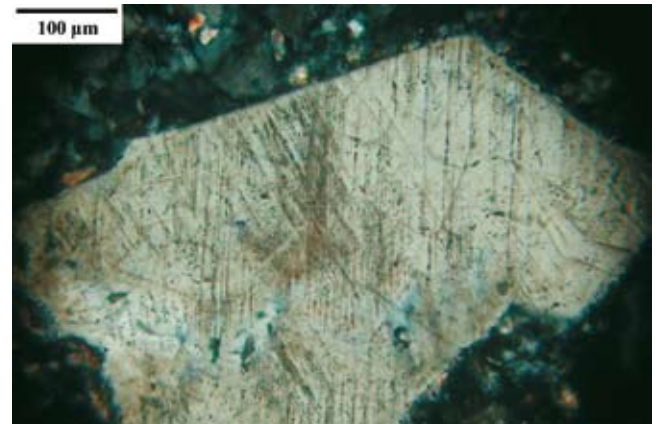
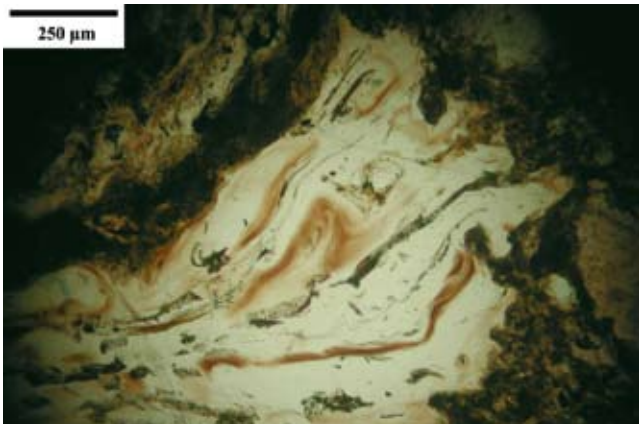
gelagert wurde. Vermutlich ist er mit hoher Geschwindigkeit die steilen Kraterwände hinab in die zentrale Vertiefung gerutscht. Dazu passt auch, dass die Brekzien unter ihm auf Kies- oder sogar Sandgröße zerrieben wurden.

Die Gesteinstrümmen über dem Granitblock sind teils ebenfalls von außen in den Krater gerutscht, überwiegend aber von der Flutwelle hineingespült worden. In den Bohrkerne entdeckten wir Spuren einer tsunamiantigen Woge. Dabei handelt es sich um ein chaotisches Gemisch diverser Gesteine, die außerhalb des Kraters in einer klaren stratigrafischen Abfolge auftreten, in seinem Inneren aber kreuz und quer durcheinandergewürfelt sind. So liegen nun Trümmerstücke aus Schichten nebeneinander, die vorher vertikal um mehrere hundert Meter getrennt waren. Außerdem sind die Fragmente nach der Größe sortiert: Ausgehend von dicken Brocken unten wird das Material nach oben hin immer feiner. Eine solche Sortierung lässt sich nur durch Sedimentation in bewegtem Wasser erklären.

Die Untersuchung der Ablagerungen im Krater in den 35 Millionen Jahren nach dem Einschlag erlaubte auch Rückschlüsse auf die geologische Entwicklung des Küstengebiets sowie langfristige Änderungen des Meeresspiegels. Zum Beispiel lässt sich aus der Art der Sedimente ablesen, ob sie jeweils an Land oder unter Wasser abgelagert wurden. Das liefert Informationen über Verschiebungen der Küstenlinie. Bei marinen Sedimenten ver-



Erbohrte Gesteine tragen Spuren des Meteoriteneinschlags. So ist das vom Aufprall geschockte Quarzkorn (unten rechts) von vielen Scherrissen durchzogen. Im Schliff einer Impaktbrekzie (links) erkennt man Fragmente verschiedenster kristalliner Gesteine und erstarrte Gesteinsschmelzen. Geschmolzen war auch ein großer Teil eines Suevits (unten links). Die Proben stammen aus Tiefen von 1444, 1412 und 1419 Metern.



ALLE: CHRISTIAN KOEBERL

raten deren Dicke und eingeschlossene Fossilien, die nur in bestimmten Meereshorizonten vorkommen, wie tief das Wasser war. Aus solchen Informationen konnten wir ermitteln, wie sich der Meteoriteneinschlag auf die tektonische Entwicklung an der Ostküste der USA ausgewirkt, also die Bewegungen und Verformungen der dortigen Erdkruste beeinflusst hat.

Überraschend waren schließlich auch die Ergebnisse biologischer Untersuchungen an den Bohrkernen. Demnach haben selbst in den heißen Zonen des Kraters in 1,8 Kilometer Tiefe bestimmte Lebensformen überdauert.

Die Auswertung der Bohrung ist noch lange nicht abgeschlossen, sondern wird meine Kollegen und mich viele weitere Jahre beschäftigen. Die nun veröffentlichten ersten Ergebnisse dürften deshalb nur der Anfang sein. Aber jetzt schon hat die Tiefbohrung im Chesapeake-Bay-Krater eine Fülle von Erkenntnissen darüber geliefert, wie der Einschlag eines riesigen Meteoriten in einem flachen Schelf genau abläuft und was die gewaltige freigesetzte Energie an Zerstörungen im Boden anrichtet.

Christian Koeberl ist Außerordentlicher Professor im Department für Lithosphärenforschung an der Universität Wien.

ASTROPHYSIK

Wie kosmische Strahlung ausgebremst wird

Neue Messungen mit Detektoren in Utah und Argentinien haben eine mehr als 40 Jahre alte theoretische Voraussage bestätigt: Die extragalaktische kosmische Strahlung wird bei sehr hohen Energien durch Wechselwirkung mit dem Mikrowellenhintergrund gestreut und verlangsamt.

Von Georg Wolschin

Unter »kosmischer Strahlung« verstehen Astronomen Teilchen aus dem Weltraum, die mit hoher Geschwindigkeit auf die Erdatmosphäre treffen und dort Schauer von Sekundärpartikeln auslösen. Im Energiebereich von 10^{12} bis 10^{15} Elektronvolt sind etwa die Hälfte von ihnen Protonen, rund ein Viertel Alphateilchen (Heliumkerne), 13 Prozent schwerere Kerne wie die von Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff und ein Prozent Elektronen.

Die Partikel der kosmischen Strahlung, von Victor Hess 1912 bei Ballonflügen mit Elektrometern erstmals beobachtet, kommen aus den unterschiedlichsten Quellen in und außerhalb der

Milchstraße. Ein Teil stammt von der Sonne, aber der Ursprung der meisten Teilchen liegt in fernen Regionen unserer Heimatgalaxie. Die wichtigste Quelle bilden wohl die Überreste von Supernovae. Das erklärt teilweise auch die hohe Geschwindigkeit der Partikel. So können sie durch direkte Beschleunigung in Stoßwellen von Supernova-Überresten bis zu 10^{16} Elektronvolt erreichen. Verfeinerte Modelle für die Explosion massereicher Sterne ergeben sogar noch mehr als 100-mal höhere Energien für galaktische kosmische Teilchen.

Partikel von außerhalb der Milchstraße überschreiten freilich selbst diesen Wert. So wurden mit dem Pierre-Auger-Detektorfeld in Argentinien bis Ende 2007 immerhin 27 Teilchen mit mehr

als $6 \cdot 10^{19}$ Elektronvolt registriert. Nach den Richtungen zu urteilen, aus denen sie kamen, stammen sie aus dem Umfeld so genannter aktiver Galaxienkerne (AGNs, für englisch *Active Galactic Nuclei*), die in unserer kosmischen Nachbarschaft liegen (Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 19).

Oberhalb von 10^{18} Elektronvolt sprechen Physiker von ultrahochenergetischer kosmischer Strahlung (UHECR, nach englisch *Ultra-High Energy Cosmic Rays*). Die gewaltige Energie solcher Partikel lässt sich erahnen, wenn man sich vorstellt, dass sie gut das Millionenfache der $7 \cdot 10^{12}$ Elektronvolt erreichen, die sich heute beim leistungsstärksten irdischen Teilchenbeschleuniger, dem gerade fertig gestellten Large Hadron Collider am CERN in Genf, in jedem der beiden kollidierenden Protonenstrahlen erzeugen lassen.

Ein unerwarteter Effekt

Gibt es eine Obergrenze für die Energie der kosmischen Strahlung? Schon 1966 bejahten Kenneth Greisen von der Cornell University in Ithaka (US-Bundesstaat New York) sowie unabhängig von ihm Georgiy T. Zatsepin und Vadim A.

Kuzmin vom Lebedew-Institut der russischen Akademie der Wissenschaften in Moskau diese Frage. Sie leiteten theoretisch ab, dass das Energiespektrum der kosmischen Teilchenstrahlung oberhalb eines bestimmten Werts – Greisen nannte 10^{20} Elektronvolt – relativ steil abfallen sollte. Der Grund für diesen so genannten GZK-Effekt ist, dass die Teilchen ab einer gewissen Energie nur noch eine begrenzte Reichweite haben, weil sie durch Wechselwirkung mit den Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung abgebremst werden.

Diese Strahlung erschien schon etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall. Damals wurde das Universum, das zuvor aus einem undurchsichtigen Plasma bestanden hatte, durch die Bildung von neutralen Wasserstoffatomen für elektromagnetische Strahlung transparent: In ihm ging gleichsam das Licht an. Wegen der Expansion des Kosmos hat sich dieses allgegenwärtige Leuchten inzwischen zu erheblich größeren Wellenlängen verschoben und liegt heute im Mikrowellenbereich. Nach seiner Entdeckung durch Arnold Penzias und Robert Wilson im Jahr 1965 haben es Astronomen bei zahlreichen Ballon- und Satel-

itenmissionen mit hoher Genauigkeit gemessen.

Die energiereichsten kosmischen Teilchen – vor allem die Protonen – sollten an den Photonen dieser Hintergrundstrahlung gestreut werden und bei der Wechselwirkung mit ihnen zudem geladene oder neutrale Pionen bilden. Das sind Paare jener beiden Typen (Flavors) von Quarks, aus denen (als Trio) auch das Proton und das Neutron bestehen. Sie gehören zu den so genannten Mesonen und bilden die masseärmsten Vertreter von stark wechselwirkenden Teilchen (Hadronen). Sie sind allerdings instabil und zerfallen binnen Kurzem wieder, wobei im Weltall schließlich die so genannten hochenergetischen GZK-Neutrinos und -Photonen entstehen.

Die Pionen-Fotoproduktion, wie Physiker den Vorgang nennen, beginnt ab einer bestimmten Energie der kosmischen Teilchen – nämlich etwas unterhalb von 10^{20} Elektronvolt. Energiereichere Partikel sollten dadurch schon nach kurzer Zeit unter diesen Schwellenwert abgebremst werden. Allerdings legen die fast lichtschnellen Teilchen durchschnittlich eine Strecke von etwa 50 Megaparsec (160 Millionen Lichtjahre) zu-

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.



Tebonin® stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.*

Ginkgo-Spezialextrakt
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnganisch 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 begonnen 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 Arzneimittel, Karlsruhe.** Stand: November 2008 T/1/08/1



Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel

www.tebonin.de

ALS ABONNENT HABEN SIE VIELE VORTEILE!



1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.
2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.
3. Unter www.spektrum.de/plus finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint, das Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können, sowie den Spektrum-Mitgliederausweis mit zahlreichen Vergünstigungen.
4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.
5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.



Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743

per Fax: 06221 9126-751

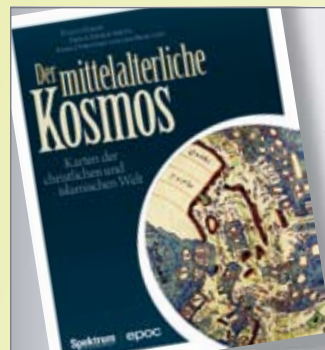
per E-Mail: service@spektrum.com

oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabonno bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Das Buch »Der mittelalterliche Kosmos« zeigt anhand alter Karten, welches Bild von Welt und Kosmos das lateinische Abendland und der islamische Orient hatten.

LESER WERBEN LESER

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



Einkaufskorb von Reisetel (Lieferung ohne Inhalt)

PRODUKT DES MONATS



Sonderpreis für Abonnenten

rück (zum Vergleich: der Durchmesser der Milchstraßenscheibe beträgt rund 30 Megaparsec), bis sie beim Zusammenstoß mit einem Photon ein Pion erzeugen. Dadurch können sie ungebremst zu uns gelangen, wenn sich ihr Ursprungsort in einem Umkreis von weniger als rund 100 Megaparsec befindet.

Mit einem 100 Quadratkilometer großen Netz aus 128 Detektoren beim Akeno-Observatorium der Universität Tokio – dem *Akeno Giant Air Shower Array* (AGASA) – haben Anfang des Jahrzehnts erstmals japanische Forscher den GZK-Effekt experimentell geprüft. Ihr Ergebnis, das sie im Jahr 2003 veröffentlichten, bot eine handfeste Überraschung: Der erwartete steile Abfall im Energiespektrum oberhalb von 10^{20} Elektronvolt war nicht zu sehen.

Viele zweifelten an der Zuverlässigkeit der Messungen, doch manche Theoretiker stellten sogar Einsteins spezielle Relativitätstheorie in Frage, um dieses Ergebnis zu erklären. Andere suchten nach weniger radikalen Deutungen für das unerwartete Resultat. Eine wäre, dass nicht Protonen, sondern schwerere Kerne die Messergebnisse hervorriefen oder dass die beobachteten Signale indirekt durch schwach wechselwirkende Teilchen wie Neutrinos erzeugt wurden. Aber auch instrumentelle Fehler lassen sich nicht ausschließen.

Inzwischen dürften all diese Überlegungen freilich gegenstandslos und auch Einsteins Relativitätstheorie wieder einmal gerettet sein. Schon vor einem Jahr gab es neue vorläufige Messdaten, die den AGASA-Ergebnissen widersprachen. Sie stammen von der Auger-Kollaboration sowie von Teilnehmern des »*High Resolution Fly's Eye Experiment* (HiRes)« aus den USA. Beide Gruppen haben ihre Daten mittlerweile veröffentlicht.

In Übereinstimmung mit dem theoretisch vorhergesagten GZK-Effekt ist in den HiRes-Daten eine deutliche Unterdrückung der hochenergetischen kosmischen Strahlung jenseits von $6 \cdot 10^{19}$ Elektronvolt zu erkennen – mit einer statistischen Signifikanz von mehr als fünf Standardabweichungen (*Physical Review Letters*, Bd. 100, Artikel-Nr. 101101).

Das Experiment lief über eine Dauer von neun Jahren (1997–2006) in klaren mondlosen Nächten. Die Belichtungszeit war damit mehr als doppelt so lang wie bei AGASA. Zwei Messstationen in

12,6 Kilometer Entfernung mit 22 beziehungsweise 42 Teleskopmodulen sammelten und fokussierten Ultraviolett-Fluoreszenzlicht von »Luftschauern«, die von der primären kosmischen Strahlung ausgelöst wurden. Cluster von jeweils 256 Photomultipliern in der Brennebene jedes Teleskopmoduls dienten als »Kameras« für das Licht.

Steiler Abfall bei hohen Energien

In den Daten findet sich nicht nur der steile Abfall bei sehr hohen Energien, sondern auch ein leichter »Höcker« im Energiebereich darunter. Die HiRes-Kollaboration erklärt ihn mit einem weiteren, allerdings viel schwächeren Bremseffekt auf die höchstenergetischen Teilchen. Diese erzeugen bei der Wechselwirkung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung, wie schon Greisens theoretische Analyse ergab, auch Elektron-Positron-Paare, was freilich weitaus weniger Energie kostet als die Produktion der wesentlich massereichen Pionen. Strahlungsteilchen mit mehr als 10^{20} Elektronvolt werden dadurch nur leicht abgebremst und so in den Höckerbereich verschoben, wo sie die Anzahl der dort gefundenen Partikel vermehren. Möglicherweise spiegelt der leichte Anstieg im Spektrum aber auch den Übergang zur galaktischen Komponente der kosmischen Strahlung wider.

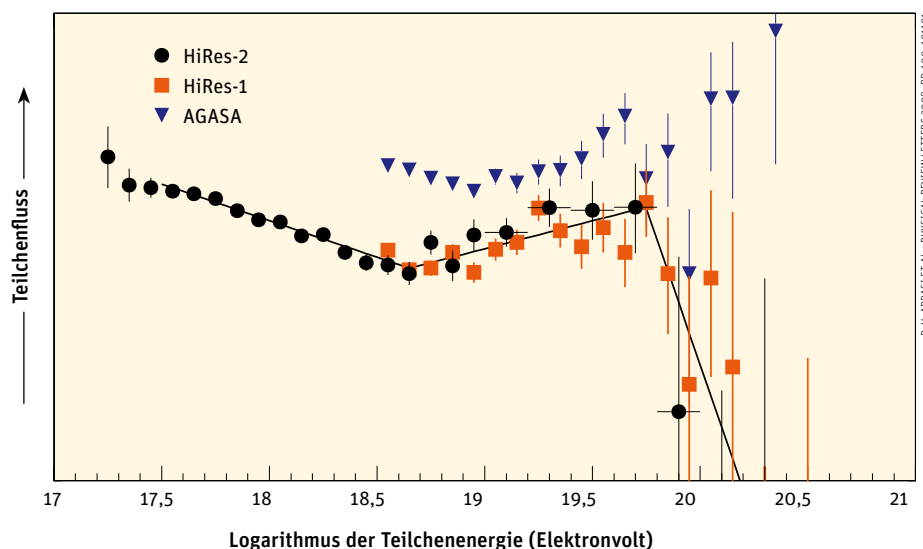
Die Resultate der Auger-Kollaboration stimmen weitgehend mit den HiRes-Ergebnissen überein (*Physical Review Letters*, Bd. 101, Artikel-Nr. 061101). Dabei sind sie noch deutlich besser abgesichert. Sie beruhen auf Untersuchungen, bei denen auf einem riesigen Detektorfeld in Argentinien zwischen Ja-

nuar 2004 und August 2007 etwa 20 000 UHECR-Ereignisse registriert wurden – rund doppelt so viele wie bei HiRes. Auch hier findet sich ein deutlicher Abfall des Energiespektrums, der allerdings schon etwas früher beginnt, nämlich bei $4 \cdot 10^{19}$ Elektronvolt.

Damit scheint der GZK-Effekt endgültig bestätigt. Zwar gibt es laut Johannes Blümer von der Universität Karlsruhe eine denkbare alternative Erklärung für den beobachteten Abfall im Spektrum: Er könnte auch darauf beruhen, dass weniger Strahlung im höchsten Energiebereich entsteht als gemeinhin angenommen. Blümer selbst und die meisten seiner Kollegen halten das jedoch für unwahrscheinlich. Derzeit untersucht die Auger-Kollaboration die Zusammensetzung der hochenergetischen Partikel, um Protonen und schwerere Kerne zu unterscheiden.

Der nun bewiesene GZK-Effekt hat auch eine wichtige praktische Anwendung für die Astronomen. Indem man die Strahlung niedriger Energie ausblendet, die vom ganz fernen Kosmos stammt, kann man diesen Effekt als EntfernungsfILTER einsetzen, um nur nahe

Messungen mit zwei Detektorfeldern namens HiRes in Utah bestätigten erstmals die theoretische Vorhersage, dass der Fluss von kosmischen Teilchen ab einer Energie von etwa 10^{20} Elektronvolt wegen der Wechselwirkung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung drastisch zurückgeht. Ältere Daten einer japanischen Gruppe (AGASA) hatten diesen Effekt überraschenderweise nicht gezeigt.



R. U. ABBASTI ET AL. - PHYSICAL REVIEW LETTERS 2008, BD.100, 101101



MAGIC TELESCOPE COLLABORATION, MPI FÜR PHYSIK

Quellen zu sehen. Das hätte sich Greisen wahrscheinlich nicht träumen lassen!

Zu den energiereichsten Boten aus dem All, die zu uns gelangen, zählt neben extrem schnellen Teilchen auch Gammastrahlung. Sie ist sogar noch aussagekräftiger, weil die betreffenden Photonen anders als die geladenen kosmischen Teilchen nicht durch Wechselwirkung mit Magnetfeldern abgelenkt werden und so in gerader Linie von ihrem Ursprungsort zu uns gelangen. Trotzdem können auch sie die Weiten des Kosmos nicht völlig ungestört durchdringen. Vielmehr interagieren sie mit dem extragalaktischen Hintergrundlicht: dem schwachen, diffusen Leuchten des Nachthimmels, das aus verschiedenen Quellen außerhalb der Milchstraße stammt und die kosmische Hintergrundstrahlung als eine Komponente enthält. Bei dieser Wechselwirkung verwandeln sich die Gammaquanten in Elektron-Positron-Paare. Deren Zerfall durch Paarvernichtung liefert zwar wieder Photonen, die jedoch in der Regel eine andere Frequenz und Richtung haben. Auch hochenergetische Gammastrahlung sollte deshalb nur aus nicht allzu weit entfernten Quellen zu uns kommen.

Umso mehr überrascht, dass Wissenschaftler mit dem MAGIC-Teleskop (*Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Telescope*) auf La Palma kürzlich einen Ausbruch von Gammastrahlung von einem Quasar namens 3C 279 entdeckt haben, der über fünf Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt ist (*Science*, Bd. 320, S. 1752). Sie stammt aus der Umgebung des Schwarzen Lochs im Zentrum dieser aktiven Galaxie, das etwa eine Milliarde Sonnenmassen enthält. Die zugehörige Akkretionsscheibe emittiert im gesamten Energiespektrum von Radiowellen über optisches Licht bis zu hochenergetischer Gammastrahlung. MAGIC hat den Bereich von $8 \cdot 10^{10}$ bis über $3 \cdot 10^{11}$ Elektronvolt registriert.

Herausforderung für Theoretiker

Der Quasar 3C 279 ist mehr als doppelt so weit entfernt wie alle zuvor im Gammalicht beobachteten Galaxien. Dass er sich trotz der enormen Distanz in diesem Spektralbereich erkennen lässt, kann nur eines heißen: Die Dichte des extragalaktischen Hintergrundlichts ist wesentlich geringer als bisher angenommen. Das untermauert ein Ergebnis, das vor

Das MAGIC-Teleskop auf La Palma hat kürzlich hochenergetische Gammastrahlung aus fünf Milliarden Lichtjahren Entfernung registriert. Demnach ist die Dichte des extragalaktischen Hintergrundlichts wesentlich geringer als bisher angenommen.

zwei Jahren bereits Forscher mit den H.E.S.S.-Teleskopen in Namibia erhielten. Die Beobachtung zweier etwa zwei Milliarden Lichtjahre entfernter Quasare hatte ergeben, dass die von ihnen ausgesandten hochenergetischen Photonen im Energiebereich um 10^{12} Elektronvolt nicht so stark durch Elektron-Positron-Bildung bei Stößen mit Photonen des extragalaktischen Hintergrundlichts vernichtet werden wie erwartet; es geht also nur ein kleiner Teil von ihnen auf dem Weg zur Erde verloren. Die überraschende Transparenz des intergalaktischen Mediums ist eine Herausforderung für etablierte Theorien über die Entstehung von Galaxien und die großräumige Struktur des Universums.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik.

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

KLIMATOLOGIE

Kalt erwischt

2008 sank die globale Mitteltemperatur deutlich unter die Projektionen des UN-Klimarats. Was hat es damit auf sich?

Von Sven Titz

Nein, einen Rekord gab es diesmal nicht. Das Jahr 2008 war, wie Forscher am Met Office Hadley Centre in Exeter (England) berechnet haben, bloß das zehntwärmste in ihren Aufzeichnungen. Die Mitteltemperatur an der Erdoberfläche lag zwar etwa 0,32 Grad Celsius über dem Durchschnitt der Jahre 1961 bis 1990 und höher als in allen Jahren des 20. Jahrhunderts außer 1998. Verglichen mit den Projektionen des UN-Klimarats IPCC (Zwischenstaatlicher Ausschuss zum Klimawandel) ist das dennoch recht kalt: ungefähr 0,25 Grad Celsius weniger als der Wert, der sich aus den Kurven im jüngsten Report von 2007 ergibt (siehe Kasten). So tief unter die jeweils aktuellste IPCC-Projektion ist die Mitteltemperatur der Abbildung zufolge noch in keinem Jahr gefallen, seit es UN-Klimaberichte gibt – also seit 1990. Damals war es auf der Erde gerade einmal 0,06 Grad kühler als 2008.

Verursacht hat den Temperaturrückgang laut Expertenmeinung zum großen Teil eine natürliche Klimaschwankung im Pazifischen Ozean: La Niña, das Gegenstück zu El Niño. Natürliche Schwankungen im Klimasystem rufen in einzel-

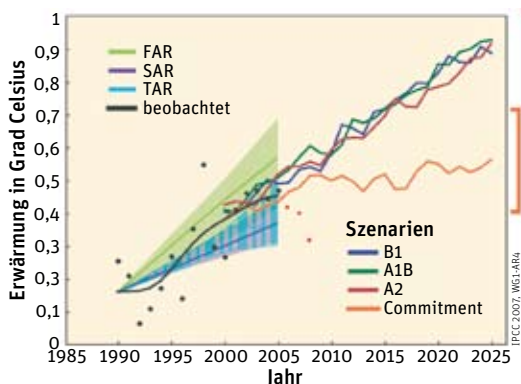
nen Jahren immer wieder Abweichungen vom Langzeittrend und von den IPCC-Projektionen hervor. So geschah es – mit umgekehrtem Vorzeichen – auch 1998. Damals hob ein El-Niño-Ereignis die Mitteltemperatur um gut 0,25 Grad Celsius über die Projektionen des IPCC-Berichts von 1995.

Fachleute sagen klipp und klar: Computermodelle des Klimas funktionieren noch nicht annähernd so verlässlich wie die für die Wettervorhersage; kurzfristige Schwankungen wie El Niño und La Niña lassen sich nicht realistisch simulieren, dekadische und multidekadische Schwankungen noch weniger. Auch wenn das Jahr 2008 ungewöhnlich kühl war, sind die unscharfen Temperaturprognosen des UN-Klimarats deshalb nicht gleich widerlegt.

Die IPCC-Projektionen fußen auf bestimmten Annahmen über Treibhausgase und andere Umstände. Vorhersagen für einzelne Jahre lassen sich daraus nicht ableiten, allenfalls durchschnittliche Temperaturwerte für Zeiträume über Jahrzehnte hinweg. So hieß es im IPCC-Bericht von 2007, in den kommenden 20 Jahren sei mit einer Erwärmung um ungefähr 0,2 Grad Celsius pro Dekade zu rechnen. Genauer geht es noch nicht.

PROGNOSEN UND REALITÄT

Projektionen des UN-Klimarats (IPCC) samt gemessenen Temperaturwerten bis 2005 (schwarze Punkte) sind hier um die Daten bis 2008 ergänzt (rote Punkte). Die vier Szenarien (B1, A1B, A2 und Commitment) stammen aus dem Klimareport von 2007 und stellen über mehrere Modellläufe gemittelte Simulationen der Temperaturentwicklung dar. Das Szenario »Commitment« geht von gleich bleibenden Treibhausgas-



konzentrationen ansteigen, wie es in Wirklichkeit der Fall war. Die grün, blau und violett schattierten Bereiche repräsentieren die Projektionen früherer UN-Klimaberichte (First Assessment Report oder FAR, 1990; SAR, 1995; TAR, 2001).

Höchstleistung:

Jetzt Extra-Zinsen sichern

4%



Sicher, kostenlos
und täglich verfügbar

Extra-Konto

Jetzt neues Geld einzahlen und ab 01.02.2009 von hohen Extra-Zinsen profitieren.

- Für alle: 4% Zinsen p. a. für jeden neuen Euro
- Zins garantiert vom 01.02. bis 30.04.2009, ansonsten gilt der jeweils aktuelle Extra-Konto Zins, derzeit 3% p. a., Stand 01.01.2009
- Bis 30.04.2009: 25 Euro Aral Tankgutschein ab 5.000 Euro Starteinlage bei Eröffnung des ersten Extra-Kontos

Direkt eröffnen:

0180 2 / 88 10 00

(Festnetz der Dt. Telekom – 0,06 Euro pro Anruf, ggf. abweichende Mobilartarife)

www.ing-diba.de

ING  DiBa

Springers Einwürfe

Anus (sic!) mirabilis

Die Evolution des Afters gibt neue Rätsel auf.

Als meinen kleinen Beitrag zum großen Darwin-Jubiläumsjahr möchte ich Ihnen den Strudelwurm vorstellen. Er ist das primitivste Exemplar der Bilateria oder Zweiseitentiere; mit ihnen begann die Evolution frei beweglicher, links-rechts-symmetrischer Lebewesen, zu denen zuletzt auch wir Menschen gehören. Davor bestand das Tierreich aus Zellhaufen oder kugelsymmetrischen Organismen, die auch heute gern in großen Verbänden Schwämme oder Korallen bilden.

Die millimetergroßen Acoela, so der lateinische Name, haben gleich anderen Plattwürmern die Gestalt eines elliptischen Topflappens und arbeiten sich, was ihnen ihre deutsche Bezeichnung eingetragen hat, mit strudelnden Wellenbewegungen ihrer Ränder vorwärts. Dabei nehmen sie durch eine Mundöffnung nahrhafte Schwebeteilchen auf, deren Verdauungsrückstände aber den Körper nicht durch eine zweite Öffnung verlassen, sondern irgendwie aus dem Innern ins Meer hinausdiffundieren.

Mir imponiert der kleine Wurm durch seine extrem sparsame Ausstattung. Er verfügt nur über das Allernötigste, und dazu gehört der After offenbar nicht. Bei seinen Verwandten, den Bandwürmern, erklärt man sich den fehlenden Anus dadurch, dass diese ohnehin im Darm eines Wirts residieren und darum ganz ohne Eingeweide auskommen. Die Vermutung lag nahe, auch der Strudelwurm habe am Anfang seiner Evolution an beiden Enden seiner Symmetrieachse automatisch je eine Öffnung besessen; die hintere sei dann, weil das bescheidene Wesen in nährstoffreichen Gewässern auch ohne sie gut zurechtkam, nachträglich evolutionär eingespart worden. Doch genetische Analysen des deutschen Zoologen Andreas Hejnol und seines US-Kollegen Mark Martindale an der University of Hawaii stellen die gängige Lehrmeinung – kein Mund ohne Anus – nun ernsthaft in Frage (*Nature*, Bd. 456, S. 382).

Nach dem neuen Befund sind bestimmte Gene ausschließlich für die Entwicklung der Mundöffnung zuständig, während eine separate Programmierung eher nebenbei das Hinterteil mitsamt den Reproduktionsorganen herausgebildet hat. Apropos Reproduktion: Der Begattungsvorgang der Strudelwürmer vollzieht sich mit archaischer Heftigkeit. Acoela sind Hermaphroditen, also Zwitter, und ein sexuell erregtes Pärchen stürzt sich so wild aufeinander, dass buchstäblich die Fetzen fliegen. Die dabei entrissenen Körperteile können aber von den kleinen Wunderwesen flugs wieder regeneriert werden.

Dass zwischen Mund und After kein notwendiger Zusammenhang besteht, regt meine evolutionäre Fantasie an: Könnten sich auf fernen Planeten nicht intelligente Zwitterwesen herausgebildet haben, deren Evolution auf ein spezielles Ausscheidungsorgan verzichtet hat? Sie würden im unwahrscheinlichen Fall einer Begegnung unsere Höflichkeit vermutlich durch intensiven Mund- und Körpergeruch sowie hemungsloses Sexualverhalten auf eine harte Probe stellen.

Interessant ist schließlich auch die Frage, wie man den lateinischen Namen meines Lieblingswurms in verschiedenen europäischen Sprachen ausspricht. Hinter ihm steckt das Eigenschaftswort *acoel* (von griechisch *akóilos*, nicht hohl). Wir Deutsche machen daraus ein unverfängliches »azöhl«. Im Englischen hört sich das Wort dagegen wie »Ekel« an. Den komischen Vogel aber schießen die Franzosen ab. In ihrem Mund klingt *acoel*, wie der britische Zoologe Tim Littlewood bei einem Kongress über parasitische Plattwürmer genüsslich bemerkt hat, fast wie ein englisches »asshole«. Wieder einmal finde ich die – zugegeben seichte – Wahrheit bestätigt, dass irgendwie alles mit allem zusammenhängt.



Michael Springer

Trotzdem: Klimaprojektionen sind als bedingte Vorhersagen aufzufassen, und deren Güte wird nach der Übereinstimmung mit Messdaten beurteilt. Da lohnt es sich, genauer hinzuschauen. Mitarbeiter des Hadley Centre berechnen die Mitteltemperatur an der Erdoberfläche aus Tausenden von Thermometermessungen in aller Herren Länder. Die Temperatur wird in einer Höhe von 1,25 bis 2 Metern über dem Land sowie direkt an der Meeresoberfläche bestimmt. Aus diesen Daten errechnet sich nach der Korrektur systematischer Fehler, etwa durch städtische Wärmeinseln, in einem komplizierten Verfahren ein Mittelwert.

Auch zwei US-Institutionen bestimmen auf ähnliche Weise eine Durchschnittstemperatur, nämlich das Goddard Institute for Space Studies der NASA und das National Climatic Data Centre der NOAA (Nationale US-Behörde für Ozeane und Atmosphäre). Sie kommen für 2008 zu einem ganz ähnlichen Ergebnis wie die Briten – ihnen zufolge handelte es sich um das neuntärmste Jahr seit Beginn der instrumentellen Aufzeichnungen.

Klimaforscher verfolgen die Temperaturentwicklung der Atmosphäre aber nicht nur mit dem Thermometer. Zwei Teams in den USA benutzen dazu Mikrowellenmessungen, die seit Ende 1978 mit Satelliten gemacht werden. Auf diese Weise ermitteln sie unter anderem die Temperatur der Luftschicht zwischen dem Boden und rund sechs Kilometer Höhe. Nach den Daten bis November platziert das eine Team das Jahr 2008 ungefähr auf Platz elf der Wärmerekordliste, das andere noch weiter hinten.

Es mag wohl sein, dass der jüngste Temperaturrückgang nur eine natürliche Fluktuation widerspiegelt. Aber dann erhebt sich eine andere Frage: Können sich die Klimaforscher wirklich sicher sein, dass analoge Schwankungen bei der Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts kaum eine Rolle gespielt haben, wie dies im letzten IPCC-Bericht zu lesen war? Wie brauchbar sind Klimaprojektionen eigentlich für mittelfristige Planungen von Regierungen und Wirtschaftsunternehmen? Vielleicht war die meinungsbestimmende Mehrzahl der Klimaforscher bei den bisherigen Antworten doch etwas zu selbstgewiss.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Das fraktale

Quanten- universum

In Kürze

► Quantenmechanik und allgemeine Relativitätstheorie vertragen sich nicht. Seit Langem wird versucht, die beiden in einer **Theorie der Quantengravitation** zu versöhnen – mit beschränktem Erfolg.

► **Ein neuer Ansatz** führt keine exotischen Komponenten ein, sondern wendet vorhandene Gesetze auf einzelne Stäubchen der Raumzeit an. Sie fügen sich dann von selbst zusammen, wie Moleküle in einem Kristall.

► Die vierdimensionale Raumzeit geht auf diese Weise dynamisch aus einfachen Bausteinen hervor. In kleinstem Maßstab erscheint die Raumzeit nicht glatt, sondern als **selbstähnliches Fraktal**.

Seit Jahrzehnten bemühen sich Physiker, Quantenmechanik und Gravitation unter einen theoretischen Hut zu bringen. Ein neuer Ansatz zeigt, wie sich die Bausteine von Raum und Zeit als selbstähnliches Fraktal zusammenfügen.

Von Jan Ambjørn,
Jerzy Jurkiewicz und Renate Loll

Wie sind Raum und Zeit entstanden? Wie haben sie die glatte vierdimensionale Leere gebildet, die unserer physikalischen Welt als Bühne dient? Wie sehen sie im allerkleinsten Maßstab aus? Solche Fragen streifen die äußersten Grenzen der modernen Wissenschaft und treiben die Suche nach einer Theorie der Quantengravitation voran; sie wäre die lang ersehnte Vereinigung von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie mit der Quantenphysik. Die Relativitätstheorie beschreibt, wie die Raumzeit im Großen unzählige verschiedene Formen anzunehmen vermag und das hervorruft, was wir als Schwerkraft wahrnehmen. Hingegen beschreibt die Quantentheorie die physikalischen Gesetze im atomaren und subatomaren Maßstab, wobei sie Gravitationseffekte völlig ignoriert. Eine Theorie der Quantengravitation soll das Wesen der

Raumzeit in den kleinsten Größenordnungen – die Lücken zwischen den kleinsten bekannten Elementarteilchen – durch Quantengesetze beschreiben und womöglich durch gewisse fundamentale Bausteine erklären.

Oft wird die Superstringtheorie als aussichtsreichster Kandidat für diese Rolle angeführt, aber sie hat noch keine der drängenden Fragen zu beantworten vermocht. Vielmehr enthüllt sie aus ihrer inneren Logik heraus noch komplexere Schichten voll neuer, exotischer Zutaten und Beziehungen, die zu einer verwirrenden Vielfalt möglicher Resultate führen.

Seit einigen Jahren entwickelt unser Team eine viel versprechende Alternative zu dieser dicht befahrenen Autobahn der theoretischen Physik. Wir folgen einem fast peinlich simplen Rezept: Man nehme ein paar einfache Zutaten, füge sie nach wohl bekannten Quantenregeln zusammen – nichts Exotisches –, rühre gut um, lasse den Teig ruhen, und fertig ist die Quantenraumzeit. Der Prozess ist so

unkompliziert, dass er sich auf einem Laptop simulieren lässt.

Genauer gesagt: Wenn wir uns die leere Raumzeit als immaterielle Substanz vorstellen, die aus einer sehr großen Anzahl winziger, strukturloser Stücke besteht, und wenn wir diese mikroskopischen Bausteine miteinander nach einfachen, von Gravitations- und Quantentheorie diktierten Regeln wechselwirken lassen, werden sie sich spontan zu einem Ganzen anordnen, das in vieler Hinsicht aussieht wie das beobachtete Universum. Der Vorgang ähnelt der Art, wie Moleküle sich zu kristallinen oder amorphen Festkörpern zusammenfügen.

Somit gleicht die Raumzeit vielleicht eher einem einfachen Auflauf als einer raffinierten Hochzeitstorte. Außerdem ist unser Rezept, anders als andere Ansätze zur Quantengravitation, sehr stabil: Wenn wir unsere Simulationen in Details variieren, verändert sich das Resultat kaum. Diese Robustheit bestärkt uns in dem Glauben, auf dem richtigen Weg zu sein. Wäre das Modell empfindlich dafür, wohin wir jedes Stückchen des enormen Ensembles platzieren, so könnten wir eine riesige Anzahl barocker Formen erzeugen, deren jede von vornherein gleich wahrscheinlich wäre – und wir verlören jede Möglichkeit, zu erklären, warum das Universum so wurde, wie es ist.

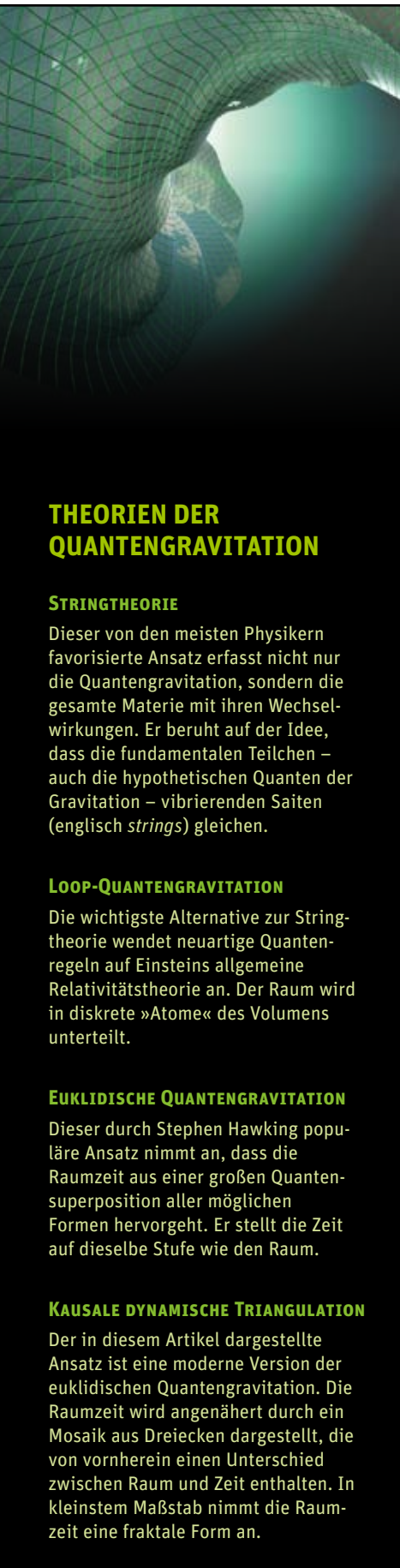
Ähnliche Mechanismen der Selbstorganisation und Selbstmontage treten in Physik, Bio-

logie und anderen Feldern der Wissenschaft immer wieder auf. Ein schönes Beispiel ist das Verhalten großer Vogelschwärme, etwa der Stare. Einzelne Vögel interagieren nur mit wenigen Nachbarn; kein Anführer gibt die Richtung vor. Dennoch bewegt sich der Schwarm als ein kompaktes Ganzes. Er besitzt kollektive oder emergente Eigenschaften, die das Verhalten des einzelnen Vogels nicht offenbart.

Eine kurze Geschichte der Quantengravitation

Frühere Versuche, die Quantenstruktur der Raumzeit durch Emergenz zu erklären, hatten nur geringen Erfolg. Sie beruhten auf der euklidischen Quantengravitation; dieses Forschungsprogramm begann Ende der 1970er Jahre und wurde durch Stephen Hawking's Bestseller »Eine kurze Geschichte der Zeit« populär. Dem Ansatz liegt ein fundamentales Prinzip der Quantenmechanik zu Grunde: Superposition. Jedes Objekt, ob klassisch oder quantenphysikalisch, ist in einem bestimmten Zustand, der beispielsweise durch Ort und Geschwindigkeit charakterisiert wird. Doch während der Zustand eines klassischen Objekts durch eine eindeutige Menge von Zahlen beschrieben werden kann, ist der Zustand eines Quantenobjekts viel reichhaltiger: Er ist die Superposition – die Überlagerung – aller möglichen Zustände.

Gekrümmte Flächen lassen sich durch Netze aus Dreiecken approximieren. Die Autoren wenden dieses Verfahren auf die Raumzeit an; an die Stelle der flachen Dreiecke treten vierdimensionale Tetraeder.



JEAN-FRANÇOIS POUREVIN

THEORIEN DER QUANTENGRAVITATION

STRINGTHEORIE

Dieser von den meisten Physikern favorisierte Ansatz erfasst nicht nur die Quantengravitation, sondern die gesamte Materie mit ihren Wechselwirkungen. Er beruht auf der Idee, dass die fundamentalen Teilchen – auch die hypothetischen Quanten der Gravitation – vibrierenden Saiten (englisch *strings*) gleichen.

LOOP-QUANTENGRAVITATION

Die wichtigste Alternative zur Stringtheorie wendet neuartige Quantenregeln auf Einsteins allgemeine Relativitätstheorie an. Der Raum wird in diskrete »Atome« des Volumens unterteilt.

EUKLIDISCHE QUANTENGRAVITATION

Dieser durch Stephen Hawking populäre Ansatz nimmt an, dass die Raumzeit aus einer großen Quantensuperposition aller möglichen Formen hervorgeht. Er stellt die Zeit auf dieselbe Stufe wie den Raum.

KAUSALE DYNAMISCHE TRIANGULATION

Der in diesem Artikel dargestellte Ansatz ist eine moderne Version der euklidischen Quantengravitation. Die Raumzeit wird angenähert durch ein Mosaik aus Dreiecken dargestellt, die von vornherein einen Unterschied zwischen Raum und Zeit enthalten. In kleinstem Maßstab nimmt die Raumzeit eine fraktale Form an.

Zum Beispiel rollt eine klassische Billardkugel längs einer einzigen Trajektorie dahin, das heißt jederzeit mit präzisiertem Ort und präziser Geschwindigkeit. Das wäre aber keine gute Beschreibung dafür, wie sich das viel kleinere Elektron verhält. Seine Bewegung wird durch Quantengesetze beschrieben, denen zufolge das Teilchen gleichzeitig in einem weiten Bereich von Orten und Geschwindigkeiten existieren kann. Wenn ein Elektron ohne Einwirkung äußerer Kräfte von Punkt A nach Punkt B wandert, nimmt es nicht bloß den geraden Weg von A nach B, sondern alle verfügbaren Routen auf einmal. Diesem qualitativen Bild, in dem alle möglichen Elektronenpfade zusammen auftreten, entspricht die präzise mathematische Vorschrift einer Quantensuperposition, wie sie der amerikanische Nobelpreisträger Richard Feynman (1918–1988) formuliert hat: ein gewichteter Mittelwert all dieser separaten Möglichkeiten.

Nach diesem Rezept lässt sich die Wahrscheinlichkeit berechnen, das Elektron in einem bestimmten Bereich von Orten und Geschwindigkeiten abseits des geraden Pfads zu finden, den wir gemäß den Gesetzen der klassischen Mechanik erwarten würden. Spezifisch quantenmechanisch wird das Verhalten des Teilchens durch seine Abweichungen von einer einzigen scharfen Trajektorie. Diese so genannten Quantenfluktuationen werden umso wichtiger, je kleiner das betrachtete System ist.

Die euklidische Quantengravitation wendet das Superpositionsprinzip auf das gesamte Universum an. In diesem Fall besteht die Superposition nicht nur aus unterschiedlichen Teilchenbahnen, sondern aus unterschiedlichen zeitlichen Entwicklungen des ganzen Universums – insbesondere aus den verschiedenen möglichen Formen der Raumzeit. Um das Problem beherrschbar zu machen, betrachten die Physiker meist nicht jede einzelne denkbare Verzerrung der Raumzeit, sondern nur ihre Gestalt im Großen und Ganzen (siehe »Quantenkosmologie und die Entstehung des Universums« von Jonathan J. Halliwell, Spektrum der Wissenschaft 2/1992, S. 50).

In den 1980er und 1990er Jahren machte die euklidische Quantengravitation durch die Entwicklung aufwändiger Computersimulationen einen großen technischen Sprung. Solche Modelle stellen die gekrümmten Raumzeitgeometrien mittels winziger Bausteine dar, die der Einfachheit halber dreieckig sind. Dreiecksgitter liefern gute Näherungen für gekrümmte Flächen und werden darum häufig für Computergrafiken und -trickfilme verwendet. Im Fall der Raumzeit sind die elementaren Bausteine vierdimensional verallgemeinerte Dreiecke, so genannte Vier-Simplices

(Plural von Vier-Simplex). Genau so, wie das Zusammenkleben von Dreiecken an ihren Kanten eine gekrümmte zweidimensionale Fläche zu erzeugen vermag, kann durch Kleben von Vier-Simplices entlang ihren »Flächen« – die eigentlich dreidimensionale Tetraeder sind – eine vierdimensionale Raumzeit entstehen.

Die winzigen Bausteine haben selbst keine unmittelbar physikalische Bedeutung. Könnte man die reale Raumzeit mit einem ultrahochauflösenden Mikroskop untersuchen, sähe man keine kleinen Dreiecke. Sie sind bloße Approximationen. Physikalisch relevante Information liefert nur das kollektive Verhalten der Bausteine, wenn man sich vorstellt, ihre Größe gehe gegen null. Bei diesem Grenzwert spielt es keine Rolle, ob die Bauteile anfangs dreieckig, würfelförmig, fünfeckig oder irgendeine Mischung davon waren.

Die Unempfindlichkeit gegen eine Vielfalt kleiner Details wird Universalität genannt. Sie ist ein wohl bekanntes Phänomen in der statistischen Mechanik, welche die Molekularbewegungen in Gasen und Flüssigkeiten untersucht; das Verhalten dieser Substanzen ist weitgehend unabhängig von ihrer Zusammensetzung im Detail. Universalität zeigt sich erst in einem Maßstab, der viel größer ist als jener der einzelnen Bestandteile. Analoges gilt für einen Schwarm von Staren: Farbe, Größe, Flügelspannweite und Alter der einzelnen Vögel sind für das Flugverhalten des gesamten Schwarms fast unerheblich. Nur wenige mikroskopische Details machen sich in makroskopischen Größenordnungen bemerkbar.

Ein Modell spielt verrückt

Mit diesen Computersimulationen begannen Theoretiker die Effekte von überlagerten Raumzeitformen zu erforschen, welche die klassische Relativitätstheorie nicht zu behandeln vermag – insbesondere solche, die auf sehr kleine Distanz extrem stark gekrümmt sind. Just dieser so genannte nichtstörungstheoretische Bereich interessiert die Physiker am meisten, lässt sich aber ohne Computerhilfe nicht berechnen.

Leider zeigten die Simulationen, dass der euklidischen Quantengravitation irgendein wichtiger Bestandteil fehlt. Nichtstörungstheoretische Superpositionen von vierdimensionalen Universen erwiesen sich grundsätzlich als instabil. Im Fall kleinräumiger Krümmung heben die Quantenfluktuationen, welche die verschiedenen überlagerten Universen charakterisieren, einander in der Summe nicht auf, um im Großen ein glattes, klassisches Universum zu erzeugen. Vielmehr verstärken sie sich in der Regel, und der gesamte Raum schrumpft

pelt zu einem Knäuel mit unendlich vielen Dimensionen zusammen. In einem solchen Raum liegt zwischen zwei beliebigen Punkten immer nur ein winziger Abstand, selbst wenn der Raum ein enormes Volumen hat. Manchmal verfällt der Raum ins andere Extrem und wird möglichst dünn und ausgedehnt, wie ein reich verzweigtes chemisches Polymer. Keine dieser Varianten ähnelt unserem Universum.

Bevor wir die Annahmen überprüfen, welche die Physiker in die Sackgasse geführt haben, wollen wir einen seltsamen Aspekt dieses Resultats betrachten. Die Bausteine sind vierdimensional, doch insgesamt ergeben sie einen Raum mit unendlich vielen (das verschrumpelte Universum) oder mit nur zwei Dimensionen (das Polymeruniversum). Sobald wir den Geist aus der Flasche lassen, indem wir große Quantenfluktuationen des leeren Raums erlauben, wird selbst ein so grundlegender Begriff wie die Dimension wandelbar. Dieses Ergebnis war auf Grund der klassischen Gravitationstheorie, in der die Anzahl der Dimensionen stets feststeht, unmöglich vorherzusehen.

Eine Folgerung wird Sciencefiction-Fans ziemlich enttäuschen. Zukunftsgeschichten nutzen gern Wurmlöcher – dünne Tunnel in der Raumzeit, die eine Abkürzung zwischen ansonsten weit entfernten Regionen bieten. Sie versprechen aufregende Zeitreisen sowie Signalübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit. Zwar ist so etwas nie beobachtet worden, doch manche Physiker mutmaßen, Wurmlöcher könnten innerhalb der Quantengravitation eine Existenzberechtigung finden. Angesichts der negativen Resultate der euklidischen Quantengravitation erscheint dies extrem unwahrscheinlich. Die Raumzeitunnel treten in derart riesiger Vielfalt auf, dass sie die Superposition dominieren und destabilisieren; darum vermag das Quantenuniversum nie über eine kleine, aber hochgradig verflochtene Nachbarschaft hinauszuwachsen.

Was mag der Fehler sein? Bei unserer Suche nach Schlupflöchern und losen Enden des euklidischen Ansatzes stießen wir schließlich auf die rettende Zutat, die absolut nötig ist, damit der Auflauf gelingt: Das Universum muss von vornherein kausal strukturiert sein. Kausalität bedeutet, dass die leere Raumzeit eine Struktur hat, die eindeutig zwischen Ursache und Wirkung unterscheidet. Dies ist ein integraler Bestandteil der klassischen speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie.

Doch die euklidische Quantengravitation enthält keine Idee von Kausalität. Der Begriff euklidisch bedeutet, dass Raum und Zeit gleich behandelt werden. Die Universen, die in die euklidische Superposition eingehen, haben vier räumliche Richtungen statt wie üblich eine für

DER RAUM ALS BUCKELPISTE

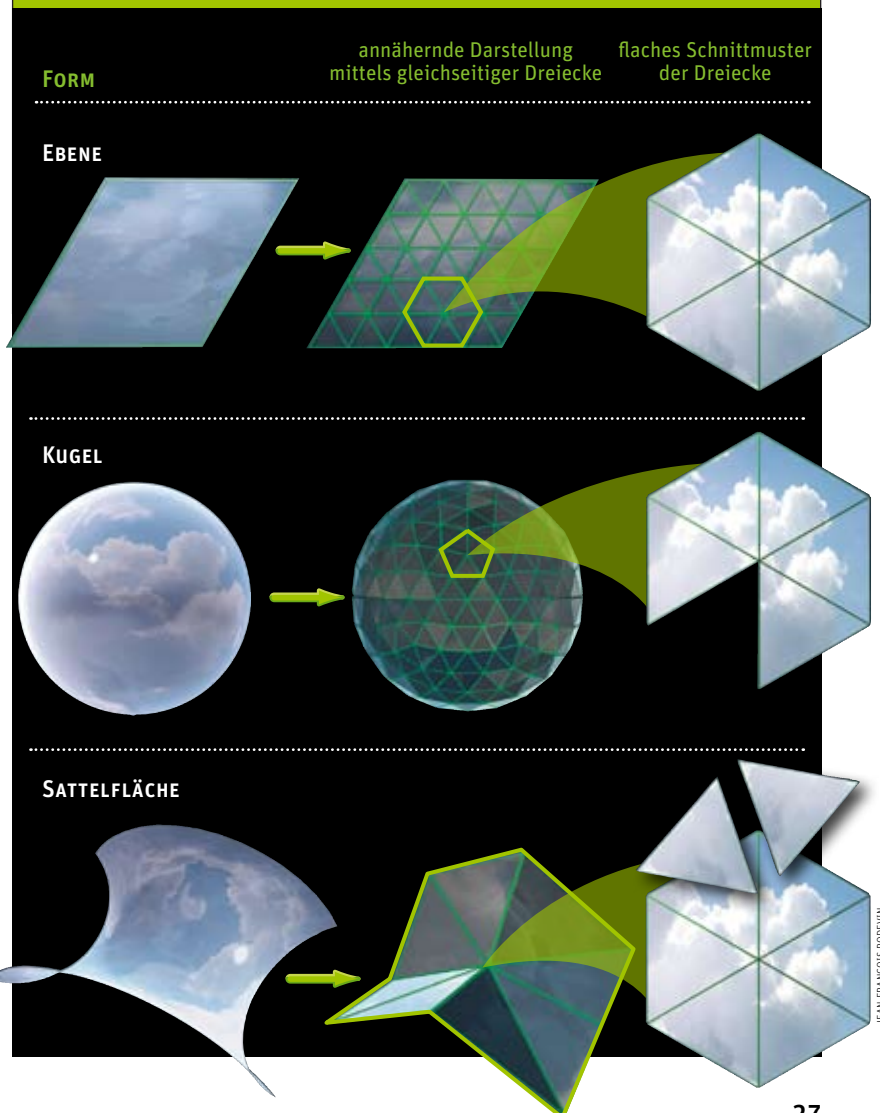
Wir stellen uns den Raum normalerweise als bloße Leere vor, doch in Wahrheit hat er zusammen mit der Zeit eine unsichtbare Struktur, die unsere Bewegungen führt – so wie die Buckel einer verschneiten Piste die Schwünge des Schifahrers leiten. Diese Struktur nehmen wir als Schwerkraft wahr. Jede Theorie der Quantengravitation hat vor allem zum Ziel, die Form der Raumzeit im Detail zu erklären.



CORBIS, KARL WEATHERLY

EIN GEWÖLBTES MOSAIK AUS DREIECKEN

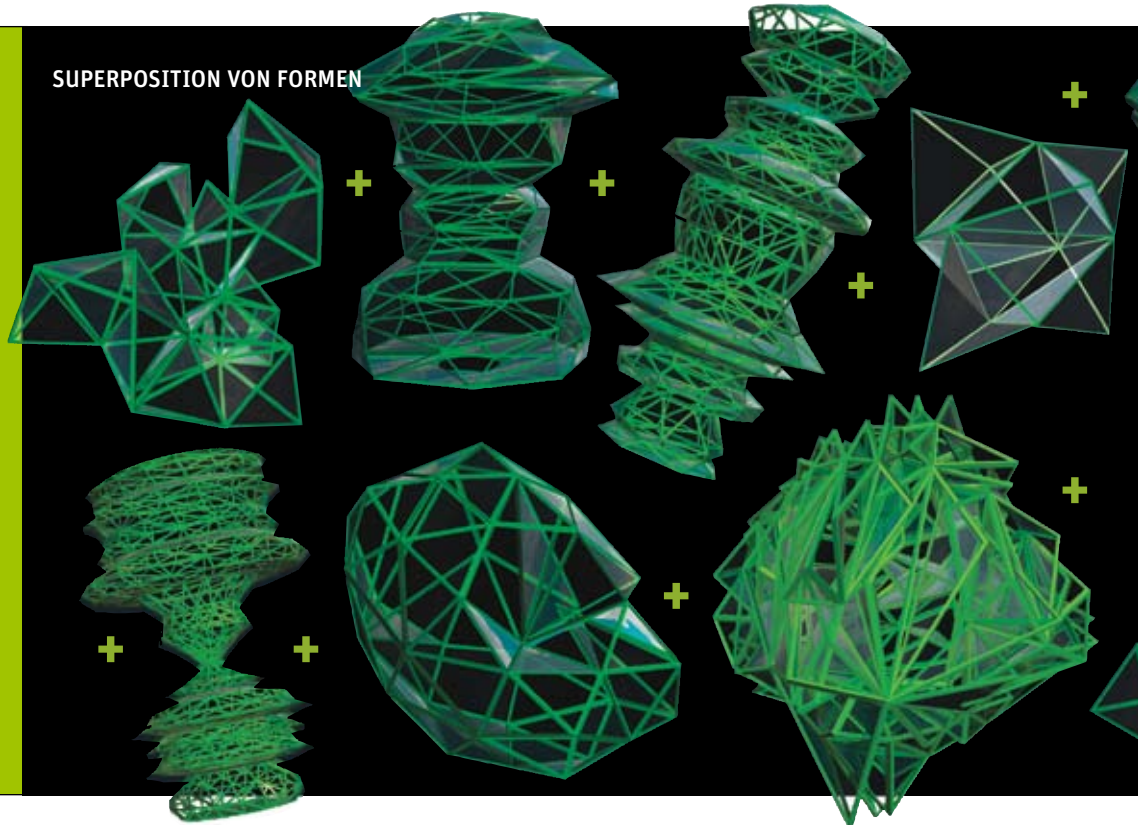
Um zu bestimmen, wie der Raum sich selbst gestaltet, müssen die Physiker zuerst eine Methode finden, um seine Form zu beschreiben. Dafür verwenden sie Dreiecke und deren höherdimensionale Entsprechungen; ein Mosaik daraus vermag eine gekrümmte Form gut angenähert wiederzugeben. Die Krümmung an einem Punkt entspricht dem Gesamtwinkel, der von den ihn umgebenden Dreiecken aufgespannt wird. Für eine ebene Fläche beträgt der Winkel exakt 360 Grad, aber für gekrümmte Flächen kann er größer oder kleiner sein.



JEAN-FRANÇOIS POEUVIN

QUANTENREGELN FÜR DIE RAUMZEIT

Die **Raumzeit** kann unzählig viele mögliche Formen annehmen. Gemäß der Quantentheorie ist die Form, die wir mit größter Wahrscheinlichkeit beobachten, eine Superposition – ein gewichtetes Mittel – all dieser Möglichkeiten. Wenn Theoretiker Formen aus Dreiecken konstruieren, gewichten sie jede Form je nachdem, wie die Dreiecke im Einzelnen zusammengeklebt werden, um diese Form zu bilden. Die Autoren haben entdeckt, dass die Dreiecke bestimmten Regeln folgen müssen, damit die Superposition dem entspricht, was wir beobachten. Insbesondere müssen die Dreiecke einen eingebauten Zeitpfeil enthalten.



SUPERPOSITION VON FORMEN

WAS IST KAUSALITÄT?

Kausalität bedeutet, dass Ereignisse kein beliebiges Durcheinander bilden, sondern eine bestimmte Zeitfolge von der Ursache zur Wirkung einhalten. Im Ansatz der Autoren ist der Unterschied zwischen Ursache und Wirkung keine sekundäre Eigenschaft, sondern ein grundlegendes Naturprinzip.



CORBIS, IMAGESHOP

die Zeit und drei für den Raum. Da euklidische Universen keinen deutlichen Zeitbegriff haben, fehlt ihnen eine Struktur, um Ereignisse in eine spezielle Ordnung zu bringen. Hawking und andere Anhänger dieses Ansatzes meinten, die Zeit sei »imaginär« – sowohl im mathematischen wie im umgangssprachlichen Sinn. Sie hofften, mikroskopische Quantenfluktuationen, die für sich genommen keine kausale Struktur enthalten, würden die Kausalität als großräumige Eigenschaft hervorbringen. Doch die Computersimulationen haben diese Hoffnung zerschlagen.

Statt beim Aufbau einzelner Universen die Kausalität zu vernachlässigen und zu hoffen, sie würde durch die kollektive Weisheit der Superposition wie von selbst auftauchen, beschlossen wir, die Kausalstruktur in einem viel früheren Stadium einzubauen. Der Fachausdruck für unsere Methode lautet kausale dynamische Triangulation. Dabei weisen wir zunächst jedem Vier-Simplex einen Zeitpfeil zu, der von der Vergangenheit in die Zukunft weist. Dann erzwingen wir kausale Kleberegeln: Zwei Simplices müssen so verklebt werden, dass ihre Zeitpfeile dieselbe Richtung haben. Den Simplices muss eine Zeit gemeinsam sein, die sich stetig in Richtung dieser Pfeile entfaltet und niemals stillsteht oder rückwärtsläuft. Der Raum behält mit fortschreitender Zeit seine allgemeine Form; er kann nicht in getrennte Stücke zerbrechen oder Wurm Löcher bilden.

Nachdem wir dieses Verfahren 1998 formuliert hatten, demonstrierten wir an stark vereinfachten Modellen, dass kausale Kleberegeln zu einer anderen großräumigen Form führen als die euklidische Quantengravitation. Das war ermutigend, aber noch fehlte der Nachweis, dass diese Regeln ausreichen, um ein ganzes vierdimensionales Universum zu stabilisieren. Darum hielten wir 2004 den Atem an, als unser Computer die ersten Berechnungen einer großen kausalen Superposition von Vier-Simplices zu liefern begann. Würde sich diese Raumzeit über große Entfernungen wirklich wie ein vierdimensionales ausgebreitetes Objekt benehmen – und nicht wie ein verknülltes Kügelchen oder Polymer?

Die Raumzeit im Großen und im Kleinen

Man stelle sich unsere Begeisterung vor, als die Anzahl der Dimensionen vier betrug – genauer $4,02 \pm 0,1$. Zum ersten Mal hatte jemand die beobachtete Dimensionszahl aus Grundprinzipien hergeleitet. Bis heute ist der Einbau der Kausalität in die Computermodelle das einzige bekannte Mittel gegen die Instabilität überlagerter Raumzeitgeometrien.

Diese Simulation war der Beginn einer langen Serie von rechnerischen Experimenten, mit denen wir bis heute versuchen, aus Computersimulationen die physikalischen und geometrischen Eigenschaften der Quantenraumzeit zu entnehmen. Zunächst untersuchten wir die

ZWEI MÖGLICHE KLEBEREGELN

ALLES ERLAUBT

Wenn Physiker totale Beliebigkeit – alle möglichen Anordnungen von Dreiecken – zulassen, kommt ein fest zusammengeknülltes Kügelchen mit unendlich vielen Dimensionen heraus.

INGESCHRÄNKT DURCH DAS KAUSALITÄTSPRINZIP

Wenn Physiker die Regel hinzufügen, dass benachbarte Dreiecke eine übereinstimmende Zeitrichtung haben müssen – so dass Ursache und Wirkung eindeutig unterschieden werden –, entsteht eine vierdimensionale Raumzeit, die unserem Universum verblüffend ähnelt.

Form der Raumzeit über große Entfernungen und wiesen nach, dass sie mit der Wirklichkeit übereinstimmt – das heißt, mit den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie. Dieser Test ist in nichtstörungstheoretischen Modellen der Quantengravitation, die keine bestimmte Standardform der Raumzeit auszeichnen, sehr aufwändig. Er ist sogar so schwierig, dass die meisten Ansätze zur Quantengravita-

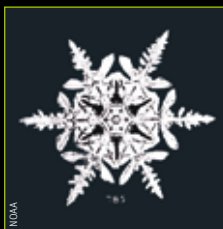
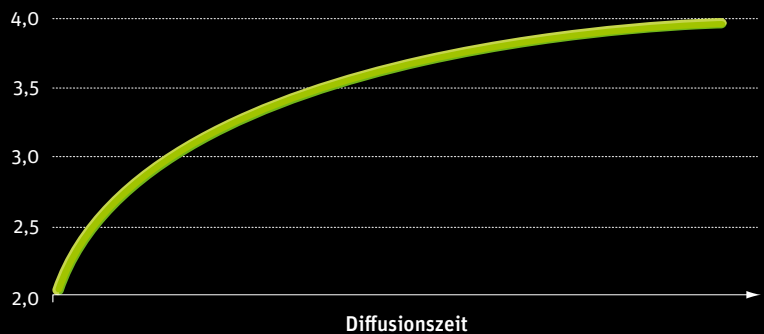
tion – auch die Stringtheorie, außer in Spezialfällen – dafür nicht genügend ausgereift sind.

Wie sich zeigte, mussten wir in unser Modell, damit es funktionierte, von vornherein eine so genannte kosmologische Konstante einbauen – eine unsichtbare und immaterielle Substanz, die der Raum auch dann enthält, wenn andere Formen von Materie und Energie völlig fehlen. Das war eine gute Nachricht,

DIE RAUMZEIT UNTER DEM MIKROSKOP

Nach den Berechnungen der Autoren geht die »spektrale« Dimension der Raumzeit (siehe unten im Kasten auf der folgenden Seite) bei immer kleineren Größenordnungen allmählich von vier zu zwei über; die kontinuierliche und glatte Raumzeit zerfällt bei hoher Auflösung in ein poröses Fraktal. Noch rätseln die Physiker, ob die Raumzeit demzufolge letztlich aus lokalisierten »Atomen« besteht – oder aus komplizierten Mustern, die mit unseren vertrauten geometrischen Begriffen nur entfernt verwandt sind.

SPEKTRALE DIMENSION DER QUANTENRAUMZEIT



Die Quantenraumzeit ähnelt vielleicht dem Schnee, der im Kleinen fraktal ist ...
... aber im Großen glatt und dreidimensional.

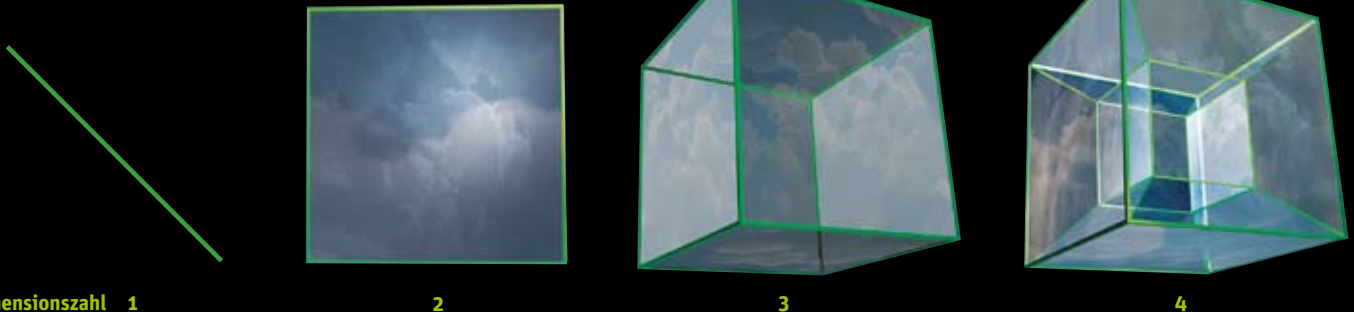


DIE FRAKTALE DIMENSION DES UNIVERSUMS

Im Alltag bezeichnet die **Dimensionszahl** die minimale Anzahl von Messungen, die den Ort eines Objekts bestimmen – zum Beispiel geographische Länge, Breite und Höhe. Diese Definition setzt voraus, dass der Raum stetig ist und den Gesetzen der klassischen Physik gehorcht. Doch was, wenn der Raum sich nicht so brav ver-

hält – wenn seine Form durch Quantenprozesse bestimmt ist, in denen Alltagsbegriffe versagen? Für solche Fälle müssen Physiker und Mathematiker raffiniertere Begriffe entwickeln. Die Dimensionszahl muss nicht einmal eine ganze Zahl sein – beispielsweise bei fraktalen Mustern, die in allen Größenordnungen gleich aussehen.

GANZZAHLIGE DIMENSIONEN ▼



Dimensionszahl 1

2

3

4

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

FRAKTALE DIMENSIONEN ▼



Cantor-Menge

Man nehme eine Strecke, entferne das mittlere Drittel und wiederhole das unendlich oft. Das resultierende Fraktal ist größer als ein einzelner Punkt, aber kleiner als eine kontinuierliche Linie. Seine Hausdorff-Dimension (siehe unten) beträgt **0,6309**.



Sierpinski-Dreieck

Wenn aus einem Dreieck immer kleinere Unterdreiecke herausgeschnitten werden, entsteht ein Mittelding zwischen einer eindimensionalen Linie und einer zweidimensionalen Fläche. Die Hausdorff-Dimension ist **1,5850**.



Menger-Schwamm

Aus einem Würfel werden immer kleinere Unterwürfel entfernt. Dieses Fraktal ist eine Fläche, die teilweise ein Volumen umhüllt. Seine Hausdorff-Dimension ist **2,7268** – ähnlich wie beim menschlichen Gehirn.

VERALLGEMEINERTE DEFINITIONEN DER DIMENSIONEN

Hausdorff-Dimension ▼

Diese Definition formulierte der deutsche Mathematiker Felix Hausdorff zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Sie gibt an, wie das Volumen V eines Gebiets von seiner linearen Größe r abhängt. Für den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum ist V proportional zu r^3 . Der Exponent gibt die Dimensionszahl an. »Volumen« kann auch für ein anderes Maß der Gesamtgröße stehen, etwa für Fläche. Beim Sierpinski-Dreieck ist V proportional zu $r^{1,5850}$. Das besagt, dass diese Figur nicht einmal eine Fläche vollständig bedeckt.

Spektrale Dimension ▼

Diese Definition beschreibt, wie etwas sich mit der Zeit durch ein Medium ausbreitet, sei es ein Tintentropfen in einem Wassertank oder eine Krankheit in einer Bevölkerung. Jedes Wassermolekül oder Individuum einer Population hat eine bestimmte Anzahl nächster Nachbarn, welche die Diffusionsrate der Tinte oder der Krankheit bedingt. In einem dreidimensionalen Medium wächst die Größe einer Tintenwolke mit der Potenz $3/2$ der Zeit. Da die Tinte beim Sierpinski-Dreieck eine verwickelte Form durchdringen muss, verteilt sie sich langsamer – mit der $0,6826$ -ten Potenz der Zeit. Das entspricht einer spektralen Dimension von $1,3652$.

ANWENDUNG DER DEFINITIONEN

Im Allgemeinen liefern unterschiedliche Berechnungsverfahren für die Dimensionszahl unterschiedliche Resultate, weil sie verschiedene Aspekte der Geometrie wiedergeben. Für einige geometrische Figuren ist die Dimensionszahl nicht konstant. Beispielsweise kann für die Diffusion an Stelle von Zeit zu einer bestimmten Potenz eine kompliziertere Formel gelten.

Simulationen der Quantengravitation konzentrieren sich auf die spektrale Dimension. Sie setzen gleichsam ein winziges Lebewesen in einen Baustein der Quantenraumzeit. Von dort aus wandert das Wesen zufällig umher. Die Gesamtzahl der Raumzeitbausteine, die es in einer bestimmten Zeit berührt, gibt Auskunft über die spektrale Dimension.

denn die Kosmologen haben Indizien für eine solche Energie gefunden. Zudem weist die entstehende Raumzeit eine so genannte De-Sitter-Geometrie auf – genau die Lösung der einsteinschen Gleichungen für ein Universum, das außer der kosmologischen Konstante nichts enthält. Es ist bemerkenswert, dass wir durch praktisch zufälliges Zusammenfügen mikroskopischer Bausteine – ohne auf eine Symmetrie oder bevorzugte geometrische Struktur zu achten – bei einer Raumzeit landen, die im Großen die hochsymmetrische Gestalt des De-Sitter-Universums aufweist.

Die dynamische Emergenz eines vierdimensionalen, im Wesentlichen richtig geformten Universums aus Grundprinzipien ist der größte Erfolg unseres Ansatzes. Ob sich dieses erstaunliche Ergebnis durch die Wechselwirkung noch unbekannter fundamentaler »Atome« der Raumzeit erklären lässt, ist Gegenstand laufender Forschung.

Nachdem unser Modell mehrere klassische Tests bestanden hatte, wandten wir uns der deutlich gequantelten Raumzeitstruktur zu, die von Einsteins klassischer Theorie nicht erfasst wird. Eine unserer Simulationen ist ein Diffusionsprozess: Wir lassen gleichsam einen Tintentropfen in die Superposition der Universen fallen und beobachten, wie er sich ausbreitet und durch die Quantenfluktuationen umhergestoßen wird. Wenn wir die Größe der Tintenwolke nach einer bestimmten Zeit messen, können wir die Dimensionszahl des Raums bestimmen (siehe Kasten links).

Variable Dimensionen

Das Ergebnis ist äußerst verblüffend: Die Anzahl der Dimensionen hängt vom Maßstab ab. Wenn wir die Diffusion nur kurze Zeit voranschreiten lassen, scheint die Raumzeit eine andere Dimensionszahl zu haben als bei langer Diffusionsdauer. Selbst wir können uns kaum vorstellen, wie die Raumzeit ihre Dimension je nach der Auflösung des Mikroskops, mit dem man sie beobachtet, stetig ändern kann. Offenbar erfährt ein kleines Objekt die Raumzeit ganz anders als ein großes. Für dieses Objekt hat das Universum eine Art fraktale Struktur. Ein Fraktal ist ein bizarrer Raumtyp; es ist selbstähnlich, das heißt, es sieht in allen Größenordnungen gleich aus.

Wie klein ist »klein«? Bis hinunter zur winzigen Größenordnung von 10^{-34} Metern wird das Quantenuniversum ausreichend durch die klassische De-Sitter-Geometrie beschrieben. Dass man der klassischen Näherung noch bei derart kurzen Distanzen vertrauen kann, ist recht erstaunlich. Es hat wichtige Folgen sowohl für das sehr frühe Universum als auch für seine fernste Zukunft. In diesen beiden ex-

tremen Phasen ist das Universum praktisch leer. Anfangs waren die Quantenfluktuationen der Schwerkraft vermutlich so stark, dass die Materie kaum ins Gewicht fiel; sie war ein winziges Floß auf einem stürmischen Ozean. In Jahrmilliarden wird durch die rapide Expansion des Universums die Materie so verdünnt sein, dass sie ebenfalls kaum eine Rolle spielt. Unsere Methode erklärt wahrscheinlich in beiden Fällen die Form des Raums.

In noch kleinerem Maßstab dominieren Quantenfluktuationen so stark, dass die klassische Geometrie völlig zusammenbricht. Die Dimensionszahl fällt von vier auf einen Wert von rund zwei. Dennoch bleibt die Raumzeit, soweit wir wissen, weiterhin kontinuierlich und enthält keinerlei Wurm Löcher. Sie benimmt sich nicht so wild wie der blubbernde Raumzeitschaum, den der amerikanische Physiker John Wheeler und viele andere sich ausmalen. Die Geometrie der Raumzeit gehorcht zwar ausgefallenen nichtklassischen Regeln, aber der Begriff des Abstands gilt weiterhin. Wir sind gegenwärtig dabei, noch kleinere Größenordnungen zu erforschen. Möglicherweise wird das Universum letztlich selbstähnlich und sieht unterhalb einer gewissen Schwelle in jedem Maßstab gleich aus. In diesem Fall besteht die Raumzeit nicht aus Strings oder Raumzeitatomen, sondern ist im Kleinsten unendlich langweilig: Die unterhalb der Schwelle gefundene Struktur wiederholt sich einfach in jedem kleineren Maßstab ad infinitum.

Es ist kaum vorstellbar, wie Physiker mit noch weniger Zutaten ein wirklichkeitsnahes Quantenuniversum erzeugen könnten. Wir müssen noch viele Tests und Experimente durchführen – beispielsweise, um zu verstehen, wie sich die Materie im Universum verhält und wie sie ihrerseits die Gesamtform des Universums beeinflusst. Jede Theorie der Quantengravitation strebt letztlich das Ziel an, beobachtbare Phänomene herzuleiten. Das wird das entscheidende Kriterium dafür sein, ob unser Modell wirklich die richtige Theorie des Quantenuniversums ist. ◀



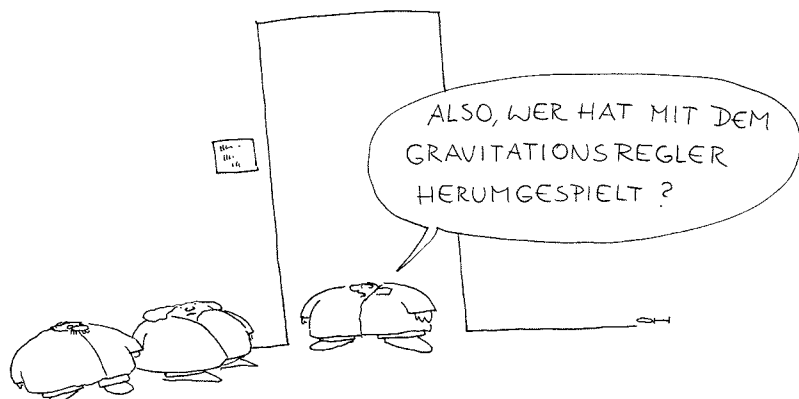
Jan Ambjørn ist Mitglied der Königlich-Dänischen Akademie sowie Professor am Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen und an der Universität Utrecht (Niederlande). **Jerzy Jurkiewicz** leitet die Abteilung für Theorie komplexer Systeme am Physikalischen Institut der Jagiellonischen Universität in Kraków (Polen). Unter anderem arbeitete er am Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen. **Renate Loll** ist Professorin an der Universität Utrecht, wo sie eine der größten europäischen Gruppen zur Erforschung der Quantengravitation leitet. Zuvor arbeitete sie als Heisenberg-Stipendiatin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam.

Ambjørn, J. et al.: Planckian Birth of a Quantum de Sitter Universe. In: Physical Review Letters 100, Nr. 091304, 2008.

Loll, R.: The Emergence of Space-time, or, Quantum Gravity on Your Desktop. In: Classical and Quantum Gravity 25(11), Nr. 114006, 2008.

Musser, G.: The Complete Idiot's Guide to String Theory. Alpha Books, New York 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/977235.



Elektronenjagd

mit Attosekundenblitzen

Attosekundenphysiker erobern den Mikrokosmos: Mittels ultrakurzer Laser- und Röntgenpulse verfolgen sie die Bewegung einzelner Elektronen nun in Echtzeit. Weitere Fortschritte könnten eine Geschwindigkeitsrevolution in der Computertechnik auslösen.

Von Reinhard Kienberger
und Ferenc Krausz

Wer tief in die Materie blickt, muss damit rechnen, dass seine zeitlichen Maßstäbe ihre Bedeutung verlieren. Denn alles, was im Mikrokosmos geschieht, spielt sich in winzigen Bruchteilen von Sekunden ab – und zwar umso schneller, je tiefer wir in ihn eindringen. Als Wissenschaftler Anfang der 1990er Jahre begannen, Bewegungen von Atomen und Molekülen während schneller chemischer Reaktionen routinemäßig zu »fotografieren«, mussten sie bereits mit femtosekundenkurzen Laserblitzen arbeiten – eine Femtosekunde sind gerade einmal 10^{-15} Sekunden. Doch selbst damals blieben Fragen unbeantwortet. Was genau geschieht im Inneren der Elektronenhülle, die jeden Atomkern umgibt? Wie lassen sich die Bewegungen einzelner Elektronen verfolgen? Und gibt es endlich eine Möglichkeit, unsere Vorstellung vom atomaren Aufbau anhand von »Bildern« zu überprüfen?

Diese Chance bietet erst die Attosekundenphysik, deren Geburtsstunde vor sieben Jahren schlug. Mittels Laserpulsen, die nur wenige hundert Attosekunden dauerten, konnten wir im Jahr 2002 erstmalig den Ablauf eines elektronischen Prozesses in einem Gasatom »filmen«. Eine Attosekunde sind 10^{-18} Sekunden, also der tausendste Teil einer Femtosekunde. Oder etwas anschaulicher gesprochen: Eine Attosekunde verhält sich zu einer Sekunde etwa so wie diese zum Alter unseres Universums.

Die Versuche, immer tiefer in den Mikrokosmos vorzudringen, werden schon bald weit reichende Konsequenzen haben. Lernen wir nämlich, elektronische Prozesse auf der Attosekundenskala zu verstehen und zu beherrschen, können wir die ultimativen Grenzen

von Technologien wie der Halbleiter- und Optoelektronik oder auch der Fotovoltaik ausloten. Dann wird sich zeigen, wie wir diese Grenzen technisch tatsächlich erreichen können. Denkbar ist etwa eine neue molekulare Elektronik, in der einzelne Moleküle die Funktion von Leiterbahnen und Transistoren auf Mikrochips übernehmen. Vielleicht geht die Entwicklung aber auch in Richtung der Plasmonik. Bei dieser sind es Dichtewellen von Elektronen, die sich entlang einer Materialoberfläche ausbreiten und auf diese Weise Information übertragen (siehe »Der Zauber der Plasmonik« in *sdW* 6/2007, S. 58).

Damit ist aber auch klar, dass es nicht genügt, elektronische Prozesse in Gasen zu untersuchen. Wir müssen unsere Experimente auf Festkörper ausweiten – vor allem auf jene, auf denen die moderne Elektronik beruht. Grundlage heutiger Elektronik ist der Transport von elektrischer Ladung in Form von Elektronen. Die Steuerung des Ladungstransports übernehmen Schaltelemente, die mit Mikrowellenspannungen betrieben werden und für einen Schaltprozess nur noch milliardstel Sekunden benötigen. Doch selbst das ist nicht mehr schnell genug, schließlich verlangen zahlreiche Forschungsdisziplinen und technische Anwendungen nach immer größerer Rechenleistung.

Noch aber limitiert die Geschwindigkeit der Schaltprozesse das Rechentempo von Computern. Diese Geschwindigkeit lässt sich aber steigern. Die obere Grenze wird offenbar durch die Zeit bestimmt, die ein Elektron benötigt, um durch die Strukturen zu wandern, von denen es kontrolliert wird. Je kleiner diese Strukturen, desto höhere Schaltgeschwindigkeiten können wir erreichen und desto größer wird die Dichte des Datenflusses.

Die kleinstmögliche Distanz für das Leiten und Schalten von Strömen ist der Abstand zwi-

In Kürze

- Die Geburtsstunde der Attosekundenphysik schlug erst vor wenigen Jahren. Seither sind Forscher in der Lage, nicht nur **die Bewegungen von Atomen und Molekülen zu »fotografieren«**, sondern sogar ins Innere der Elektronenhülle zu blicken.
- Ausgeklügelte Verfahren erlauben es mittlerweile, elektronische Prozesse wie die Bewegung von Elektronen durch Kristalle auf **billiardstel Sekunden genau** zu analysieren.
- Computerprozessoren werden **von Erkenntnissen aus diesen Experimenten profitieren**. Künftig könnte ein mikroelektronischer Schaltprozess nur so lange dauern, wie ein Elektron benötigt, um in einem Kristall von einem Atom zum nächsten zu wandern.

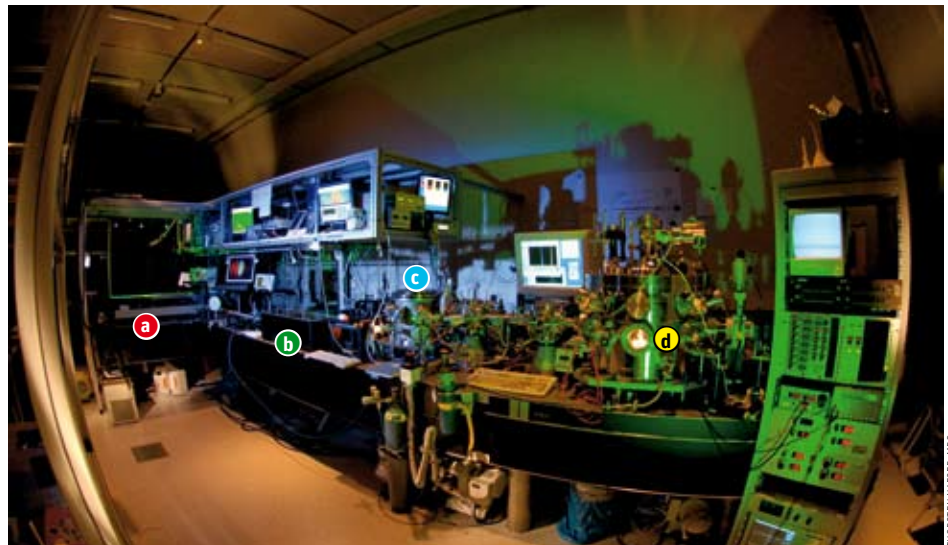
BEIDE FOTOS: THORSTEN NAESER, MPQ

Der Aufbruch in die Attosekundenwelt findet im Labor statt. Mittels trickreicher Anordnungen untersuchen Forscher mittlerweile einzelne elektronische Prozesse, die auf einer Zeitskala von nur wenigen Attosekunden (10^{-18} Sekunden) stattfinden, und nähern sich allmählich dem Ziel einer künftigen Höchstgeschwindigkeitselektronik. Im Bild ist Max-Planck-Forscher Adrian L. Cavalieri zu sehen. Spezielle Laserspiegel (kleines Foto) dienen zur Erzeugung von Laserpulsen, die aus nur wenigen Wellenzyklen bestehen. Diese femtosekundenkurzen Pulse (10^{-15} Sekunden) bilden ihrerseits die Grundlage zur Erzeugung isolierter Attosekundenpulse.

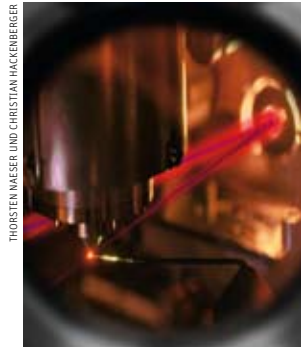


FISCHAUGENBLICK INS LABOR

Der experimentelle Aufbau der Garching Forscher befindet sich im Labor für Attosekundenphysik des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik. In einer flachen Metallbox **(a)** ist das Lasersystem untergebracht. In der schwarzen Box **(b)** werden die Laserpulse auf eine Dauer von wenigen Femtosekunden verkürzt und in der Vakuumkammer **(c)** zur Erzeugung Hoher Harmonischer eingesetzt, Wellen also, die als »Rohmaterial« für Attosekundenpulse dienen. Die Probe befindet sich in der



THORSTEN MAESER, MPQ



THORSTEN MAESER UND CHRISTIAN HACKENBERGER

Vakuum-Experimentierkammer **(d)**, mit »Bullauge«. Das kleine Bild links zeigt den Blick durch das Bullauge. Attosekundenpulse (blau markiert) und ein infraroter Laserstrahl (rot markiert) werden hier über ein zweiteiliges Spiegelsystem auf Neongas (weißroter Lichtpunkt) fokussiert. Es strömt aus einer Zuleitung (schwarz), denn jeder »Schuss« mit einem Attosekundenpuls muss auf »frische« Atome treffen. Der Zylinder (links) mit der kegelförmigen Spitze ist der Flugzeitdetektor für Elektronen.

schen benachbarten Atomen oder Molekülen in einem Kristallgitter. Um solche Entfernungen zu überwinden, benötigen Elektronen nur einige Attosekunden. Solche Systeme müssen sich zwischen jedem Schaltvorgang zwar kurze Zeit »stabilisieren«, im Prinzip aber können Schaltkreise mit atomaren Bauteilen Ströme öfter als eine Billiarde (10^{15}) Mal, vielleicht sogar 10^{16} Mal pro Sekunde schalten. Damit wären wir in das Zeitalter der Petahertz-Elektronik eingetreten ($1 \text{ Phz} = 10^{15} \text{ Hz}$). Mit ihrer Hilfe ließe sich die Geschwindigkeit der heutigen Elektronik um fast ein Millionenfaches übertreffen. Sie wäre gleichzeitig die ultimative Grenze, die wir in elektronbasierten Informationstechnologien überhaupt erreichen können.

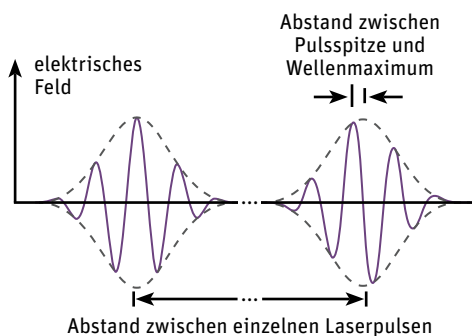
Der Weg, der uns dieser Grenze näherbringt, führt über die Techniken der Attosekundenphysik. Die Quantenmechanik sagt voraus, dass die typische Geschwindigkeit elektronischer Prozesse in Atomen durch die Energiedifferenzen gegeben ist, die dabei überwunden werden. Zum Beispiel kann ein Elektron, das an einen Atomkern gebunden ist, durch ein energiereiches Photon auf ein höheres Energieniveau angeregt werden oder sich gar aus dem Atom befreien. Die Bindungsenergie von Elektronen in Atomen liegt wiederum in der Größenordnung von einigen zehn bis hundert Elektronvolt, was der Quantenmechanik zufolge mit einer typischen Zeit-

skala elektronischer Prozesse im Attosekundenbereich einhergeht.

Wie lassen sich solche ultraschnellen Vorgänge untersuchen? Anrege-Abfrage-Experimente haben sich für diesen Zweck als direkteste Methode erwiesen. Dabei setzt ein Anregepuls, der aus Licht- oder Röntgenstrahlen, aber auch aus Teilchen wie Elektronen bestehen kann, einen mikroskopischen Prozess in Gang, und ein Abfragepuls tastet die zeitliche Entwicklung dieses Prozesses ab.

Je kürzer die untersuchten Prozesse, desto größer ist allerdings die Herausforderung für Experimentalphysiker im Labor. Das Problem beginnt mit der Suche nach einem Verfahren, das uns geeignete Anregepulse liefert. Wir benötigen eine Strahlungsquelle im weichen oder harten Röntgenbereich, die in der Lage ist, attosekundenlange und extrem energiereiche Pulse auszusenden. Zudem muss die Strahlung kohärent sein, die Berge und Täler jeder der sich fortbewegenden Wellen müssen also gleich bleibende Abstände zu denen der jeweils anderen Wellen aufweisen. Doch bislang existieren schlicht keine Laser, die ausreichend kurze Pulse bei Röntgenwellenlängen liefern.

Vor sieben Jahren gelang es uns jedoch erstmals, Röntgenpulse mit einer Dauer im Attosekundenbereich zu erzeugen. Dazu entwickelten wir eine Variante des schon länger bekannten Verfahrens der *High-Order Harmonic*



Kürzer als ein Schwingungszyklus der Trägerwelle (violette Linie) kann ein Laserpuls (gekennzeichnet durch die gestrichelte Pulseinhüllende) nicht sein. Die Nahinfrarot-Pulse im Bild besitzen eine Länge von 3,5 Zyklen. Die Wellenform wird durch den Abstand zwischen Pulsspitze und Wellenmaximum bestimmt. Sie kontrollieren zu können, ist Voraussetzung für die Erzeugung isolierter Attosekundenpulse.

Generation (HHG). Hohe Harmonische sind Wellen, die von ultrakurzen Laserpulsen erzeugt werden und deren Frequenzen jeweils einem ungeradzahigen Vielfachen der ursprünglichen Laserfrequenz entsprechen. Das HHG-Verfahren verwandelt Laserlicht also in laserartige Strahlung höherer Frequenzen. Das Wichtigste dabei: Es genügt schon ein Laser, der bei vergleichsweise großen Wellenlängen im nahen Infrarot (NIR) strahlt, um kurzwellige Strahlung im extrem ultravioletten (XUV) oder weichen Röntgenbereich zu liefern.

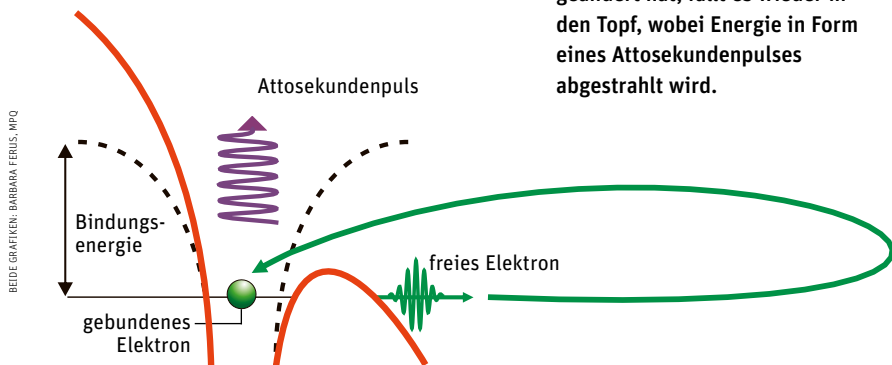
Frei – ganze 2000 Attosekunden lang

Um die Hohen Harmonischen zu erzeugen, richten wir einen NIR-Laser auf eine mit dem Edelgas Neon gefüllte Röhre, wo die elektrischen Felder des Laserstrahls die Bindung der Elektronen an ihre Atomkerne schwächen. Bereits kurz bevor die oszillierenden Felder ihre maximale Stärke erreichen, ist die Bindung so schwach, dass die Elektronen dank ihrer Quanteneigenschaften durch die verbliebene Potenzialbarriere »hindurchtunneln« können.

Allerdings erfreuen sie sich ihrer Freiheit nur kurze Zeit. Das Laserfeld beschleunigt sie zunächst einige Nanometer weit weg vom Atomkern. Dabei erreichen die Elektronen Geschwindigkeiten von einigen tausend Kilometern pro Sekunde. Weil das Feld aber oszilliert, kehrt sich die Richtung der Partikel bald wieder um. Am Ende, nach etwa 2000 Attosekunden, kollidieren sie mit ihren Ursprungsatomen und fallen in deren Elektronenhüllen zurück. Dabei wird die durch die Beschleunigung erlangte Energie in Form von Photonen im XUV- oder im noch höherfrequenten weichen Röntgenbereich frei.

Weil das Laserfeld diesen Vorgang perfekt synchron in Millionen von Atomen herbeiführt, werden sehr viele Photonen gleichzeitig synchron abgestrahlt und formen einen nahezu perfekt gebündelten, laserähnlichen Röntgenstrahl. Dieser Prozess wiederholt sich mehrfach: nämlich jedes Mal, wenn das elektrische Feld des Lasers erneut seinen höchsten Wert erreicht, was während jedes Schwingungszyklus

Physiker stellen sich Elektronen (grün), die an ein Atom gebunden sind, als in einem »Potenzialtopf« (gestrichelt) gefangen vor: Die Teilchen können sich nicht eher vom Atom lösen, als bis sie genügend Energie erhalten, um die »Wände« des Topfs zu überwinden. Trifft ein Laserstrahl im nahen Infrarot (nicht dargestellt) auf das Atom, verbiegt sein elektrisches Feld die Wände (rot). Dank eines quantenmechanischen Effekts kann das Elektron durch die nun viel niedrigere Potenzialwand »hindurchtunneln«. Dann wird es zunächst vom Feld des Laserstrahls wegbeschleunigt. Nachdem sich die Feldrichtung geändert hat, fällt es wieder in den Topf, wobei Energie in Form eines Attosekundenpulses abgestrahlt wird.



BILDE: GRAFIKEN: BARBARA FERBUS, MPO



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 –**
von Kernspin bis Kosmologie,
von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

- ▶ **KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

- ▶ **WISSENSlogs**
Science unplugged
www.wissenslogs.de

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

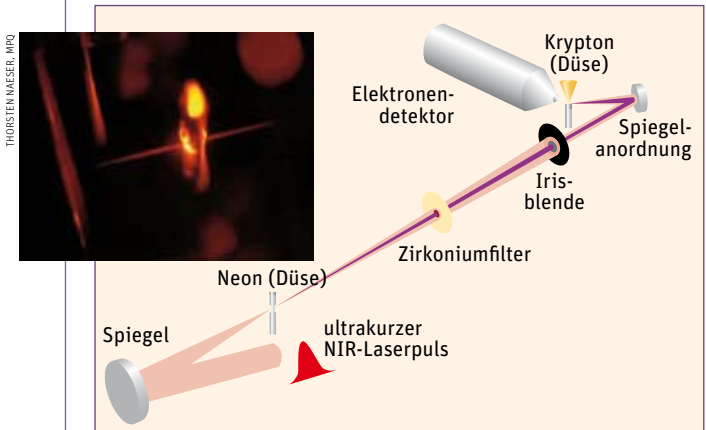
GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

DER EXPERIMENTELLE AUFBAU

Ein **Atomic Transient Recorder** basiert auf einem Nahinfrarot-Laser (NIR-Laser), der ultrakurze Pulse aussendet. Über einen Spiegel gelangen diese auf eine Probe des Edelgases Neon, wo sie Photonen («Hohe Harmonische») im extremen Ultraviolett

(XUV) oder im Röntgenbereich erzeugen. Ein Zirkoniumtransmissionsfilter sorgt dann dafür, dass sich im Inneren des austretenden kegelförmigen Strahls nur XUV-Strahlen, im äußeren nur Infrarotstrahlen befinden. Dank eines piezoelektrischen Mechanismus in der zweiteiligen Spiegelanordnung (rechts oben) lässt sich der Infrarotstrahl gegenüber dem XUV-Strahl kontrolliert verzögern. Derjenige Teil der Anordnung, der für die Reflexion der XUV-Strahlen verantwortlich ist, filtert zudem energieärmerere XUV-Pulse heraus und lässt nur die energiereichsten Harmonischen hindurch. Die Anrege-Abfrage-Prozesse in der Probe (ein Festkörper wie Wolfram oder ein Gas; in der Grafik strömt Krypton aus einer Düse) lassen sich schließlich mit Hilfe des Elektronendetektors vermessen.

Die Erzeugung Hoher Harmonischer findet in einer Düse statt, die oben verschlossen ist (orangegeletter «Propfen» im Foto) und in die von unten Neon strömt. Ein auf das Gas fokussierter Laserblitz (feiner roter Strahl, für die Farbe sorgt das Leuchten ionisierten Gases) durchbohrt die Düse und regt Gasatome an, Lichtblitze im Attosekundenbereich auszustrahlen.



Treffen viele Pulse in kurzer Zeit auf ein Material, stören sie die Messung – wir brauchen daher einzelne, isolierte Pulse

zweimal der Fall ist. Wir erhalten also einen »Zug« vieler kurz aufeinander folgender XUV-Pulse, die jeweils weniger als eine Femtosekunde dauern und einem Laserstrahl ähneln.

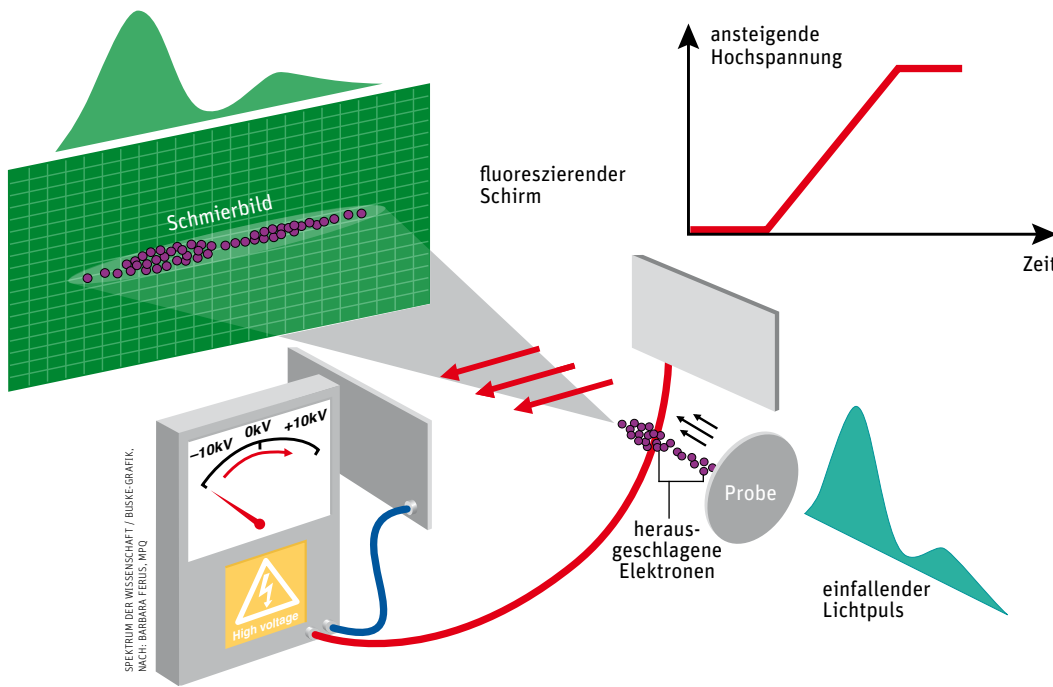
Für den Zweck der Untersuchung mikroskopischer Vorgänge ist ein solcher Strahl allerdings noch nicht geeignet. Treffen viele Pulse in kurzer Zeit auf ein Material, regen sie die uns interessierenden Prozesse während ihres Ablaufs immer wieder an oder stören sie auch, so dass sie sich nicht mehr eindeutig untersuchen lassen. Wir brauchen daher einzelne, isolierte Attosekundenpulse, um bestimmte elektronische Prozesse genau einmal auslösen und sie dann eindeutig nachweisen zu können. Das gelang uns erst mit einem »few-cycle«-NIR-Laser, dessen Pulse aus nur wenigen Schwingungszyklen bestehen (Bild S. 34). In ihnen ist die Amplitude der zentralen Schwingungsperiode im Vergleich zu den anderen deutlich größer, so dass sich mehr als die Hälfte der gesamten Pulsenergie darin konzentriert.

Diese extrem kurzen Lichtpulse mit einer Energie von rund einem Millijoule stammen aus Titan-Saphir-Lasern, die Licht mit einer Wellenlänge von rund 750 milliardstel Metern erzeugen, also im nahen Infrarot am Rand des sichtbaren Spektrums strahlen. Bei dieser Wellenlänge entsprechen 1,5 Zyklen einer Pulsdauer von rund 3,7 Femtosekunden. Ebenso wichtig für HHG ist eine konstante Wellenform der NIR-Laserpulse, wie wir sie erst auf Basis der von Theodor Hänsch entwickelten Frequenzkammtechnik erreichen konnten. Hänsch forscht wie wir beide am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und war für diese

Technik im Jahr 2005 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden (siehe »Von Sirius zum Laserkamm«, SdW 12/2005, S. 20).

Nun müssen wir noch die Harmonischen mit der höchsten Energie heraussortieren, denn nur sie sind geeignet, die gewünschten Prozesse in unserer Probe auszulösen. Die höchsten Harmonischen erzeugt der NIR-Laserpuls dann, wenn seine Amplitude gerade ihren größten Wert erreicht hat. Dann nämlich verfügen die freigesetzten Elektronen bei der Rückkehr zu ihrem Kern und der Kollision mit ihm über die höchste Energie. Wenn die Laserpulse tatsächlich nicht viel länger als 1,5 Zyklen sind, wachsen die energiereichsten Harmonischen bei etwa 100 Elektronvolt Photonenenergie zu einem spektralen Kontinuum zusammen. Aus der Fouriertheorie weiß man nun, dass dies ein eindeutiger Hinweis auf ein Einzelereignis ist. Oder anders ausgedrückt: Der Effekt zeigt, dass die an der Erzeugung dieser Hohen Harmonischen beteiligten Elektronen nur durch die einzelne, ausgeprägte Feldspitze beschleunigt wurden, die das elektrische Feld im Zentrum des NIR-Pulses aufwies.

Mit Hilfe von Spiegeln, die bestimmte Wellenlängen selektiv reflektieren, können wir die höchsten Harmonischen nun vom Rest der Strahlung, den energieärmeren Harmonischen, separieren. Wir erhalten dann isolierte XUV- beziehungsweise Röntgenpulse mit einer Dauer von nur noch 100 Attosekunden. Dafür war allerdings zunächst die Frage geeigneter Spiegel zu klären, denn Röntgenstrahlen werden beim Eindringen in Materie kaum gebrochen und daher auch schlecht reflektiert.



Ursprünglich dienten elektronenoptische Schmierbildkameras nur dazu, die Dauer kurzer Lichtblitze im Femtosekundenbereich zu messen. Dazu schlägt ein Lichtpuls aus einer Probe Elektronen, die durch ein elektrisches Feld (schwarze Pfeile) zu einem fluoreszierenden Schirm beschleunigt werden. Eine ansteigende und quer zur Flugrichtung angelegte Hochspannung (rote Pfeile) sorgt dann dafür, dass Elektronen umso stärker abgelenkt werden, je später sie diese passieren. Dadurch verteilen sich ihre Auftreffpunkte auf dem Schirm, sie »verschmieren«. Aus der Breite des Schmierbilds lassen sich schließlich Informationen über die Dauer des ursprünglichen Lichtpulses gewinnen.

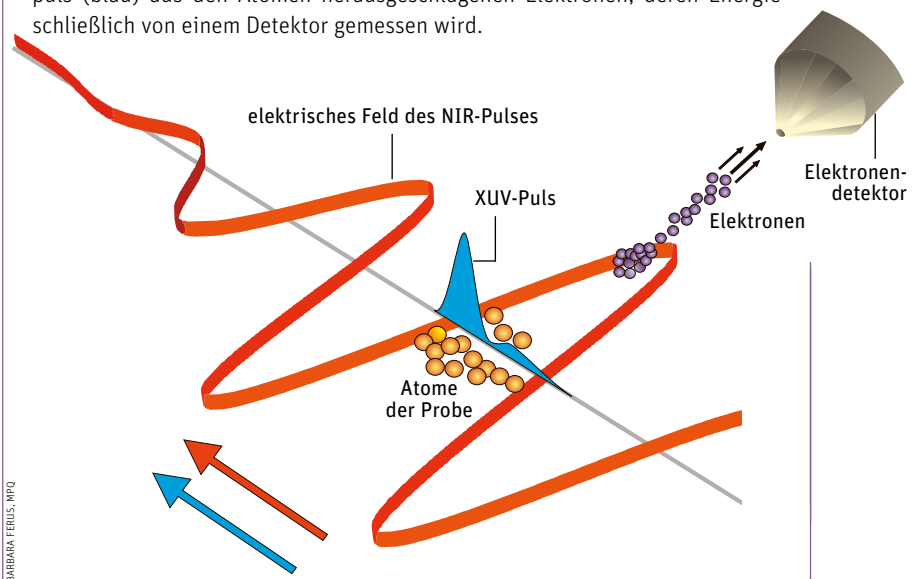
Doch glücklicherweise konnten wir auf hoch entwickelte Vielschichtspiegel zurückgreifen, die ursprünglich in der Halbleiterlithografie zum Einsatz kamen und immerhin eine Reflexivität von einigen Prozent besitzen. Diese Spiegel werfen Strahlen mit einer Wellenlänge um 13 Nanometer zurück, also im Bereich der sehr weichen Röntgenstrahlung. Je kürzer ein Puls, desto breiter ist allerdings sein Spektrum (auch dies eine Konsequenz aus der Fouriertheorie). Er setzt sich also aus Wellenlängen deutlich größerer beziehungsweise kleinerer Energie zusammen. Dem entspricht, dass die Bandbreite unserer Spiegel bei bis zu 30 Elektronvolt liegt, sie reflektieren daher auch Photonen entsprechend höherer beziehungsweise niedrigerer Energie. Entwickelt wurden diese speziellen Vielschichtspiegel von unseren Kollegen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik Michael Hofstetter und Ulf Kleineberg.

Nun verfügen wir also endlich über energiereiche, isolierte und ultrakurze XUV-Attosekundenpulse. Zwar erfolgen noch immer etwa 4000 Pulse pro Sekunde, aber da wir ein Zeitfenster von nur rund zehn Femtosekunden betrachten und dort Prozesse auf der Attosekundenskala untersuchen, sind sie für unsere Zwecke ausreichend »isoliert«. Um mit diesen Pulsen die Elektronendynamik in einem Festkörper zu vermessen, müssen wir sie als Anregepulse auf eine Probe lenken, um dort kontrolliert elektronische Prozesse auszulösen. Als Abfragepuls wird der verbleibende NIR-Puls verwendet, denn weil er die XUV-Pulse selbst erzeugt hat, ist er perfekt mit ih-

nen synchronisiert. Die entsprechenden experimentellen Aufbauten werden als *Atomic Transient Recorder* bezeichnet (übersetzt etwa: Aufzeichnung energetischer Übergangsprozesse in Atomen, siehe Kästen auf dieser Doppelseite). Es handelt sich dabei um das derzeit einzige Verfahren, mit dessen Hilfe sich die

ELEKTRONISCHE PROZESSE IN ECHTZEIT MESSEN

Ein *Atomic Transient Recorder* erweitert das Prinzip der Schmierbildkamera (Grafik oben). Er misst nicht nur die Dauer von Ultrakurzpulsen, sondern untersucht auch elektronische Prozesse mit höchster Zeitauflösung. Das Feld von oszillierenden Infrarotlaserstrahlen (rot) sorgt dabei für die zeitveränderliche Hochspannung. Es beschleunigt (oder bremst) die durch einen Attosekundenpuls (blau) aus den Atomen herausgeschlagenen Elektronen, deren Energie schließlich von einem Detektor gemessen wird.



zeitlichen Abläufe attosekundenschneller Elektronenprozesse in Echtzeit beobachten lassen. Damit können wir nicht nur die äußeren Elektronen eines Atoms auf ihr Verhalten im Attosekundenbereich untersuchen, sondern sogar jene, die näher am Kern liegen und daher stärker gebunden sind.

Wie gehen wir nun genau vor? Zunächst generiert ein ultrakurzer »few-cycle«-NIR-Laserpuls den XUV-Strahl, der – parallel zum Laserstrahl – den Attosekundenpuls trägt (Kasten S. 36). Auf parallelem Weg bewegen sich beide Strahlen dann auf eine zweiteilige Spiegelanordnung zu, die sie umlenkt und in Richtung der Probe fokussiert. Je ein Spiegel ist dabei für den NIR-Laserstrahl beziehungsweise die XUV-Pulse zuständig. Außerdem dient die Anordnung dazu, nur die Attosekundenpulse aus dem hochenergetischen Kontinuum herauszufiltern und weiterzuleiten.

Anschließend dringen die XUV-Pulse in die Probe ein und schlagen dort Elektronen aus ihren Atomen heraus. Geschieht dies in den obersten Atomsschichten der Probe, schaffen es die meisten der Partikel, sich durch sie hindurchzubewegen, ohne bei Kollisionen mit anderen Atomen Energie zu verlieren. Genau in dem Moment, in dem sie schließlich die Oberfläche der Probe verlassen, bekommen sie auch das Feld des Abfragelasers zu spüren. Sie erhalten also nicht nur Energie durch die XUV-Photonen, sondern werden kurz darauf zusätzlich beschleunigt oder abgebremst.

Blick in die Elektronenhülle

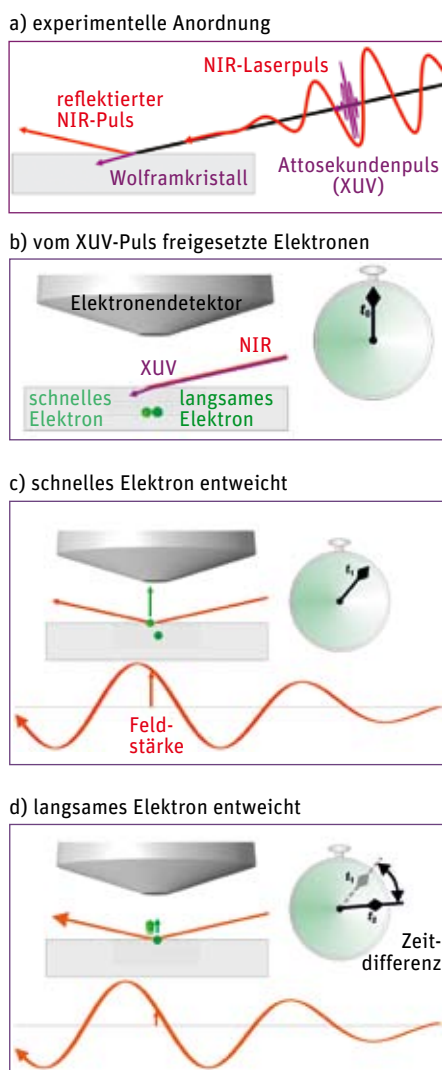
Misst man ihre Energie nun in einem Elektronendetektor, erhält man ein »Schmierbild« (Bild S. 37 oben). Dieses altbekannte Konzept wurde bis vor Kurzem lediglich zur Messung der Dauer kurzer Lichtblitze, allerdings im Pikosekundenbereich (10^{-12} Sekunden), verwendet. Dabei schlägt ein Lichtblitz Elektronen aus einer Metallplatte heraus, die anschließend durch ein statisches elektrisches Feld in Richtung eines fluoreszierenden Schirms beschleunigt werden. Bevor sie dort einschlagen, werden sie von einem weiteren Feld seitlich abgelenkt, dessen Stärke mit der Zeit zunimmt. Je später die Elektronen dieses Feld durchqueren, desto stärker ist also ihre Ablenkung. Weil die Breite des Schmierbilds mit der Zeit korrespondiert, während derer Elektronen aus der Metallplatte freigesetzt wurden, gibt sie Auskunft über die Dauer des Lichtblitzes.

Unsere Neuerung, die wir ab 2001 einführen, bestand nun zum einen darin, dass wir das zeitveränderliche Feld durch das elektrische Feld des NIR-Lasers ersetzen. Der Zeitraum, in dem der Attosekundenpuls Elektronen aus der Probe herausschlägt, passt dabei in einen halben Schwingungszyklus des Laserlichts. Außerdem verwenden wir statt eines fluoreszierenden Schirms, auf dem sich die Elektronen räumlich verteilen, einen Detektor, der die Energie der eintreffenden Elektronen misst. Unser Schmierbild zeigt also keine räumlich verschmierten Auftreffpunkte, sondern eine verschmierte Energieverteilung.

Ziel ist es nun, eine ganze Serie solcher Schmierbilder aufzunehmen. Dabei verschieben wir den Attosekundenpuls von Bild zu Bild zeitlich ein wenig gegen den Laserpuls, indem wir den entsprechenden Spiegel mittels eines piezoelektrischen Elements nanometergenau vor- oder zurückbewegen. Daher spüren die Elektronen zu dem Zeitpunkt, zu dem sie aus der Probe austreten, jeweils einen anderen Wert des Laserfelds und erhalten entsprechend weniger oder mehr Energie.

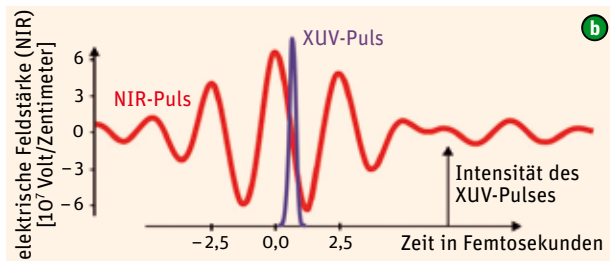
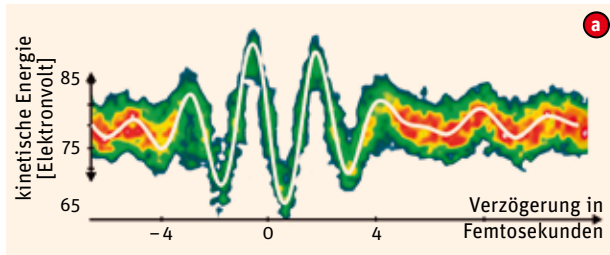
ELEKTRONENTRANSPORT IM FESTKÖRPER

Das Prinzip des Experiments, das den Elektronentransport in einem Festkörperkristall in Echtzeit beobachten hilft, zeigen diese Abbildungen. Ein NIR-Puls (rot) und ein XUV-Puls (lila) fallen auf einen Wolframkristall. Während der Laserpuls an dessen Oberfläche reflektiert wird, dringt der XUV-Puls in den Kristall ein (a) und setzt dort Leitungselektronen sowie stark an den Atomkern gebundene Rumpfelektronen frei (b). Die schnelleren Leitungselektronen verlassen die Probe zuerst und »spüren« an deren Oberfläche das NIR-Feld (c). Weil das Feld oszilliert, spüren später austretende Elektronen eine andere (in diesem Fall geringere) Feldstärke und werden zum entsprechend langsamer zum Flugzeitdetektor beschleunigt (d). Aus dessen Messungen lässt sich schließlich die Zeitdifferenz zwischen der Ankunft schneller und langsamer Elektronen mit Attosekundengenauigkeit bestimmen.



DIE INTERPRETATION DER DATEN

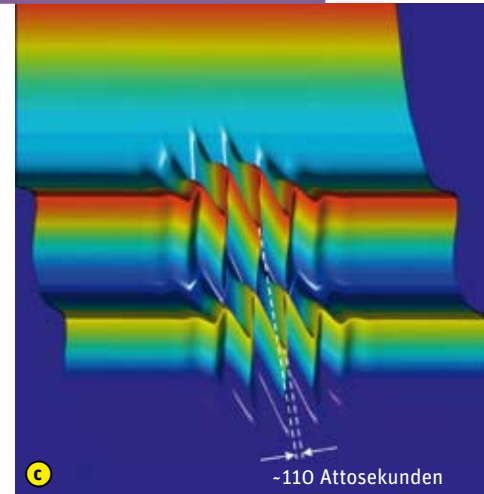
Dieses mit einem *Atomic Transient Recorder* aufgenommene Spektrogramm (a) ist Ergebnis zahlreicher Messungen mit unterschiedlich eingestellten Verzögerungen (x-Achse) zwischen XUV- und NIR-Pulsen. Auf der y-Achse ist die Energie der im Detektor eintreffenden Elektronen aufgetragen. Gemittelt ergibt sich die weiße Linie. Sie zeigt an, wie stark die Elektronen das NIR-Feld (genauer: sein Vektorpotenzial) spüren. Daraus lässt



sich die tatsächliche elektrische Stärke des NIR-Felds ermitteln (rote Linie, b). Am ebenfalls eingezeichneten XUV-Puls (lila, ohne Einheiten) kann man erkennen, wie seine Intensität zeitlich zum NIR-Puls liegt.

Untersucht man den Elektronentransport in einem Festkörper, erscheint in dem Spektrogramm auch ein Wellenzug für Elektronen geringerer kinetischer Energie, nämlich Rumpfelektronen, bei denen mehr Energie in Ablösung vom Atomkern investiert werden musste. Weil diese Elektronen das NIR-Feld später spüren, verschiebt sich die aus dem Spektrogramm ermittelte Stärke des NIR-Felds (wie sie in b zu sehen wäre) zeitlich entsprechend. Die Verschiebung entspricht dem gesuchten Laufzeitunterschied zwischen Rumpfelektronen und Leitungsbandelektronen.

c zeigt diesen Sachverhalt in drei Dimensionen. Dafür wurde b sowohl für Rumpf- als auch für Leitungsbandelektronen ermittelt. Als dritte Dimension fügten die Forscher die Zahl der jeweils gemessenen Elektronen hinzu.



BARBARA FERUS, MPQ

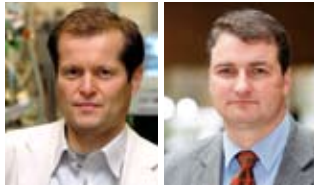
Die einzelnen Schmierbilder kann man schließlich zu einem Spektrogramm zusammensetzen (a in Grafik oben), das die Bewegungsenergie der Elektronen in Abhängigkeit von der zeitlichen Verschiebung zwischen Anrege- und Abfragepuls darstellt. Aus diesem Spektrogramm lassen sich zahlreiche Informationen ablesen. Neben den gesuchten Charakteristika der emittierten Elektronen können wir sogar auf die Wellenform des Infrarotlasers und die Dauer des Attosekundenpulses rückschließen und so die experimentellen Bedingungen überprüfen.

Mit diesem Verfahren haben wir ein weites Anwendungsfeld eröffnet. Blickt man in die Elektronenhülle um ein Atom, wird sehr schnell deren komplexe dynamische Struktur offensichtlich. Sehr viele Prozesse laufen gleichzeitig oder in Konkurrenz zueinander ab. Ein einfacher und typischer Fall ist ein Elektron, das sein Atom verlässt, nachdem es die Energie eines einfallenden Photons übernommen hat. Es kommt aber auch zu komplizierteren Situationen. So kann etwa das herausgeschlagene Elektron einen Teil seiner vom Photon erhaltenen Energie an ein weiteres Hüllenelektron abgeben, bevor es das Atom verlässt. Ebenso ist es möglich, dass ein Photon ein Elektron herausschlägt und die entstehende Lücke von einem anderen Elektron gefüllt wird – dabei

wird ebenfalls Energie frei, die ein drittes Elektron vom Atom lösen kann. Die Liste der Möglichkeiten ist lang, und nur die Attosekundenphysik gibt uns die Instrumente in die Hand, sie einzeln zu untersuchen.

Ein Beispiel ist die Frage nach der Population angeregter, elektronischer Zustände in Gasatomen. Erzeugen können wir eine solche Population über einen *shake-up*-Prozess, also einen energiereichen Puls, der Elektronen aus ihren Atomen schlägt. Dabei ist der Fall interessant, in dem ein Teil der Energie auf ein weiteres Elektron übergeht und dieses anregt. Blicke Letzteres im Grundzustand, könnten wir es mit einem Laser im relativ energiearmen nahen Infrarot nicht vom Atom lösen. Nun aber reichen die elektrischen Feldspitzen des Laserpulses aus, um seine Bindung weiter zu schwächen und ihm das Tunneln zu erlauben. (Gegenüber dem schon beschriebenen Anrege-Abfrage-Verfahren ist die Rolle der jeweiligen Strahlung hier übrigens vertauscht: Die energiereichen XUV-Pulse sorgen für die Anregung, den *shake up*, während der NIR-Laser für die Abfrage verantwortlich ist.)

Jedes Mal, wenn ein angeregtes Elektron davontunneln kann, erhöht sich nun der Ionisationsgrad der Gasatome. Diesen können wir messen, und zwar in Abhängigkeit von der Höhe der jeweils herrschenden Feldstärke. Da-



Ferenc Krausz (links) gehört zu den weltweit führenden Experimentatoren auf dem Gebiet der Attosekundenphysik. 2001 gelang ihm erstmals die Erzeugung von Röntgenpulsen, die kürzer waren als eine Femtosekunde. Der Ungar ist Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching und hat den Lehrstuhl für Experimentalphysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München inne. Mit dem Leibniz-Preis des Jahres 2006 wurde ihm die wichtigste wissenschaftliche Auszeichnung Deutschlands verliehen.

Reinhard Kienberger ist Professor für Experimentalphysik an der Technischen Universität München und leitet am MPQ die »Selbstständige Nachwuchsgruppe Attosekundendynamik« und die Experimente zur Attosekundenphysik. Er erhielt 2006 den mit rund einer Million Euro dotierten Sofja-Kowalevskaja-Preis der Alexander von Humboldt-Stiftung und 2008 den prestigeträchtigen »Starting Grant« des European Research Council.

Cavalieri, A. L. et al.: Intense 1.5-Cycle Near Infrared Laser Waveforms and their Use for the Generation of Ultrabroad-Band Soft-X-Ray Harmonic Continua. In: *New Journal of Physics* 9, S. 242, Juli 2007.

Cavalieri, A. L. et al.: Attosecond Spectroscopy in Condensed Matter, *Nature* 449, S. 1029–1032, 2007.

Goulielmakis, E. et al.: Single-Cycle Nonlinear Optics. In: *Science* 320, S. 1614–1617, 2008.

Goulielmakis, E. et al.: Attosecond Control and Measurement: Light-wave Electronics. In: *Science* 317, S. 769–775, 2007 (im Rahmen einer »Special Section: Attosecond Spectroscopy«).

Kienberger, R. et al.: Atomic Transient Recorder. In: *Nature* 427, S. 817–821, 2004.

Uiberacker, M. et al.: Attosecond Real-Time Observation of Electron Tunnelling in Atoms. In: *Nature* 446, S. 627–632, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974633.

bei zeigt sich: Der Ionisationsgrad steigt stufenartig an, und zwar immer dann, wenn das elektrische Feld des Laserpulses einen Extremwert erreicht. Damit konnten wir 2007 die schon vor rund 50 Jahren aufgestellte Theorie, dass der Tunneleffekt für die Ionisierung bei Bestrahlung mit Lasern verantwortlich sei, erstmals experimentell nachweisen. Außerdem erhielten wir Informationen über die Zeitdauer dieses Vorgangs, denn je steiler der Übergang von einer Stufe zur nächsten, desto schneller gehen die involvierten Prozesse vonstatten. Für die Dauer beider Prozesse zusammengenommen – sowohl *shake up* als auch Tunnelionisation – konnten wir so eine Obergrenze von weniger als 400 Attosekunden ermitteln.

Präziser »Kick«

Nicht nur dieses Experiment zeigt, dass die Attosekundenphysik den Kinderschuhen bereits entwachsen ist. Längst geht es nicht mehr nur darum, geeignete Ultrakurzpulsquellen zu entwickeln, sondern wir sind bereits in der Lage, inneratomare Prozesse, die sich auf einer Zeitskala von unter einer Femtosekunde abspielen, zeitlich aufzulösen. Kürzlich gelang uns mit Kollegen von der Universität Bielefeld, die Attosekundenmesstechnik auf die Untersuchung von Festkörperprozessen auszuweiten. Mit Hilfe der *Atomic-Transient-Recorder*-Technologie beobachteten wir in Echtzeit, wie Elektronen mehrere atomare Schichten eines Wolframkristalls durchquerten (Kasten S. 38). Dazu feuerten wir 300 Attosekunden lange XUV-Pulse gemeinsam mit einem NIR-Laserpuls auf die Oberfläche des Kristalls. Der Attosekundenpuls drang in den Kristall ein und schlug Elektronen aus ihren Atomen. Dies waren zum einen leicht gebundene Leitungsbandelektronen, wie sie in Festkörpern für die Leitung von Strömen verantwortlich sind. Weil der XUV-Puls so energiereich war, schlug er zum anderen auch Rumpfelektronen heraus, solche also, die weiter innen im Atom lokalisiert und entsprechend stärker an den Kern gebunden sind. Treten sie nun an der Kristalloberfläche aus, besitzen sie die Energie, die sie vom XUV-Photon erhalten hatten, abzüglich der Energie, die nötig war, um sie aus der Bindung an ihr Atom zu lösen. Weil die ursprünglich stärker gebundenen Rumpfelektronen eine höhere Bindungsenergie überwinden mussten, sind sie aber energieärmer als ihre Pendanten aus dem Leitungsband.

Indem wir die Energieverteilung der schnelleren Leitungsband- und der langsameren Rumpfelektronen vermessen, können wir ihre Ankunftszeit an der Oberfläche bestimmen. Das oszillierende Laserfeld funktioniert dabei wie eine Stoppuhr mit Attosekun-

denauflösung: Zu jedem Zeitpunkt prägt es den Elektronen eine unterschiedliche Geschwindigkeit, einen »Kick«, auf. Je nachdem, wann sie aus der Oberfläche austreten, erhalten sie also einen stärkeren oder schwächeren Kick (Kasten S. 38).

Das Spektrogramm (Kasten S. 39) zeigt die beiden mit dem *Atomic Transient Recorder* gemessenen und nachbearbeiteten Spektrogramme der Leitungsband- und Rumpfelektronen aus der Wolframprobe. Eine sorgfältige Analyse ergab, dass die energiereicheren Elektronen etwa 100 Attosekunden vor den Rumpfelektronen an der Oberfläche des Kristalls ankommen. Die Verzögerung deutet darauf hin, dass sich die freigesetzten Leitungsbandelektronen doppelt so schnell wie die Elektronen bewegen, die nahe dem Atomkern lokalisiert waren – eine Erkenntnis, die sich auch mit theoretischen Vorhersagen deckt.

Zwar stehen wir auch heute noch erst am Beginn der Attosekundenphysik. Doch mit diesem Experiment haben wir bewiesen, dass wir in der Lage sind, ultraschnelle elektronische Prozesse in Festkörpern präzise zu messen. Schon jetzt können wir den Ladungstransport durch atomare Schichten in Echtzeit mit Attosekundenauflösung verfolgen, und bald wird auch die Untersuchung vieler weiterer subatomarer Vorgänge hinzukommen. Relaxationsprozesse, bei denen Atome und Moleküle von angeregten energetischen Zuständen in Zustände mit niedrigerer Energie zurückfallen, gehören dazu ebenso wie Wechselwirkungen zwischen gebundenen Elektronen. Auch die Dynamik von Valenzelektronen, die in Festkörpern für die Anziehung zwischen den Atomen und Molekülen verantwortlich sind, ist natürlich von großem Interesse.

Die Entwicklung der Attosekundentechnologie schreitet inzwischen in rasantem Tempo voran. Die unlängst, nämlich Mitte 2008, erzeugten XUV-Pulse mit einer Dauer von 80 Attosekunden lassen inneratomare Elektronenbewegungen erstmals auf der Zeitskala der atomaren Zeiteinheit (rund 24 Attosekunden) beobachten und enthüllen dadurch die Wechselwirkung von Elektronen innerhalb von Atomen und Molekülen.

Die Echtzeitbeobachtung elektronischer Prozesse und deren Kontrolle mit Licht wird nicht nur grundlegende neue Einblicke in die Vorgänge im Mikrokosmos und deren Auswirkungen auf die makroskopische Welt (sogar auf die Entstehung von Krankheiten) gewähren, sondern könnte sogar den Fortschritt der technischen Entwicklung bestimmen, indem sie der Mikroelektronik zu Geschwindigkeiten verhilft, die heutige Standards um mehrere Größenordnungen übertrifft. ◀

MODELLE DES SONNENSYSTEMS

Worum dreht es sich eigentlich?

Ob ein Planet um die Sonne oder die Sonne um den Planeten läuft, ist Ansichtssache, solange man Kräfte aus dem Spiel lässt. Unter dieser Voraussetzung kann man mit Nikolaus Kopernikus die Sonne als ruhend ansehen – oder ebenso gut mit Tycho Brahe die Erde.

Von Norbert Treitz

Tyge Ottesen Brahe, der letzte große Astronom, der noch ohne Fernrohr auskommen musste, wurde 1546 in Knudstrup im damals dänischen Schonen (heute Südschweden) geboren, studierte in Rostock und verlor als 20-Jähriger bei einem Duell einen Teil seiner Nase (Bild rechts), weshalb man ihn auf Porträts mit einer seiner Prothesen aus edlen Metallen sieht. Der dänische König Frederik II. errichtete für ihn die Sternwarten Uraniborg und Stjerneborg auf der kleinen Insel Hven im Öresund. Dort gelangen ihm mit Mauerquadranten Positionsmessungen mit der bis dahin unerreichten Genauigkeit von 2 Bogenminuten, das ist weniger als ein Zehntel des scheinbaren Monddurchmessers. Als 1599 Frederik starb und sein Nachfolger weniger Geld für Astronomie (und Astrologie) übrig hatte, ging Brahe nach Prag zu Kaiser Rudolf II., der eine neue Sternwarte für ihn zu bau-

en begann. Deren Fertigstellung erlebte Brahe aber nicht, denn er starb 1601. Seine Messungen bildeten die entscheidende Grundlage für die mühevollen Rechnungen, mit denen Johannes Kepler in den folgenden Jahrzehnten zu den Ellipsenbahnen der Planeten gelangte und damit festgefügte Vorstellungen über das Vorrecht der Kreise im Kosmos überwand.

Heute verbinden wir mit dem Namen Brahe und seinem gräzisierten Vornamen Tycho neben diesen Messergebnissen und der Supernova, die er 1572 beobachtete und vermaß, vor allem sein Modell der Planetenbahnen. Im Rückblick erscheint es wie ein halbherziger Kompromiss zwischen dem althergebrachten ptolemäischen Weltbild mit der Erde als Mittelpunkt der Welt und dem erst wenige Jahrzehnte alten Gegenentwurf des Nikolaus Kopernikus (1473–1543), der die Sonne ins Zentrum gesetzt hatte.

In Brahes System ruht die (selbstverständlich kugelförmige) Erde mitten in



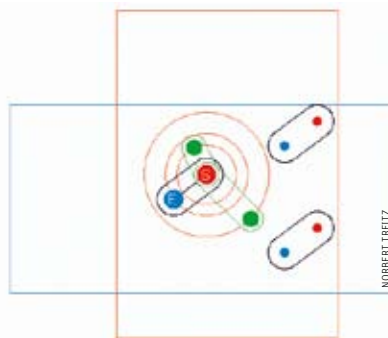
Tycho Brahe (1546 – 1601)

der Welt, die Sonne läuft ebenso wie der Mond auf einem Kreis um sie und die anderen Planeten ebenfalls (ungefähr) auf Kreisen; aber deren Zentren sind allesamt die umlaufende Sonne und nicht

DAS SONNENSYSTEM: DURCHBLICK MIT DER KLARSICHTFOLIE

Eine einfache Bastelei veranschaulicht das tychonische und das kopernikanische System zugleich, für ein größeres Publikum über einen Overheadprojektor nachvollziehbar. Stanzen Sie oder schneiden Sie mit dem Papiermesser in eine Klarsichtfolie (blauer Rand) ein Loch namens »Erde« und zwei Hilfslöcher (blau). Schneiden Sie aus einer weiteren Folie drei gleiche abgerundete, mit je zwei Löchern versehene Rechtecke (schwarzer Rand) aus. Diese wirken als Gelenkarme:

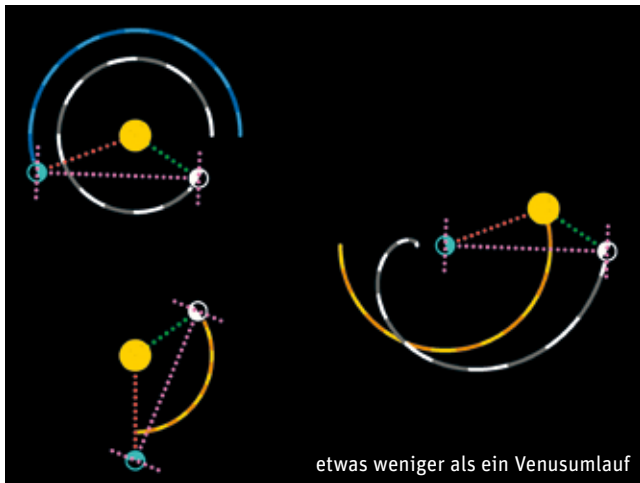
Verbinden Sie jeweils ein Loch eines solchen Rechtecks mit Hilfe eines Textildruckknopfs mit einem der blauen Löcher und das andere Loch mit entsprechend angebrachten Löchern einer darübergelegten Folie (rot). Mit den drei schwarzen Armen können die beiden großen Folien ohne Eigendrehungen gegeneinander



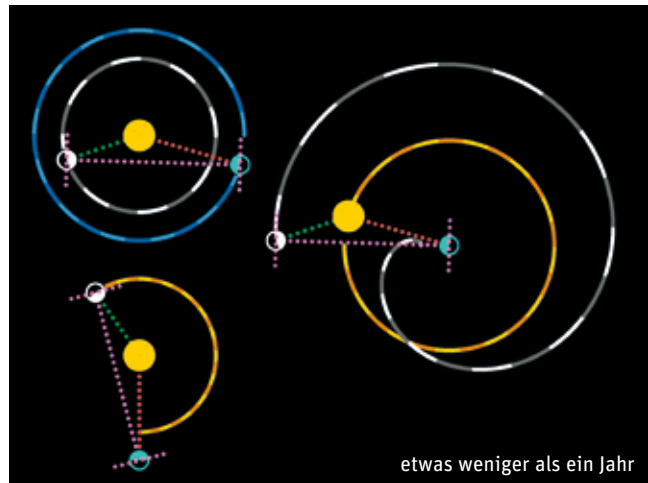
kreisende Bewegungen machen wie eine Hand beim Tafelwischen.

Das mit der Erde verbundene Loch der »roten« Folie entspricht der Sonne. In diesem Loch stecken zwei weitere Gelenkarme (grün). Die grünen Kreise an deren anderem Ende stehen für Venus und Mars als Beispiele für einen weiter innen (»unteren«) und einen weiter außen laufenden (»oberen«) Planeten. Man muss sie einzeln mit der Hand bewegen, sie bleiben dabei aber auf den gemalten roten Kreisen.

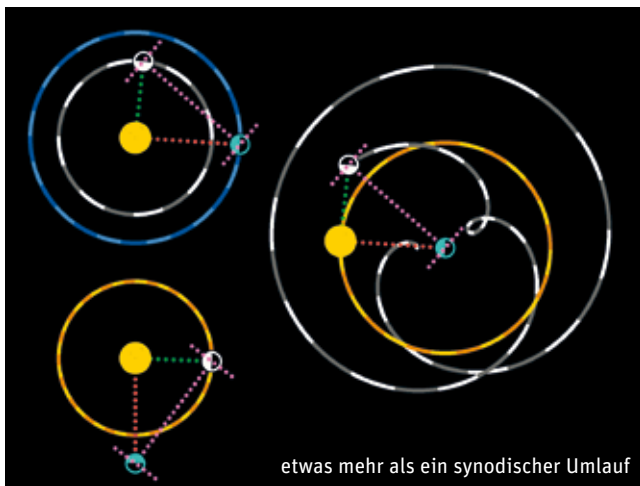
Hält man die unterste, blaue Folie fest und bewegt die rote, so demonstriert man damit das tychonische System. Hält man dagegen die rote Folie fest und bewegt die anderen, ist man bei Aristarch oder Kopernikus, ohne dass man an den Folien und ihren Verknüpfungen irgendetwas ändern müsste.



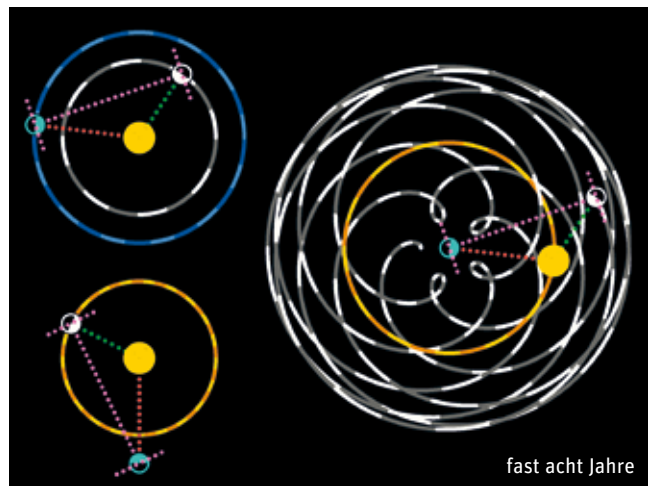
etwas weniger als ein Venusumlauf



etwas weniger als ein Jahr



etwas mehr als ein synodischer Umlauf



fast acht Jahre

die Erde. So kommen die von der Erde aus zu beobachtenden Schleifenbahnen der Planeten mit zeitweiser Rückläufigkeit zu Stande. Wir werden sehen, dass Tychos Bild dem kopernikanischen überraschend nahekommt. Der Unterschied besteht nur in einer Koordinatentransformation; und Brahe erspart uns die kopernikanische Zumutung, dass unser Heimatplanet mit 30 Kilometern pro Sekunde durch den Raum sausen soll, ohne dass wir etwas davon merken. Unsereins lernt das in der Schule und tut dann so, als wäre das nichts Aufregendes.

Üblicherweise unterscheidet man »geozentrisch« und »heliocentrisch«; wichtiger als diese Wahl des Bildmittelpunkts ist aber die Wahl des als ruhend beschriebenen Objekts: geostatisch versus heliostatisch. Der wirklich entscheidende Unterschied besteht darin, dass das heliostatische System fast genau ein Inertialsystem ist, die geostatischen Systeme dagegen gegen den Rest der Welt beschleunigt sind oder rotieren.

Denken Sie sich einen Tisch oder ein Zeichenblatt, auf dem mehrere Objekte

(Planeten) mit jeweils konstanten Winkelgeschwindigkeiten auf konzentrischen Kreisen laufen, und bewegen Sie dann diesen Tisch so, dass seine Kanten parallel zu sich bleiben und zugleich einer der »Planeten« stets an derselben Stelle über dem Fußboden bleibt. Sie heben also die Kreisbewegung dieses einen Planeten durch die Bewegung des Tisches auf. Dadurch wird die Bewegung aller anderen deutlich komplizierter, nämlich schleifenförmig. Im Fall von genauen Kreisbahnen sind diese Schleifen irrationale (sich nicht schließende) Epizykloiden, bei Ellipsenbahnen noch stärkere Verallgemeinerungen von Epizykloiden.

Der Wandel vom geostatischen (tychonischen) zum heliostatischen (kopernikanischen) Weltbild ist also nichts weiter als der Übergang vom ruhenden zum bewegten Tisch oder schlicht eine Vektoraddition, wobei der zu addierende Vektor selbst von der Zeit abhängt.

Sehr viel Durchblick können auch Klarsichtfolien schaffen (wozu heißen sie auch sonst so?), vor allem wenn man mehrere von ihnen mit (Textil-)Druck-

Diese Bildserie zeigt Sonne (gelb), Erde (blau) und Venus (weiß) in drei verschiedenen Koordinatensystemen: jeweils links oben heliostatisch im Inertialsystem (Aristarch, Kopernikus), rechts geostatisch ohne Drehung (Herakleides, Tycho Brahe), links unten heliogeostatisch, also mit »Nachführung« der Drehung der Linie Erde-Sonne.

knöpfen verknüpft (Kasten links). Das empfiehlt sich insbesondere, wenn Sie keinen Computer haben und Ihnen das Tischerücken zu unhandlich ist.

Ein detailliertes Bild des Systems aus Sonne, Venus und Erde finden Sie im Bild oben, und zwar mit ruhendem und bewegtem Tisch sowie zusätzlich mit einem rotierenden Tisch, bei dem die Positionen von Sonne und Erde über dem Fußboden konstant bleiben. Die Zeit wird durch Zebrastrifen auf den Bahnschleifen angezeigt. Jedes Paar aus einem hellen und einem dunklen Streifen bedeutet 1/13 (Erden-)Jahr, also fast genau 4 Wochen. Da sich im Lauf der

ANTIKE VORLÄUFER

Ebenso wie Aristarch von Samos

(um 310 – um 230 v. Chr.) weit vor Kopernikus die Sonne in den Mittelpunkt der Welt stellte, hat ein anderer griechischer Naturphilosoph möglicherweise Tycho Brahe vorweggenommen: Platons Schüler Herakleides Pontikos (um 390 – um 322 v. Chr.), nicht zu verwechseln mit dem früheren und bekannteren Herakleitos (Heraklit), über dessen unklaren Tiefsinn sich schon Titus Lucretius Carus lustig machte und dessen Lob der Antagonismen zur Verherrlichung des Kriegs umgedeutet wurde.

Als einer der Ersten hat Herakleides den sichtbaren Umlauf der Sterne mit einer täglichen Rotation der Erde erklärt. Wie für fast alle antiken Denker (außer Aristarch) war sie aber immer noch der Mittelpunkt der Welt, und alle Planeten einschließlich – im damaligen Verständnis – Sonne und Mond sollten um sie kreisen.

Nach einigen Deutungen der Quellen hat Herakleides vermutet, dass zwar die Sonne und die oberen – äußeren – Planeten (Mars bis Saturn) um die Erde laufen; die unteren – inneren – Planeten Merkur und Venus aber, die wir ja stets – wenn überhaupt – auf derselben Seite wie die Sonne sehen, sollten um diese kreisen.

Jahrmillionen zwischen Erde und Venus annähernd eine Resonanz im Verhältnis 13:8 eingestellt hat, ist das recht genau 1/8 der Venus-Umlaufzeit. In den Bildern wird das Verhältnis der (siderischen) Umlaufzeiten zu genau 13:8 idealisiert, und die Ellipsenbahnen werden als exakte Kreise angenommen, was bei Erde und Venus – anders als bei Merkur – nur unauffällige Effekte verschleiert.

Alle Bilder zeigen die Sicht rechtwinklig »von oben« auf die Erdbahnebene, von der die Bahnebene der Venus nur sehr wenig abweicht. Die gepunkteten Linien zeigen die Verbindungsstrecken der drei Objekte und die geometrischen Grenzen der gegenseitigen Sichtbarkeit der beiden Planeten.

Sind nun die vor 400 Jahren umstrittenen »Weltsysteme« gleichwertig? Man kann auch fragen, ob der Beifahrer einen Stadtplan bei einem Richtungswechsel

drehen oder immer mit Norden nach vorne halten soll. Beides kann nützlich sein. In der Kernphysik benutzen wir Laborsysteme und Schwerpunktsystem, die zum Messen und zum Rechnen unterschiedlich bequem sind. Auch die Erscheinungen am Himmel beschreiben wir zunächst von einem Punkt auf der Erde aus, und sogar Astronomen reden vom Auf- und Untergang eines Objekts, wenn »in Wirklichkeit« wegen der Erdrotation unsere Fußbodenebene durch das Objekt hindurchkippt. Die Unterscheidung von »wirklichen« und »scheinbaren« Bewegungen setzt einen absoluten Raum voraus, den wir nicht haben.

Allenfalls könnte man die Dopplerverschiebungen der kosmischen Hintergrundstrahlung heranziehen. Wer hier keine Vorzugsrichtung hat, ruht in einem sehr weit gehenden Sinn. Unsere Galaxis saust dagegen mit einigen 100 Kilometern pro Sekunde durchs All; um deren Mitte läuft das Sonnensystem mit ähnlich großer Geschwindigkeit und darin die Planeten um die Sonne, wir Erdbewohner mit immerhin noch 30 Kilometern pro Sekunde.

Erst die Suche nach Ursachen für die Bewegungen hat, im Wesentlichen durch Newton, zu der Erkenntnis geführt, dass man die Beschleunigungen astronomischer Objekte »erklären« kann. Die entscheidende Zutat ist das Gravitationsgesetz; dazu sind Masse und Geschwindigkeit jedes Objekts zu bestimmen.

Solche Rechnungen sind nur (vergleichsweise) einfach in Inertialsystemen; denn in ihnen bleibt der Impulsvektor eines unbeeinflussten Objekts konstant und alle Impulsänderungen (Beschleunigungen) sind durch die Gravitation oder auch ähnliche Naturgesetze erklärbar. Denn das Gravitationsgesetz beachtet »von allein« die Gesetze der Impuls- und der Drehimpulserhaltung. Das heliostatische (und nicht gegen den Rest der Welt drehende) System von Aristarch und Kopernikus ist ein Inertialsystem, wenn man davon absieht, dass die Bahn des Sonnensystems um die Mitte der Galaxis nicht wirklich, sondern nur sehr genau geradlinig ist, und wenn korrekterweise nicht die Mitte der Sonne, sondern der Schwerpunkt des ganzen Sonnensystems als Nullpunkt für die Geschwindigkeiten verwendet wird (als »ruhend«; ob als Mitte, ist weniger wichtig).

Im tychonischen System läuft das schwerste Objekt, genauer gesagt: der

Schwerpunkt des Ganzen, auf einem Kreis, nicht jedoch die anderen Objekte. Es ist zwar kinematisch gleichwertig zu heliostatischen, lässt sich aber weder durch Naturgesetze, die eine mit der Schwerkraft vergleichbare Struktur haben, noch mit der Annahme allgegenwärtiger Kreisbewegungen »erklären«. Wohl aber kann man eine »Planetenuhr« mit Zahnrädern bauen, die (in der Idealisierung durch Kreisbahnen) alle Planetenbewegungen abbildet und bei der es keine Rolle spielt, welche der vielen Achsen man an der Wand befestigt.

Als »kopernikanisch« bezeichnen wir heute nicht nur die Bevorzugung von Inertialsystemen gegenüber verschiedenen ebenfalls nützlichen Laborsystemen, sondern – viel weiter gehend – das Postulat, dass unsere Beschreibung der Welt möglichst universell sein und keine Spezialitäten unserer näheren Umgebung leichtsinnig verallgemeinern soll. So ist unser Heimatplanet in unserem Weltbild aus der Mitte gerückt und zu einem von vielen geworden, ebenso unser Sonnensystem und unsere ganze Galaxis.

Die Entdeckung der Spektroskopie, dass es auf fernen Sternen die gleichen chemischen Elemente gibt wie bei uns, ist dabei eine überzeugende Stützung dieser Sicht, auch wenn der Mensch dabei Bescheidenheit lernen muss, wie er es auch im Bereich der Biologie seit der Mitte des 19. Jahrhunderts tut: als Teil der Natur, nicht in ihrer Mitte, aber weit und breit der einzige Teil, der über sich und das Ganze staunen kann und das auch tun sollte.

In der nächsten Folge erfahren wir, wie die Tageszeiten auf Venus und auf Merkur aussehen. Unter anderem schauen wir einem Besucher von der Erde über die Schulter, der immer wieder mittags von Venus aus den Blick auf seine Heimat richtet, und wundern uns über die unentschlossen aufgehende Sonne am Merkur-Horizont. ◀



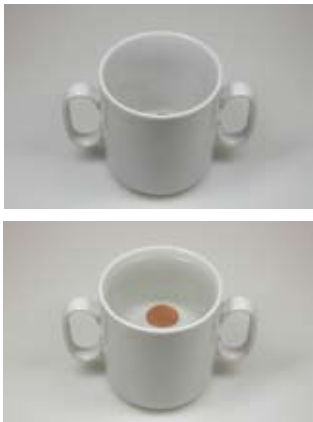
Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Schemmel, M.: Wie entstehen neue Weltbilder? In: Sterne und Weltraum 12/2008, S. 48 – 58.

Wenn der Pool ins Schwimmen gerät

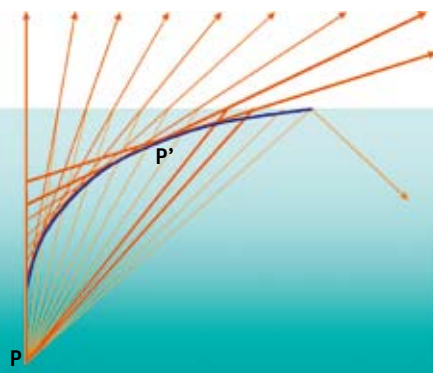
Von stürzenden Böden, auftauchenden Münzen und der Suche nach dem Wahren hinter der Täuschung

Hügellandschaft unter Wasser oder gar ein liquider Abgrund? Für das Spektakuläre im Alltäglichen – wie diese brechungsbedingten optischen Deformationen der Schwimmbeckengeometrie – sind wir meist blind.



Sehen Sie die Münze? Oben ist sie nur zu erahnen. Erst Wasser in der Tasse sorgt dafür, dass sie mitsamt dem Tassenboden zumindest optisch angehoben wird.

Die vom Punkt P ausgehenden Lichtstrahlen durchdringen die Wasseroberfläche mit unterschiedlichen Winkeln und werden daher unterschiedlich stark gebrochen. Treffen die fett gezeichneten Strahlen das Auge, sieht es P im Schnittpunkt P' der geradlinigen Verlängerung der Strahlen. Auf der blauen Kurve liegt die Gesamtheit der Schnittpunkte.



Fast schon spektakulär wirkt dieser Swimmingpool auf den ersten Blick. Eine ungewöhnliche Geometrie, ein zum Vordergrund hin in die Tiefe stürzender Beckenboden? Man ahnt natürlich, dass es sich hier nicht um reale Deformationen handelt – welchen Sinn sollten sie auch haben? –, sondern um eine optische Täuschung. Doch wohl nur wenige haben das Phänomen je wahrgenommen.

Dafür gibt es gute Gründe: Neben der typischen Blindheit für das Spektakuläre im Alltäglichen wird man einen Swimmingpool kaum durch eingehende Betrachtung, eher schon durch Schwimmen oder Planschen in Beschlag nehmen wollen. Dann aber ist Schluss mit der glatten Wasseroberfläche, was die Sichtbarkeit des Phänomens stark einschränkt. Auch erschließt sich der Reiz des Alltäglichen (nicht nur in diesem Fall) eben gerade aus einer nicht alltäglichen Perspektive, wenn man nämlich schwimmend flach über die Wasseroberfläche schaut oder bäuchlings die Beckenrandperspektive einnimmt. Sonst nimmt die Deformationen nur der wahr, der bereits weiß, was er sehen will.

Auch andere flüssigkeitsgefüllte Behälter foppen uns mit optischen Täuschungen. Blickt man in eine Tasse mit Wasser, so stellt man manchmal fest – der eine mehr, der andere weniger erstaunt –, dass der Boden angehoben erscheint. Mit einer Münze lässt sich dies eindrucksvoll demonstrieren. Blickt man so in die leere Tasse, dass man die Münze gerade nicht mehr sieht, gerät das Geldstück

plötzlich in den Blick, wenn die Tasse mit Wasser gefüllt wird. Diese optische Hebung hängt stark von Position und Blickwinkel des Beobachters ab. Blickt man unter einem großen Winkel gegenüber der Senkrechten, also sehr flach auf eine Wasseroberfläche, so ist die Hebung des Bodens viel stärker als bei einem kleinen Winkel. Und weiter entfernte Bodenflächen erscheinen stärker gehoben als nähere.

Diese Änderung macht sich jedoch bei der Tasse kaum bemerkbar, weil die Variation des Blickwinkels vom vorderen bis zum hinteren Ende der Münze sehr klein ist. Nicht so bei größeren Wasserkörpern wie dem Swimmingpool. Hier überblickt man gleichzeitig einen großen Winkelbereich, so dass die ferneren Teile des Fliesenbodens stärker gehoben erscheinen als die näheren. Die dadurch entstehenden scheinbaren Deformationen sind so gut zu erkennen, weil Beckenboden und -wände mit Fliesen belegt sind, die wie Millimeterpapier selbst kleine Verzerrungen sichtbar werden lassen. Ein Teich macht es uns deutlich schwerer: Weil bei ihm das rechteckige Bezugssystem fehlt, wird man brechungsbedingte Abweichungen von der unbenannten und unverzerrten, also »wahren« Geometrie des Bodens kaum feststellen können.

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



SERIE: EVOLUTION

Teil I: Evolution – Gruppe oder Individuum?	SdW 1/2009
Teil II: Missverständnisse um Darwin	SdW 2/2009
Teil III: Der Ameisenforscher. Bert Hölldobler im Porträt	SdW 3/2009
Teil IV: Evolution und Religion	SdW 4/2009

Missverständnisse um Darwin

Darwins Buch zur Entstehung der Arten, in dem er seine Evolutionstheorie darlegt, gilt als das bedeutendste naturwissenschaftliche Werk der Neuzeit. Einige seiner Thesen sind noch heute umstritten, und manche werden außerhalb der Wissenschaft oft falsch verstanden. Was aber hat Darwin wirklich gesagt?

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio. Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk



THE COMPLETE WORK OF CHARLES DARWIN ONLINE (DARWIN-ONLINE.ORG.UK) / UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Von Christoph Marty

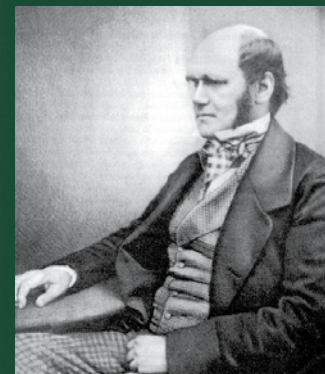
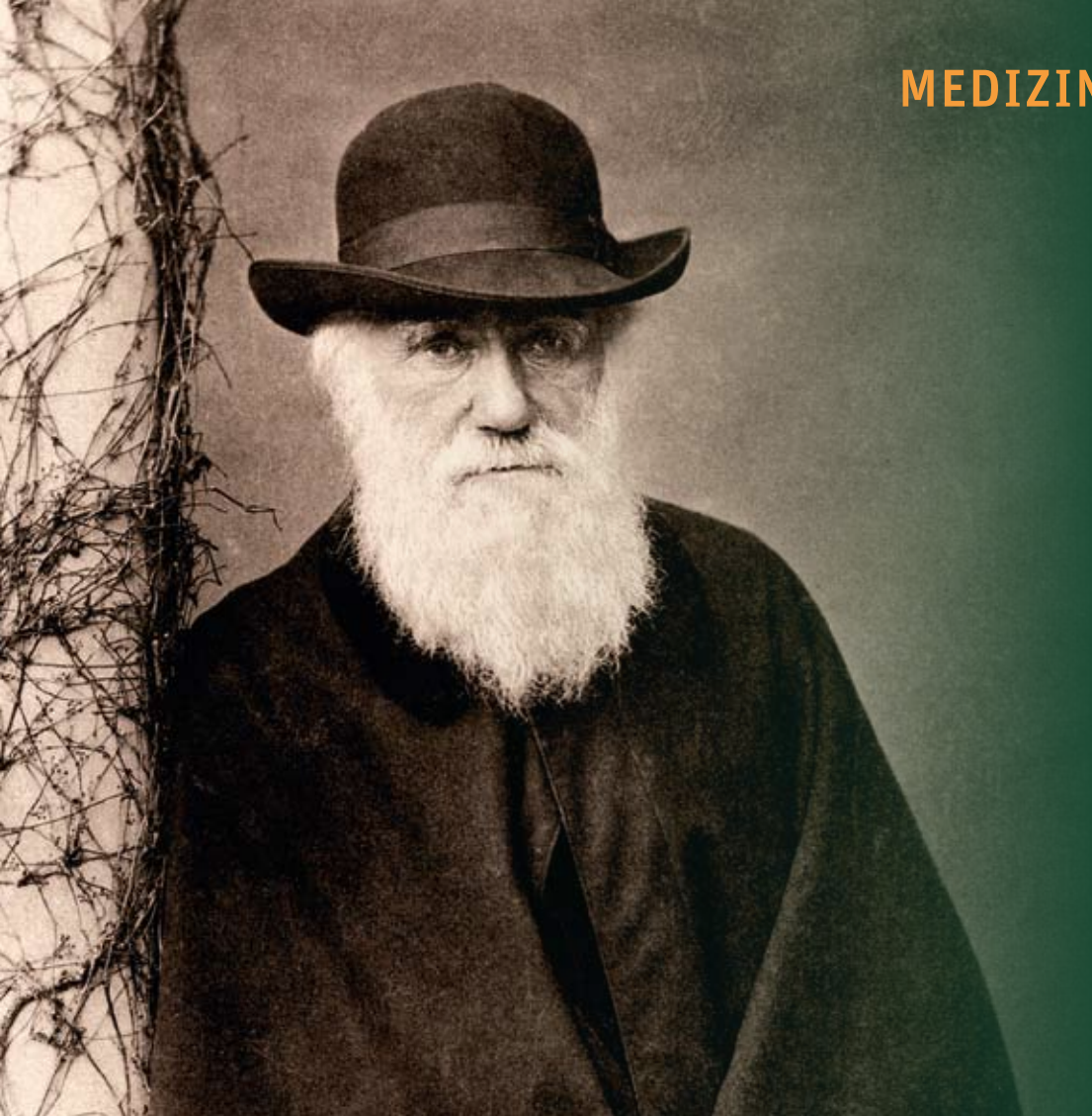
Um den Meinungskrieg, den Charles Darwins 1859 erschienenes Hauptwerk »On the Origin of Species« auslöste, ranken sich Legenden. Dieser Streit zwischen Evolutionsbefürwortern und -gegnern wurde längst zu Gunsten der Evolutionstheorie entschieden. Trotzdem gibt das berühmte Buch aus verschiedenen Gründen auch Anlass zu Kritik: Der Text liest sich mühsam, schon wegen der umständlichen Sprache; einzelne Ausführungen widersprechen einander; zudem erscheint das Werk lückenhaft – der Autor klammerte einige Fragen aus, die der Buchtitel impliziert; und manche Passagen wirken seltsam unpräzise. Ferner könnte man Darwins Argumentation mangelnde Konsequenz vorwerfen.

Und doch markierte das Erscheinen von »Über die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl oder die Erhaltung der begünstigten Rassen im Kampf ums Dasein« (im Folgenden kurz die »Origin« genannt) vor 150 Jahren einen Meilenstein in der Geschichte der Naturwissenschaften. Darwin be-

diente sich zur Erklärung der Lebensvielfalt nicht mehr biblischer Mythen, sondern argumentierte rational. Er ersetzte ein längst überkommenes theistisches Weltbild durch ein naturalistisches.

Wohl kaum ein anderes wissenschaftliches Buch dürfte deshalb jemals ein so großes Echo gefunden, zugleich jedoch Zeitgenossen und nachfolgende Generationen so tief gespalten haben. Keines wurde aber auch so oft falsch interpretiert, kein anderer Verfasser immer wieder für verschiedenste vermeintliche Grundübel des jeweils herrschenden Zeitgeists, zum Beispiel für Atheismus, verantwortlich gemacht, kein Theoriengebäude als angeblich »wissenschaftliche Grundlage« für Menschen verachtende Ideologien wie etwa den Nationalsozialismus derart ausgiebig missbraucht. »Meine Ansichten sind häufig grob entstellt, mit Bitterkeit angegriffen und lächerlich gemacht worden«, klagte bereits der alte Darwin (1809–1882) in seiner Autobiografie.

Dabei hatte der Naturforscher seine revolutionären Thesen – nach denen die Arten eine gemeinsame Abstammung haben und



BEIDE FOTOS: PUBLIC DOMAIN

Vor 150 Jahren erschien Charles Darwins berühmtestes Buch – die Kurzfassung eines wesentlich umfangreicher geplanten Werks. Wie sehr ihn angriff, dass seine Erkenntnisse das Weltbild seiner Zeit umwarfen, sah man ihm damals schon an (kleines Bild).

sich in einem ebenso blinden wie mechanischen Prozess allmählich verändern – schon selbst in seinem Hauptwerk mit zahlreichen Fakten untermauert. Seit Darwin lieferten Hunderte von Studien weitere Teile zu dem Riesenpuzzle. So konnten Biologen und Paläontologen etwa anhand von mannigfaltigen Fossilienfunden und anatomischen Vergleichen die evolutionäre Geschichte vieler heutiger Lebewesen und deren verwandtschaftliche Beziehungen überzeugend rekonstruieren. Von anderer Seite belegten später beispielsweise Erbgutvergleiche und vielfältige molekulare Analysen die Stimmigkeit der Deszendenztheorie.

Wissenschaftler akzeptieren die Evolution denn auch längst als Tatsache. Nur eine kleine Fraktion von Ewiggestrigen, Anhänger des Kreationismus oder modern gefasst des »Intelligent Design«, sät mit fragwürdigen Argumenten noch heute Zweifel an der von ihr verhassten evolutionsbiologischen Weltanschauung. Dabei war die wissenschaftliche Glaubwürdigkeit des biblischen Schöpfungsberichts eigentlich schon lange vor Erscheinen der »Origin« kompromittiert: Die damals ent-

deckten fossilen Faunen wollten einfach nicht zu dem Mythos passen, dass sich die Biota der Erde seit ihrer Schöpfung nicht verändert hatten. Geologische Studien sprachen zudem klar dafür, dass die Erde weitaus älter sein müsse als jene 6000 Jahre, die ihr die anglikanische Kirche, gestützt auf die Bibel, zugestand. Doch als Darwins Abhandlung erschien, hingen sogar noch manche Naturforscher der biblischen Weltansicht an.

»Bei vielen Lesern stieß das Buch daher zunächst auf wenig Wohlwollen«, kommentiert die Biophilosophin Eve-Marie Engels von der Universität Tübingen. »Viele Missverständnisse sind möglicherweise auch deshalb entstanden, weil es viele Menschen einfach nicht verkraftet haben, dass sich der Mensch aus affenähnlichen Vorfahren entwickelt hat.« Nikolaus Kopernikus (1473–1543) hatte die Menschheit einst aus dem Zentrum des Universums verbannt. Charles Darwin entriss ihr nun auch die Krone der Schöpfung. »Damit brachte Darwin die Biologie auf ein intellektuell höheres Niveau, auf dem sich andere Naturwissenschaften wie die Physik bereits befanden – die nämlich Phänomene der unbe-

In Kürze

- ▶ Vor 150 Jahren erschien Charles Darwins grundlegendes Werk »Über die Entstehung der Arten«. Seine Evolutionstheorie besteht aus **fünf Einzeltheorien**. Viele seiner Grundgedanken haben spätere Forscher weiter ausgebaut. Aber auch neue kamen hinzu. Darwins Beobachtungen und Schlussfolgerungen gelten als die Basis, auf der sich die Biologie begründet.
- ▶ **Darwin revolutionierte** mit seiner Theorie nicht nur die Wissenschaft, sondern vor allem auch **unser Menschenbild**. Abgesehen von einigen Außenseiterpositionen wird das von ihm postulierte Geschehen heute allgemein als Tatsache akzeptiert.

Das Kriegs- und Vermessungsschiff »HMS Beagle«, auf dem Darwin fast fünf Jahre reiste, hier 1834 zur Überholung auf einem südamerikanischen Strand

lebten Natur nicht durch das Eingreifen Gottes, sondern mit allgemein gültigen Gesetzen erklärten«, urteilt Engels. »Darwins Theorien wirkten aber weitaus provozierender, weil sie unser Verständnis der lebendigen Natur betreffen und damit letzten Endes auch das Selbstverständnis von uns Menschen unmittelbar berühren.«

Entsprechend der Bedeutung des Werks waren schon am Erscheinungstag von »Über die Entstehung der Arten«, dem 24. November, alle 1250 Exemplare der Erstauflage vergriffen. »Damals wie heute hat sich das Buch zwar gut verkauft, es ist aber leider kaum im Detail gelesen worden«, erklärt der Evolutionsbiologe Ulrich Kutschera von der Universität Kassel. »Ich wage zu behaupten, dass nur wenige Biologen Darwins ›Origin‹ Seite für Seite studiert haben, da sich die wesentlichen Inhalte in einigen Sätzen zusammenfassen lassen.«

Heute erschwert zudem die veraltete Sprache die Lektüre. Dazu meint Kevin Padian, Paläontologe an der University of California in Berkeley: »Wenn ich gemeinsam mit meinen Studenten die ›Origin‹ lese, liegt deshalb eine alte Ausgabe der ›Encyclopedia Britannica‹ immer griffbereit. Viele Ausdrücke haben heute eine andere Bedeutung als zu Darwins Zeiten, wie zum Beispiel das Wort ›Evolution‹, wofür Darwin meist die Bezeichnung ›Transmutation‹ gebraucht hat.«

Im Darwin-Jahr 2009, in das am 12. 2. außerdem Charles Darwins 200. Geburtstag fällt, ist es deshalb noch immer nötig, sich zu versichern, was der Forscher in seinem Artenbuch eigentlich niedergeschrieben hat – und was nicht. Dieser Artikel möchte einige Eindrücke davon vermitteln, welche Impulse Darwin der Biologie verliehen hat – und auch, welche Fragen er offen ließ beziehungs-

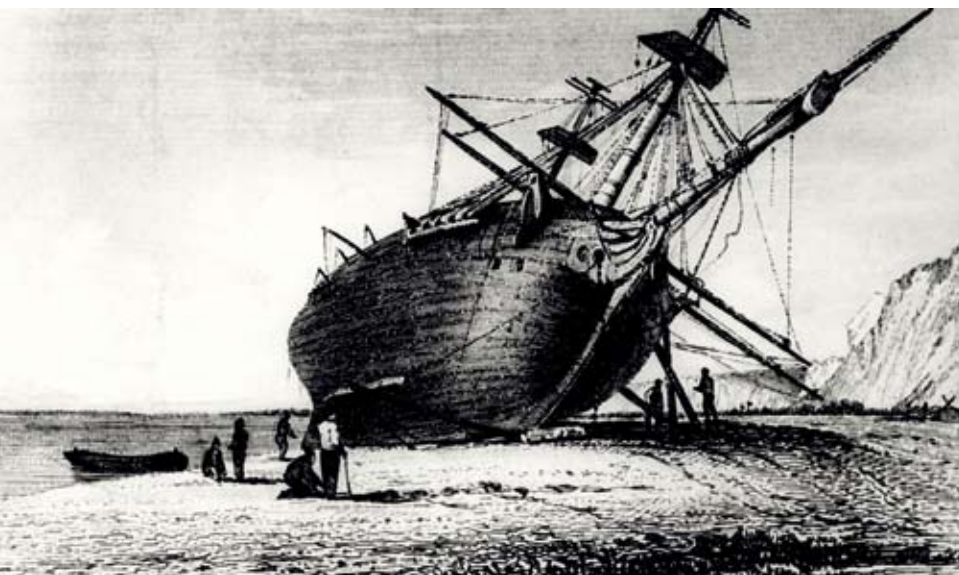
weise offen lassen musste, etwa weil er die von Gregor Mendel (1822–1884) entdeckten Vererbungsgesetze noch nicht kannte. Inspiriert von seinen umfangreichen Beobachtungen auf der fast fünf Jahre dauernden Forschungsreise mit dem Vermessungsschiff »HMS Beagle«, die ihn von 1831 bis 1836 rund um die Welt führte, entwickelte Darwin in den Jahren nach seiner Rückkehr gleich ein ganzes Bündel von Hypothesen, die sich in fünf einander ergänzende Einzeltheorien ordnen und zusammen seine Vorstellungen von den Evolutionsprozessen wiedergeben. Diese Ideen seien im Folgenden angerissen.

Die Lebewesen verändern sich in langen Zeiträumen

»Während der Reise der ›Beagle‹ hatte die Entdeckung großer fossiler Tiere, die mit einem Panzer, gleich dem der jetzt existierenden Gürteltiere, bedeckt waren, in der Pampasformation Patagoniens einen tiefen Eindruck auf mich gemacht«, erinnert sich Darwin im Alter in seiner Autobiografie. »Zweitens ebenso die Art und Weise, in der beim Hinabgehen nach Süden über den Kontinent Südamerikas nahe verwandte Tiere einander vertreten, und drittens auch der südamerikanische Charakter der meisten Naturerzeugnisse des Galapagosarchipels, und ganz besonders die Art und Weise, wie sie auf einer jeden Insel der Inselgruppe unbedeutend verschieden sind.«

Der Bedeutung dieser Entdeckungen wurde sich der Naturforscher allerdings erst nach der Rückkehr in seine Heimat bewusst: Verwirrt von den variierenden Schnabelformen der auf den Galapagosinseln heimischen Vögel, hatte er dem britischen Ornithologen John Gould (1804–1881) eine Anzahl Bälge zur Klassifizierung überlassen. Der Vogelexperte identifizierte außer den später berühmt gewordenen »Darwin-Finken« auch drei neue Spottdrossel-Arten und erkannte deren enge Verwandtschaft mit einer auf dem südamerikanischen Festland heimischen Spezies. Somit, folgerte Darwin, waren die heutigen verschiedenen Organismen nicht wie im Schöpfungsbericht beschrieben vom Allmächtigen erschaffen und gleich bestens an ihre Umwelt angepasst, sondern sie hatten sich im Verlauf der Erdzeitalter immer mehr verändert und sich erst später an ihre jetzigen ökologischen Nischen adaptiert. »In seinem Buch sucht Darwin nach den Mechanismen dieses Artenwandels«, erklärt Engels. »Die Frage nach der Erstsache lässt er dagegen außen vor.«

Missverständnisse schuf schon der Titel von Darwins Artenbuch – zumindest im englischen Original. Darwins Verleger hatte



ANGEBILIN (ZEICHNUNG VON CONRAD MARTENS)

die verkaufsfördernde Formulierung »On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life« durchgesetzt. Das Wort »Origin« kann allerdings mehreres bedeuten, darunter »Entstehung« ebenso wie »Ursprung«. »Viele Menschen sind deshalb noch heute davon überzeugt, dass Darwin über den Ursprung allen Lebens geschrieben hat«, sagt der Wissenschaftshistoriker John van Wyhe von der University of Cambridge. »Tatsächlich aber war Darwin davon überzeugt, dass die Wissenschaft seiner Zeit diese Frage noch gar nicht beantworten konnte.«

Dies hielt Darwin allerdings nicht davon ab, eifrig über den Anfang allen Lebens zu spekulieren: In Briefen vermutete er, dass das Leben auf chemischem Weg »in einem warmen Tümpel unter Reaktion von Ammonium- und Phosphorsalzen« entstanden sei. In »Über die Entstehung der Arten« liest sich das freilich anders: »Es ist wahrlich etwas Erhabenes um die Auffassung, dass der Schöpfer den Keim allen Lebens, das uns umgibt, nur wenigen oder gar einer einzigen Form eingehaucht hat und dass, während sich unsere Erde nach den Gesetzen der Schwerkraft im Kreise bewegt, aus einem so schlichten Anfang eine unendliche Zahl der schönsten und wunderbarsten Formen entstand und noch weiter entsteht.«

Gott – so seine Botschaft im Schlusskapitel – wirke durch seine Gesetze. »Dieses Zugeständnis an die Schöpfungstheorie war ein Kompromiss«, erklärt Kutschera. »Darwin wollte die Kreationisten des 19. Jahrhunderts nicht zu stark provozieren.« Ein Zugeständnis, das allerdings auch Widerspruch hervorrief. Die Biophilosophin Engels meint dazu: »Einigen Zeitgenossen ging Darwins Argumentation nicht weit genug. Sie haben es ihm übel genommen, dass er sich in seinem Artenbuch nicht auch zum Ursprung des Lebens geäußert hat.«

Die Organismen verändern sich allmählich in vielen kleinen Schritten

Während seiner Reise mit der Beagle wurde Charles Darwin in Chile Zeuge einer riesigen Naturkatastrophe: Eines Morgens – er hatte sich nach einem morgendlichen Spaziergang gerade zur Erholung auf den Boden gelegt – begann die Erde unter ihm für rund zwei Minuten zu beben. Was wirklich geschehen war, erkannte er aber erst, als er wenige Tage später Concepción erreichte. Die Stadt am Fuße der Anden war nahezu vollständig zerstört, überdies hatte sie nach dem verheerenden Beben auch noch ein mehrere Meter hoher Tsunami überrollt. Tausende Menschen



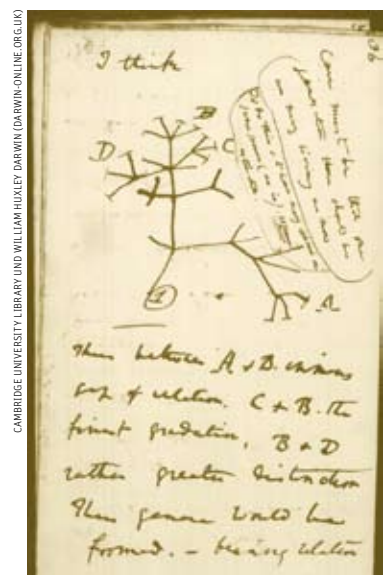
hatten ihr Leben verloren. Darwin versuchte die Ursache der Katastrophe zu ergründen. Der Kapitän der »Beagle« wies ihn auf Muschelbänke auf einer nahe gelegenen Insel hin, die oberhalb der Flutlinie lagen und eben erst zu faulen begonnen hatten. Gleich um mehrere Fuß, schloss Darwin, musste sich das Land aus dem Meer emporgehoben haben. Diese Beobachtung gehörte zu den entscheidenden Eindrücken, die Darwins Denken formten.

Schon in der ersten Zeit seiner Reise hatte er während der langen Phasen auf dem Meer – wann immer es seine Seekrankheit zuließ – die »Principles of Geology« von Charles Lyell (1797–1875) studiert. Darin beschreibt der schottische Geologe eine Welt im permanenten Wandel, angetrieben von gealterischen Kräften wie Erdbeben, Erosion und Vulkanismus, die das Antlitz unseres Planeten über die Jahrtausende geformt haben und noch heute wirken – allerdings nicht kataklysmisch wie in Georges Cuviers (1769–1832) damals vorherrschender Katastrophentheorie beschrieben, sondern in einem graduellen Prozess. Die Landmassen sieht Lyell in zusammenhängender Bewegung: Steigen sie in einem Gebiet empor, müssen sie an anderer Stelle absinken.

Darwin hatte auf seiner Reise schon vorher Indizien gefunden, die Lyells neuartige Ansichten zu stützen schienen. Doch die Katastrophe von Concepción überzeugte ihn: Gebirge wie die Anden, so schloss er daraus, hatten sich nicht in einem einzigen, kolossalen Umbruch aufgefaltet, sondern wuchsen, kaum merklich, im Verlauf von Jahrtausenden, als Ergebnis unzähliger kleiner Hebungen wie jener, deren Zeuge er nun selbst geworden war. »Von Lyell inspiriert begann Darwin, die Welt in einem langsamen Wandel begriffen anzusehen«, urteilt John van Wyhe.

Auch den Wandel und die Entstehung von Arten verstand Darwin als graduellen Prozess, wovon ihn zunächst vor allem seine Beobachtungen auf dem südamerikanischen Kontinent überzeugten. Allerdings erlaubten ihm die lückenhaften Fossilienansammlungen zu seiner Zeit noch nicht, zu erklären, wie neue Or-

Diese Skizze eines Artenstammbaums zeichnete Darwin schon 1837, ein Jahr nach seiner großen Reise, in ein Tagebuch. Darüber schrieb er: »I think« (Ich denke).





Die Vogelwelt der Galapagosinseln lieferte Darwin später wichtige Anhaltspunkte für die Mechanismen der Evolution, hier Kaktusgrundfinken.

In Südamerika entdeckte Darwin riesige Skelette von ausgestorbenen Tieren, beispielsweise von Riesenfaultieren. Diese später anhand der Fossilien von Richard Owen (1804–1892) gezeichnete Rekonstruktion (Bild) zeigt die Ähnlichkeit mit heutigen Faultieren.



THE COMPLETE WORK OF CHARLES DARWIN ONLINE (DARWIN.ONLINE.ORG.UK) / UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

gane zu Stande kommen. Er selbst äußert sich dazu in der »Origin« durchaus selbstkritisch: »Wenn man zeigen könnte, dass irgendein komplexes Organ existiert, das nicht durch zahlreiche aufeinander folgende, geringfügige Modifikationen gebildet worden ist, würde meine ganze Theorie zusammenbrechen.« Er vermochte sich zum Beispiel nicht vorzustellen, wie sich etwa das Auge durch natürliche Ausleseprozesse entwickelt haben könnte – ein selbstkritischer Einwand, den noch heute Evolutionskritiker, vor allem Kreationisten, gern zitieren.

Tatsächlich aber konnten Forscher in den vergangenen Jahrzehnten bei ausgewählten Organismengruppen die Evolution von Augen rekonstruieren – etwa am Beispiel der Mollusken oder Weichtiere, zu denen auch die Tintenfische mit ihren großen Linsenaugen gehören. So besitzen die im Meer lebenden Napfschnecken der Gattung *Patella*, die sich von Algen ernähren und sich bei Ebbe oder Gefahr auf steinigem Untergrund festheften, nur Becheraugen zur Unterscheidung von Licht und Schatten, während die räuberischen, ihre Opfer anbohrenden Purpurschnecken der Gattung *Nucella* über komplex aufgebaute Linsenaugen verfügen, mit denen sie ihre Beute gezielt aufspüren. Daneben stießen Forscher auf verschiedenste Zwischenformen dieser beiden Extreme, anhand derer die Evolution des Auges bei den Weichtieren deutlich wird.

Alle Lebewesen haben einen gemeinsamen Ursprung

Ein Jahr nach seiner Rückkehr nach England überschrieb Charles Darwin eine Seite in einem seiner geheimen Notizbücher zum Artenwandel mit den Worten: »Ich denke.« Doch seine folgende Erklärung fasste er nicht in Worte, sondern skizzierte sie mit wenigen Federstrichen in einem halbseitigen Diagramm (Bild S. 49). Was er hier zu Papier gebracht hat, erzählt vom Entstehen und Vergehen der Arten: Ausgehend von einem Ursprungspunkt zeichnete er eine Linie, von der mehrmals in ungleichmäßigen Abständen seitlich Striche abzweigen, die sich wiederum verästeln. Die Verzweigungen markieren die Auftrennungen von Arten; mit einem Querstrich abgeschlossene Linien stehen für heutige Spezies, lose Enden dagegen für ausgestorbene Arten wie die von ihm in Patagonien entdeckten Riesensäugetiere.

Die kleine Skizze symbolisiert die Metapher von einem Stammbaum des Lebens, die Entwicklung aller Lebewesen ausgehend von einem gemeinsamen Ursprung. »Darwins Konzept von einer gemeinsamen Abstammung hat die Genealogie beflügelt«, urteilt der Paläontologe Kevin Padian. »Das regte eine verstärkte Suche nach den nächsten Verwandten von Lebensformen und nach den gemeinsamen Vorfahren an.« Zudem erklärte die Deszendenztheorie, warum sich die Organismen in Gruppen mit gleichen Bauplänen sortieren lassen.

Eine solche Strichskizze fand später als einzige Abbildung Aufnahme in Darwins Artenbuch. Dieser Stammbaum sei allerdings sehr abstrakt und habe die Fachwelt kaum beeindrucken können. Darauf weist Ulrich Kutschera in seinem Lehrbuch »Evolutionsbiologie« hin. Den ersten anschaulich aus einer Wurzel heraus entspringenden Stammbaum – der eigentlich wie ein sich stark verzweigender Busch aussah (siehe Bild S. 52) – publizierte 1866 der deutsche Zoologe Ernst Haeckel (1834–1919). Bis 1874 wurde daraus bei ihm ein knorriger Baum mit dickem Stamm und vielen verzweigten Ästen. Anders als Haeckel – der den Menschen gleich mit einordnete und ihn zu den Säugetieren an die Spitze der Primaten setzte, womit er den Protest religiöser Kreise provozierte – schloss Darwin den Menschen in seinem »Origin«-Buch zunächst aus. Vermutlich entschied er so aus taktischen Gründen und auch aus Rücksicht auf seine religiöse Frau. Allein ein ebenso vorsichtig wie doppeldeutig formulierter Satz lässt seine wahre Gesinnung erkennen: »Licht wird auch fallen auf den Menschen und seine Geschichte«, heißt es im Schlusskapitel.

Zu den Ursprüngen unserer eigenen Spezies äußerte er sich erst 1871 in seinem Werk »Die Abstammung des Menschen«. In der Einleitung begründet er die Verzögerung: »Viele Jahre hindurch habe ich Notizen über den Ursprung oder die Abstammung des Menschen gesammelt, ohne dass mir etwa der Plan vorgeschwebt hätte, über den Gegenstand einmal zu schreiben, vielmehr mit dem Entschluss, dies nicht zu tun, da ich fürchtete, dass ich dadurch nur die Vorurteile gegen meine Ansichten verstärken würde.« Dennoch polarisierte die »Afffrage« die britische Gesellschaft von Anfang an. Ende Juni 1860 kam es in der Versammlung der British Association for the Advancement of Science in Oxford zu einer denkwürdigen Konfrontation der beiden gegnerischen Lager. Darwin selbst war wegen seines chronischen Magenleidens nicht anwesend. Es ging heftig zu. Die Rede des Bischofs von Oxford, Samuel

Wilberforce (1805–1873), der selbst Ornithologe war, gipfelte in der Frage, ob Darwins enger Freund, der Zoologe Thomas Henry Huxley (1825–1895), auf Seiten seines Großvaters oder seiner Großmutter vom Affen abstammte, worauf dieser konterte: »Wenn die Frage an mich gerichtet wurde, ob ich lieber einen miserablen Affen zum Großvater haben möchte oder einen durch die Natur hoch begabten Mann von großer Bedeutung und hohem Einfluss, der aber diese Fähigkeiten und diesen Einfluss nur dazu benutzt, um Lächerlichkeit in eine ernste wissenschaftliche Diskussion hineinzutragen, dann würde ich ohne Zögern meine Vorliebe für den Affen bekräftigen.«

Treibende Kraft der Evolution ist die natürliche Auslese

Mit dem Konzept der Selektion (*natural selection*) fand Darwin eine plausible Erklärung für Evolutionsvorgänge auf der Grundlage von Veränderlichkeit und Bevölkerungsüberschuss. Das Selektionsprinzip wurde damals gleich zweimal erkannt: Charles Darwin und der britische Naturforscher Alfred Russel Wallace (1823–1913) ließen sich vom gleichen Buch inspirieren – dem zuerst 1798 erschienenen Werk »An Essay on the Principle of Population« (»Versuch über das Bevölkerungsgesetz«) des Engländers Thomas Malthus (1766–1834). In seinem düsteren Bericht erörtert der englische Nationalökonom und Sozialphilosoph, weshalb das Wachstum der Bevölkerung die Zunahme der Nahrungsmittelressourcen stets übersteigen müsse, wodurch Übervölkerung und Versorgungsknappheit unvermeidlich würden, sofern nicht Naturkatastrophen oder Kriege die Einwohnerzahl einer Gesellschaft dezimierten.

Unabhängig voneinander übertrugen Darwin und Wallace Malthus' Übervölkerungslogik auf die Natur, wo demnach ein »Kampf ums Dasein« (*struggle for existence*) herrsche. (Darwin verwendete dafür auch den Ausdruck *struggle for life*). »Dieser Begriff ist durch einen bis heute nicht korrigierten Übersetzungsfehler falsch interpretiert worden«, erklärt Kutschera. Der Daseinswettbewerb – so die treffendere Übersetzung – bezieht sich demnach vor allem auf den Fortpflanzungserfolg der einzelnen Individuen im Vergleich zueinander in ein- und derselben Population.

Dass es einen *struggle for existence* geben müsse, vermuteten bereits Philosophen des 18. und frühen 19. Jahrhunderts, darunter Georges Buffon (1707–1788) und Johann Gottfried Herder (1744–1803). Aber für sie herrschte ein Wettbewerb zwischen den Arten, etwa zwischen Wolf und Schaf. Als Darwin

im Jahr 1838 Malthus las, erkannte er, dass der wahre Existenzkampf zwischen den Individuen derselben Art, ja sogar innerhalb derselben Population stattfindet. Einige Individuen sind demnach gegenüber anderen Artgenossen im Vorteil, weil sie über Eigenschaften verfügen, die ihre Überlebenschancen bei gegebenen Umweltbedingungen verbessern. Damit erhöhen sich zugleich auch ihre Chancen auf Nachwuchs, so dass diese vorteilhaften Adaptationen über die Generationen weitervererbt werden können.

In späteren Auflagen der »Origin« umschrieb Darwin diese Zusammenhänge auch mit der Wendung *survival of the fittest* (»Überleben des Tauglichsten«), die er von dem britischen Philosophen Herbert Spencer (1820–1903) übernahm. »Aber schon Darwin war fest davon überzeugt, dass die natürliche Auslese nicht der einzige Evolutionsfaktor sein kann«, merkt Padian an. Mit seiner Theorie der so genannten sexuellen Selektion – wobei in der Regel die Männchen um die Weibchen konkurrieren beziehungsweise die Weibchen zwischen mehreren Männchen wählen – unterbreitete Darwin einen weiteren Mechanismus, den er vor allem in seinem späten Werk »Über die Abstammung des Menschen« ausführlich erörterte. »Die Unterschiede zwischen den Geschlechtern konnten mit der Theorie der sexuellen Zuchtwahl erstmals als Ergebnis eines Wettbewerbs mehrerer Männchen um ein Weibchen erklärt werden und nicht als Ausdruck eines göttlichen Schöpfungsakts«, urteilt Padian.

Heute sind die Forscher davon überzeugt, dass neben der natürlichen und der geschlechtlichen Auslese noch andere Mechanismen die Evolution vorantreiben – so etwa die genetische Drift. Dadurch häuft sich manchmal zufällig eine Genvariante besonders an – vor allem in kleinen Populationen, wo sie stark wirkt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist zwar sehr gering, dennoch gilt die genetische Drift heute als ein wichtiger Evolutionsfaktor. »In kleinen Populationen könnte die genetische Drift deshalb womöglich sogar noch stärker wirken als die Selektionsmechanismen«, erklärt der Evolutionsbiologe Axel Meyer von der Universität Konstanz. Ihre Bedeutung relativ zu anderen Evolutionsprozessen sei aber noch nicht abschließend geklärt.

Einen Kernaspekt in Darwins Selektionstheorie bildet seine Beobachtung, dass gleichartige Lebewesen variieren und dass jedes Individuum einzigartig ist. In der »Origin« widmet er diesem Thema, mit dem er sich auch selbst ausgiebig praktisch an Tauben befasste, gleich die ersten beiden Kapitel. Allerdings entwickelte Darwin nur sehr verschwommene



Seit 1842 lebte und arbeitete Darwin meist sehr zurückgezogen in dem Wohnsitz »Down House«, einem Anwesen bei dem abgestorbenen Weiler Down in Kent, zwei Fahrstunden von London. Von dort pflegte er allerdings eine umfangreiche weltweite Korrespondenz.



3 FOTOS: CHRISTOPH MARYT

Vorstellungen zur Erbllichkeit von Eigenschaften und zur Herkunft von Mutationen. Wie hätte er wohl reagiert, hätte er die Arbeit, die Mendel ihm zugesandt hatte, aufgeschnitten und gelesen? Erst im frühen 20. Jahrhundert entdeckten Forscher diese Erbgelien neu und ergründeten sie tiefer, und erst ein paar Jahrzehnte danach entwarfen Populationsgenetiker Modelle, in denen Genetik und Evolution zusammenstimmen – wohlgernekt auf der Basis von Darwins grundlegenden Ideen. Als Hauptvertreter dieser neuen »Synthetischen Theorie der Evolution« gilt der deutsch-amerikanische Forscher Ernst Mayr (1904–2005).

Im Lauf der Zeit wächst die Lebensvielfalt

Mit seinem Buch wagte sich Darwin an das »Geheimnis aller Geheimnisse«: das Auftreten neuer Arten, wie Darwin selbst in der Einleitung schrieb. Er sammelte viele Belege zu lange ausgestorbenen Organismen und zu jungen Spezies. Doch obwohl er die Ansicht vertrat, dass die Artenzahl in der Evolution wächst, hat er sich mit den Ursachen und Mechanismen der Aufspaltung von Arten – einem Kernthema der späteren Evolutionsbiologie – nach Ansicht einiger Wissenschaftshistoriker wenig befasst. Stärker interessierte ihn die Anpassung, die Adaptation von Arten.

»Entgegen dem Buchtitel definierte er den Begriff »Art« allerdings nicht«, betont Kutschera. Offenbar war ihm das nicht vorrangig wichtig, obwohl er durchaus einiges dazu sagte. Darwin schrieb etwa: »Ich betrachte den Ausdruck Spezies als einen arbiträren und der Bequemlichkeit halber auf eine Reihe einander sehr ähnliche Individuen angewende-

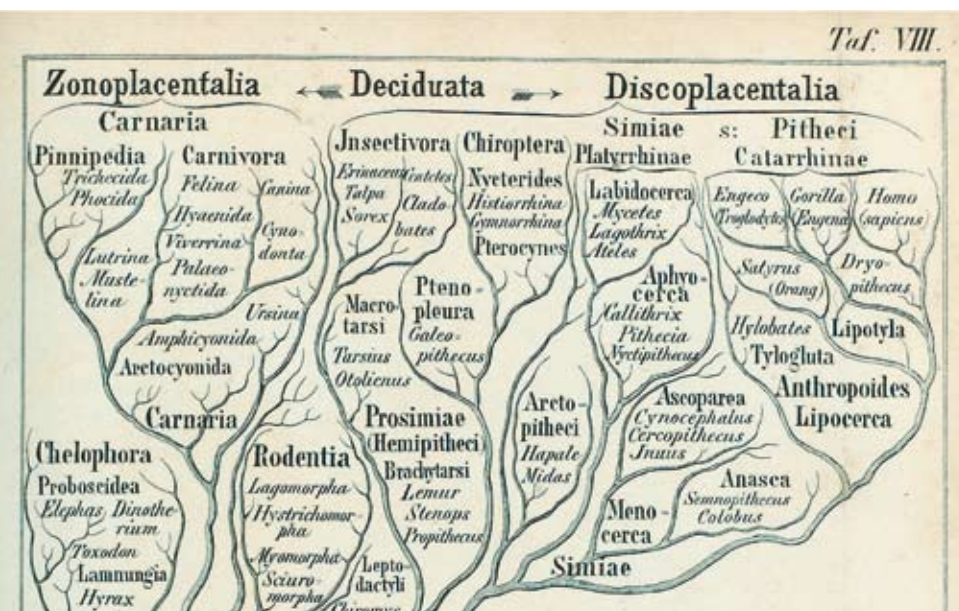
ten, und glaube, dass er vom Ausdruck Varietät nicht wesentlich verschieden ist.« Andere Forscher – allen voran Ernst Mayr, der das so genannte biologische Artkonzept entwickelte – betonten später die Bedeutung der Biospezies in Evolutionsprozessen, weil sie die Fortpflanzungseinheiten darstellen. Eine endgültige Definition, was eine Art sei, steht jedoch noch immer aus.

»Darwin hat nur wenig zum Verständnis der Art beigetragen«, sagt auch Axel Meyer. »Ebenso wenig hat er klare Hypothesen zur Artbildung vorgelegt, seine Ausführungen blieben relativ vage.« Darwins Vermutung, dass Selektionsprozesse nicht nur verbesserte Anpassungen hervorbringen, sondern durch schrittweise Veränderungen auch aus einer Art eine andere machen können, ist heute weit gehend anerkannt. Doch wie, unter welchen Bedingungen oder durch welche Prozesse sich Arten aufspalten können, blieb unklar. Spätere Forscher vertraten den Standpunkt, dass sie zunächst begreifen müssen, was Arten überhaupt sind, wenn sie deren Evolution verstehen wollen. Wesentlich gründlicher als Darwin thematisierten sie als Muster der Artenzunahme die Auftrennung und Abspaltung von Entwicklungslinien.

Als wichtigsten Ursprung für die Artbildung erkannten Ernst Mayr und andere die Isolation von Populationen durch neue geografische Barrieren. (Biologen nennen das allopatrische Speziation – im Gegensatz zur sympatrischen, bei der eine Art aufspaltung ohne geografische Trennung erfolgt, ein noch strittiger Vorgang.) So kann etwa ein frisches Gebirge inmitten des Verbreitungsgebiets eine Spezies teilen – oder eine Teilpopulation findet sich auf einer Insel wieder, wie vermutlich bei vielen Galapagosvögeln geschehen. Genetisch entwickeln sich solchermaßen räumlich getrennte Populationen langsam auseinander – und zwar mit der Zeit so weit, dass sie sich schließlich nicht mehr miteinander paaren, sollten sie jemals wieder in direkten Kontakt treten. Nach Mayrs Artkonzept handelt es sich dann um verschiedene Spezies. »In jüngster Zeit mehren sich allerdings die Anzeichen, dass auch eine sympatrische Speziation häufiger vorkommen könnte als bislang angenommen«, sagt Meyer – also die Veränderlichkeit innerhalb desselben Habitats. Dem fügt der Konstanzler Evolutionsforscher hinzu: »Die Bedeutung der natürlichen Selektion bei der Artbildung gegenüber neutralen Prozessen ist allerdings noch sehr umstritten.«

Ein Phänomen, das die meisten Biologen noch vor Jahrzehnten für absurd gehalten hätten, gilt inzwischen als sicher: Leben, das auf Zellen mit einem Zellkern beruht, fußt auf

Der Jenaer Forscher Ernst Haeckel plaktierte Darwins Thesen und entwickelte sie auf eigene Art weiter. Hier ein Ausschnitt seines Stammbaums von 1866, der den Menschen einschließt



dem Verschmelzen zweier einfacher strukturierter, bakterienartiger Organismen (einer so genannten Symbiogenese). Ähnlich erwarben zellkernhaltige Organismen auch manche ihrer Organellen, zum Beispiel Pflanzenzellen ihre Chloroplasten. Vor allem neue genetische Erkenntnisse versprechen Einblicke in diese großen evolutionären Veränderungen. Schon jetzt haben sie manche Überraschung gebracht.

Warum Charles Darwin allerdings so lange gewartet hat, bis er seine revolutionären Theorien veröffentlichte, gibt bis heute Anlass zur Spekulation. Hatte er seine Theorien womöglich deshalb zurückgehalten, weil er um seinen Ruf als Wissenschaftler fürchtete? »Dafür gibt es keinen Beweis«, meint John van Wyhe. »Vielmehr ist es wahrscheinlich, dass Darwin von seinen anderen Projekten so in Anspruch genommen war, dass er schlichtweg keine Zeit dafür hatte.« Er schrieb seinen Bericht über die Reise mit der »Beagle«, erklärte die Entstehung von Korallenriffen und verfasste nach jahrelanger Sezierarbeit eine mehrbändige Monografie über die skurrile Lebensform der Rankenfußkrebse (zu denen unter anderem Seepocken und Entenmuscheln gehören), die ihm im Jahr 1853 die Königliche Medaille der Royal Society einbrachte. Nachdem am 1. Juli 1858 Auszüge seiner Schriften gemeinsam mit einem Aufsatz Wallaces vor der Linnean Society verlesen worden waren, konnte es ihm aber nicht schnell genug gehen: Unter chronischen Magenkrämpfen und Brechreiz stellte er die »Origin« – gewissermaßen ein Auszug aus seinem geplanten mehrbändigen Werk, das er bereits begonnen hatte – binnen weniger Monate fertig.

»Das Buch ist didaktisch ungeschickt aufgebaut und enthält zahlreiche Widersprüche«, bemerkt Ulrich Kutschera. So schreibt Darwin einmal etwa zur Frage, ob Evolution nach Perfektion strebe: »Da die natürliche Selektion einzig und allein durch und für das Wohl eines jeden Lebewesens arbeitet, werden alle körperlichen und geistigen Anlagen dazu tendieren, sich in Richtung Perfektion zu entwickeln.« An anderer Stelle heißt es dagegen: »Die natürliche Selektion versucht nur, jedes organische Wesen ebenso vollkommen oder noch etwas vollkommener zu machen als die übrigen Bewohner desselben Gebiets, mit denen es in Wettbewerb tritt.«

Was gilt? »Zunächst stellt sich die Frage, wie Perfektion jeweils überhaupt definiert werden soll. Ferner spricht gegen den Trend der Optimierung, dass sich der Selektionsdruck oft mit jeder neuen Generation ändert«, gibt Axel Meyer zu bedenken. »Was heute perfekt ist, kann sich morgen als unvorteilhaft erweisen, etwa weil sich die Umweltbedingungen geändert haben.« Um zu überleben und sich – als



ALEXANDER VAN DEUSEN / FOTOLIA

wichtigstes Zielkriterium – auch fortzupflanzen, müssen Organismen eine Vielzahl an Funktionen erfüllen. Würden jedoch einzelne Eigenschaften perfektioniert, ginge dies möglicherweise auf Kosten anderer Funktionen.

Auch der Mensch ist ja alles andere als perfekt: »Unser Auge ist beispielsweise ein einziger Kompromiss: Kein Ingenieur hätte es so konstruiert, denn seine sensorischen Zellen sind vom Licht abgewandt«, erklärt Meyer. Von Perfektionsstreben als Ausdruck unendlicher Kreativität der Evolution kann also keine Rede sein. Vielmehr muss die Evolution mit dem auskommen, was bereits vorhanden ist, und auf dieser Grundlage eine möglichst optimale Funktionalität erzielen.

Die Lesungen im Sommer 1858 vor der Linnean Society von zwei Darwintexten und anschließend dem Manuskript von Wallace – das Darwin von dem jüngeren Forscherkollegen zur Weiterleitung und Veröffentlichung zugesandt worden war – sollen damals bei den Mitgliedern wenig Beachtung gefunden haben. Am Jahresende notierte die Vereinigung, das Jahr sei »ohne eine jener Entdeckungen vergangen ..., die eine Forschungsdisziplin revolutionieren.«

Angesichts des Aufruhrs, den Darwins Buch »Über die Entstehung der Arten« schon ein Jahr später in weiten Kreisen hervorrief, mag man dies heute kaum glauben. Zwar kommentiert Kutschera: »Da Darwin weder die Gesetze der Vererbung noch das Prinzip der Symbiogenese kannte, hat sein Artenbuch mit unserer heutigen Sicht vom Verlauf der Evolution nur noch wenig gemeinsam.« Dennoch bilden vor allem Darwins Theorien das Fundament, auf dem sich die Biologie als wissenschaftliche Disziplin aufbaute. Axel Meyer betont: »Darwins Einsicht, dass die natürliche Selektion die kreative Hauptkraft der Evolution darstellt, bleibt nach 150 Jahren als wissenschaftlich erwiesen bestehen.« ◀

Wie viel Aufschluss über die Evolution von Arten die Galapagosinseln liefern, erkannte Darwin erst nach seiner Reise.



Christoph Marty arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Dortmund.

Desmond, A., Moore, J.: Darwin. Rowohlt, Reinbeck 1994.

Engels, E.: Charles Darwin. C.H.Beck, München 2007.

Kutschera, U.: Evolutionsbiologie. 3. Aufl. Ulmer UTB, Stuttgart 2008.

Mayr, E.: Das ist Biologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin 2000.

Neffe, J.: Darwin. Das Abenteuer des Lebens. C. Bertelsmann, München 2008.

Sentker, A., Wigger, F. (Hg.): Vielfalt, Wandel, Menschwerdung. Zeit Wissen Edition. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/977237.

Veranstaltungen im Darwin-Jahr unter: www.darwin-jahr.de

The title is written across three staves of musical notation. The first staff shows a treble clef, a 4/4 time signature, and the word 'Das'. The second staff contains the words 'Saitenblas-' and the third staff contains 'Instrument :|'. The text is rendered in a large, bold, black serif font.

Das Saitenblas-Instrument

Ein bisschen Trompete, ein bisschen Geige – ihre Vielseitigkeit verdankt die Singstimme vor allem nichtlinearen Effekten.

Von Ingo R. Titze

In Kürze

► Obwohl der menschliche Vokaltrakt klein ist, kann er dank nichtlinearer Effekte **eindrucksvolle und vielfältige Klänge** erzeugen.

► **Alle Musikinstrumente** haben eine Tonquelle, einen Resonator, der Töne durch Resonanz verstärkt, sowie eine Schallöffnung oder eine schwingende Fläche, die den Ton abstrahlt.

► **Die menschliche Tonquelle** sind die komplex aufgebauten Stimmlippen im Kehlkopf; der Resonator ist der Luftweg über dem Kehlkopf, während der Schall vom geöffneten Mund abgestrahlt wird.

Allein an seiner Größe gemessen erscheint unser Kehlkopf (fachlich: Larynx) wenig beeindruckend, in einem klassischen Orchester rangierte er auf einer Stufe mit der Pikkoloflöte. Wie also gelingt es Solisten, gegen Streicher und Bläser zu bestehen – und obendrein eine enorme Bandbreite von Lauten hervorzubringen? Mehr als ein halbes Jahrhundert lang erklärten Wissenschaftler solche Fähigkeiten mit einer linearen Theorie, der zufolge Tonerzeugung und -verstärkung unabhängig voneinander arbeiten sollten. Inzwischen wissen sie: Nichtlineare Wechselwirkungen spielen bei der Stimmtonerzeugung (fachlich: Phonation) eine zentrale Rolle.

Wie bei jedem Instrument lassen sich auch beim menschlichen Vokaltrakt drei Grundkomponenten unterscheiden: Tonquelle, Resonanzkörper und Schallöffnung. Die Quelle erzeugt einen Klang, der sich aus einer Grundfrequenz und Vielfachen davon, den Obertönen, zusammensetzt; Erstere bestimmt die Tonhöhe, Letztere machen die Klangfarbe aus. Durch Mitschwingen eines Resonanzkörpers wird der Schall verstärkt und über eine Öffnung oder Fläche in die Umgebung abgestrahlt.

Bei der Trompete etwa entsteht die Grundschwingung, weil die gespannten Lippen des Musikers vibrieren, wenn Luft durch das Mundstück gepumpt wird. Metallrohre verstärken den Ton, der sich weitende Schalltrichter sendet ihn aus. Die Tonhöhe ändert der Musiker zum einen durch die Lippenspannung, zum anderen über Ventile, die weitere Rohre zuschalten und so die effektive Länge des Instruments verändern. Die Geige hingegen verdankt ihren Klang den schwingenden Saiten, deren Ton vom hölzernen Korpus intensiviert und von den so genannten f-Löchern abgestrahlt wird.

Im Takt von Druck und Strömung

Ähnlich verhält es sich bei der Phonation. Als Tonerzeuger dienen unsere Stimmlippen, vereinfacht oft auch als Stimmbänder bezeichnet, zwei Gewebebündel im Kehlkopf. Beim Atmen stehen sie weit auseinander, beim Sprechen oder Singen hingegen werden sie über Knorpelgelenke und Kehlkopfmuskeln so verstellt, dass zwischen ihnen nur ein schmaler Spalt verbleibt, die Stimmritze oder Glottis. Bevor sich diese ganz schließt, baut sich beim Ausatmen darunter ein Druck auf, der die Stimmlippen auseinanderpresst. Nun wirken die Gesetze der Physik: An einer Engstelle



Die menschliche Stimme erzeugt Klänge, die so komplex und reichhaltig sind wie die »echter« Musikinstrumente – bei viel kleineren Dimensionen.

AARON GOODMAN

LINEAR UND NICHTLINEAR

Bisher erklärten Forscher die Stimmbildung im Rahmen linearer Effekte, bei denen eine Wirkung proportional zu ihren Ursachen ist. Inzwischen ist klar, dass die Stimmtoneerzeugung nicht-linear verläuft, kleine Veränderungen also große Auswirkungen haben.



GETTY IMAGES/WIREIMAGE, GEORGE PIMENTEL

Der Rockmusiker Steven Tyler (* 1948) ist berühmt für seinen kreischenden Gesang. Der Frontmann der amerikanischen Band Aerosmith nutzt dafür in hohem Maß Nichtlinearitäten der Stimme.

DREI DINGE BRAUCHT EIN INSTRUMENT

VIOLINE

Stimmwirbel

Griffbrett

Steg

STEVE DIBBLEE / ISTOCKPHOTO

Nahezu alle Musikinstrumente haben drei grundlegende Elemente gemeinsam: **1** eine Tonquelle, die durch ihre Schwingung Druckwellen einer ganz bestimmten Grundfrequenz (die wir als Tonhöhe wahrnehmen) erzeugt sowie eine Reihe Obertöne (ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz), die Klangfarbe oder Timbre bestimmen; **2** einen Resonanzkörper, der Grund- und Obertöne verstärkt; und **3** ein Element, das den Schall in die Luft abstrahlt und so an das Ohr des Zuhörers gelangen lässt.

1 TONQUELLE (Saite)

2 RESONANZKÖRPER (Decke, Boden und Zarge)

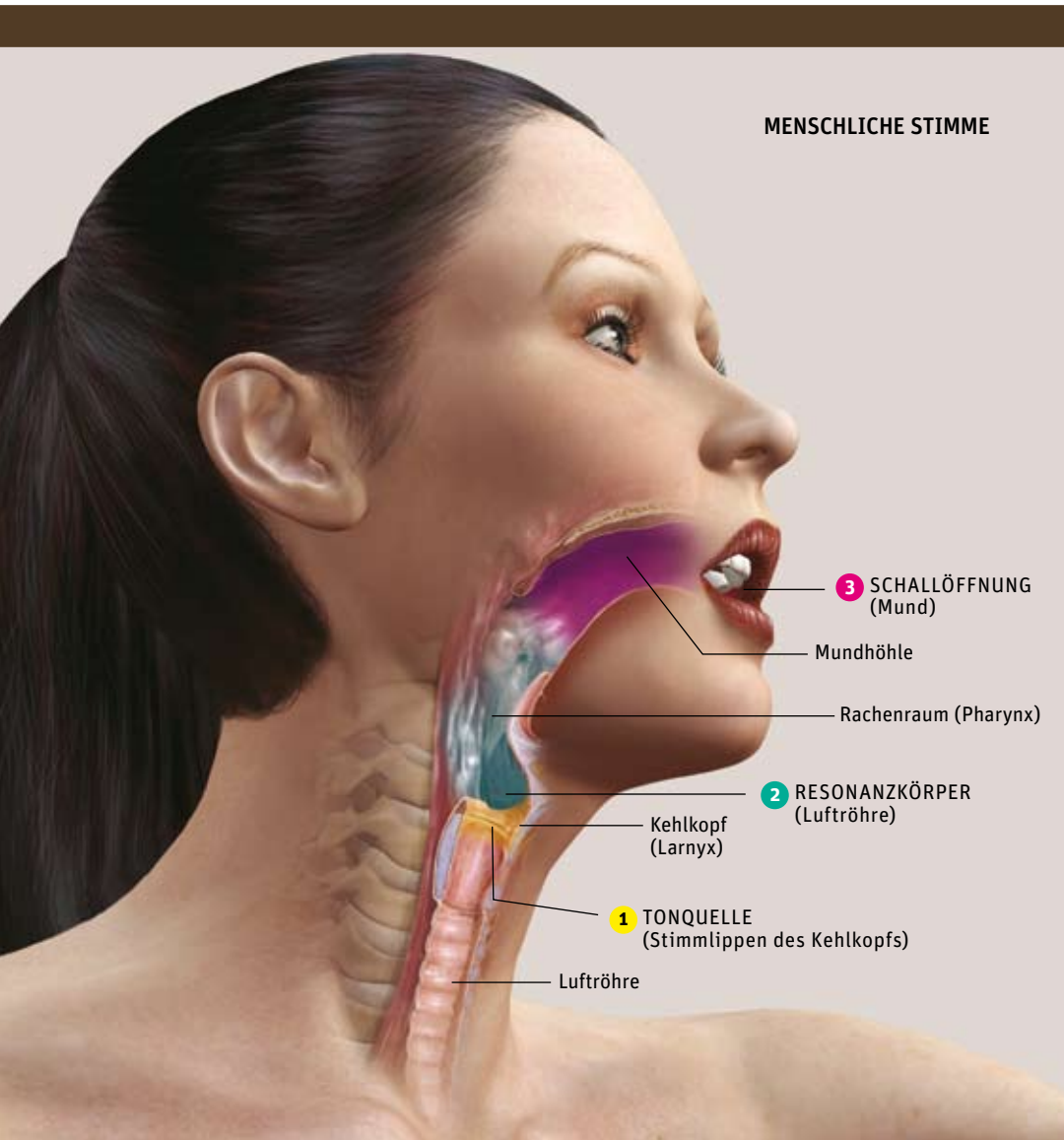
3 SCHALLÖFFNUNG (Schalllöcher)

wird eine Strömung beschleunigt, der Druck hingegen fällt dort ab; Physiker sprechen vom bernoullischen Gesetz. Die elastischen Lippen ziehen sich deshalb wieder zusammen, das Spiel beginnt von vorn – die Stimmlippen schwingen und erzeugen einen Ton. Wie das Mundstück der Trompete vermittelt der sich weitende Kehlkopf das Schallsignal an den Mund- und Rachenraum, der Mund strahlt es schließlich nach außen ab.

Ein Instrumentenbauer spräche den gerade einmal daumennagelgroßen Stimmlippen sicher nur ein geringes Potenzial zu, eindrucksvolle Klänge hervorzubringen: Sie sind zu klein und obendrein zu weich, um einen anhaltenden Ton oder gar ein breites Spektrum von Frequenzen zu erzeugen. Und doch gelingt unserem Vokaltrakt genau dieses Kunst-

stück. Dass unsere Luftwege – von der Lunge bis in den Mundraum – mitschwingen und so den Ton durch Resonanz erheblich verstärken, genügt noch nicht als Erklärung, misst das »Luftrohr« oberhalb des Kehlkopfs doch nur 15 bis 20 Zentimeter, darunter 12 bis 15 Zentimeter. Das entspricht, wie schon erwähnt, der Länge einer Pikkoloflöte, nicht der einer Trompete oder Posaune. Deren Tonlagen lassen sich mit der einer Gesangsstimme vergleichen, nicht aber ihre effektiven Rohrlängen: 1,5 bis 2 Meter sind es bei der Trompete, bis 3 Meter bei der Posaune.

Vergleicht man die menschliche Stimme nicht mit Blas-, sondern mit Saiteninstrumenten, gibt es noch mehr Überraschendes zu entdecken. Sieht man von den Obertönen einmal ab, die einem Ton im Wesentlichen



MENSCHLICHE STIMME



Broadway-Star Ethel Merman (1908–1984) sang mit so präziser Aussprache und Tonkontrolle, dass das Publikum sie auch ohne Verstärkung gut hören konnte.

die Klangfarbe verleihen, die das jeweilige Instrument auszeichnet, interessiert vor allem die Grundfrequenz, mit der eine Luftsäule oder eben eine Saite schwingt. Ob Violine oder E-Gitarre, ob Darm- oder Stahlsaiten, bei dieser Instrumentengruppe hängt die Grundfrequenz von mehreren Parametern ab, vor allem von Spannung und Länge. Um eine Oktave zu spielen, also die Schwingungszahl zu verdoppeln, könnte ein Musiker die Saite entweder vierfach stärker spannen oder ihre Länge halbieren. Tatsächlich wählt ein Geiger oder Gitarrist letztere Möglichkeit und »greift« an der entsprechenden Stelle, verkürzt also durch das Drücken der Saite auf das Griffbrett das schwingende Segment. Der erste Effekt bleibt aber ebenfalls nicht ungenutzt: Die Instrumente sind mit mehreren Saiten

bestückt, die zwar gleich lang, aber auf Grund unterschiedlicher Materialstärke und Spannung verschieden gestimmt sind.

Wesentlich komplexer geht es offenbar im Kehlkopf zu, betrachtet man den Aufbau der Stimmrippen: Im Innern liegen die eigentlichen Stimmbänder aus Bindegewebe (fachlich: Ligamentum vocale), eng verbunden mit Muskeln; als äußere Hülle der Gesamtstruktur fungiert Schleimhaut; dazwischen liegen mehrere Lagen Bindegewebe. Diese Materialkombination zeigt Eigenschaften, wie man sie bei keinem Saiteninstrument findet. Experimente an Präparaten haben gezeigt, dass die mechanische Spannung im Ligament schon bei geringer Dehnung nichtlinear ansteigt. Wird ein Stimmband gar von 1 auf 1,6 Zentimeter verlängert, also um 60 Prozent, wächst

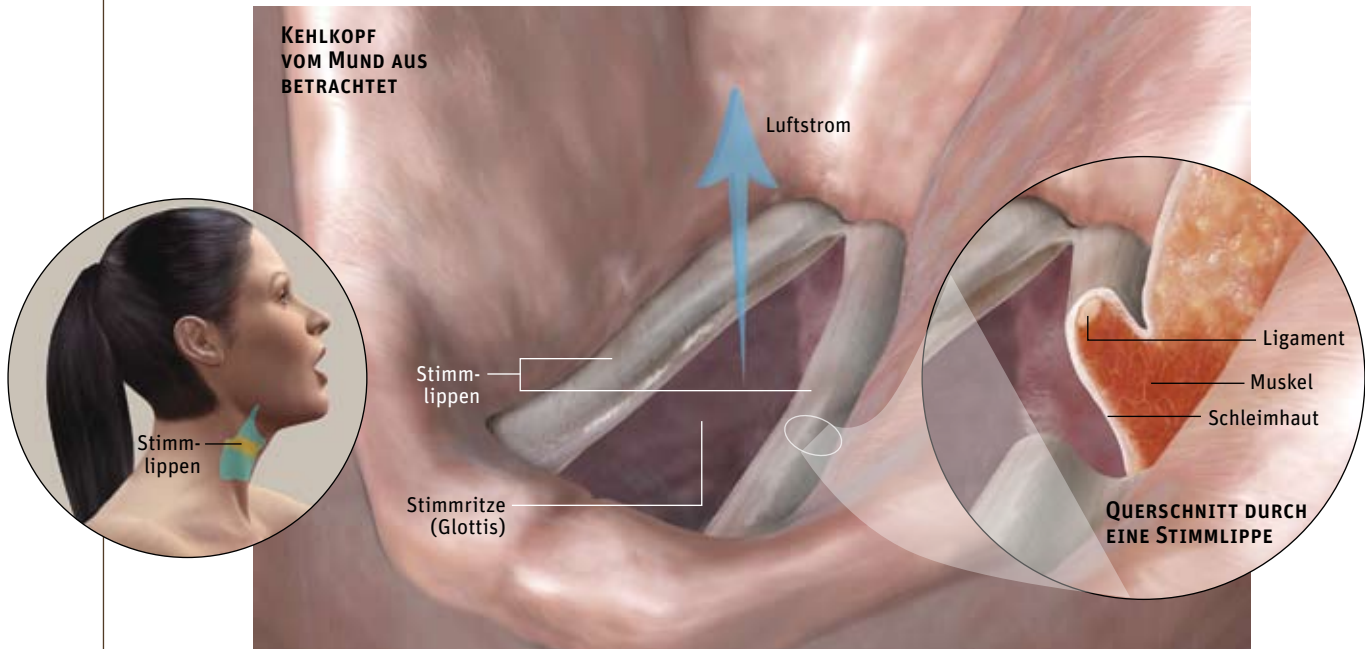
WUSTEN SIE SCHON ...?

Einem sehr übergewichtigen Menschen trauen wir eher eine kräftige Stimme zu als einem zart gebauten. Tatsächlich tragen Brust, Rücken, Bauch nichts zum Ton bei, und schon gar nicht Gesäß oder Beine – der komplette Klang kommt aus Kehlkopf und Atemwegen.

DIE MENSCHLICHE STIMMQUELLE – WIE DIE STIMMLIPPEN ARBEITEN

Anders als Violinsaiten hat die menschliche Tonquelle – die Stimmlippen im Kehlkopf – einen komplexen Aufbau, der uns einen Tonumfang von mehreren Oktaven verleiht. Herzstück ist ein Ligament, eine bindegewebige Struktur, die von Muskelfasern umgeben ist. Eine hochelastische Schleimhaut bildet die äußere Hülle der Stimmlippe. Die Spannung des Ligaments

steigt sehr schnell an, wenn es durch äußere Kehlkopfmuskeln gedehnt wird, und erzeugt dadurch hohe Frequenzen. Wenn die inneren Muskeln kontrahieren, erzeugen sie zusätzliche Spannung im Ligament und erweitern so den Frequenzbereich. Die weiche und verformbare Oberfläche der äußeren Membran überträgt die Schwingungen der Stimmlippen auf die Luft.



ADAM QUESTEL

Die australische Sopranistin Joan Sutherland (* 1926) wusste, dass einige Vokale nicht zu bestimmten Tonhöhen passen. Kurzerhand änderte sie ihren Text, auch um den Preis einer falschen Aussprache.



CORBIS, IFA, NOWINSKI

sie auf das 30-Fache, die Frequenz auf mehr als das Fünffache. Dem wirkt der Längenzuwachs entgegen – eine längere Saite schwingt mit niedrigerer Frequenz –, so dass alles in allem eine Verdreifachung der Tonhöhe resultiert. Das entspricht etwa anderthalb Oktaven, und in diesem Stimmumfang bewegen sich die meisten von uns beim Singen. Dass manche Vokalistinnen vier oder fünf Oktaven zu Wege bringen, versetzt Wissenschaftler nach wie vor in Staunen.

Auch wenn Mozarts »Königin der Nacht« in der berühmten Arie das C³ mit 1048 Hertz erreicht, ist das physikalisch das reinste Wunder. Wie gelingt es einer Sängerin, solche Höhen präzise anzusteuern? Früher nahm man an, das Muskelgewebe der Stimmlippen würde tatsächlich mit der Frequenz des gesungenen Tons vibrieren; es macht etwa 90 Prozent ihres Volumens aus. Tatsächlich aber verfielen die Muskulatur schon ab 30 Hertz in einen Dauerkrampf. Inzwischen wissen Stimmphysiologen: Des Rätsels Lösung ist die Schleimhauthülle unserer Tonquelle. Darauf bilden sich hochfrequente Oberflächenwellen aus. Auf diese Weise wird Energie zwischen

Luftstrom, Stimmbändern und inneren Muskeln übertragen. Auch die Funktion der Bindegewebsschichten zwischen der weichen Hülle und dem steiferen Muskel-Ligament-Paket ist nun klar: Einerseits entkoppeln sie die beiden Komponenten mechanisch voneinander, ermöglichen also unterschiedlich schnelle Schwingungen, andererseits vermitteln sie den Energietransfer.

Die Kunst der Feinabstimmung

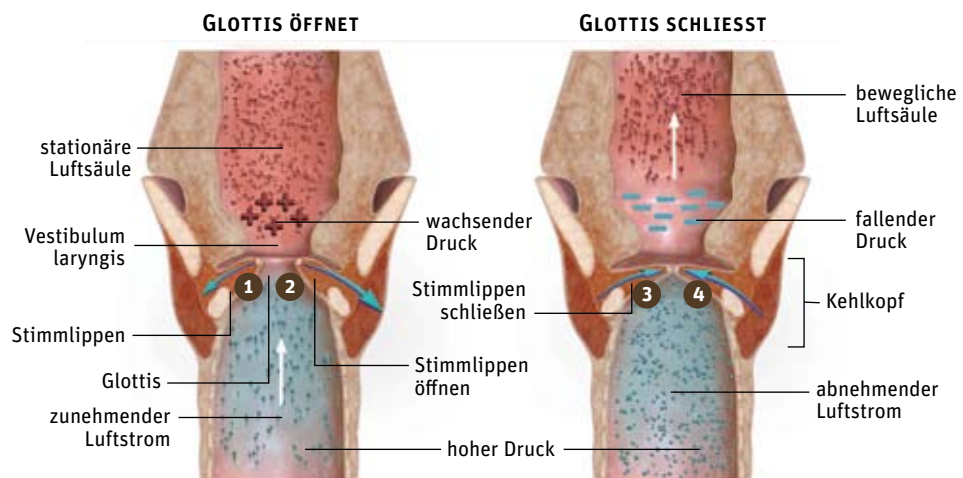
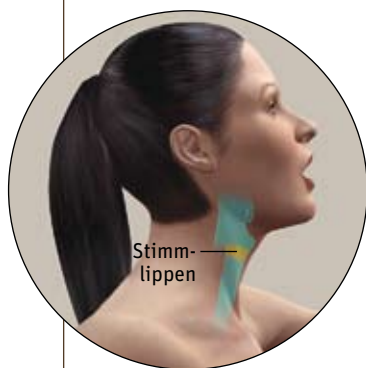
Viel Training und Geschick sind nötig, um all diese Komponenten aufeinander abzustimmen und über mehrere Oktaven hinweg einzelne, saubere Töne zu singen. Damit beispielsweise im unteren Frequenzbereich des jeweiligen Stimmumfangs tiefe Töne kräftig klingen, kontrahieren die inneren Muskeln, während die äußeren Kehlkopfmuskeln entspannt bleiben. Die Stimmlippen verkürzen sich, werden also zwangsläufig dicker. Hohe Töne erfordern hingegen eine Kontraktion der äußeren Muskulatur, die Stimmlippen werden gespannt. Das Ergebnis ist wie schon beschrieben eine Verlängerung sowie eine höhere Spannung im Ligament.

WIE DIE LUFTWEGE DES SPRECHAPPARATS TÖNE VERSTÄRKEN

Beim Menschen verstärkt eine Rückkopplung im Vestibulum laryngis, dem Luftweg direkt über den Stimmlippen, die erzeugten Töne. Dieser als *inertive reactance* bezeichnete Effekt gibt jedem zyklischen Öffnen und Schließen der Stimmlippen einen zeitlich genau abgestimmten Stoß, der ihre Schwingungen verstärkt und dadurch hilft, stärkere Schallwellen zu erzeugen.

Wenn sich die Stimmlippen zu Beginn einer Schwingung trennen **1**, fließt Luft aus der Lunge durch die Stimmritze (Glottis)

und drückt gegen die unbewegte Luft darüber. Durch die Trägheit der Luftsäule steigt der Druck in der Glottis und presst die Stimmlippen weiter auseinander **2**. Der Luftstrom aus der Lunge bricht ab, sobald das elastische Zurückfedern der Stimmlippen die Glottis schließt **3**. Diese Reaktionen erzeugen im Bereich der Glottis einen Unterdruck, der die Stimmlippen wieder zusammenpresst **4**. Durch Druck und Zug zum richtigen Zeitpunkt verstärkt die Luftsäule über dem Kehlkopf die Schwingungen der Stimmlippen.



Wer sich ohne eine fundierte Gesangs- ausbildung zu immer höheren Tönen aufschwingt, erlebt vermutlich ein unelegantes Umkippen des »Gesangsregisters«, das heißt der Klang- farbe, von der Vollstimme in das Falsett. Denn bei zunehmender Kontraktion der Kehlkopfmuskulatur ändert sich das aerody- namische Verhalten der Stimmlippen, und auch die Glottis schließt nicht mehr vollstän- dig. Sänger lernen während ihrer Ausbildung, die Muskelspannung so zu steuern, dass sie zwischen den Registern unhörbar wechseln; mitunter nutzen sie den Registersprung in ih- rer Kunst, etwa beim Jodeln.

Die Größe eines Musikinstruments wird üblicherweise vom Resonanzkörper vorgege- ben. Die Saiten einer Violine etwa laufen über einen Steg, der sie mit der Deckplatte des Korpus verbindet. Ebenso wie die Luft im Innern gerät diese in Resonanz und verstärkt möglichst viele Schwingungsanteile der Saiten. Die Trichter von Holz- und Blechblas- instrumenten haben die gleiche Funktion. Weil sich jeder Klang aus ganzzahligen Viel- fachen der Grundfrequenz (2:1, 3:1, 4:1 ...) aufbaut, benötigt ein Resonanzkörper ent-

sprechende Ausmaße, um einen vollen Ton hervorzubringen. Deshalb sind Trompeten und Posaunen so groß.

Beim Menschen geizt die Natur mit Raum. Der obere Luftweg ist nur 17 Zentimeter lang. Die tiefste Frequenz, die damit verstärkt werden kann, beträgt etwa 500 Hertz, bei der Mundstellung bestimmter Vokale wie »u« oder »i« sind es gar nur 250 Hertz. Weil unser Vokaltrakt einer am unteren Ende verschlos- senen Röhre entspricht, bringt sie überdies nicht jeden Oberton hervor, sondern den Ge- setzen der Physik folgend nur die geraden Vielfachen der jeweiligen Grundfrequenz. Da- durch wird Energie auf wenige Frequenzen gebündelt, was den Klang tragfähiger macht. Und auch wenn wir die effektive Länge des Rohrs durch das Schürzen der Lippen oder das Absenken des Kehlkopfs um ein paar Zen- timeter erweitern können, ist das nichts ange- sichts der Möglichkeiten einer Posaune oder Trompete.

Wieder zeigen neuere Forschungen, dass nichtlineare Effekte den Liederabend retten, nämlich eine Interaktion zwischen den einzel- nen Komponenten des Systems. Der Mund

Der italienische Tenor Luciano Pavarotti (1935–2007) war berühmt für die reiche Resonanz seines Gesangs, vermutlich ein Resultat präzise eingestellter Rückkopplungseffekte in seiner Kehle.

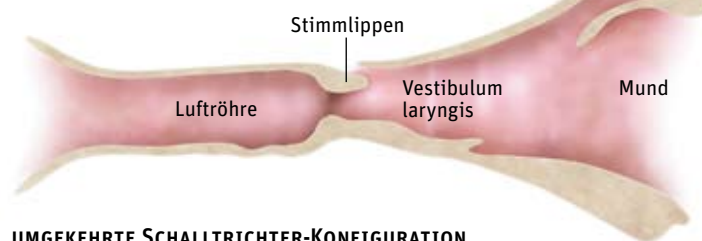


MENSCHLICHE SCHALLABSTRAHLUNG – GROSSE KLASSE UND DICKER HALS

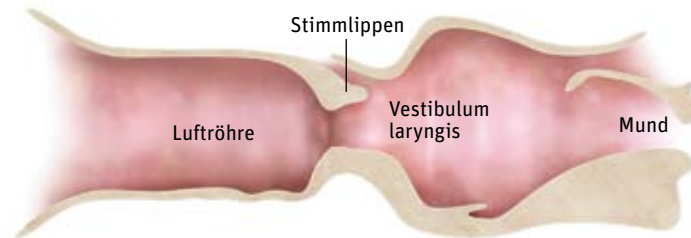
Ein Rohrresonator wie der menschliche Sprechapparat kann bestimmte Tonlagen und ihre diversen Obertöne besser nach außen projizieren, wenn das Rohr eine geeignete Form annimmt. Um kraftvolle hohe Töne zu erzeugen, öffnet ein Sänger oft seinen Mund so weit wie möglich. Der Sprechapparat ähnelt dann einer Trompete (oben), mit den Stimmlippen als »Lippen und Mundstück« und dem Mund als Schalltrichter. Diese Konfiguration bezeichnet man als Schalltrichter-Konfiguration. Andere Töne und Obertöne funktionieren besser mit dem umgedrehten Schalltrichter, bei dem der Mund verengt ist (unten).



SCHALLTRICHTER-KONFIGURATION



UMGEKEHRTE SCHALLTRICHTER-KONFIGURATION



ADAM QUESTTEL



Der Physiker **Ingo R. Titze** lehrt Sprachpathologie und Audiologie an der University of Iowa und ist Direktor des National Center for Voice and Speech. Der Autor unterrichtet Gesang und tritt selbst als Sänger auf. HNO-Facharzt Michael Fuchs von der Abteilung für Stimm-, Sprach- und Hörstörungen der Universität Leipzig hat die deutsche Fassung des Beitrags unterstützt.

Fletcher, N. H., Rossing, T. D.: The Physics of Musical Instruments. 2. Auflage. Springer, Berlin 2005.

Story, B. et al.: Vocal Tract Area Functions from Magnetic Resonance Imaging. In: Journal of the Acoustical Society of America 100(1), S. 537 – 554, 1996.

Titze, I. R.: Principles of Voice Production. Nachdruck. National Center for Voice and Speech, 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/977238.

strahlt nicht die gesamte Schallenergie aus, vielmehr vermag der Vokaltrakt Töne durch energetische Rückkopplung zu verstärken. Dazu speichert er in einem Teil des Schwingungszyklus akustische Energie, die er dann an die Stimmlippen zurückspeist. Das lässt sich mit dem Anstoßen eines Schaukelnden vergleichen: Erfolgt der Schubs zum richtigen Zeitpunkt, steigt die Schaukel höher und höher hinauf. Dieses optimale Timing erfordert beim Singen, dass die Bewegung der Luft im Vokaltrakt gegenüber der Vibration der Stimmlippen leicht verzögert wird, Wissenschaftler sprechen hier von *inertive reactance* (einen deutschen Fachbegriff gibt es dafür nicht), also einer verlangsamten Reaktion auf einen anliegenden Druck.

Wenn sich die Stimmlippen zu Beginn eines Schwingungszyklus auseinanderbewegen, strömt Luft aus der Lunge in die Glottis und in den oberen Kehlkopfinnenraum (Vestibulum laryngis). Dort befindet sich bereits Luft, die nun von der aufsteigenden beschleunigt wird. Der Druck in und über der Stimmritze wächst, deshalb öffnen sich die Stimmlippen noch weiter. Sobald sie aber elastisch zurückfedern und die Glottis schließen, strömt keine Luft mehr nach. Da sich der Luftkörper darüber als Folge der Massenträgheit noch ein Stück weiterbewegt, entsteht nun ein Unterdruck, der wiederum den Stimmlippen-Schluss verstärkt. Die verzögerte Reaktion der Luft im Vokaltrakt wirkt somit wie das Anschubsen eines Schaukelnden und

verstärkt durch Druck und Zug die Schwingungen der Stimmlippen. Dieser Effekt tritt allerdings nicht bei allen Lauten auf. Durch Auswahl geeigneter »Gesangsvokale« werden die Luftwege so geformt, dass *inertive reactance* über einen möglichst großen Tonbereich zum Tragen kommt. Das ist ohne Frage keine leichte Aufgabe.

Um den Effekt optimal einzusetzen, nutzen Sänger unterschiedliche Formen des Vokaltrakts. Beim gedeckt klingenden »ä« wie im Englischen *mad* wird die Stimmritze verengt und der Mund weit geöffnet; dies wird als Schalltrichter-Konfiguration bezeichnet. Mindestens zwei Obertöne lassen sich dann bei hohen Tönen verstärken, bei tieferen Schwingungen sogar noch mehr. Ideal für klassische Sängerinnen, die in der Mitte ihres Tonumfangs singen, sowie für männliche Sänger in hohen Tonlagen ist hingegen die »umgekehrte Schalltrichter-Konfiguration«: Der Raum über den Stimmlippen wird erweitert – beispielsweise durch Absenken des Kehlkopfs – bei gleichzeitig weit geöffnetem Rachenraum und andererseits schmalen Mund.

Die Fähigkeit, für jede Tonhöhe den richtigen Vokal zu finden, bei dem möglichst viele Frequenzen unterstützt werden, bezeichnen Gesangslehrer als Decken der Stimme. Sie profitieren von der Arbeit der Wissenschaftler, die immer besser verstehen, wie die Stimmtoneerzeugung herausragender Sänger abläuft. Freilich: Deren Kunst geht weit über Physik und Physiologie hinaus. <

Wie aus Tönen Sprache wird

Um zu verstehen, wie Menschen Laute mit einem sinnvollen Inhalt verknüpfen, sollten wir erforschen, wie das Gehirn Musik verarbeitet.



BRETT CHARLTON / ISTOCKPHOTO

Von Aniruddh D. Patel

Musik spielt im Kopf, ob Klassik oder Klassiker. Wenn wir uns an Orchesterklängen berauschen oder einen Rhythmus mittrommeln, stets ist unser Gehirn vollauf damit beschäftigt, eine Abfolge akustischer Signale zu deuten, ihr einen Sinn geben. Nicht anders verhält es sich bei der Sprachverarbeitung. Seit Kurzem untersuchen Wissenschaftler deshalb, ob Musik und Sprache nicht ähnliche, vielleicht sogar überlappende Prozesse in unserem Gehirn auslösen.

Schon jetzt ergibt sich ein aufregendes Gesamtbild. Die Übereinstimmungen sind bei Weitem größer, als es nach gängigen Theorien zu erwarten gewesen wäre. Sie reichen von den sensorischen Abläufen, die Laute kodieren, bis hin zu all den abstrakten Prozessen, die Worte oder Töne in syntaktische Einheiten gruppieren. Die vergleichende Forschung über Musik und Sprache bietet somit einen neuen Ansatz, komplexe kognitive Prozesse zu ergründen.

Allerdings haben sich bisherige Untersuchungen einschließlich meiner eigenen vor allem auf westliche Sprachen und westliche Musiktraditionen konzentriert. Mit gutem Grund: Beide Felder waren, jedes für sich, in Praxis und Theorie schon intensiv erforscht

Indonesische Gamelan-Orchester spielen auf diesen Metallophen Tonleitern, die eine Oktave deutlich anders unterteilen, als dies in der westlichen Musiktradition üblich ist.

worden. Nun ist die Zeit gekommen, auch andere Kulturbereiche in Augenschein zu nehmen.

Schon tauchen faszinierende Fragen auf. Wenn die kognitiven Vorgänge so eng verbunden sind, welche Bedeutung kommt dann Tonleitern für das Sprachverstehen zu? Auf den ersten Blick – nur sehr wenig. Denn selbst Sprachen, in denen Worte je nach Tonlage ihre Bedeutung ändern, orientieren sich an keiner Tonleiter.

Apropos: Die Abfolge von Ganz- und Halbtonintervallen unserer Dur- und Molltonleitern ist nicht durch Gesetze der Akustik oder der Hörphysiologie naturgegeben. In der Tradition des griechischen Philosophen Pythagoras von Samos (570–510 v. Chr.) haben westliche Gelehrte Musik lange als eine Art hörbare Mathematik angesehen, bestimmten Tonintervallen Eigenschaften wie wohl klingend oder dissonant zugewiesen. Dass andere Völker ein gänzlich anderes Empfinden haben können, zeigt beispielsweise ein Blick auf die traditionellen Gamelan-Orchester Javas: Deren Pelog- und Slendro-Tonleitern stimmen mit dem westlichen System nicht überein und können sogar von Orchester zu Orchester variieren. Auch arabische und indische Musik lehrt westliche Theoretiker Bescheidenheit, denn für uns missgestimmt klingende Mikrointervalle, also Tonabstände kleiner als ein Halbton, versetzen Hörer in diesen Ländern in Entzücken.

Allen Kulturkreisen gemeinsam ist anscheinend lediglich (und auch dem widersprechen manche Studien), dass beim Ausüben und Erfahren von Musik die Oktave – das Intervall aus einer Grundfrequenz und dem Doppelten davon – als Rahmen dient, innerhalb dessen es eine begrenzte Anzahl von Tonhöhen und Intervallen gibt.

Erlernte Klangkategorien

Da das jeweilige System nicht naturgegeben ist, lernen Menschen es offenbar durch Zuhören. Sie übernehmen es als Maßstab und versuchen unbewusst, die gelernten Tonhöhen selbst dann aus einem akustischen Signal herauszuhören, wenn sich dessen Frequenz eigentlich kontinuierlich ändert (etwa beim Gesang, dessen Töne häufig fließend ineinander übergehen).

Nicht anders lernen Kleinkinder ihre Muttersprache: Das Gehirn filtert unbewusst spezifische Sprachlaute aus dem Gesagten, die so genannten Phoneme. In der Musik ändern wir die Tonlage, um verschiedene Noten und Intervalle zu erzeugen; in der Sprache verwen-



den wir wechselnde Klangfarben, um unterschiedliche Phoneme zu formen. In beiden Fällen muss das Gehirn Klangkategorien aus einem komplexen akustischen Signal herausfiltern und abspeichern. Es ist also durchaus möglich, dass Musik und Sprache dabei auf die gleichen Verarbeitungsmechanismen zugreifen, obwohl sich das akustische Material unterscheidet.

Das Studium nichtwestlicher Kulturen wirft weitere Fragen auf: Gibt es allgemein gültige Prinzipien, nach denen die Menschen Rhythmen wahrnehmen? Auf Grund von Untersuchungen in westeuropäischen Ländern waren Forscher etwa bisher der Ansicht, eine Folge von kurzen und langen Tönen würde stets als repetitives Muster »kurz-lang« gedeutet. Versuche in anderen Kulturkreisen zeigen jedoch, dass diese Annahme nicht zutrifft. Zum Beispiel gliedern japanische Erwachsene solche Tonsequenzen eher in »Lang-kurz«-Einheiten.

Da es unwahrscheinlich ist, dass dieser Unterschied in der Wahrnehmung angeboren ist, dürfte er vielmehr erlernt sein, und wir sollten das Muster andernorts in der japanischen Kultur wiederfinden, etwa in bekannten Rhythmen. Untersuchungen meiner Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit dortigen Kollegen deuten jedoch eher darauf hin, dass der verbindende Faktor die Sprache ist. Sowohl in der englischen als auch in anderen westeuro-

Die afrikanische Dundun wird mit einem Schlegel gespielt, ihr Ton durch Armdruck auf die seitlichen Spannschnüre variiert. Auf diese Weise vermag ein Trommler mit der Dundun regelrecht zu sprechen.

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

nature

Das englische Original dieses Artikels erschien unter dem Titel »Talk of the Tone« in »Nature«, Bd. 453, S. 726–727, 5. Juni 2008.



päischen Sprachen werden kurze Worte einem längeren vorangestellt, mit dem sie syntaktisch verknüpft sind, in der japanischen Grammatik ist das gerade umgekehrt. So heißt es zum Beispiel im Deutschen »das Buch«, im Englischen »the book«, im Französischen »le livre«. Das Japanische stellt den Artikel jedoch hinter das Substantiv: »hon-wo«, wobei »hon« »Buch« bedeutet. Meiner Ansicht nach übt der Satzbau einer Sprache einen starken Einfluss auf das rhythmische Umfeld eines Menschen aus und prägt so die Art und Weise, wie wir nichtsprachliche Muster wahrnehmen.

Wenn Trommeln sprechen

Manche Phänomene lassen sich nicht eindeutig den Kategorien Sprache oder Musik zuordnen. Beispielsweise gehören die »Nachrichtentrommeln« West- und Zentralafrikas offenbar zu beiden. Dort kommunizieren Musiker, indem sie Töne und Silbenlängen bestimmter Ausdrücke auf ihren Instrumenten nachahmen. Die getrommelten Worte entstammen den so genannten afrikanischen Tonsprachen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass die Bedeutung eines Worts nicht nur durch Vokale und Konsonanten bestimmt wird, sondern ebenso durch Intonation. Ändert man die Tonhöhe, wird etwa aus einem »Flügel« eine »Tasche«.

Die Yoruba aus Nigeria spielen die Dundun, eine Trommel in Form einer Sanduhr (Foto S. 63), während einer musikalischen Aufführung auch zum »Sprechen«. Die Lokele am Oberlauf des Kongos in Zentralafrika übertragen mit großen Schlitztrommeln aus ausgehöhlten Holzblöcken Nachrichten weit durch den Dschungel. Getrommelte Informationen verstehen in der Regel nur Zuhörer, die mit der Trommelsprache vertraut sind. Zumal die Trommler nicht auf einen begrenzten Vorrat in Rhythmen kodierter Standardbotschaften

zurückgreifen, sondern regelrechte Sätze bilden können. Allerdings ist die Vermittlung nicht so sicher wie bei der gesprochenen Sprache, da viele »Worte« das gleiche tonale Muster besitzen. Um Zweideutigkeiten zu vermeiden, werden die getrommelten Worte in längere, stereotype poetische Sätze eingebettet und so aus dem Kontext identifizierbar.

Eine weitere Möglichkeit zur Kommunikation bieten die Pfeifsprachen Afrikas, Asiens und Zentralamerikas. Sie übertragen das rhythmische und tonale Muster von Wortsilben einer Sprache in Pfeife. Unterschiede in der Lautstärke kodieren den Rhythmus, wechselnde Tonhöhen die Klangmuster. So verwenden die Hmong Südostasiens sieben Tonlagen beim Sprechen, um Worten verschiedene Bedeutungen zu verleihen. Sieben Tonhöhen nutzen sie dementsprechend auch in ihrer Pfeifsprache. Sie ist für die Hmong leicht zu verstehen, obwohl sie nur wenige Hinweise auf die Vokale und Konsonanten der Worte liefert. Nichteingeweihten erscheint das Pfeifen dagegen eher wie Musik.

Über die kognitiven Prozesse, die bei Erzeugung und Verstehen von Trommel- und Pfeifsprachen ablaufen, ist bisher nur wenig bekannt. Für die moderne Neurowissenschaft eine lohnende Aufgabe, denn offenbar lassen sich die biologischen Bausteine, mit denen wir Sprache und Musik erkennen, durchaus neu konfigurieren. Die Wahrnehmung von Musik erfolgt nicht an einem klar definierten, isolierten Ort in unserem Gehirn. Schon Platon, Charles Darwin und Ludwig Wittgenstein waren der Ansicht, Musik und Sprache seien miteinander verwoben – das scheint sich nun zu bestätigen. Wir Menschen gehören einer ebenso musikalischen wie auch sprachbegabten Spezies an. Indem wir beides im Blick haben, gewinnen wir vielleicht ein tieferes Verständnis für die Vorgänge, die uns in die Lage versetzen, Lauten einen Sinn zu geben. <



Aniruddh D. Patel ist Esther-J.-Burnham-Wissenschaftler in der Arbeitsgruppe Theoretische Neurobiologie am Neuroscience Institute in San Diego (Kalifornien).

© Nature Publishing Group
www.nature.com/nature

Patel, A. D.: Music, Language, and the Brain. Oxford University Press, 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/977239.

1959

Affe im All

»Auf dem Versuchsgelände von Cape Canaveral wurde ... eine ›Jupiter‹-Rakete abgefeuert, in deren Spitze sich erstmalig ein Äffchen befand.

Dieser erste amerikanische Raketen-Tierversuch verlief zufriedenstellend ...: Die Beschleunigung bei der Abfeuerung hatte auf den Affen nur eine schwache physiologische Wirkung und keine ernsthaften physiologischen Folgen. ... Während der Zeit, in welcher sich die Schwerkraft nicht mehr bemerkbar machte, blieb das Atmen normal.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 12. Jg., Heft 2, Februar 1959, S. 59

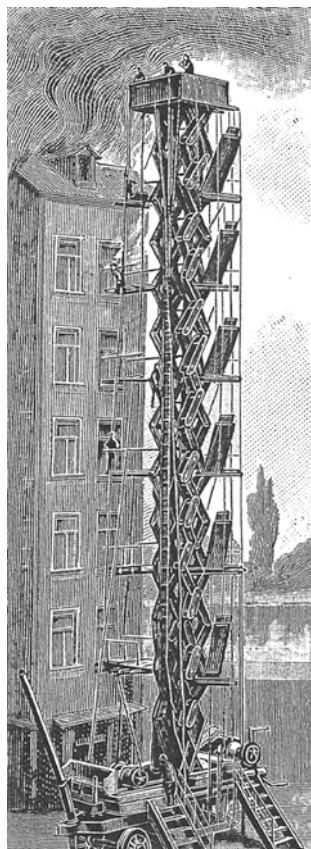
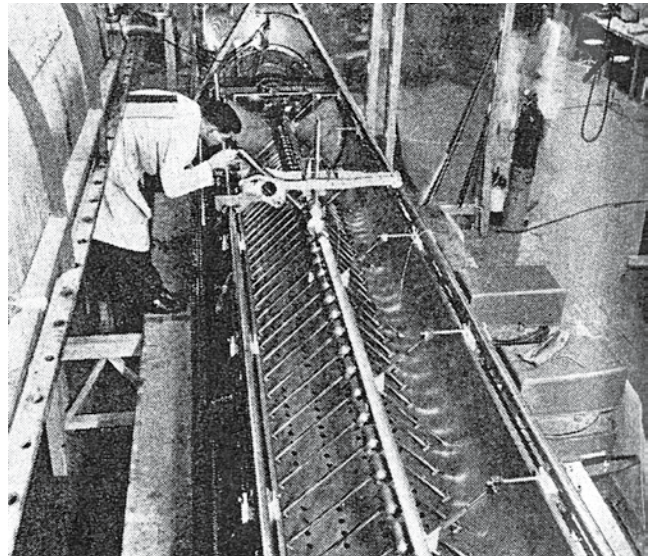
Weltwunder Teilchenbeschleuniger

»Die frühere Energie reichte bei weitem noch nicht aus, um die gewünschten Erkenntnisse über die zwischen den Kernbausteinen wirksamen Kräfte zu gewinnen. ... Höhere Werte, etwa 20 GeV, werden mit jetzt im Bau befindlichen Protonensynchrotron-Anlagen erreicht werden ... Daß das Protonensynchrotron der Cern, das mit einem finanziellen Aufwand von mehr als 60 Millionen DM in Genf erbaut wird, 1960 läuft, ist wohl sehr wahrscheinlich, aber ganz sicher sind sich dessen die Erbauer dieses ›Weltwunders‹ heute noch nicht.« *Umschau*, 59. Jg., Nr. 3, 1. Februar 1959, S. 73–76

Linearbeschleuniger zum Protonensynchrotron des CERN

Milch hemmt Antibiotika

»Trotz ihrer vielseitigen, meist therapeutischen Anwendung ist der Wirkungsmechanismus der meisten Antibiotika noch unbekannt. Die Wirksamkeit einiger Antibiotika kann durch die Anwesenheit störender Stoffe beeinträchtigt oder sogar aufgehoben werden. ... durch den hohen Gehalt an Kalzium- und Magnesiumionen in Milch, ... auch noch durch das Kasein der Milch.« *Umschau*, 59. Jg., Nr. 3, 1. Februar 1959, S. 90



Mechanischer Feuerleiterturm

»Zwei Mängel sind es vor allem, die den meisten gegenwärtigen Feuerleitern ... noch anhaften. Sie sind meist auch in zusammengelegtem Zustand noch zu lang, um bei der Fahrt zum Brandherde um sehr scharfe Ecken zu biegen ... Dementsprechend geht das Augenmerk der Konstrukteure neuerdings auf steilere oder womöglich ganz senkrechte Leitern aus, die sich zusammenfalten lassen und mehr aufgerichteten Türmen ... gleichen. ... Mit Hilfe einer Handwinde aufgerichtet, bildet die von W. Lampe ... einen Turm, dessen Höhe die der meisten Häuser überragt.« *Das Neue Universum*, 30. Jg., 1909, S. 174–177

Neue Feuerleitern sind wahre Faltkunstwerke

Neues Zerfallsprodukt

»Gelegentlich einer Untersuchung der β -Strahlen des Actiniums fanden die Verfasser (Hahn und Meitner) Unregelmäßigkeiten in der zeitlichen Abklingung des aktiven Niederschlages, welche sie veranlaßten, die Zerfallsprodukte des Actiniums einer genaueren Prüfung zu unterziehen ... Es gelang nun ... Actinium B (abzutrennen), das sich ... in ein β -strahlendes Produkt von

1909

5,1 Minuten Periode umwandelt, ... Actinium C. Die typischen β -Strahlen rühren vom letzten her, während Actinium B entgegen der bisherigen Annahme nur α -Strahlen emittiert.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 24. Jg., Heft 7, Februar 1909, S. 85–86

Felsenzeichnungen in Südafrika

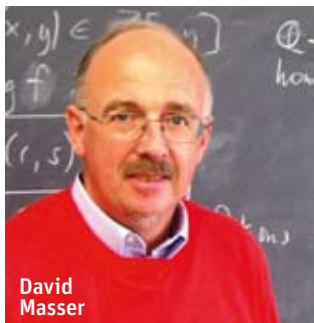
»Im November des Jahres 1906 hatte Herr v. Luschan eine Reise ins Gebiet der Drakensberge in Südafrika unternommen, um hier Kopien von Felsenzeichnungen der Buschmänner für das Berliner Museum zu gewinnen. ... Ganz besonderes Interesse kommt den Bildern ... zu, weil sie eine höchst auffallende und fast rätselhafte Ähnlichkeit mit den prähistorischen Malereien besitzen, mit denen Menschen der älteren Steinzeit die Wände südfranzösischer Höhlen schmückten.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 24. Jg., Heft 6, Februar 1909, S. 76

Die ABC-Vermutung

Die Eigenschaften dreier natürlicher Zahlen namens A , B und C , die durch die schlichte Gleichung $A + B = C$ verbunden sind, unterliegen tief liegenden strukturellen Gesetzmäßigkeiten, die erst allmählich und in Umrissen sichtbar werden.



Joseph Oesterlé



David Masser

Von Gerhard Frey

Auf den ersten Blick sieht die ABC-Vermutung täuschend einfach aus. Sie macht eine Aussage über drei natürliche Zahlen namens A , B und C , die durch die einfachste überhaupt mögliche Beziehung miteinander verknüpft sind: $A + B = C$. Was genau sie aber über diese drei Zahlen aussagt, ist nicht ganz so offensichtlich; und ein Beweis liegt nach dem derzeitigen Stand unseres Wissens in weiter Ferne.

Formuliert wurde sie 1985 von dem Franzosen Joseph Oesterlé, Professor an der Universität Paris VI, und dem Briten David Masser, Professor an der Universität Basel.

Wenn sie zutrifft, dann hätte man eine Alternative zu dem Beweis, den Andrew Wiles und Richard Taylor für die fermatsche Vermutung geliefert haben (Spektrum der Wissenschaft 1/1998, S. 96). Und nicht nur das: Ganze Klassen von Problemen, die sich auf

Gleichungen unter ganzen Zahlen beziehen, wären gleich miterledigt.

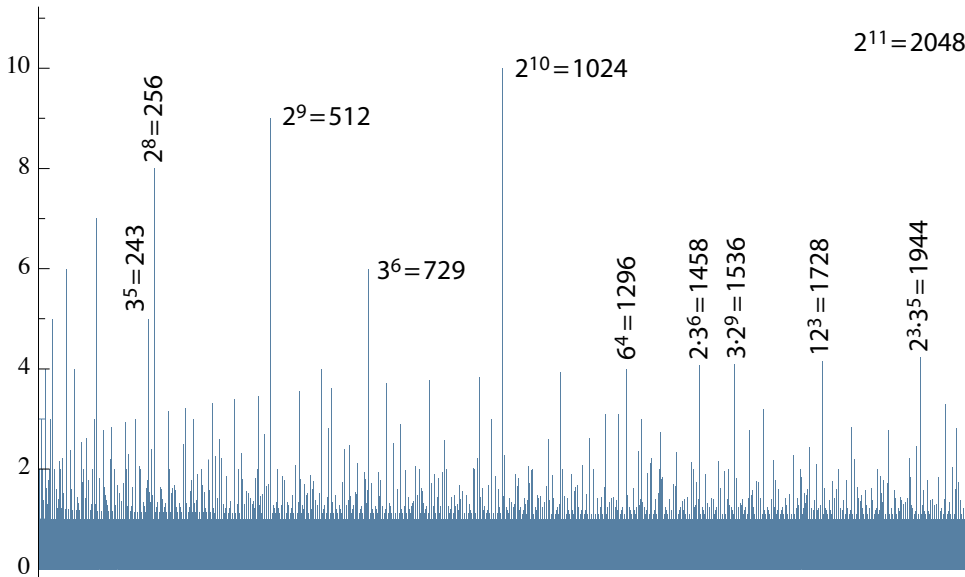
Ein Zugang zur ABC-Vermutung verläuft über ein beliebtes Prinzip der Zahlentheorie: Man tut so, als seien die Eigenschaften der natürlichen Zahlen, insbesondere ihre Zusammensetzung aus Primfaktoren, vom Zufall bestimmt. In erstaunlich vielen Aspekten verhalten sich die Zahlen so, als träfe diese – falsche – Unterstellung zu. So folgt die Verteilung der Primzahlen, als wäre sie zufällig, mit großer Genauigkeit dem gaußschen Primzahlsatz und mit noch größerer Genauigkeit dessen Verfeinerungen (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86).

Es ist also durchaus sinnvoll, viele Einzelfälle durchzuprobieren und daraus statistische Aussagen zu gewinnen. Nicht umsonst heißt mein Arbeitsplatz »Institut für experimentelle Mathematik«. Aber in Wirklichkeit herrschen strenge Regeln im scheinbaren Chaos. Da man mathematische Aussagen nicht nur für die »durchschnittliche«, sondern für alle natürlichen Zahlen treffen möchte, muss man auch die Einzelfälle, die weit von jedem Durchschnittswert abweichen, mit geeigneten Methoden einfangen. Diese »Ausreißer« machen die besondere Schwierigkeit der ABC-Vermutung aus.

Es geht in diesem Zusammenhang nicht nur um die Frage, ob eine Zahl eine Primzahl ist, sondern aus welchen Primfaktoren sie zusammengesetzt ist. Irgendeine zufällig herausgegriffene Zahl wird im Durchschnitt einige wenige Primfaktoren haben. Unter ihnen können manche mehrfach vorkommen; jedes Vielfache von 9 enthält zweimal den Primfaktor 3, jedes Vielfache von 16 viermal den Primfaktor 2.

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 Yang-Mills-Problem	SdW 04/2009
Teil VIII:	Das Navier-Stokes-Problem	SdW 05/2009
Teil IX:	Was ist Mathematik?	SdW 06/2009



Reiche und superreiche Zahlen: $\delta(n)$ aufgetragen über n von 2 bis 2048. Spitzenreiter sind die reinen Potenzen, dicht gefolgt von potenzreichen oder fast potenzreichen Zahlen. Während der Blick aufs Ganze eine gewisse Regelmäßigkeit erkennen lässt – durch die Potenzen ein und derselben Zahl kann man eine Logarithmuskurve legen –, scheint im kleinen Maßstab eher der Zufall zu regieren.

Dass aber die mehrfach vorkommenden Primfaktoren in der Zerlegung einer Zahl die Oberhand haben, kommt selten vor. Rein per Zufall trifft man kaum eine reine Potenz wie $2^{26} = 67108864$ oder eine »potenzreiche« Zahl wie $614810677 = 13^3 \cdot 23^4$, in der alle Primfaktoren mindestens in der zweiten Potenz auftreten. (Das englische Wort für »potenzreich« ist ein hübsches Wortspiel: *powerful*.) Hat man zwei derartige Ausnahmehzahlen A und B , dann »müsste es schon mit dem Teufel zugehen«, wenn deren Summe $C = A + B$ auch eine Ausnahmehzahl wäre. Oder umgekehrt: Versucht man eine Ausnahmehzahl C in zwei Summanden A und B zu zerlegen, so wird man wohl eine Ausnahmehzahl A finden, die kleiner als C ist; aber die Differenz $B = C - A$ wird dann keine Ausnahmehzahl sein. Die ABC-Vermutung ist eine Verfeinerung und Präzisierung dieser schwammigen Aussage.

Arme und reiche Zahlen

Dahinter steckt eine weitere Eigenheit der Zahlentheorie: Die additive Struktur der natürlichen Zahlen ist denkbar einfach und die multiplikative Struktur nicht besonders kompliziert; der Satz über die eindeutige Zerlegbarkeit in Primfaktoren sagt schon alles Wesentliche. Aber die beiden Strukturen vertragen sich nicht besonders; wenn man sie mischt, wie zum Beispiel bei der fermatschen Vermutung, wird es schwierig (und interessant). In unserem Fall hängt die Summe der Zahlen A und B , vom Standpunkt der additiven Struktur aus gesehen, in sehr regelhafter Weise von A und B ab. Vom Standpunkt der multiplikativen Struktur aus gesehen ist dieser Zusammenhang vom Zufall kaum zu unterscheiden.

Nennen wir eine natürliche Zahl »reich«, wenn sie Primfaktoren in mehrfacher Ausfertigung enthält. Wir machen sie »arm«, indem wir ihr die mehrfach vorhandenen Primfaktoren wegnehmen, so dass sie von jeder Sorte nur noch einen übrig behält. Diese »Sparversion« einer Zahl n nennen wir das Radikal von n , in Formeln $\text{Rad}(n)$. Einige Beispiele:

$$\begin{aligned} \text{Rad}(324) &= \text{Rad}(2^2 \cdot 3^4) = 2 \cdot 3 = 6, \\ \text{Rad}(2341564) &= \text{Rad}(2^2 \cdot 585391) = 1170782, \\ \text{Rad}(1170782) &= 1170782. \end{aligned}$$

Das Radikal einer Zahl ist stets kleiner oder allenfalls gleich der Zahl selbst. Primzahlen und andere Zahlen, die jeden ihrer Primfaktoren nur einmal enthalten, »leben an der Armutsgrenze«: Sie sind gleich ihren Radikalen. Umgekehrt ist $\text{Rad}(n)$ dann viel kleiner als n , wenn alle Primzahlen, die n überhaupt teilen, dies mit einer hohen Potenz tun.

Um ein präzises Maß für den »Reichtum« einer Zahl zu gewinnen, ordnen wir jeder Zahl n ihren »Durchschnittsexponenten« $\delta(n)$ durch die Gleichung

$$n = \text{Rad}(n)^{\delta(n)}$$

zu. Indem man beide Seiten logarithmiert, ergibt sich $\log(n) = \delta(n) \cdot \log(\text{Rad}(n))$ und daraus eine direkte Definition für $\delta(n)$:

$$\delta(n) = \frac{\log(n)}{\log(\text{Rad}(n))}$$

Für unsere Beispielzahlen gilt $\delta(324) = \log(324) / \log(6) = 3,22629\dots$ und $\delta(2341564) = \log(2341564) / \log(1170782) = 1,04960\dots$

Wer Experimente mit Computern liebt, kann mit einem kleinen Programm schnell Durchschnittswerte von δ ausrechnen. Bei

In Kürze

- ▶ Zahlen, die viele gleiche Primfaktoren enthalten (»reiche Zahlen«), kommen unter den natürlichen Zahlen relativ selten vor.
- ▶ Dass die Summe zweier reicher Zahlen ebenfalls reich ist, kommt noch viel seltener vor. Die **ABC-Vermutung** ist eine Präzisierung dieser Aussage.
- ▶ Bedeutende Sätze der Zahlentheorie wie insbesondere der **große fermatsche Satz** sind einfache Folgerungen aus der ABC-Vermutung.
- ▶ Über die Theorie der **elliptischen Kurven** ergibt sich eine tief liegende Verbindung zwischen Zahlentheorie und Geometrie.
- ▶ Diese Verbindung lässt es höchst unplausibel erscheinen, dass die ABC-Vermutung falsch sein könnte. Ein **Beweis der Vermutung** liegt gleichwohl noch in weiter Ferne.

LOGARITHMEN

Der Logarithmus einer Zahl n zur Basis 10 ist diejenige Zahl, mit der man die Basis 10 potenzieren muss, damit n herauskommt: $n = 10^{\log n}$. Seine wichtigste Eigenschaft ist, dass er »Multiplikationen in Additionen verwandelt«: $\log(ab) = \log a + \log b$ und $\log(a^n) = n \log a$.

10000 zufällig gewählten Zahlen im Bereich bis zu einer Milliarde erhalten wir bei einem Versuch als Durchschnittswert $\delta = 1,047519\dots$, beim nächsten Versuch $1,05267\dots$ und beim dritten $1,04793\dots$. Das überzeugt uns, dass die »durchschnittliche« Zahl nur knapp über ihrer Armutsgrenze lebt: »In der Regel« ist $a \leq \text{Rad}(a)^{1,06}$. Um noch sicherer zu sein, machen wir das Experiment mit 100 000 Zufallszahlen und erhalten als durchschnittlichen δ -Wert $1,049266\dots$.

Das kann aber nicht die ganze Wahrheit sein. Immerhin ist unter den Zahlen bis zu einer Milliarde die superreiche Zahl $67\,108\,864 = 2^{26}$ mit dem δ -Wert 26. Und dem Reichtum sind nach oben keine Grenzen gesetzt. Es gibt ja beliebig hohe Zweierpotenzen. Wenn wir unter 10000 zufällig gewählten Zahlen, wieder im Bereich bis zu einer Milliarde, die reichste nehmen, erhalten wir bei einem Experiment $n = 692\,599\,663$ mit dem δ -Wert $3,831201\dots$. Die Zerlegung in Primfaktoren ergibt $n = 77 \cdot 29^2$. Ein zweiter Versuch liefert $614\,810\,677 = 13^3 \cdot 23^4$ mit $\delta(614\,810\,677) = 3,55004\dots$. Sucht man gezielt nach reichen Zahlen, so findet man im Allgemeinen potenzreiche.

Da nach Definition eine potenzreiche Zahl jeden Primfaktor mindestens zur zweiten Potenz enthält, ist ihr minimaler Exponent gleich 2. Dann kann ihr Durchschnittsexponent δ nicht kleiner sein; im Allgemeinen ist er sogar deutlich größer, wie die Beispiele zeigen.

Zudem zeigen unsere Versuche, die von – schwierigen – Argumenten der Zahlentheorie bestätigt werden, dass potenzreiche Zahlen, verglichen mit reinen Potenzen, häufig vorkommen. Noch mehr Zahlen n sind »fast« potenzreich. Das soll heißen, dass sie bis auf einen kleinen Faktor potenzreich sind. Auch bei ihnen wird der Wert von δ überdurchschnittlich groß sein.

Auf dem Weg zur ABC-Vermutung

Welche Erfahrungen haben wir aus diesen Experimenten gewonnen? Die durchschnittliche Zahl ist arm: $\delta \leq 1,06$. Reiche Zahlen mit $\delta \geq 2$ sind selten, viel seltener als Primzahlen, aber weitaus häufiger als reine Potenzen, aber ihr Reichtum ist prinzipiell grenzenlos. Man kann zwar den durchschnittlichen Reichtum einer Zahl bestimmen; aber Mathematiker suchen nach Aussagen, die für alle Zahlen zutreffen und nicht nur für die meisten.

Zum Reichtum einer einzelnen Zahl gibt es offensichtlich nichts Nennenswertes zu sagen. Dass zwei Zahlen zugleich reich sind, ist zwar äußerst unwahrscheinlich, wenn man sie

per Zufall wählt; aber unsere Aussage soll auch dann noch gelten, wenn wir uns gezielt zwei reiche Zahlen aussuchen. Wir greifen die eingangs angesprochenen Grundgedanken auf, vermischen die multiplikative mit der additiven Struktur und behaupten versuchsweise: Die Summe zweier reicher Zahlen kann nicht wirklich reich sein.

Wählen wir also zwei natürliche Zahlen A und B nach Belieben mit der einzigen Einschränkung, dass A und B teilerfremd sein sollen. Wir setzen $C = A + B$ und erwarten, dass mindestens eine der Zahlen A , B oder C sich durchschnittlich verhält.

Wenn A eine Durchschnittszahl ist, dann erwarten wir $A \leq \text{Rad}(A)^{1,06}$ oder – nach Logarithmieren – $\log(\text{Rad}(A)) \geq \log(A) / 1,06$. Wenn das für alle drei Zahlen A , B und C gilt, dann ist

$$\begin{aligned} &\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)) \\ &= \log(\text{Rad}(A)) + \log(\text{Rad}(B)) + \log(\text{Rad}(C)) \\ &\geq (\log(A) + \log(B) + \log(C)) / 1,06. \end{aligned}$$

(Da A , B und C zueinander teilerfremd sind, ist $\text{Rad}(A \cdot B \cdot C) = \text{Rad}(A)\text{Rad}(B)\text{Rad}(C)$.) Wegen $C = A + B \leq A \cdot B + 1$ ist $\log C \leq \log A + \log B$; setzen wir das in die Ungleichung ein, so ergibt sich $\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)) \geq 2\log(C) / 1,06 > 1,88679\dots \log C$. Oder andersherum gesagt: Wir erwarten, dass im Durchschnitt

$$C \leq \text{Rad}(A \cdot B \cdot C)^{0,53}$$

sein sollte, also ungefähr durch die Quadratwurzel aus $\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)$ abgeschätzt werden kann.

Wir führen eine neue Maßzahl ähnlich dem »Reichtumsindex« δ für das Verhalten von Radikalen von Tripeln ein: Für teilerfremde natürliche Zahlen A , B , C mit $C = A + B$ definieren wir

$$\kappa(A, B, C) := \frac{\log(C)}{\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))}.$$

$\kappa(A, B, C)$ (»kappa von A , B und C «) ist also diejenige reelle Zahl, mit der man das Radikal von $A \cdot B \cdot C$ potenzieren muss, um C zu erhalten: $C = \text{Rad}(A \cdot B \cdot C)^{\kappa(A, B, C)}$.

Natürlich prüfen wir unsere Erwartung sofort durch einen Versuch nach. Wir untersuchen im Bereich der Zahlen bis zu 10 Milliarden 10000 zufällige Tripel $(A, B, C = A + B)$ und erhalten als Durchschnittswert von $\kappa(A, B, C)$ die Zahl $0,3848\dots$, also noch deutlich unter dem Schätzwert von $0,53$. (Die Abschätzung von $A + B$ durch $A \cdot B$ ist sehr grob.)

Wir sind aber nicht an einem Durchschnittswert interessiert, sondern an einer Obergrenze für $\kappa(A, B, C)$. Gibt es eine solche Grenze überhaupt? Um dieser Frage nä-

herzukommen, konstruieren wir Zahlentripel A, B, C , für die κ möglichst groß wird.

Dazu ist es zweckmäßig, ein reiches C zu nehmen, zum Beispiel wie oben $C = 614810677 = 13^3 \cdot 23^4$, und es in zwei (zu C teilerfremde) Summanden A und B zu zerlegen. Wählen wir A und B zufällig, so erhalten wir in einem Experiment mit 10000 Versuchen den κ -Wert 0,70195; der ist schon beträchtlich größer als unsere Erwartung bei vollkommen zufälliger Wahl. Zudem gibt es besondere Tripel, bei denen κ noch größer ist. So ist $\kappa(13365, 614797312, 614810677) = 1,142153\dots$ Wie kommt das?

Nun, die Zahlen $A = 13365 = 3^5 \cdot 5 \cdot 11$ und $B = 150097 \cdot 2^{12}$ sind ziemlich potenzreich, und $C = 13^3 \cdot 23^4$ sowieso. Zudem ist A klein im Vergleich zu C . Bemerkenswert ist, dass unsere Zufallsuche diese Lösung gefunden hat.

Hat man ein solches Tripel (fast) potenzreicher Zahlen, kann man daraus eine Gleichung machen, zu dem das Tripel eine Lösung ist, in diesem Fall zum Beispiel die Gleichung $55x^5 + 150097y^{12} = 23z^3$ mit der Lösung $x = 3, y = 2$ und $z = 299$.

Diesen Zufallsfund kann man systematisieren. Man stelle eine Gleichung mit mehreren Variablen auf, finde möglichst viele Lösungen dieser Gleichung und konstruiere daraus Tripel reicher Zahlen. Im Folgenden beschreibe ich zwei interessante Gleichungstypen.

► Die Gleichung $x^2 = 3y^2 + 1$ hat nach einem Ergebnis der elementaren Zahlentheorie unendlich viele Lösungen (x, y) . Ein Beispiel ist das Paar $(3650401, 2107560)$. Nun setzen wir $A = 1, B = 3y^2$ und $C = x^2$. Dann ist

$$\frac{\log C}{\log(\text{Rad}(ABC))} = \frac{2 \log x}{\log(\text{Rad}(x \cdot 3 \cdot y))}$$

Da x und $3y$ teilerfremd sind, gilt $\text{Rad}(x \cdot 3 \cdot y) = \text{Rad}(x) \cdot \text{Rad}(3 \cdot y)$. Außerdem ist $\log(3y)$ ungefähr gleich $\log x$, und wenn wir annehmen, dass x und y »Durchschnittszahlen« mit einem δ -Wert von 1,06 sind, ergibt sich aus obiger Gleichung $\kappa(A, B, C) \approx 1,06$, insbesondere $\kappa(A, B, C) \geq 1$. Mit den Zahlen des Beispiels ist sogar

$$\kappa(1, 13325427460800, 13325427460801) = 1,14\dots$$

Das ist in der Tat größer als 1, aber nicht wesentlich größer.

► Die zweite Art von Gleichungen erzwingt noch höhere Potenzen: $a \cdot x^3 + b \cdot y^3 = c \cdot z^3$ mit ganzzahligen Vorfaktoren a, b und c . Haben wir ganze Zahlen x, y und z , die diese

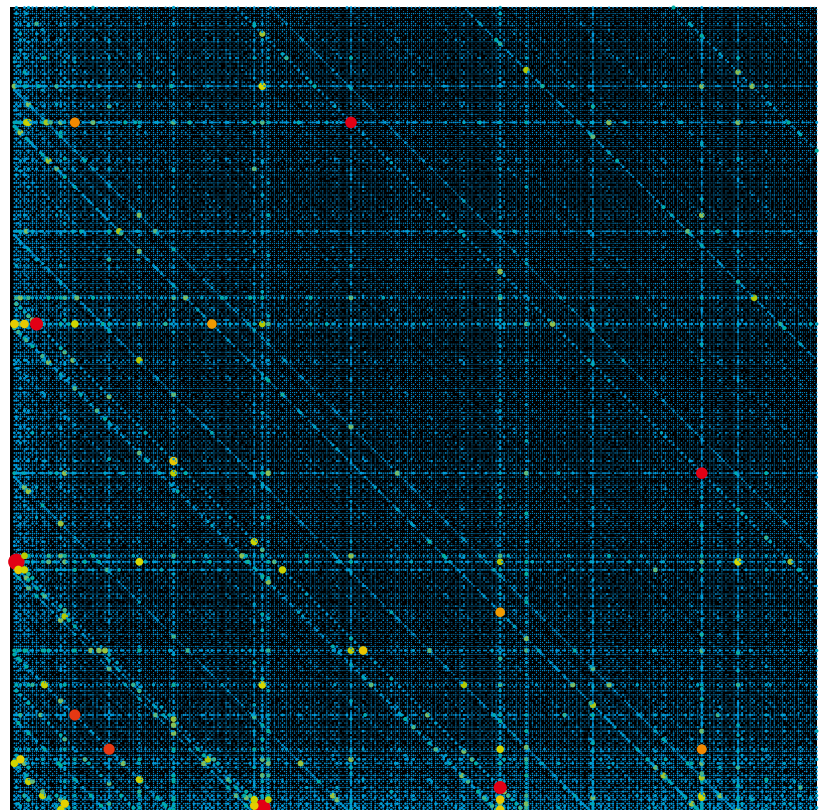
Gleichung lösen, so können einzelne Terme negativ sein; es gelingt aber stets, die Gleichung so umzuformen, dass alle Terme positiv sind. Wenn insbesondere schon in der Form $a \cdot x^3 + b \cdot y^3 = c \cdot z^3$ alle Terme positiv sind, setzen wir $A = a \cdot x^3, B = b \cdot y^3$ und $C = c \cdot z^3$.

Über die Lösungsmenge dieser Gleichungen weiß man recht gut Bescheid, denn sie gehören zu elliptischen Kurven (Spektrum der Wissenschaft 1/2009, S. 62): In manchen Fällen hat die Gleichung überhaupt keine Lösung mit natürlichen Zahlen (zum Beispiel für $a = b = c = 1$, denn eine Lösung würde der fermatschen Vermutung für den Exponenten 3 widersprechen), in anderen Fällen unendlich viele Lösungen.

Wenn die Zahlen x, y und z in derselben Größenordnung liegen und weit größer sind als die Vorfaktoren a, b und c , dann erhält man mit einer ähnlichen Abschätzung wie oben, dass abermals $\kappa(A, B, C) \approx \delta(x)$ und wahrscheinlich $\leq 1,06$ ist. Ist jedoch x viel (das heißt um mehrere Zehnerpotenzen) kleiner als y und z , so ergibt sich $\kappa(A, B, C) \approx (3/2) \delta(x)$. So gehört zu $(A, B, C) = (22 \cdot 32^3, 51^3, 5 \cdot 49^3)$ der κ -Wert 1,27509..., zu $(1, 17 \cdot 7^3, 18^3)$ der Wert 1,31962... und zu $(1, 80, 81)$ der Wert 1,29...

Das letzte Beispiel ist besonders interessant, denn $81 = 3^4 = 5 \cdot 2^4 + 1$ ist eine Lösung der Gleichung $x^4 = 5y^4 + z^k$ mit beliebig großem k . Je höher die Exponenten in den Gleichung

Dreiecksbeziehungen unter den Reichen: Aufgetragen ist $\kappa(A, B, C = A + B)$ für A (horizontale Achse) und B (vertikale Achse) von 2 bis 400. Die Farbe der Kreise verändert sich von hellblau ($\kappa < 0,6$) über grün und gelb ($\kappa = 1$) bis rot ($\kappa \geq 1,2$); der Radius der Kreise ist proportional zu κ^2 , um die Punkte (A, B) mit großen κ -Werten (die »Hits«) hervorzuheben. Man erkennt, dass es für eine Dreiecksbeziehung unter Reichen hilfreich ist, wenn einer der Partner reich ist, sei es A (vertikale Linien), B (horizontale Linien) oder C (diagonale Linien). Der größte Hit dieses Bereichs ist mit $\kappa = 1,42657$ ausgerechnet das relativ kleine Tripel $(3, 125, 128)$, dicht gefolgt von $(13, 243, 256)$ mit $\kappa = 1,27279$. Bereits auf dieser bescheidenen Größenskala sieht man, dass die Ausreißer zu größeren Zahlen hin seltener werden.





Alexander Grothendieck ist der Mann, dem die mathematische Welt den völligen Neuaufbau der algebraischen Geometrie verdankt. Sein Leben ist in vielerlei Hinsicht einzigartig: Geboren 1928 als Sohn eines russischen Anarchisten, fand er trotz mangelhafter Ausbildung schon früh bahnbrechende Resultate. Im Jahr 1970 gab er seine Stelle am Institut des Hautes Études Scientifiques (IHES) in Paris auf; 1991 brach er jeden Kontakt zur Außenwelt ab und lebt seitdem an unbekanntem Ort in den Pyrenäen. Unerschrocken setzte er sich stets für die Unterdrückten ein. So reiste er 1967, mitten im Vietnamkrieg, für drei Monate zum wissenschaftlichen Austausch nach Nordvietnam (Bild).

chungen (die obigen Beispiele handeln von den Exponenten 2 und 3), desto größere κ -Werte würde man erreichen – wenn die entstehenden Gleichungen denn überhaupt noch ganzzahlige Lösungen hätten. Die aber können nicht allzu reichlich vorhanden sein. Gerd Faltings hat durch seinen Beweis der mordellischen Vermutung gezeigt, dass die genannte Gleichung für jeden Exponenten $k \geq 4$ nur endlich viele teilerfremde Lösungstriplett besitzt. Man vermutet, dass die Lösungsmenge auch dann endlich bleibt, wenn man alle Exponenten k zusammennimmt: Die Menge aller teilerfremden Tripel (x, y, z) , für die es ein $k \geq 4$ gibt, so dass $x^4 = 5y^4 + z^k$ gilt, ist endlich.

Als Fazit unserer Versuche können wir feststellen: Durchschnittlich ist κ etwa 0,5. In allen untersuchten Fällen ist $\kappa(A, B, C)$ kleiner als 2. Es gibt viele Beispiele, bei denen κ größer als 1 ist, und große Werte hängen eng mit Lösungen von Polynomgleichungen mit drei Variablen zusammen.

Die Vermutung

Wir haben nun genug Erfahrung gesammelt, um – mit aller gebotenen Vorsicht gegenüber experimentellen Ergebnissen in der Zahlentheorie – die folgende Vermutung zu wagen. Für teilerfremde Zahlen A und B mit $C = A + B$ ist der Messwert κ durch eine Zahl c beschränkt: $\kappa(A, B, C) \leq c$. Dasselbe kann man auch ohne Verwendung der von A und B abhängigen Größen C und κ ausdrücken:

$$A + B \leq (\text{Rad}(A \cdot B \cdot (A + B)))^c$$

Am liebsten hätten wir nicht nur die Aussage, dass eine solche Schranke c existiert, sondern auch, dass sie »effektiv gegeben«, das heißt mit Hilfe eines Rechenverfahrens bestimmbar

ist. Leider sind die bisher gefundenen Verfahren oft so komplex, dass sie im Prinzip funktionieren, aber einen Großrechner für 1000 Jahre oder länger beschäftigen würden. Also stellen wir uns unter »effektiv« ein praktisches Verfahren vor, das zum Beispiel auf einem Laptop in einer Woche fertig wird.

Vielleicht wäre es ja möglich, diese Vermutung mit einem fantastisch hohen c zu beweisen. Aber das würde nicht viel helfen, weil eine so grobe Abschätzung nicht mehr viel über das Verhalten der Zahlen A und B aussagt. Der Wert von c soll also so klein wie möglich sein. Nach unseren Ergebnissen wäre man versucht, etwa $c = 1,4$ zu wählen. Leider ist in gewissen Fällen κ größer als 1,4, unsere Vermutung wäre also falsch; andererseits ist in den allermeisten Fällen $\kappa(A, B, C)$ viel kleiner. Unsere Wahl von c scheint gleichzeitig zu groß und zu klein zu sein!

Der Ausweg: Wir binden die Gegenbeispiele ein, indem wir eine zweite Konstante einführen. An die Stelle obiger Ungleichung setzen wir

$$A + B \leq d(\text{Rad}(A \cdot B \cdot (A + B)))^c$$

mit einer Konstanten d , die ebenfalls effektiv berechenbar sein soll. Mit κ ausgedrückt, lautet die Vermutung:

$$\kappa(A, B, C) \leq c + \frac{\log d}{\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))}$$

Das sieht zunächst so aus, als würde die Behauptung bis zur Unkenntlichkeit verwässert. Wenn ein Gegenbeispiel nicht zur Vermutung passt, mache man eben d geeignet größer. Nehmen wir an, wir experimentieren mit Zahlen C im Bereich bis zu 10^9 (einer Milliarde). Dann ist mit $d = 10^9$ die Vermutung für jeden Exponenten c richtig (und uninteressant). Aber der erste Eindruck täuscht. Je größer die Zahlen A, B und C werden, desto größer wird auch – allerdings viel langsamer – der Nenner $\log(\text{Rad}(ABC))$. Das heißt, die Freiheit, die einem die zusätzliche Konstante d verschafft, schrumpft gegen null, je mehr die beteiligten Zahlen anwachsen. Für die unendliche Vielfalt der Zahlen »weit draußen« ist nur noch die Schranke c maßgebend.

Auch in dieser Form steckt noch etwas zu viel Beliebigkeit. Man kann sich aussuchen, ob man einen Ausreißer durch Vergrößern von c oder Vergrößern von d einfangen will. Aber es geht ja darum, durch geeignete Wahl von c und d ein perfektes Kleid für alle natürlichen Zahlen zu schneiden: Nichts soll unbedeckt bleiben (keine Gegenbeispiele!), zugleich soll das Kleid so eng sitzen wie mög-

lich. Das heißt, es soll zumindest gewisse Zahlentripel geben, für die obige Ungleichung mit dem Gleichheitszeichen gilt. Würde man c und d noch knapper wählen, entstünde ein Gegenbeispiel. Wenn man bei einem perfekten Kleid c knapper macht, muss man d etwas großzügiger wählen.

Die ABC-Vermutung in der Fassung ihrer Autoren Oesterlé und Masser ist eine Verschärfung unserer letzten Version. Die wesentliche Aussage ist: c muss nur geringfügig größer sein als 1 – beliebig wenig größer. Alle Ausreißer können dann durch ein geeignetes d aufgefangen werden. Allerdings muss man in Kauf nehmen, dass d beliebig groß wird, wenn c nahe an den Wert 1 heranrückt. Die Mathematiker wählen dafür eine Formulierung, wie sie in der klassischen Analysis Brauch ist:

Die ABC-Vermutung

Für alle reellen Zahlen $\varepsilon > 0$ gibt es eine reelle Zahl $d_\varepsilon > 0$, so dass für alle teilerfremden natürlichen Zahlen A und B und $C = A + B$ gilt:

$$C \leq d_\varepsilon \cdot (\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))^{1+\varepsilon} .$$

Mit anderen Worten: Es ist

$$\kappa(A, B, C) \leq 1 + \varepsilon + \frac{\log(d_\varepsilon)}{\log(\text{Rad}(ABC))} ,$$

und der Korrektursummand $\log(d_\varepsilon)$ hängt von ε ab.

Warum kann man c nicht gleich 1 oder gar noch kleiner wählen? Weil man dann gewisse Gegenbeispiele nicht beherrschen könnte. Nach dem kleinen fermatschen Satz aus der Zahlentheorie ist für jede ungerade Primzahl p die Zahl $C = 2^{p(p-1)}$ um 1 größer als eine durch p^2 teilbare Zahl. Es gibt also eine natürliche Zahl n , so dass $2^{p(p-1)} = 1 + n \cdot p^2$ ist. Nun setzen wir $(A, B, C) = (1, n \cdot p^2, 2^{p(p-1)})$ und erhalten

$$\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)) \leq \log 2 + \log(\text{Rad}(n)) + \log p .$$

Zudem ist $\log C$ (bis auf eine sehr kleine Korrektur) gleich $\log B = \log n + 2 \cdot \log p$, daher ist

$$\begin{aligned} &\log(C) - \log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)) \\ &\geq \log(p) + (\log(n) - \log(\text{Rad}(n))) - 1 \\ &\geq \log(p) - 1 , \end{aligned}$$

und diese Differenz wächst für wachsendes p unbeschränkt, kann also durch keine Konstante d_ε eingefangen werden.

Kann man auf der anderen Seite ein ε finden, so dass die Konstante d_ε gleich 1 gewählt werden kann, dass also unsere erste Variante der ABC-Vermutung gilt? Natürlich suchen wir ein möglichst kleines ε .

Der größte bekannte Wert für $\kappa(A, B, C)$ ist gleich $1,6299117$. Er gehört zu dem Tripel $(2, 3^{10} \cdot 109, 235)$, das eine Lösung der Gleichung $x^5 - 109y^{10} = 2$ ist. Eric Reyssat von der Universität de Caen (Normandie) hat das Tripel gefunden. Da man alle Zahlen im Bereich bis 10^{20} abgesucht hat, gibt es zumindest in diesem riesigen Rechenbereich kein Gegenbeispiel dagegen, dass (für $d_\varepsilon = 1$) die ABC-Vermutung mit $c = 2$ (entsprechend $\varepsilon = 1$) richtig ist.

Auf der Jagd nach Hits

Kaum formuliert, löst die ABC-Vermutung die Suche nach Beispielen aus, die große Konstanten erfordern. Erstaunlich viele Mathematiker suchen gezielt und mit großer Ausdauer Tripel (A, B, C) von teilerfremden ganzen Zahlen mit $A + B = C$ und mit großem $\kappa(A, B, C)$. Einerseits gewinnt man durch solche Beispiele Grenzen für die Wahl von ε und d_ε ; andererseits ist auch sportlicher Ehrgeiz im Spiel. Man wetteifert um den schnellsten und den ergiebigsten Algorithmus und nimmt die Aufgabe als willkommene Gelegenheit, zu erproben, wie man viele Computer zugleich (»parallel«) rechnen lassen kann, ohne viel Zeit durch die Kommunikation der Computer untereinander zu verlieren. Zudem kann man erwarten, durch die Suche nach solchen Beispielen auf interessante Gleichungen zu stoßen.

Man nennt ein Zahlentripel (A, B, C) einen »Hit«, falls $\kappa(A, B, C) > 1,4$ ist. Hits sind extrem selten. Unter den erschöpfend abgesuchten bis zu 20-stelligen Zahlen findet man nur ungefähr 200 Stück.

Jeder ist eingeladen, sich mit seinem PC an einer groß angelegten Internetsuche nach weiteren Tripeln zu beteiligen (siehe <http://www.abcathehome.com/>) oder auch seinen eigenen Suchalgorithmus zu entwickeln.

Was hätten die Mathematiker davon, wenn die ABC-Vermutung bewiesen wäre? Zum Beispiel einen geradezu lächerlich einfachen Beweis des großen fermatschen Satzes. In der Gleichung

$$x^n + y^n = z^n$$

setzen wir $A = x^n, B = y^n, C = z^n$ und schätzen zunächst $\text{Rad}(ABC)$ ziemlich grob nach oben ab: $\text{Rad}(ABC) = \text{Rad}(x^n y^n z^n) = \text{Rad}(xyz) \leq xyz < z^3$. Damit können wir $\kappa(A, B, C)$ nach unten abschätzen:

$\varepsilon < 10^{-3}$	$\varepsilon < 10^{-4}$	$\varepsilon < 10^{-5}$	$\varepsilon < 10^{-6}$	$\varepsilon < 10^{-7}$	$\varepsilon < 10^{-8}$	$\varepsilon < 10^{-9}$
8	4	4	3	3	3	3
21	17	14	9	7	6	5
110	74	50	32	8	5	5
418	243	154	81	51	6	6
1.368	667	379	103	38	11	11
3.400	1.488	858	210	60	17	17
8.987	3.043	1.698	364	90	25	25
22.216	6.744	3.893	706	149	34	34
56.877	15.233	7.930	1.509	281	54	54
146.876	37.610	19.346	3.967	527	84	84
382.856	79.714	42.773	8.328	1.011	114	114
979.276	195.783	108.816	21.918	2.001	164	164
2.456.848	496.749	272.043	54.985	760	234	234
6.247.826	1.447.784	784.743	159.987	1.991	314	314
16.079.629	3.920.076	2.176.520	4.314	2.332	434	434
41.010.017	1.029.466	548.203	17.961	5.530	544	544
104.667.594	2.597.796	1.422.898	41.961	1.822	694	694

Der aktuelle (7. Januar 2009) Stand der Jagd nach Hits (Webseite http://rekenmeemetabc.nl/?item=h_stats der Universität Leiden, Niederlande). Gezeigt ist die Anzahl der Werte C in gewissen Zahlbereichen (Tabellenzeilen), für die es A und B gibt mit $A + B = C$ und κ (hier q genannt) größer als eine gewisse Schranke (Tabellenspalten). Für blau unterlegte Felder ist die Suche abgeschlossen.

POLYNOMIALES UND EXPONENTIELLES WACHSTUM

Eine Funktion von x kann gegen unendlich streben wie x^a (»polynomial«) oder wie a^x (»exponentiell«), jeweils mit konstantem a . Einerlei, was die Funktion für einen endlichen Bereich der Variablen x tun mag, »auf die Dauer« ist ein exponentieller Anstieg immer stärker als ein polynomialer.

Der Unterschied spielt beim Problem »P = NP« eine entscheidende Rolle (Spektrum der Wissenschaft 10/2008, S. 74): Steigt der Rechenaufwand polynomial mit der Problemgröße, gilt das als langsam und das Problem als »leicht«. Steigt er jedoch exponentiell, ist das Problem schwer und überfordert bereits bei mäßiger Größe jeden Computer.

$$\begin{aligned} \kappa(A, B, C) &= \frac{\log C}{\log(\text{Rad}(ABC))} \\ &\geq \frac{\log(z^n)}{\log(z^3)} = \frac{n}{3} \end{aligned}$$

Das strebt für große Exponenten n gegen unendlich. Wenn wir also zum Beispiel wüssten, dass $\kappa(A, B, C)$ durch 2 beschränkt ist, wäre bewiesen, dass die Fermat-Gleichung für Exponenten $n \geq 6$ keine Lösung haben kann. Damit sind wir fertig, denn für kleine Exponenten ist der große fermatsche Satz längst bewiesen.

Ähnlich kurz und elegant würde die ABC-Vermutung weitere Schwergewichte der Zahlentheorie erledigen – wenn man sie denn beweisen könnte. Allgemein geht es um Polynomgleichungen: Man multipliziert Potenzen der Unbekannten miteinander und mit ganzen Zahlen, addiert mehrere solcher Produkte und setzt das Ergebnis gleich null. Gesucht sind dann ganzzahlige Lösungen einer solchen Gleichung. Aufgaben dieser Art nennt man diophantische Probleme nach dem antiken Mathematiker Diophant von Alexandria.

Insbesondere würde ein Beweis der ABC-Vermutung folgende Probleme lösen:

► die catalansche Vermutung: Die Gleichung $x^m - y^n = 1$ hat in den natürlichen Zahlen nur eine einzige Lösung, nämlich $3^2 - 2^3 = 1$; bewiesen 2002 von Preda Mihăilescu (Spektrum der Wissenschaft Spezial 4/2003 »Omega«, S. 64).

► die mordellsche Vermutung: Jede durch eine Polynomgleichung gegebene Kurve vom Geschlecht größer als 1 kann höchstens endlich viele rationale Punkte enthalten (Spektrum der Wissenschaft 1/2009, S. 62, insbesondere S. 67); bewiesen 1983 von Gerd Faltings. Dass die mordellsche Vermutung aus der ABC-Vermutung folgt, hat Noam Elkies 1991 gezeigt. Wenn die ABC-Vermutung in ihrer schärfsten Form gültig ist, hat man nicht nur eine Existenzaussage, sondern auch ein Verfahren, um diese rationalen Punkte effektiv zu berechnen.

► eine ungeheure Vielfalt an Verallgemeinerungen dieser Probleme. So könnte man beweisen, dass es zu jeder Fermat-Gleichung mit ganzzahligen Vorfaktoren

$$ax^n + by^n = cz^n$$

und $n \geq 4$ nur endlich viele Lösungen geben kann. Gleiches gilt für die Catalan-Fermat-Gleichung

$$x^n + y^m = z^k,$$

wenn die Exponenten »groß« sind, genauer, wenn $1/n + 1/m + 1/k < 1$ ist.

Beweisansätze

Warum könnte die ABC-Vermutung richtig sein? Welche Teilergebnisse gibt es? Die enttäuschende Antwort ist: herzlich wenig.

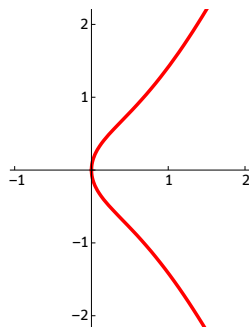
Wir haben, wie ausgeführt, reichlich Zahlenmaterial, das die Vermutung unterstützt, aber das hilft für den Beweis überhaupt nichts.

Cameron L. Stewart von der University of Waterloo (Kanada), Robert Tijdeman von der Universität Leiden (Niederlande) und Kunrui Yu von der Hong Kong University of Science and Technology haben mit Methoden der so genannten transzendenten Zahlentheorie ein gewisses Teilergebnis erzielt: »C geht in Abhängigkeit von $\text{Rad}(ABC)$ nicht stärker als exponentiell gegen unendlich« (Kasten links oben). Die Aussage der ABC-Vermutung ist, dass dieses Wachstum polynomial ist, und zwar höchstens mit der Potenz 2 oder auch $1 + \epsilon$, je nach der Version der Vermutung. Immerhin wissen wir damit, dass C nicht einfach unbeschränkt in den Himmel wachsen kann. Aber für große C ist das Kleid viel zu weit. Nur wie man mit den verwendeten Mitteln von der exponentiellen Version zur polynomialen Abschätzung kommen könnte, ist gegenwärtig nicht abzusehen.

Ein ganz anderer Ansatz beschreitet einen zunächst paradox erscheinenden Weg. Man verallgemeinert die ABC-Vermutung, macht sie also gewissermaßen noch schwerer und

ELLIPTISCHE KURVEN

Eine elliptische Kurve E ist die Menge der Punkte (x, y) , die eine Gleichung der Form $y^2 - x^3 - ax - b = 0$ erfüllen, mit ganzzahligen Koeffizienten a und b und einer Zusatzbedingung: Die »Diskriminante« $\Delta_E = 4a^3 - 27b^2$ darf nicht null sein. Man bestimmt nun eine Größe j_E durch $j_E = 12^3 \cdot 4a^3 / \Delta_E$. Elliptische Kurven mit gleichem j_E unterscheiden sich nur durch eine einfache Koordinatentransformation voneinander.



hofft, dass sie dadurch leichter zu beweisen ist. Die Verallgemeinerung besteht darin, von den vertrauten natürlichen Zahlen zu komplizierteren Strukturen zu abstrahieren.

Was man von den natürlichen Zahlen braucht, ist die additive Struktur, die multiplikative Struktur und ein »Größenmaß«, das durch die natürliche Anordnung gegeben ist: Zwei natürliche Zahlen sind stets vergleichbar in dem Sinn, dass die eine kleiner ist als die andere oder umgekehrt. Diese drei Eigenschaften findet man in vielen anderen mathematischen Strukturen:

► den rationalen Zahlen, also Brüchen der Form r/s mit ganzen Zahlen r und s : Additive und multiplikative Struktur sind wie gewohnt, aber an die Stelle der üblichen Anordnung sortiert man die Zahlen nach ihrer sogenannten Höhe, das ist das Maximum aus Zähler und Nenner in der gekürzten Form des Bruchs (ohne Rücksicht auf irgendwelche Vorzeichen). Die Höhe ist somit ein Maß für die »Kompliziertheit« der rationalen Zahl.

► Polynomen, das heißt Summen aus Produkten von Potenzen der Unbekannten und Konstanten. An die Stelle der Höhe tritt hier der Grad des Polynoms, das heißt die höchste vorkommende Summe aller Exponenten.

► rationalen Funktionen, das sind Brüche, deren Zähler und Nenner Polynome sind.

Auf solche Strukturen lässt sich die ABC-Vermutung übertragen. Dadurch wird ihr Hintergrund klarer, und in einem Fall lässt sie sich sogar beweisen. Wie schon beim Beweis der fermatschen Vermutung spielen dabei elliptische Kurven eine Schlüsselrolle.

Die so genannte Höhenvermutung für elliptische Kurven E setzt die Höhe der rationalen Zahl j_E mit dem Radikal von Δ_E (Kasten unten links) in Beziehung. Aus dieser Beziehung folgt die ABC-Vermutung, und über dem Rechenbereich der rationalen Funktionen sind beide Vermutungen sogar gleichwertig.

Damit ist die seit 200 Jahren betriebene und enorm reichhaltige Theorie der elliptischen Kurven für unsere Zwecke nutzbar. So fand ich mit Ergebnissen, die Faltings zum Beweis der mordellschen Vermutung führten, eine (leider wieder nur exponentielle) Abschätzung von C durch $\text{Rad}(ABC)$.

Mehr noch: Wir haben unser Problem in den Bereich der »Arithmetischen Geometrie« eingeordnet. Dieser Zweig der Mathematik, der im Wesentlichen auf Alexander Grothendieck zurückgeht, hat die Zahlentheorie seit etwa 1960 revolutioniert. So wie in der Schule die »Analytische Geometrie« algebraische Gleichungen mit geometrischen Gebilden verbindet, so hilft die Arithmetische Geome-

trie, zahlentheoretische Probleme geometrisch zu interpretieren, und vermittelt dabei neue, überraschende Einsichten. Ohne Arithmetische Geometrie sind die neueren Durchbrüche in der Zahlentheorie, den Beweis der mordellschen Vermutung durch Faltings und den des großen fermatschen Satzes durch Wiles eingeschlossen, nicht denkbar.

Nach meiner Auffassung ist die Höhenvermutung für elliptische Kurven nicht nur eine tiefe Strukturaussage über ihren eigentlichen Gegenstand, sondern auch der gesuchte strukturelle Hintergrund für die ABC-Vermutung. Für den Fall, dass der Rechenbereich aus rationalen Funktionen besteht, hat Lucien Szpiro von der City University of New York die Höhenvermutung bewiesen und danach auch im Wesentlichen für Zahlbereiche formuliert. Bemerkenswerterweise war für Joseph Oesterlé der Zusammenhang mit der Arithmetik elliptischer Kurven die wesentliche Motivation, die ABC-Vermutung aufzustellen.

Da die Höhenvermutung für elliptische Kurven im Rechenbereich der rationalen Funktionen richtig ist, stimmt in solchen Körpern auch die ABC-Vermutung mit all ihren Folgerungen. Ich habe einen einfachen Beweis dafür gegeben. Das unterstützt die Hoffnung, dass sie auch über den rationalen Zahlen, die sich arithmetisch oft ähnlich wie rationale Funktionen verhalten, gelten sollte. Allerdings liefert mein Beweis keine Analogie im Sinn der Arithmetischen Geometrie, die aus der geometrischen Welt in Zahlbereiche übertragbar wäre. Dagegen liefert der viel kompliziertere ursprüngliche Beweis von Szpiro zumindest den Ansatz einer solchen Übertragung. Für die Durchführung eines Beweises fehlen aber noch wesentliche Bausteine. Damit scheint auch der Beweis der ABC-Vermutung gegenwärtig außerhalb unserer Reichweite zu sein.

Eins haben wir aber erreicht. Wir können sicher sein, dass die ABC-Vermutung nicht eine Skurrilität aus dem Kuriositätenkabinett der Zahlentheorie ist. Sie hat weit reichende Folgerungen und ist selbst eine Konsequenz aus Vermutungen, von deren Richtigkeit wir aus strukturellen Gründen überzeugt sind. Ihr geometrisches Analogon folgt aus grundlegenden Eigenschaften von Flächen. Nach unserem Verständnis gibt es ein Gegenstück zu den Flächen auf der Seite der Zahlentheorie, das entsprechende Eigenschaften hat. Wäre die ABC-Vermutung falsch, dann würde die Verbindung zwischen Zahlentheorie und Geometrie, auf der in den letzten 50 Jahren so erfolgreich die Arithmetische Geometrie aufgebaut wurde, auf eine ernste Probe gestellt. Es fällt schwer, sich das vorzustellen. ◀



Gerhard Frey ist Professor am Institut für experimentelle Mathematik der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen. Er forscht auf dem Gebiet der Arithmetischen Geometrie und deren Anwendungen auf dem Gebiet der Datensicherheit. Er fand eine Verbindung zwischen Lösungen von Gleichungen vom Fermat-Typ und elliptischen Kurven mit dem zugehörigen Modulformen. Damit und mit weiteren Ergebnissen konnte die fermatsche Vermutung auf die Vermutung von Taniyama für elliptische Kurven zurückgeführt werden; die wiederum hat Andrew Wiles für die benötigten Spezialfälle bewiesen.

Beukers, F.: Introduction to the ABC Conjecture. Vortragsfolien. www.math.leidenuniv.nl/~desmit/ic/abc/fritsABCpresentation.pdf

Faltings, G.: Endlichkeitssätze für abelsche Varietäten über Zahlkörpern. In: *Inventiones mathematicae* 73, S. 349–366, 1983.

Frey, G.: Links Between Solutions of $A - B = C$ and Elliptic Curves. In: Schlickewei, H. P., Wirsing, E. (Hg.): *Number Theory. Lecture Notes in Mathematics* 1380. S. 31–62, Springer, Heidelberg 1989

Frey, G.: Der Beweis des Fermatschen Theorems. In: G. Faltings (Hg.): *Moderne Mathematik*. S. 166–175. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1996.

Oesterlé, J.: Nouvelles Approches du Théorème de Fermat. *Séminaire Bourbaki* 694 (1987–88).

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/977240.

APOKALYPSE im Rheintal

Beim Ausbruch des Laacher-See-Vulkans sind mehrfach pyroklastische Ströme entstanden – ähnlich wie hier bei der Eruption des Vulkans Unzen (Japan) im Jahr 1991. Diese Glutlawinen enthalten eine Mischung aus heißen Bimspartikeln, Gesteinsbruchstücken und Asche, die durch vulkanische Gase und eingesaugte Luft in der Schwebe gehalten werden. Sie rasen mit hoher Geschwindigkeit hangabwärts – bevorzugt in Flusstälern – und zerstören alles auf ihrem Weg.

Vor 12 900 Jahren ereignete sich in der Eifel bei Koblenz eine gewaltige Vulkaneruption. Glutlawinen stauten den Rhein zu einem riesigen See auf, der vermutlich bis nach Mannheim reichte. Als der Damm brach, schoss eine über zehn Meter hohe Flutwelle durch das Rheintal. Ähnliches könnte sich eines Tages wiederholen.



CORNELIA PARK

Der idyllische, wassergefüllte Krater des Laacher-See-Vulkans – hier ein Luftbild (links) – war Schauplatz der gewaltigsten explosiven Eruption in ganz Mittel- und Westeuropa während der letzten 100 000 Jahre. Am Südwestufer liegt das weltberühmte Kloster Maria Laach. Heute schläft der Vulkan lediglich. In Blasen aufsteigendes Kohlendioxid (oben) zeugt von fortdauernder Entgasung in der Tiefe.

FOTOFLUG.DE

In Kürze

- ▶ **Die Eruption des Laacher-See-Vulkans vor 12 900 Jahren** begrub weite Bereiche Europas unter einer mehrere Zentimeter dicken Ascheschicht.
- ▶ **Pyroklastische Ströme aus heißen Gasen** mit darin suspendierten Bimspartikeln und Gesteinsfragmenten stauten den Rhein bei Brohl 27 Meter hoch auf.
- ▶ Kurzzeitig entstand so ein riesiger See, der bis Mannheim reichte. Beim Bruch des Damms raste **eine bis zu 15 Meter hohe Flutwelle** rheinabwärts mindestens bis Köln.
- ▶ Die Geschichte des Vulkanismus in der Osteifel zeigt ein **periodisches Aktivitätsmuster** mit regelmäßigen Unterbrechungen, das nahelegt, dass der Laacher-See-Vulkan eines Tages wieder ausbrechen könnte.

Von Cornelia Park und Hans-Ulrich Schmincke

Friedlich ruht der Laacher See in der sanft gewellten Hochfläche der Eifel. 40 Kilometer südlich von Bonn und acht Kilometer westlich des Rheins gelegen, ist er ein idyllischer, wassergefüllter Krater. Von den zwei Millionen Touristen, die jährlich das weltberühmte Kloster Maria Laach an seinem Ufer besuchen, ahnt wohl kaum jemand, dass hier vor 12 900 Jahren – am Ende der Altsteinzeit und kurz nach der letzten großen Vereisung – der gewaltigste Vulkanausbruch in Mittel- und Westeuropa innerhalb der letzten 100 000 Jahre stattfand.

Während der Hauptphase der Eruption, die vermutlich nur drei Tage dauerte, wurden 20 Kubikkilometer an Asche und erbsen- bis nussgroßen »Lapilli« – zu Bims erstarrte Fetzen aufgeschäumten Magmas sowie Schiefer- und Sandsteinfragmente vom alten Untergrund – aus dem Krater geschleudert. Das Auswurfmaterial könnte 200 Milliarden Bierfässer von 100 Liter Fassungsvermögen füllen. Die Landschaft östlich des Kraters, wo die Hauptmasse des Fallouts niederging, veränderte ihr Aussehen radikal. Eine Fläche von 1400 Quadratkilometern, was etwa 200 000 Fußballfeldern entspricht, wurde unter einer viele Meter dicken Bimsschicht begraben. In Kraternähe türmten sich die vulkanischen Auswurfprodukte (Tephra) teils mehr als 50 Meter hoch.

Die senkrecht nach oben steigende Eruptionswolke erreichte mehrfach Höhen von mehr als 20 Kilometern. Ascheregen ging über weiten Bereichen Mittel-, Nord- und Südeuropas nieder. Sogar noch in Südschweden und in Norditalien lässt sich Laacher-See-Asche in Mooren und Seeablagerungen nachweisen.

Ganz abgesehen von der weitflächigen Verwüstung der Landschaft durch Bims- und Aschenfall, ging überraschenderweise auch vom Rhein ein enormes Zerstörungspotenzial aus. Es betraf selbst scheinbar sichere Gebiete weit außerhalb der Hauptfalloutzone, mehrere hundert Kilometer vom Krater entfernt. Voluminöse pyroklastische Ströme (Glutlawinen), die über Seitentäler in den Rhein rasten, stauten den Fluss zu einem riesigen See, der sogar noch weite Regionen südlich des heutigen Mainz bis nach Mannheim überschwemmte. Wenige Wochen später brach der entstandene natürliche Damm. Als Folge davon schoss eine mehr als zehn Meter hohe Flutwelle rheinabwärts und riss alles mit sich.

Damals hielten sich nur sporadisch einzelne Menschengruppen in dem von der Eruption betroffenen Gebiet auf. Sie folgten den wandernden Tierherden und hatten keine festen Behausungen. Offenbar forderte der Ausbruch seinerzeit kein Menschenleben; denn trotz des weitflächigen Bimsabbaus im Umkreis des Laacher Sees wurde nie ein direktes Opfer der Eruption gefunden.

Im heutigen dicht besiedelten und hoch-industrialisierten Deutschland wären die Fol-

gen weit dramatischer. Städte wie Andernach und Neuwied würden meterhoch unter Wasser stehen und nur die höchsten Gebäude sowie Kirchtürme noch aus den Fluten ragen. Dächer wären zuvor schon unter der Auflast meterdicker Auswurfmassen oder bei Erdbeben kollabiert. Selbst wenn die Menschen rechtzeitig evakuiert werden könnten, würden Umweltgefahren durch die Überflutung drohen – man denke nur an auslaufendes Heizöl und freigesetzte Industriechemikalien.

Eine Wiederholung der damaligen Ereignisse lässt sich prinzipiell nicht ausschließen. Nach unseren Erkenntnissen ist der Eifelvulkanismus keineswegs erloschen, sondern hat nur eine längere Ruhephase eingelegt, die jederzeit zu Ende gehen kann. Es empfiehlt sich also, die Auswirkungen der Eruption vor 12900 Jahren gut zu untersuchen – und in Zukunft auf der Hut zu sein.

Die entscheidende Entdeckung

Schon 1970 hatten wir damit begonnen, den Ablauf der einstigen Laacher-See-Eruption und ihre Auswirkungen auf die Umwelt systematisch zu erforschen. Dabei kam uns zustatten, dass durch den Bimsabbau, der seit Beginn des letzten Jahrhunderts in großem Maßstab betrieben wird, die Ablagerungen der Eruption weitflächig angeschnitten worden waren. In den Abbauwänden können wir lesen wie in einem Buch.

Vor etwa 20 Jahren stießen wir bereits bei unseren Untersuchungen in Rheinnähe auf eine rätselhafte Lage innerhalb der gesamten Tephraabfolge. Sie bestand aus reinem Bims (Bild S. 83). Normalerweise enthalten Falloutschichten auch zahlreiche Gesteinsfragmente, die beim Ausbruch vom Untergrund mitgerissen wurden. Die neu entdeckte Schicht konnte somit nicht direkt durch die Eruption entstanden sein. Bimse sind jedoch so leicht, dass sie auf Wasser schwimmen. Offenbar waren sie, so unsere Vermutung, als Floß auf einem See aufgetrieben und dadurch von den schwereren Gesteinsfragmenten getrennt worden.

In einer späteren Forschungskampagne gingen wir dem Zufallsfund genauer nach. Dabei entdeckten wir die ungewöhnliche Lage an vielen Stellen im tieferen Neuwieder Becken nördlich von Koblenz – sogar bis zu 25 Meter über dem Rhein. Auch ein gigantisches Hochwasser hätte sie nicht dorthin verfrachten können. Die Höhenlage und die weite Verbreitung der Bimsfloßschicht ließen nur einen Schluss zu: Der Rhein musste zu einem riesigen See aufgestaut worden sein, an dessen Oberfläche die Bimspartikel schwammen.

Die markante Schicht überdeckt Falloutschichten der Haupteruptionsphase und

wird ihrerseits von den Auswurfprodukten der finalen Eruptionsintervalle überlagert. Demnach musste der See noch während des Ausbruchs entstanden, aber auch wieder verschwunden sein. Zunächst blieb rätselhaft, was die Ursache dieser gigantischen Aufstauung war. Ein unmittelbarer kausaler Zusammenhang mit der Eruption stand jedoch außer Frage. Wie könnte der Ausbruch den Rhein direkt beeinflusst haben?

Eruptionssäule bis in die Stratosphäre

Hochexplosive Ausbrüche wie die des Laacher See-Vulkans nennt man plinianisch – nach der verheerenden Eruption des Vesuv im Jahr 79 n. Chr., die Plinius der Jüngere beschrieben hat. Weitere berühmte Beispiele sind die Ausbrüche von Thera (Santorin), Tambora, Krakatau, Mount St. Helens und Pinatubo.

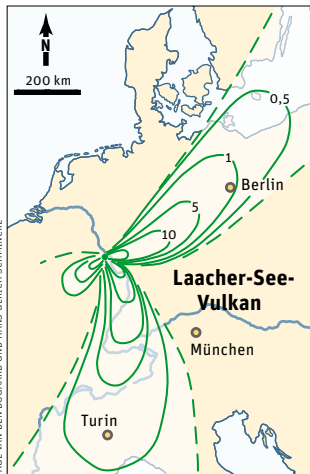
Bei einer plinianischen Eruption kann das Auswurfmaterial auf zwei Arten vom Krater wegtransportiert und abgelagert werden. Meist steigt die Hauptmasse des Gemisches aus Bimslapilli, Gesteinsfragmenten, heißen Gasen und eingesaugter Luft in einer senkrechten Säule auf und gelangt bis in die Stratosphäre, die in Mitteleuropa in zwölf Kilometer Höhe beginnt. Von den dort herrschenden Winden wird das Material verdriftet und regnet, sobald der Auftrieb nachlässt, sortiert nach Teilchengröße und -gewicht ab. Wenn das Partikelgemisch aber zu schwer ist oder zu viel auf einmal austritt, kann die Eruptionssäule nicht konvektiv aufsteigen, sondern fließt als Bodenwolke aus Gas und darin suspendierten Teilchen der Hangneigung folgend vom Schlot weg. Solche pyroklastischen Ströme rasen daher bevorzugt durch die angrenzenden Täler.

Das Brohltal, ein Seitental des Rheins, wurde während der Laacher-See-Eruption bis zu 60 Meter hoch von pyroklastischen Strömen aufgefüllt. Reste der dabei abgelagerten Ignimbritschicht liegen hier frei. Am Talausgang entstand eine 27 Meter hohe Barriere, die den Rhein flussaufwärts zu einem See aufstaute.

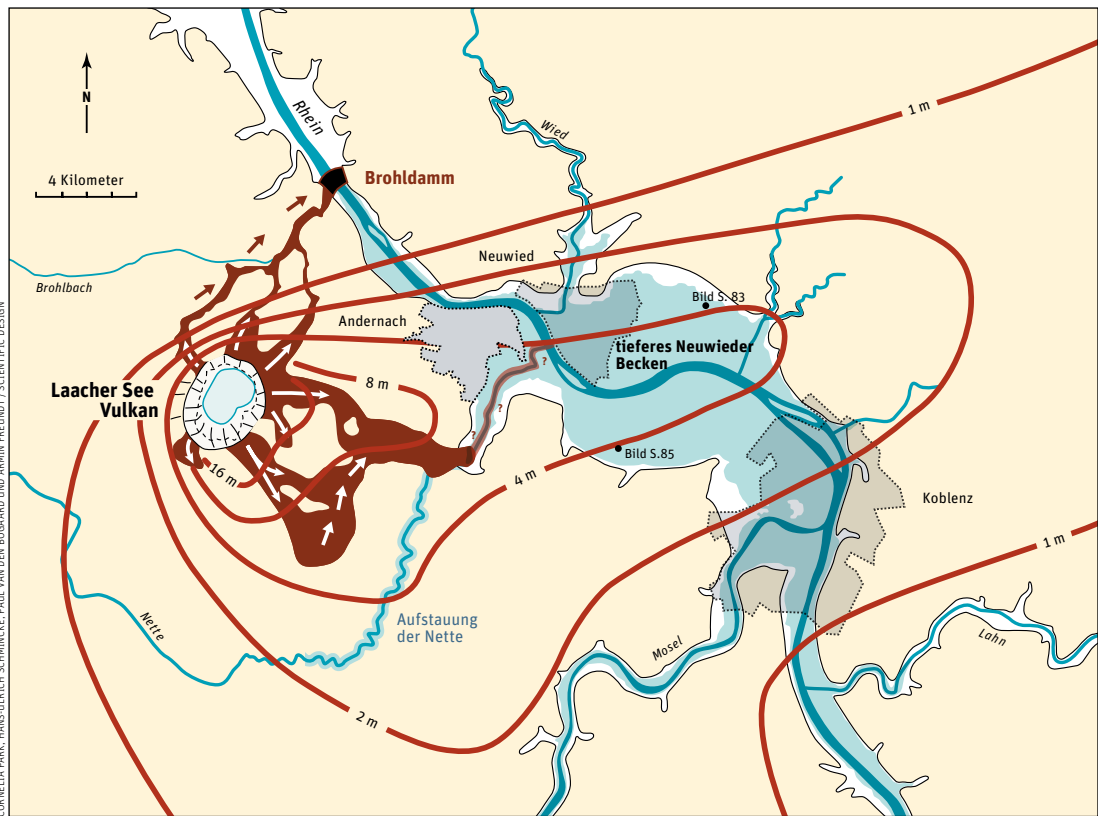


HANS-ULBRICH SCHWENKE

- Glutlawinen-ablagerungen
- Täler und Niederungen <100 m ü. NN
- Stausee
Seespiegel bei 85 m ü. NN
- 1 m Tephraablagerungen (m)
- 1 cm Ascheablagerungen (cm)



Asche der Lacher-See-Eruption gelangte bis nach Südschweden und Norditalien (kleine Karte). Die grünen Linien zeigen die Dicke der Ablagerungen in Zentimetern. Bedingt durch Westwinde in der Stratosphäre, ging die Hauptmasse des Fallouts im Bereich des Neuwieder Beckens nieder (große Karte). Pyroklastische Ströme (dunkelrot) erreichten vermutlich an zwei Stellen den Rhein. Am Ausgang des engen Brohltals schufen sie einen etwa 30 Meter hohen Damm, der den Fluss vollständig blockierte und aufstaute. Der Stausee hatte im Bereich des Kartenausschnitts eine Fläche von etwa 120 Quadratkilometern und eine maximale Tiefe von rund 25 Metern. Andernach, Neuwied und Koblenz wären damals weitgehend im Wasser versunken.



Während der Laacher-See-Eruption wechselten konvektive Eruptionssäulen und Bodenwolken mehrfach miteinander ab. Anhand der Ablagerungen lässt sich der Ausbruch in vier große Phasen unterteilen. Die erste hinterließ als mächtige Falloutschicht die Lower Laacher-See-Tephra (LLST). Die Phase 2 war ein Zwischenstadium, in dem ein auffälliges Bündel von feinkörnigen Tufflagen entstand, das den unteren Abschnitt der Middle Laacher-See-Tephra (MLST) darstellt. Diese Schicht (MLST-A) bildet eine markante Grenze zwischen den Falloutschichten der LLST darunter und denen der MLST-B/C darüber.

Während der Phase 2 produzierten gewaltige Aschefontänen voluminöse pyroklastische Ströme. Von allen Eruptionseignissen haben sie die Landschaft am stärksten verändert, da sie dort, wo sie entlangrasten, innerhalb kürzester Zeit mächtige Ablagerungen hinterließen. Das Brohltal, ein kleines Nebental des Rheins nordöstlich des Kraters, wurde innerhalb weniger Stunden bis zu 60 Meter hoch verschüttet.

In der folgenden Phase 3 erreichte die Eruption ihren Höhepunkt. Dabei trat die Hauptmasse des Laacher-See-Magmas aus (MLST-B/C). Die Eruptionssäulen erreichten die größten Höhen, vermutlich mehr als 30 Kilometer. Die resultierenden Falloutablagerungen sind dicker und die Bimspartikel deutlich größer als bei Phase 1.

Das relativ gasarme Restmagma, das nach Ende dieser Eruption im unteren Abschnitt der Magmakammer zurückblieb, konnte nicht

mehr durch »normales« Aufschäumen ausgeworfen werden, weil der Kristallbrei zu schwer und zu zähflüssig war. Deshalb legte der Vulkan eine längere Pause ein. Wir vermuten, dass erst Grundwasserzutritt in die teilweise entleerte und kollabierte Magmakammer zum Wiederaufleben der Eruptionstätigkeit führte. In besonders heftigen Explosionen wurden nun schwere Partikel in hochenergetischen Druckwellen ausgeworfen, so genannten Blasts. Insgesamt war der Eruptionsablauf dieser vierten Hauptphase, in der die Schicht der Upper Laacher-See-Tephra (ULST) entstand, sehr kompliziert, was sich in äußerst variablen Ablagerungen widerspiegelt.

Der Laacher-See-Ausbruch ereignete sich im späten Frühjahr, als die Laubbäume vollständig ausgetrieben hatten. Die Bimsablagerungen begruben blühende Maiglöckchen, deren Reste unter ihnen erhalten sind.

Zu Beginn unserer Untersuchungen vermuteten wir, dass die gesamte Eruption nur wenige Tage dauerte – analog zu anderen plinianischen Ausbrüchen, deren Ablauf bekannt ist: Beim Vesuv war die Eruption nach zwei (24.–25. August 79 n. Chr.) und beim Pinatubo nach drei Tagen (15.–17. Juni 1991) vorüber. Inzwischen liegen uns überzeugende Indizien dafür vor, dass Phase 1, 2 und 3 tatsächlich insgesamt nur wenige Tage dauerten. Das ist umso erstaunlicher, als während des größten Teils dieser Zeitspanne Ruhepausen herrschten – insbesondere vor und während Phase 2, als die Instabilität der Eruptionssäule zu längeren Unterbrechungen führte. Folglich

entstanden die mächtigen Falloutablagerungen von Phase 1 und 3 sehr wahrscheinlich jeweils in nur wenigen Stunden. Die sehr heterogene, von vielen Pausen unterbrochene Schlussphase (Phase 4) dauerte dagegen sehr viel länger: Sie erstreckte sich möglicherweise bis in das Folgejahr, mindestens jedoch über mehrere Monate.

Kampf des Rheins mit den Tephramassen

Das romantische Engtal des Rheins öffnet sich bei Koblenz in das Neuwieder Becken, ein tektonisches Einbruchsbecken im Rheinischen Schiefergebirge. Bei Andernach verlässt es der Rhein wieder. Hier ist er nur knapp zehn, bei Koblenz etwa 23 Kilometer vom westlich gelegenen Laacher-See-Vulkan entfernt.

Ein Fluss verlagert mit der Zeit immer wieder sein Bett. Eine Grundvoraussetzung für unsere detaillierten Untersuchungen war es, den Verlauf der Flussrinnen und deren Eintiefung in die Aue zur Zeit der Laacher-See-Eruption zu rekonstruieren. Nur so konnten wir zuverlässige Aussagen darüber machen, wo Fallouttephra während eines bestimmten Eruptionsintervalls noch auf trockenen Boden oder schon ins Wasser gefallen war.

Beiderseits des Hauptbetts, dessen Position sich nicht mehr genau rekonstruieren lässt, verlief ein mäandrierender Altarm. Dort fanden wir die meisten Indizien für eine Aufstauung des Rheins. Der südliche Altarm war wahrscheinlich noch ganzjährig von etwas Wasser durchflossen, der nördliche lag dagegen trocken. Das ist wichtig zu wissen; denn während der Laacher-See-Eruption wurde die vorher trockene Flussaue samt den anschließenden Hangbereichen bis zu einer Höhe von 25 Metern überflutet.

Mehrere Faktoren machten das Neuwieder Becken zum neuralgischen Bereich. So verlief damals wie heute die Windrichtung in der Stratosphäre von Westsüdwest nach Nordnordost. Da die Eruptionssäule während der beiden plinianischen Hauptphasen mehrfach bis in die Stratosphäre aufstieg, wurde das vulkanische Material genau über das östlich gelegene Neuwieder Becken getrieben.

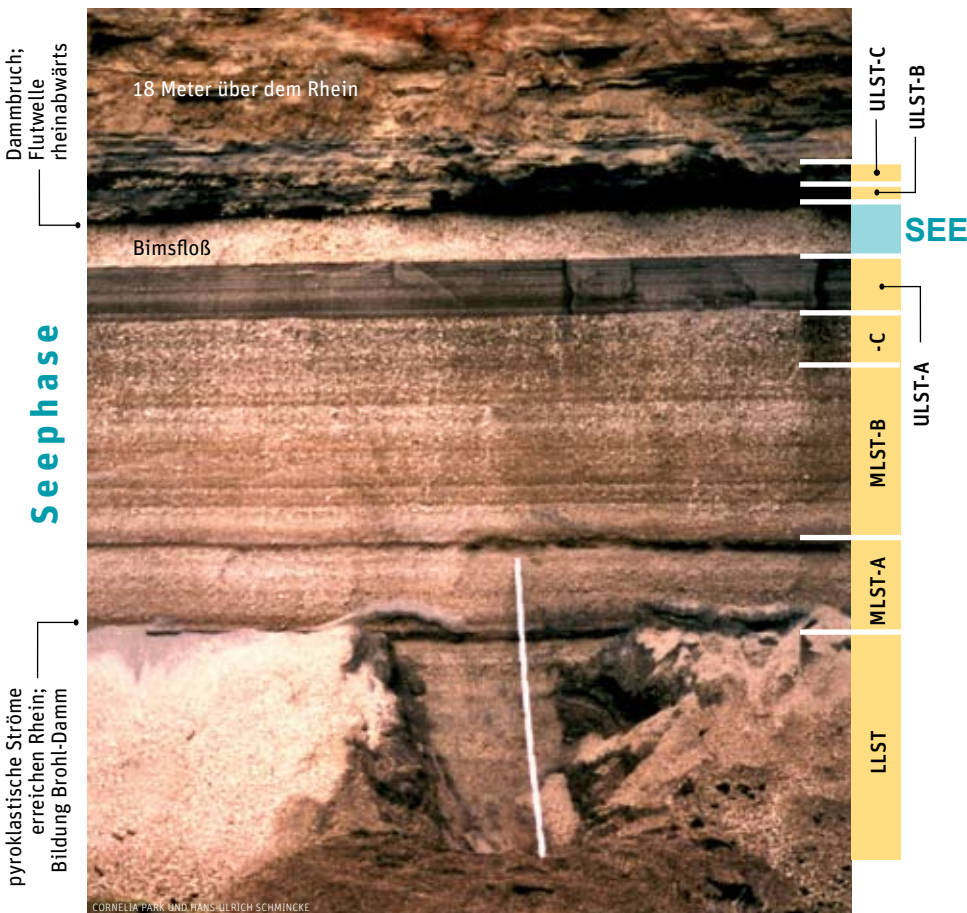
In nur wenigen Stunden fiel so über eine Flusslänge von mehr als 25 Kilometern hinweg Tephra ein bis sechs Meter hoch auf die Rheinaue. Zum Vergleich: Der Fluss ist heute in der Strommitte im Schnitt rund drei Meter tief. Weil der Rhein im Senkungsbereich des Neuwieder Beckens per se ein geringeres Gefälle hatte und sich in mehrere Rinnen aufteilte, während der weitflächige Auenbereich zugleich eine Überflutung begünstigte, reagierte er hier schneller und empfindlicher auf

den Partikelregen als im Engtal flussauf- oder -abwärts.

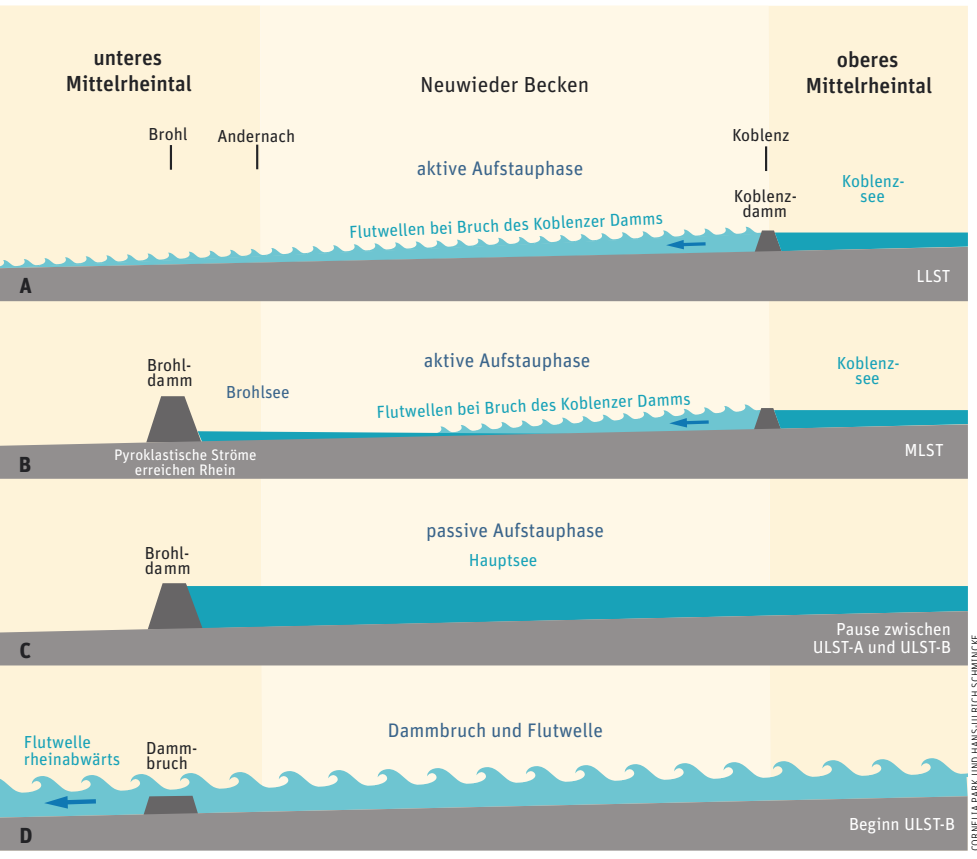
Viel Fallout landete auch in der Mosel. Da sie bei Koblenz am Eingang zum Neuwieder Becken in den Rhein mündet, schwemmte sie dort zusätzlich beträchtliche Bims mengen an. Auch der Rhein selbst transportierte von stromaufwärts gelegenen Abschnitten weiteren Ballast in Richtung Neuwieder Becken. So erwies sich der scheinbare Vorteil, dass die meisten Bimse schwimmfähig waren, als entscheidender Nachteil, denn dadurch konnten große Tephramassen leicht verlagert und zu einem Damm angehäuft werden. Schon der Partikelregen hatte also eine extreme Überfrachtung des Rheins zur Folge und reichte aus, ihn während der Eruption im Bereich von Koblenz mehrmals temporär aufzustauen.

Die voluminösen pyroklastischen Ströme, die über das Brohltal sechs Kilometer stromabwärts des Neuwieder Beckens den Rhein erreichten, besiegelten während der zweiten Eruptionsphase schließlich das Schicksal des Flusses. Jeder einzelne konnte innerhalb von Sekunden mehrere Meter hohe Ablagerungen hinterlassen. Dadurch wurde das Rheintal an dieser Stelle offenbar komplett abgeriegelt. Tatsächlich bedurfte es eines 27 Meter hohen, sehr breiten und stabilen Walls, damit sich im

Ein reines Bimsfloß, das ursprünglich auf der Oberfläche des aufgestauten Sees trieb, ist rund 18 Meter über dem damaligen Rheinspiegel auf primären Falloutablagerungen der Laacher-See-Eruption gestrandet, die aus einer Mischung aus Bims und Gesteinsbruchstücken bestehen. Der See muss während der Pause zwischen zwei späten Eruptionsintervallen – ULST-A und ULST-B genannt – bis zu dieser Stelle angestiegen sein und sich auch wieder entleert haben, da der Fallout beider Eruptionsphasen auf trockenen Boden fiel. Die Farbe der Bimse wird nach oben hin immer dunkler. Auch in dieser Hinsicht passt das helle Floß nicht in die primäre Abfolge.



DIE ENTWICKLUNG DES STAUSEES IM RHEINTAL



Die Aufstauung des Rheins vollzog sich in mehreren Etappen:

- A.** Der Rhein war durch die auf ihn niederprasselnden Tephramassen sehr schnell überfrachtet. Schon während der frühen Ausbruchphase (LLST) staute er sich mehrfach bei Koblenz. Dammbürche verursachten massive Flutwellen im Neuwieder Becken.
- B.** Während der zweiten Ausbruchphase (MLST-A) erreichten pyroklastische Ströme den Rhein bei Brohl und schufen dort einen riesigen, über längere Zeit stabilen Damm. Mit jeder Flutwelle infolge von Dammbürchen bei Koblenz wuchs der Brohlsee.
- C.** Als zu Beginn der vierten Ausbruchphase (ab Ende ULST-A) eine zusammenhängende Wasserfläche von Brohl bis nach Koblenz reichte, war das Neuwieder Becken komplett überflutet: Das passive Seestadium trat ein. Der Wasserspiegel stieg nun immer weiter an, und der Rückstau dehnte sich rheinaufwärts möglicherweise bis in den Oberrheingraben hinein aus.
- D.** Noch vor dem Ende der vierten Ausbruchphase (Beginn von ULST-B) brach – vielleicht infolge starker Erdbeben – der Brohldamm, was eine verheerende Flutwelle rheinabwärts auslöste.

CORNELIA PARK UND HANS-ULRICH SCHMIDKE

Bereich des Neuwieder Beckens ein tiefer, weitflächiger See aufstauen konnte, der Wochen bis Monate bestand.

Während der Laacher-See-Eruption müsssen sich im tieferen Neuwieder Becken dramatische Szenen abgespielt haben. Der Rhein lieferte sich einen erbitterten Kampf mit den Tephramassen. In den Altarmen fanden wir Sedimente, die sich bei sehr hohen Fließgeschwindigkeiten von ein bis zwei Meter pro Sekunde gebildet haben müssen. Sie bestehen ausschließlich aus Laacher-See-Tephra und wurden zweifelsfrei noch während der Laacher-See-Eruption dort deponiert; denn sie sind – genau wie die Bimsflöße – von primären Ablagerungen der vierten Eruptionsphase überdeckt. Mit mehreren Metern Mächtigkeit überziehen sie selbst Altarm- und Auenbereiche, die schon längere Zeit vor der Eruption trockenengefallen und bewachsen waren. Das beweisen an den Bimswänden angeschnittene Hohlformen oder Abdrücke von Bäumen und Sträuchern (Bild rechts). Die Höhenlagen, in denen wir noch solche Hochgeschwindigkeitsablagerungen fanden, weisen auf gigantische Wasservolumina hin.

Enorme Tephramassen wurden bei den Überflutungen mehrfach vollständig aus den

Altarmen ausgeräumt und sogar noch von deren Uferbereichen weggerissen. Komplette primäre Falloutpakete von mehreren Kubikmetern Größe brachen durch Unterspülung ab und schwammen als Flöße mit der Flut stromabwärts. An anderen Stellen wurden sie angetrieben und zum Teil kopfüber übereinander gestapelt. Das bedeutet, dass die Tephraablagerungen zum Zeitpunkt ihrer Mobilisierung noch trocken waren. Denn nur so konnten die lediglich im trockenen Zustand schwimmfähigen Bimse das Gewicht der Gesteinsbruchstücke kompensieren. Demnach fiel zwischen den Überflutungsphasen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten immer wieder Tephra auf trockenen Grund – selbst tief in den Altarmen, die zuvor bereits meterhoch unter Wasser gestanden hatten.

Die hohen Fließgeschwindigkeiten, die großen Wasservolumina und die mehrfache Ausräumung riesiger Tephramassen aus den Altarmen noch vor Entstehung des Hauptsees zeigen, dass wir es hier nicht mit einer einfachen Hochwassersituation zu tun haben. Der schon durch den Fallout komplett überfrachtete Rhein hätte niemals eine solch hohe Transportkraft und Fließgeschwindigkeit entwickeln können. Unter normalen Abflussbedingungen

befördert er heute lediglich Komponenten in Sandkorngröße und kleiner. Nur bei den wenigen Hochwasserereignissen im Jahr kann er auch größere Steinchen verfrachten. Aber während der Laacher-See-Eruption wurde ja nicht mehr Wasser aus dem Oberlauf angeliefert. Außerdem fällt auf, dass die Überflutungsphasen im nördlichen und im südlichen Altarm sowie in deren Nebenarmen zeitgleich stattfanden. Sie betrafen all diese Rinnen auf ihrer kompletten Länge in vergleichbarer Weise.

Insgesamt lassen diese Indizien nur einen Schluss zu: Riesige Wassermengen waren mehrfach an kurzlebigen, instabilen Dämmen aus losem Falloutmaterial irgendwo im Bereich von Koblenz aufgestaut und rauschten nach dem Dambruch mit hoher Geschwindigkeit durch das Neuwieder Becken flussabwärts. Beim gegenwärtigen Stand unserer Forschungen können wir mit Sicherheit fünf, möglicherweise sogar sechs große Überflutungsphasen rekonstruieren.

Bildung eines riesigen natürlichen Stausees

Der eigentliche See begann sich am stabilen Hauptdamm im Bereich der Brohltalmündung aufzustauen. Es gab also zeitgleich an zwei verschiedenen Stellen Blockaden, wobei diejenigen bei Koblenz instabil waren und mehrfach brachen. Jeder Bruch führte zu Flutwellen im Neuwieder Becken und einer sprunghaften Vergrößerung des bei Brohl aufgestauten Sees.

Bei der Auswertung unserer hoch aufgelösten Korrelationen zeigte sich, dass sich die Dynamik des Tephrafalls in den Rhein – und damit der Eruptionsverlauf – unmittelbar in den Überflutungen widerspiegelt. Anscheinend hielt sich die Aufdämmung bei Koblenz nur so lange, wie neues Material angeliefert wurde, also während des aktiven Fallouts. Folglich kam es in der Pause nach dem Ende eines großen Tephregens fast stets zum Bruch der Koblenzer Dämme.

Durch die Verzahnung der Ausbruchsphasen mit den Überflutungsereignissen im Neuwieder Becken konnten wir die Dauer einiger Eruptionsintervalle und Pausen über Berechnungen des Wasservolumens ziemlich genau bestimmen. So kamen wir auf die erstaunlich kurzen Zeiträume von wenigen Stunden. Dies ist ein sehr seltener Glücksfall. Normalerweise lässt sich bei prähistorischen Ausbrüchen die Dauer einzelner Eruptionsergebnisse nur sehr schwer abschätzen.

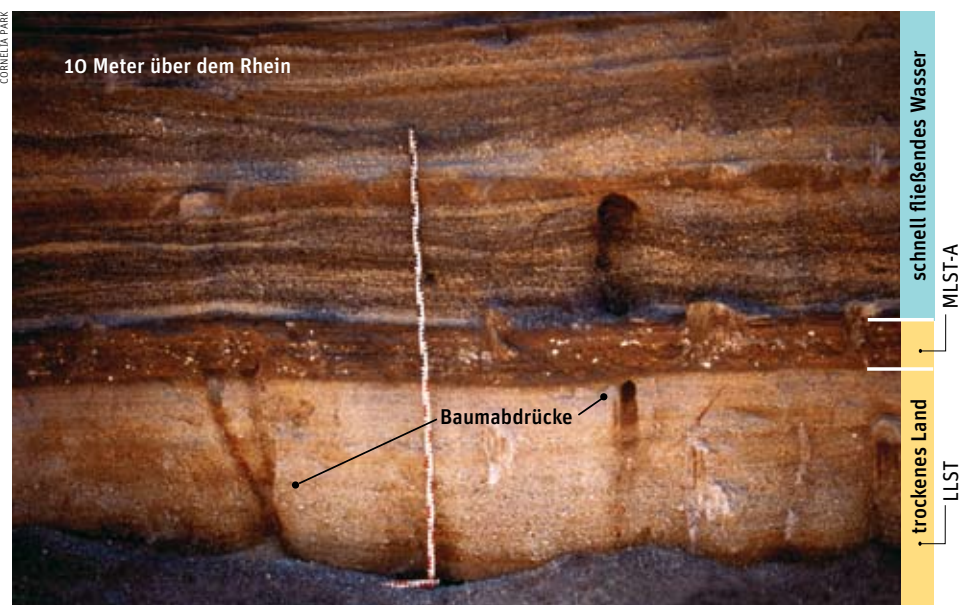
Der Kampf des Rheins mit den Tephramassen im Neuwieder Becken endete erst, als der bei Brohl aufgestaute See so weit angewachsen war, dass eine zusammenhängende Wasserflä-

che bis Koblenz reichte. Danach stieg der Wasserspiegel stetig an, während der See immer größer wurde und der Rückstau immer weiter stromaufwärts reichte. Das konnten wir anhand der Ablagerungen des Eruptionsintervalls ULST-A dokumentieren, die zu Beginn der vierten und letzten Ausbruchsphase deponiert wurden. Demnach übertraf der Anstieg des Wasserspiegels zunächst die Sedimentationsrate von ULST-A, blieb mit der Zeit aber dahinter zurück. Das ist plausibel; denn wegen der wachsenden Seeoberfläche erforderte es immer mehr Wasser, den Wasserspiegel um den gleichen Betrag anzuheben. Die 1,66 Kubikkilometer für die letzten zehn Meter Wassersäule sammelten sich während der Eruptionspause zwischen ULST-A und ULST-B an, was ausgehend von der heutigen mittleren Wasserführung des Rheins wohl neun bis zehn Tage in Anspruch genommen hat.

Wir fanden noch auf 83 Meter Meereshöhe ein dünnes Bimsfloß. Die sehr feinkörnigen ULST-A-Ablagerungen darunter sind nicht durch Wellenbewegung gestört. Demnach befand sich diese Stelle ein gutes Stück vom Seeufer entfernt in einer Wassertiefe, bis zu der die Wellen nicht vordrangen. Der maximale Seespiegel erreichte vermutlich 85 Meter Meereshöhe, das heißt 27 Meter über dem damaligen Rheinbett.

Rein rechnerisch müsste sich der Rückstau bis 140 Kilometer stromaufwärts vom Damm erstreckt haben, also bis zum heutigen Mannheim im nördlichen Oberrheingraben. Dort könnte ein See ähnlicher Ausdehnung wie im Neuwieder Becken entstanden sein, wenn gleich er wohl wesentlich flacher und von vielen Inseln und Halbinseln zergliedert war. Das bleibt freilich reine Spekulation, da wir die

Baumabdrücke in den Ablagerungen der frühen Ausbruchsphase (LLST) beweisen, dass hier vor der Laacher-See-Eruption trockenes Land war. Auch der gesamte Fallout der zweiten (MLST-A) und dritten Eruptionsphase (MLST-B/C) fiel noch ins Trockene. Monströse Flutwellen, die durch den Bruch eines Damms bei Koblenz entstanden, räumten danach die MLST-B/C-Schicht komplett ab und ließen Gesteinsbruchstücke (grau) sowie bereits wassergesättigte und daher nicht mehr schwimmfähige Bimse (weiß) zurück. Die Sedimentstrukturen deuten auf sehr hohe Fließgeschwindigkeiten von ein bis zwei Meter pro Sekunde. Die Flutwellen reichten an dieser Stelle mindestens zehn Meter über den Rhein.



Verhältnisse im Oberrheingraben bisher noch nicht näher überprüfen konnten. Der Rückstau reichte sicherlich auch weit in die Nebenflüsse hinein – bei der Mosel eventuell sogar mehr als 60 Kilometer stromaufwärts. Der See umfasste insgesamt 2,55 Kubikkilometer und sollte sich, wieder die heutige Wasserführung des Rheins vorausgesetzt, innerhalb von gut zwei Wochen gebildet haben.

Dammbruch und verheerende Flutwelle rheinabwärts

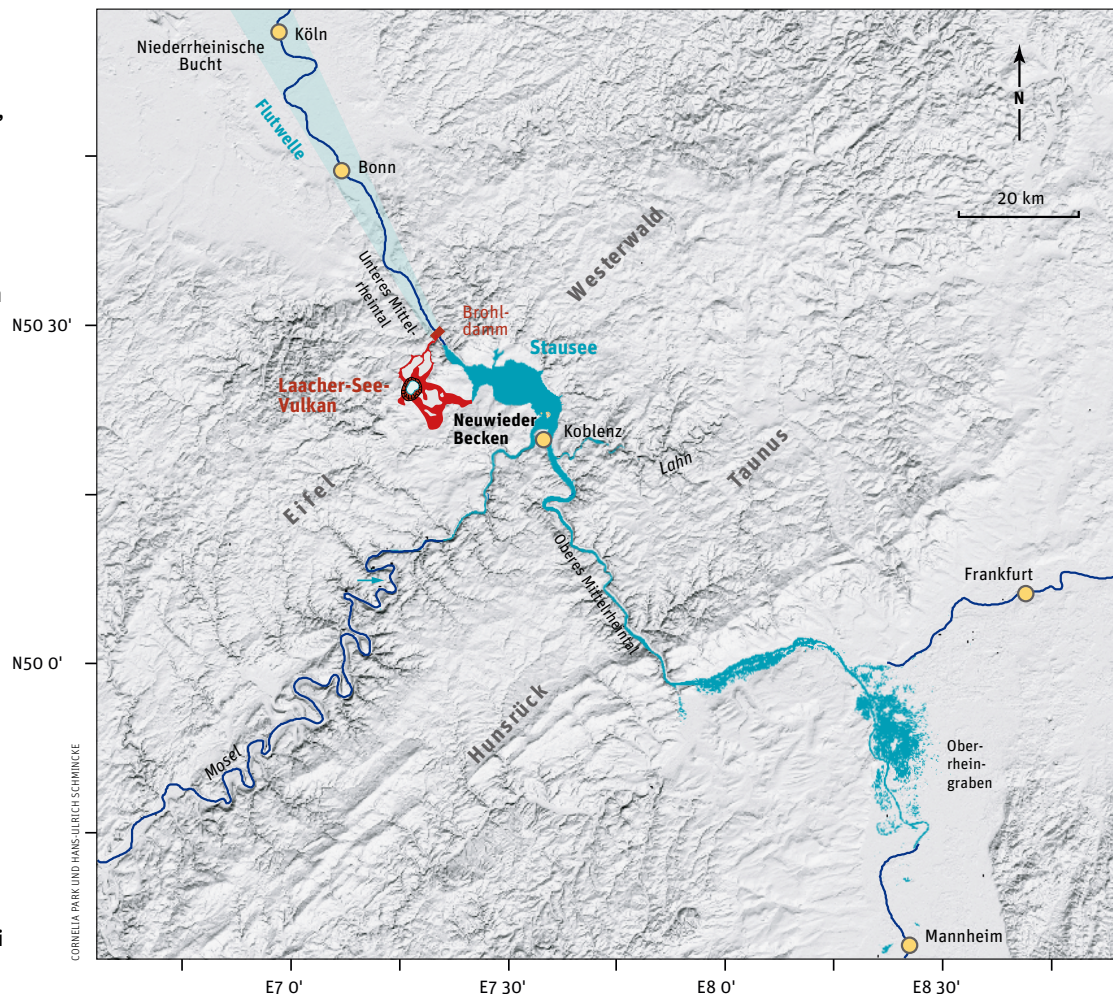
Schließlich brach auch der Hauptdamm an der Mündung des Brohlbachs. Das muss gegen Ende der Pause zwischen den Eruptionen ULST-A und -B geschehen sein; denn im höheren Abschnitt des Sees ist die Bimsfloßschicht, die auf der Wasseroberfläche trieb, unmittelbar auf primären Ablagerungen des Eruptionsintervalls ULST-A gestrandet. Möglicherweise haben die heftigen Explosionen während der Eröffnungsphase von ULST-B starke Erdbeben ausgelöst, die den Kollaps des oberen Dammschnitts bewirkten.

Bei der Klärung der Frage, wie schnell der See nach dem Dammbruch auslief, hilft der Umstand, dass ULST-B aus einer alternie-

renden Abfolge von feinkörnigen und größeren Aschenlagen besteht. Deren Anzahl nimmt systematisch mit der Höhe ab, in der man sie heute findet. Im obersten Bereich des ehemaligen Sees bis etwa 15 Meter unterhalb seines Spiegels ist die komplette ULST-B-Abfolge auf die gestrandeten Bimsflöße gefallen. Von da ab fehlen jedoch, je tiefer die Schicht sich befindet, immer mehr der unteren Lagen. Diese müssen demnach in einen noch verbliebenen Wasserkörper gefallen sein. Das aber heißt, dass sich der Seespiegel beim Dammbruch zunächst schlagartig um etwa 15 Meter erniedrigt hat. Fast denselben Wert liefert auch die Modellierung des Wasservolumens, das nötig war, um die rekonstruierten Überschwemmungen im Bereich der Ahrmündung sechs Kilometer stromabwärts des Brohldamms hervorzurufen.

Man kann sich vorstellen, welche gewaltige Flutwelle nach dem Dammbruch mit hoher Geschwindigkeit rheinabwärts raste. Leider finden sich im zentralen Talbereich heute keine Spuren mehr davon. Sedimente dort hat der Rhein später wieder komplett abgetragen und umgelagert. Allerdings existieren noch Ablagerungen vom Rand der Flutwelle in den

Diese großräumige Karte illustriert das mögliche Ausmaß des Rhein-Rückstaus. Er müsste sich, wenn man eine Wasserspiegellhöhe von 85 Metern über dem Meer und die heutige Topografie zu Grunde legt, rund 140 Kilometer stromaufwärts bis in den nördlichen Oberrheingraben erstreckt haben. Dort bildete sich demnach ein zweiter See von ähnlicher Ausdehnung wie der im Neuwieder Becken, der allerdings wesentlich flacher und von vielen Inseln zergliedert war. Handfeste Belege für seine Existenz fehlen bis jetzt aber noch. Der Rückstau betraf auch die Nebenflüsse und reichte etwa bei der Mosel vermutlich 60 Kilometer weit stromaufwärts (Pfeil). Alles in allem bedeckte der durch die Laacher-See-Eruption aufgestaute See eine Fläche von 300 Quadratkilometern und beinhalten 2,5 Kubikkilometer Wasser. Wie Ablagerungen beweisen, erstreckte sich die Flutwelle nach dem Bruch des Damms bei Brohl mindestens bis Köln.



Altarmrinnen auf der höher gelegenen ehemaligen Flussaue. Am differenziertesten und ausagekräftigsten sind sie sechs Kilometer flussabwärts des Damms, einem »Goldene Meile« genannten Flussabschnitt südlich der Ahrmündung. Dort liegen rein aus Laacher-See-Tephra bestehende fluviatile Sedimente, die sehr schnell fließendes Wasser anzeigen, auf ehemals trockenem Terrain.

Die Flutwelle war im Bereich der Goldenen Meile etwa zehn bis zwölf Meter hoch. Zwar erreichte ein außergewöhnliches Hochwasser dort 1926 ebenfalls die Elf-Meter-Marke. Vor dem Dammbbruch war der Rheinkanal flussabwärts von der Barriere jedoch praktisch komplett leer, so dass plötzlich eine zwölf Meter hohe Wasserwand flussabwärts raste. Da das Rheintal unmittelbar hinter dem Damm deutlich enger ist, dürfte diese Wand dort noch wesentlich höher gewesen sein.

Bis 52 Kilometer stromabwärts des Damms, südlich von Köln, konnten wir Spuren der Flutwelle nachweisen. Ihre Auswirkungen reichten sicher noch weiter – vermutlich bis nach Holland. Doch entsprechende Sedimente lassen sich hier nur noch äußerst schwer finden, weil das Gefälle des Rheins sehr gering ist, so dass er ältere Ablagerungen in viel höherem Maße erodiert hat als weiter flussaufwärts.

Nördlich von Bonn erfasste die Flutwelle unseren Untersuchungen zufolge einen fünf Kilometer breiten Streifen, wobei sich die Überschwemmung jedoch auf tiefer gelegene Auenbereiche und Rinnen beschränkte. Würde Ähnliches heute passieren, wären die Auswirkungen auf die ufernahen Gebiete verheerend.

Der nach dem Hauptdammbbruch verbliebene Restsee war stellenweise noch 14 Meter tief. Er wurde wesentlich langsamer abgelassen als der obere Teil – vermutlich indem abströmendes Wasser den Restdamm und die Dammbbruchmassen schrittweise erodierte. Dafür spricht die systematische Abnahme der ULST-B-Lagen in diesem unteren Seebereich.

Ist der Eifelvulkanismus erloschen?

Die für die heutigen Bewohner des Rheinlands interessante Frage lautet natürlich, wie wahrscheinlich es ist, dass sich das Geschehen von vor 12900 Jahren wiederholt. Die rund 340 Vulkane der Eifel verteilen sich auf zwei Vulkanfelder und sind mit Abstand die jüngsten in ganz Deutschland. Die anderen deutschen Vulkangebiete wie Rhön, Hegau oder Kaiserstuhl haben ein Alter von vielen Millionen Jahren.

Die Eifelvulkane entwickelten sich auf dem Rheinischen Schild, einem großen Lithosphärenblock, der während der letzten 40 Millio-

nen Jahre in mehreren Phasen gehoben wurde und sich in einigen Bereichen auch heute noch hebt. Vermutlich steigt hier kristallines, aber zähplastisches Gestein des Erdmantels langsam aus der Tiefe auf und schmilzt wegen der Druckentlastung stellenweise.

Bis in die 1980er Jahre überwog die Auffassung, dass die vulkanische Aktivität in der Eifel endgültig erloschen sei. Doch diese Ansicht basierte weder auf überzeugenden empirischen Daten noch auf wissenschaftlicher Logik. Inzwischen gibt es Indizien dafür, dass die Magmaproduktion in der Tiefe weitergeht.

Die allermeisten Vulkane der Eifel sind Schlackenkegel und Maare, deren Eruptionen nur lokal begrenzte Auswirkungen hatten. Insofern bildet der Laacher-See-Vulkan eine Ausnahme. Doch es ist nicht die einzige: Zwei ihm benachbarte noch ältere Vulkane in der Osteifel hatten jeweils eine Aktivitätsphase, in der sie bei mehreren hochexplosiven Ausbrüchen ebenfalls sehr weite Gebiete verwüsteten. In beiden Fällen zog sich der Eruptionszyklus über einen Zeitraum von einigen 10000 Jahren hin. Zwischen den Aktivitätsphasen der zwei Vulkane lagen über 100000 Jahre der Ruhe. Danach folgte eine ebenso lange Zeit der Inaktivität, bis vor 12900 Jahren schließlich die Laacher-See-Eruption stattfand.

Dieses Muster ist auffallend regelmäßig. Per Analogieschluss legt es nahe, dass der Laacher-See-Vulkan mit seinem Ausbruch einen neuen, dritten Zyklus eingeleitet haben könnte. Wenn dieser sich wie im Fall der beiden Vorgänger über mehrere 10000 Jahre erstreckt, wären weitere hochexplosive Eruptionen zu erwarten.

Obwohl es im Moment keinerlei konkrete Anzeichen für ein Wiedererwachen gibt, ist es sinnvoll, bestimmte Parameter wie die Mikroseismik oder Menge und Zusammensetzung der aus dem Krater austretenden Gase längerfristig systematisch zu überwachen, um eine natürliche Fluktuation von einer progressiven Entwicklung unterscheiden zu können.

Sollte der Laacher-See-Vulkan tatsächlich wieder ausbrechen, werden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit erneut pyroklastische Ströme bilden, die über dieselben Seitentäler wie vor 12900 Jahren den Rhein erreichen. Auch heute herrschen noch Westwinde in der Stratosphäre, so dass die Hauptmasse des Fall-outs wie seinerzeit im Bereich des Neuwieder Beckens niedergehen dürfte. Eine erneute Aufstauung des Rheins wäre dann sehr wahrscheinlich. Wir möchten hier nicht in Alarismus verfallen, aber eine potenzielle Bedrohung besteht und muss bei längerfristigen Projekten und solchen mit hohem Gefährdungspotenzial berücksichtigt werden. ◀



Cornelia Park beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Laacher-See-Eruption, finanziell unterstützt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Sparkasse Koblenz. Derzeit erforscht sie am Leibniz-Institut für Meeresforschung (IFM-GEOMAR) in Kiel die kraternahen Auswirkungen der von dem Ausbruch verursachten Klimaänderung.

Hans-Ulrich Schmincke gilt als führender Experte für den Eifelvulkanismus. Von 1990 bis zu seiner Emeritierung 2003 leitete er die von ihm aufgebaute Abteilung Vulkanologie und Petrologie am IFM GEOMAR der Universität Kiel. Von 1983 bis 1991 war er Generalsekretär der internationalen vulkanologischen Gesellschaft (IAVCEI). Zu seinen vielen Ehrungen zählt die Verleihung des Leibnizpreises der Deutschen Forschungsgemeinschaft (1991).

Park, C., Schmincke, H.-U.: Lake Formation and Catastrophic Dam Burst During the Late Pleistocene Laacher See Eruption (Germany). In: Naturwissenschaften 84, S. 521–525, 1997.

Schmincke, H.-U.: Eifelvulkane. Aufbau, Entstehung und heutige Bedeutung. Görres, Koblenz. S. 1–185, 2008.

Schmincke, H.-U.: Volcanism. Springer, Heidelberg, S. 1–324, 2004.

Schmincke, H.-U.: Vulkanismus. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 1–264, 2000.

Schmincke, H.-U. et al.: Evolution and Environmental Impacts of the Eruption of Laacher See Volcano (Germany) 12900 a BP. In: Quaternary International 61, S. 61–72, 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/977241.

Von null auf sechzig

Mit Luft- oder Bodentemperaturen, die einen Menschen vor Kälte bibbern ließen, gelingt es Wärmepumpen, ganze Häuser zu heizen.

Von Mark Fischetti und Bernhard Gerl

Heizung und Warmwasseraufbereitung verbrauchen fast 90 Prozent der in privaten Haushalten genutzten Energie. Nach wie vor entsteht diese vor allem durch Verbrennen von Öl und Gas, doch hohe Brennstoffpreise und ökologische Nachteile motivieren immer mehr Bauherren, eine Alternative zu suchen. Sonnenkollektoren können vor allem im Sommer einen guten Teil des Energiebedarfs decken, doch nur bei günstiger Ausrichtung des Dachs und ausreichend großer Dachfläche. Auch Wärmepumpen wandeln im Grund Sonnenenergie in Heizwärme um, das aber ganzjährig und zu jeder Tageszeit – sie entnehmen sie der aufgewärmten Umgebungsluft eines Hauses oder dem Erdboden.

Das Funktionsprinzip ähnelt dem eines Kühlschranks (Spektrum der Wissenschaft 10/2008, S. 88): Ein flüssiges Kühlmittel wird durch ein so genanntes Expansionsventil gepresst, dehnt sich aus und verdampft. Dabei kühlt es ab, und zwar so stark, dass es nun auch aus einer Umgebung mit relativ niedriger Temperatur Wärme aufnehmen kann. Anschließend wird es von einem Kompressor wieder zu einer Flüssigkeit verdichtet. Die ist nun so heiß, dass sie zum Heizen taugt. Da Wärmepumpen auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau am effektivsten arbeiten, eignen sie sich vor allem für großflächige Heizkörper wie Fußbodenheizungen in Wohnräumen.

Luft-Wasser-Wärmepumpen entnehmen die Energie der Luft außerhalb des Hauses. Deren Temperatur sollte dann nicht unter null bis zwei Grad Celsius liegen. Bei Minusgraden muss eventuell ein elektrisches Heizgerät zugeschaltet werden, was die Kosten nach oben treibt. Dafür lässt sich eine solche Anlage dann im Sommer zur Kühlung verwenden, ein Umsteuerventil kehrt die Fließrichtung des Kühlmittels dazu um (siehe Grafik rechts).

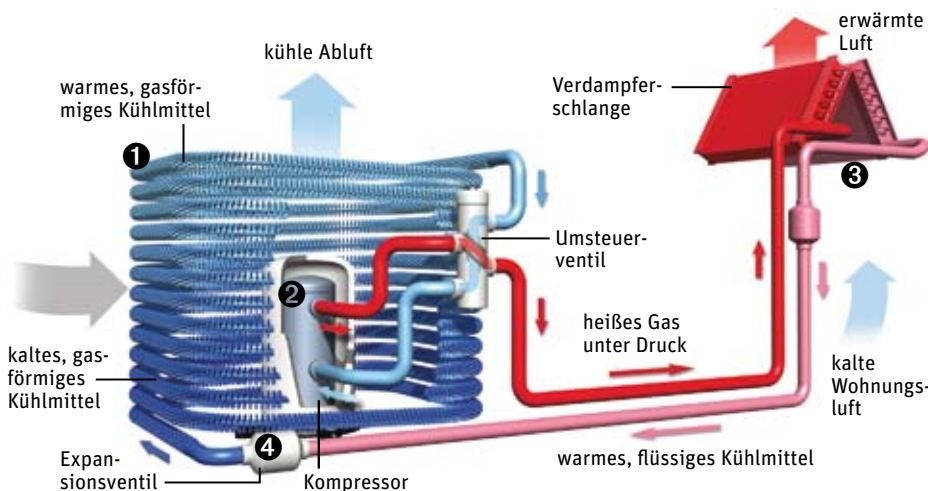
In unserer Klimazone sind Heizungen verbreiteter, die das Erdreich oder Grundwasser als Wärmequelle nutzen. Das Erdreich speichert solare Energie sehr gut und bleibt bis in die in Frage kommende Tiefe von 100 Metern das ganze Jahr über acht bis zwölf Grad

Celsius warm. Dann wird entweder über eine größere Fläche ein Rohrschlängensystem 20 Zentimeter unterhalb der Frostgrenze eingegraben (Erdwärmekollektoren) oder mit Tiefbohrungen eine beziehungsweise mehrere u-förmige Leitungen bis zu 100 Meter senkrecht hinabgetrieben (Erdwärmesonden). Als Kältemittel dient entweder konzentrierte Salzlösung (Sole) in der Bohrung, die zunächst Wärme auf das eigentliche Kältemittel der Pumpe überträgt. Mitunter wird Letzteres direkt in die Erde gepumpt, bei so genannten Einzelkreis-Systemen verzichtet man ganz auf ein Kältemittel und schickt direkt das aufzuheizende Wasser hinab. Dient Grundwasser als Wärmequelle, wird es aus der Tiefe hochgefordert und, nachdem es in der Wärmepumpe seine Energie auf das Kältemittel übertragen hat, an einer anderen Stelle wieder zurückgeleitet.

Ein Nachteil dieser Technik: Anders als Sonnenkollektoren verbrauchen Wärmepumpen viel Strom, vor allem für die Pumpen und den Kompressor. Der Energieverbrauch entspricht ungefähr 25 Prozent der von der Wärmepumpe gelieferten Wärmeenergie. Trotzdem arbeiten diese Systeme effizienter als konventionelle Heizungen und sind – obwohl teurer in der Anschaffung – auf lange Sicht kostengünstiger.

Wärmepumpen gibt es schon seit den 1950er Jahren, doch in den letzten Jahren sind sie wettbewerbsfähiger geworden, weil die Motoren und Kompressoren effizienter und billiger im Betrieb wurden, die Verflüssiger und Verdampfer mehr Wärme übertragen können und dabei auch noch kleiner geworden sind. In Deutschland werden bei etwa zehn Prozent der Neubauten Wärmepumpen, meist solche mit Erdwärmesonden, installiert. Bei Altbauanierungen kommen eher Luft-Luft-Wärmepumpen in Frage, die einfacher nachzurüsten sind. Insgesamt sind inzwischen zirka 300 000 Anlagen installiert.

MARK FISCHETTI ist Redakteur bei »Scientific American«, BERNHARD GERL arbeitet als freier Technikpublizist in Mainz.



Heizen im Winter

Warmes, gasförmiges Kühlmittel ① fließt durch einen Kompressor ②, der es zu einem heißen Gas verdichtet und es in das Haus weiterleitet. Dort nimmt die kühle Zimmerluft die Wärme auf. Das Kühlmittel kondensiert ③ und fließt zurück nach draußen, wo es durch ein Expansionsventil strömt und zu einem kalten Gas wird ④. Dabei nimmt es Wärme aus der Umgebungsluft auf, und der Zyklus beginnt von Neuem.

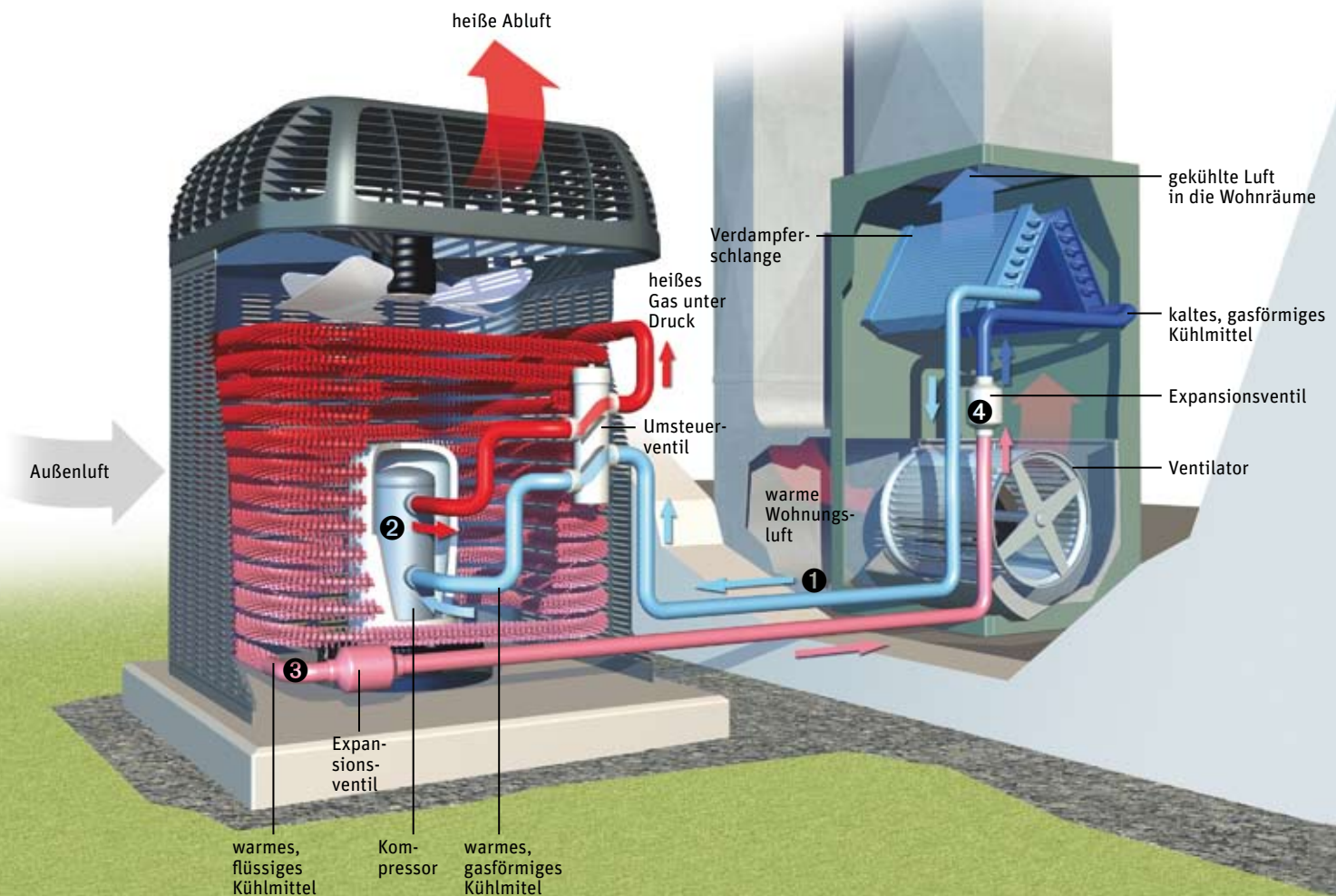
WUSSTEN SIE SCHON?

► **Heißwasser als Abfallprodukt:** Im Sommer heizen Wärmepumpen und Klimaanlage die Umgebung auf; das lässt sich nutzen, um über einen weiteren Kreislauf Brauchwasser zu erwärmen.

► Ob und wie stark eine Wärmepumpe zu einer **Einsparung von Treibhausgasen** führt, hängt vom Strommix eines Landes ab, denn etwa 25 Prozent der resultierenden Heizwärme stammen indirekt aus elektrischer Energie. In Ländern mit einem hohen Anteil an Kern-, Wasser- und Windkraftwerken ergeben sich insgesamt deutliche Emissionsvorteile gegenüber Ländern wie Deutschland mit einem hohen Anteil an Kohle- und Gaskraftwerken.

► **Energieversorger bieten** den Betreibern von Wärmepumpen Strom mitunter zu einem günstigeren Tarif. Allerdings müssen diese dafür das Recht einräumen, die Lieferung in Spitzenlastzeiten abzuschalten, maximal bis zu dreimal pro Tag für je zwei Stunden. In dieser Zeit kann ein Gebäude um ein bis zwei Grad abkühlen.

► **Im Jahr 1834** baute der Amerikaner Jacob Perkins erstmals eine Maschine, in der ein Kältemittel – bei ihm Äther – Wärme aufnahm und dabei verdampfte, an anderer Stelle komprimiert wurde und die Wärme wieder abgab. 1852 bewies der irische Physiker Lord Kelvin, dass sich nach diesem Prinzip umgekehrt auch heizen ließe. Realisiert wurden größere Wärmepumpen aber erst 1929 während der Wirtschaftskrise in den USA.



ILLUSTRATIONEN: GEORGE PRETSECK

Kühlung für den Sommer

In Luft-Luft-Wärmepumpen strömt ein warmes, gasförmiges Kühlmittel vom Inneren des Hauses ❶ durch einen Kompressor, der es zu einem heißen Gas verdichtet ❷. Draußen trägt Luft, die darübergeblasen wird, die Wärme weg, so dass es kondensiert und flüssig wird ❸. Die Flüssigkeit fließt durch ein Expansionsventil, das

wieder ein kaltes Gas aus ihr macht, ins Haus zurück ❹. Ventilatoren blasen in einem Verdampfer die warme Luft aus dem Haus durch die Leitungen mit dem kalten Gas, wobei sich diese Luft abkühlt und dann zurück in die Wohnräume geleitet wird. Das warme Gas wird wieder zum Kompressor geleitet, und der Zyklus beginnt von vorn.

Wie NANO das AUTO verändert

Manche ihrer Vorhaben klingen nach Sciencefiction. Doch längst haben Nanowissenschaftler anwendungstaugliche Neuerungen hervorgebracht, die sich in vielen Alltagsgegenständen wiederfinden. Insbesondere die Automobilindustrie setzt auf eine breite Palette an Nanoprodukten – und hat noch viele Pläne in der Schublade.

In Kürze

- ▶ Strukturen in der Größenordnung von milliardstel Metern verleihen Materialien oft ganz neue Eigenschaften. Auch die **Automobilindustrie** setzt immer mehr auf Nanotechnologie.
- ▶ Nanoprodukte im Auto dienen vor allem Umweltschutz und Verbrauchsreduzierung, Sicherheit und Komfort. Sie versprechen zum Beispiel effizientere Scheinwerfer, **verschleißfreie Motoren** und pflegeleichtere Oberflächen.
- ▶ Noch verhindern hohe Kosten und weiterer Forschungsbedarf oft, dass Neuerungen tatsächlich auf den Markt kommen. **Nanolacke** etwa oder blendfreie Rückspiegel gehören aber schon fast zum automobilen Alltag.

Von Björn Lohmann

Transparente Autodächer, die Sonnenenergie in Strom umwandeln, Lacke, die Kratzer selbst entfernen und auf Knopfdruck die Farbe wechseln, oder gar Fahrzeugkarosserien, die ihre Form der sie umströmenden Luft anpassen: An mehr oder weniger futuristischen Ideen, die sich mittels Nanotechnologie realisieren ließen, mangelt es der Automobilindustrie nicht. Zumal das Auto ein guter Kandidat ist, um Nanotechnologie in vielfältiger Form zum Einsatz kommen zu lassen oder auf Herz und Nieren zu testen, was – wie die Katalysatortechnik – in anderen Branchen erdacht wurde. Der Umwelt käme vor allem eine Verbrauchsminimierung zugute. Erreichen ließe diese sich, indem man Reibung und Verschleiß im Motor senkt oder durch neue Materialien Gewicht spart. »Nano« kommt sogar in Batterien oder Brennstoffzellen zum Einsatz, und auch effizientere Katalysatoren, die zudem auf Schwermetalle verzichten, würden die Umwelt entlasten.

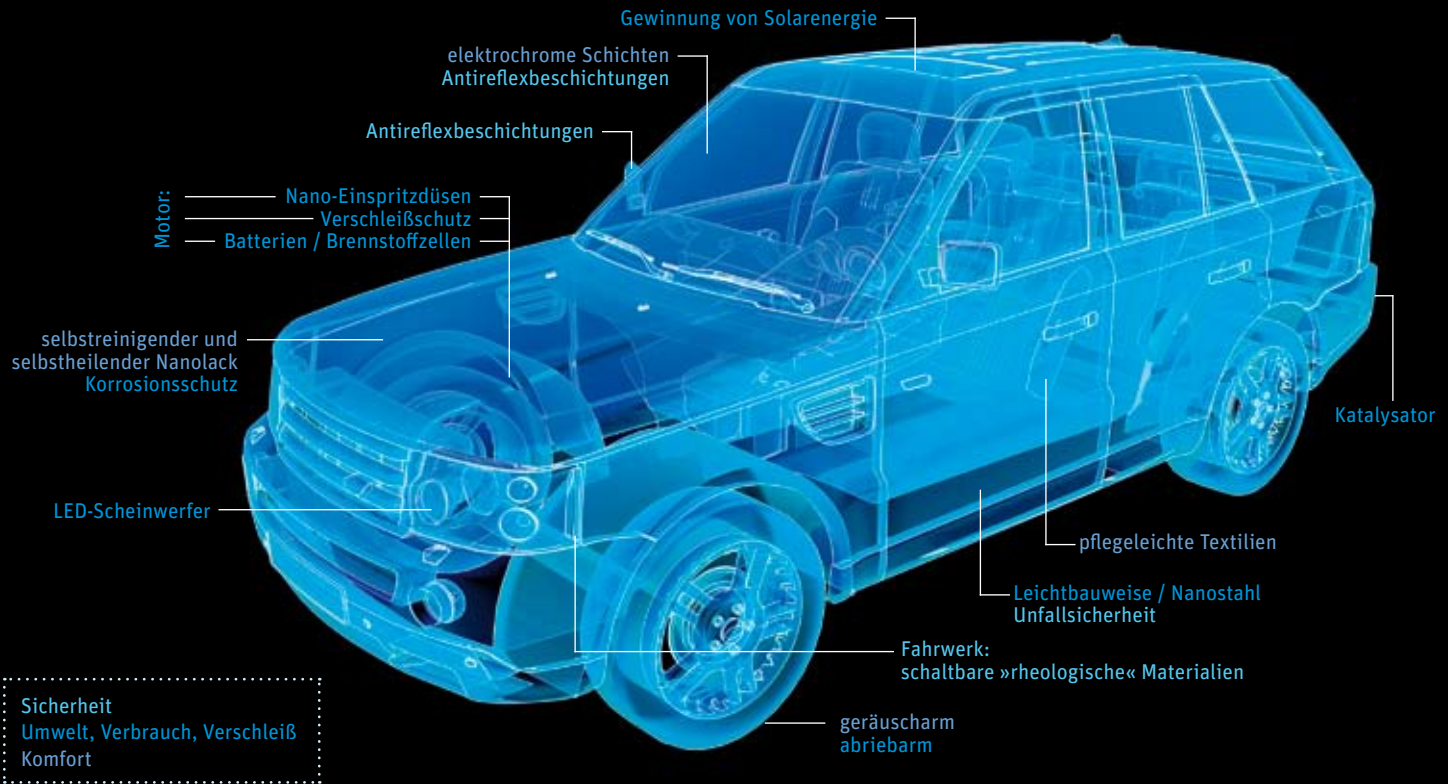
Ein weiterer großer Anwendungsbereich ist die Sicherheit. Nanosensoren könnten zahlreiche Daten über Wetter und Fahrbahnzustand, Motorsysteme und Reifendruck zusammentragen und beschichtete Spiegel und Scheiben die Sicht des Fahrers verbessern. LEDs mit hoher Lichtausbeute würden in Strom sparenden Scheinwerfern verwendet, und ermüdungsfreie Nanostähle

könnten die Zuverlässigkeit von Fahrzeugen im Güterverkehr erhöhen.

Nicht zuletzt profitieren Autofahrer auch von neuartigem Komfort – oder können zumindest davon träumen. Abschattbare Fenster, »selbstreinigende« Sitze und ebensolcher Lack oder gar die variable Dämpfung des Fahrwerks in voller Fahrt gehören zu dem, was Materialstrukturen mit Größenordnungen im Bereich von milliardstel Metern schon leisten oder zumindest versprechen.

Tatsächlich verfolgen Forscher und Ingenieure zahlreicher Firmen und Institute etliche konkrete Ansätze. Dabei hilft ihnen, dass sie viele Teilerfolge erzielt und manche Produkte in den letzten Jahren den Weg in die Serienfertigung gefunden haben oder auch in die Fertigung selbst, wo sich die Wartungsintervalle von Werkzeugmaschinen senken lassen. Andererseits: Allzu viel »Nano« wird Ihr Autohändler in der Regel nicht anbieten. Denn die Technologie ist bislang oft so teuer, dass sie gar nicht in den Massenmarkt gelangt. Ein elektrotransparentes Panoramadach etwa, dessen Durchlässigkeit für Licht sich per Knopfdruck regeln lässt, ist für gängige Mittel- und Oberklassefahrzeuge nicht vorgesehen – wohl aber für den edlen Maybach 62 S, den der Daimler-Konzern als »Chauffeur-Limousine« auf den Markt brachte.

Auch für Effekt- oder Flipflopplacke, die mittlerweile immerhin ausgereift sind, zahlt der Kunde ungern einen Aufpreis. Sie enthalten winzige Plättchen aus Silizium-, Alumi-



SPOOKY 2006 / FOTOLIA

nium- oder Eisenoxid, die von einem weiteren Metalloxid und einer Reflektorschicht umhüllt sind. Abhängig von Schichtfolge und Schichtdicke des Metalloxids kommt es bei Lichteinfall zu unterschiedlichen Interferenz- und damit Farbeffekten, die zudem auch abhängig vom Blickwinkel sein können.

Weitere Nanoanwendungen wiederum dürften ihre Premiere anderswo feiern, nicht aber im Auto. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme etwa präsentiert auf Messen derzeit ein Solarmodul aus organischem Farbstoff, das mit Hilfe feinsten Nanopartikel Sonnenlicht in Strom umwandelt und sich einfach auf Glasscheiben aufdrucken lässt. Fassaden und Dächer sind aber allemal geeigneter, um seine Leistungsfähigkeit zu demonstrieren, als die vielleicht zehn Quadratmeter Fläche der Autokarosserie. Auch der (noch in weiter Ferne liegende) Plan, Karosserieelemente durch elektrisches Stauchen und Dehnen von Nanoröhrchen dynamisch zu verformen, wird sicherlich eher im Flugzeugbau zum Einsatz kommen, um das Flügelprofil und damit Flugeigenschaften und Treibstoffverbrauch zu optimieren. Denn hier stünden die hohen Kosten in einem günstigeren Verhältnis zum Gesamtpreis des Produkts.

Was genau wir in den nächsten Jahren zu erwarten haben, ist noch unklar. Über Details künftiger Anwendungen schweigt sich die Branche oft aus oder spricht über ihre Ziele nur hinter vorgehaltener Hand. Aus Wettbewerbsgründen ist den Automobilzulieferern

und Forschungsinstituten, die meist die eigentliche Entwicklungsarbeit leisten, oft Geheimhaltung auferlegt. Was dennoch durchsickert, gibt aber gemeinsam mit den bereits in den Markt eingeführten Neuerungen einen guten Überblick über den Stand der Technik und ihre Zukunft.

Beispiel Lack. Während die ersten Nanolacke das Auto metallic- oder perlmuttfarben schimmern ließen, sieht man seit 2003 auch kratzfeste und selbstreinigende Autolacke auf deutschen Straßen. Klarlack auf der Basis von Nanoteilchen war eine der ersten Nanoanwendungen im Fahrzeugbereich und von Mercedes-Benz 2003 als »Weltpremiere« eingeführt worden. Kratzfester und damit sicherer vor Rollsplit oder auch den Borsten der Waschanlage wurde der Lack nämlich erst, als man gelernt hat, Siliziumkarbide darin einzulagern – sehr harte, anorganische Nanoteilchen meist keramischer Natur. Zunächst schwimmen die Keramiktteilchen in flüssigem Klarlack, der als äußerste Schicht auf die Autokarosserie aufgetragen wird. Erst beim Trocknen vernetzen sie sich und bilden so zusammen mit elastischen organischen Bindemitteln eine gleichmäßige Schutzschicht.

Fachleute sprechen von diesem Aushärteprozess als »Sol-Gel-Verfahren«, weil dabei aus einer Lösung (lateinisch *solutio*) durch die Vernetzung der eingelagerten Partikel ein Gel mit festkörperartigen Eigenschaften entsteht. Darin sind die Nanoteilchen wesentlich dichter gepackt als die Bestandteile herkömmli-

Sicherheit, Komfort sowie der Bereich Umweltschutz, Treibstoffverbrauch und Materialverschleiß sind die großen Anwendungsgebiete für Nanotechnologie im Auto. In den kommenden Jahrzehnten werden sie in praktisch alle Fahrzeugkomponenten vordringen.

WAS HEISST »NANO«?

Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter. Zwischen Nanoteilchen und Fußbällen besteht daher ein ähnliches Größenverhältnis wie zwischen einem Fußball und dem Planeten Erde. Als Nanotechnik wird der Einsatz von Partikeln und Oberflächenstrukturen bezeichnet, deren Größenordnungen zwischen einem und einigen hundert Nanometern liegen. Dies führt nicht einfach zu filigraneren Strukturen als in der Mikro-technik, vielmehr weisen die neuen Materialien oft völlig neue und vielfältig nutzbare Eigenschaften auf.

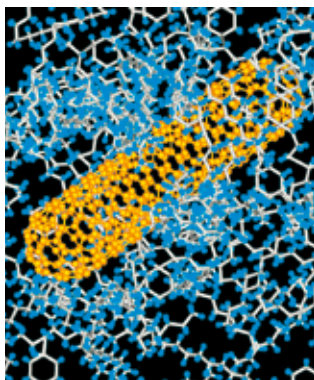
RÖHREN, WÜRFEL UND FasERN

Kohlenstoffnanoröhren sind winzige Röhren aus Kohlenstoff, deren Durchmesser im Größenbereich von Nanometern liegt. Vor rund 20 Jahren entdeckt, verdanken sie ihrer wabenartigen Struktur, dass sie leicht wie Kunststoff und fester als Stahl sind. Mittlerweile lassen sie sich mit doppelten Wänden, aber auch mit »Deckel« herstellen oder mit anderen Stoffen befüllen. Der weltweite Umsatz mit solchen CNTs (*carbon nanotubes*) könne in den nächsten Jahren bis zu zwei Milliarden US-Dollar erreichen, sagen Marktforscher.

Nanostrukturierte Materialien wie die Nanoröhren zeichnen sich unter anderem auch durch das extrem hohe Verhältnis zwischen ihrer Oberfläche und ihrem Volumen aus. Die »Nanowürfel« der BASF etwa weisen pro Gramm Material eine Oberfläche von beeindruckenden 4500 Quadratmetern auf. Das macht solche Strukturen zu idealen Kandidaten für Katalysatoren oder für Technologien zur Speicherung von Wasserstoffgas, da sich mit ihrer Hilfe mühelos die Energiedichten übertreffen lassen, die bei dessen gasförmiger oder flüssiger Speicherung möglich sind.

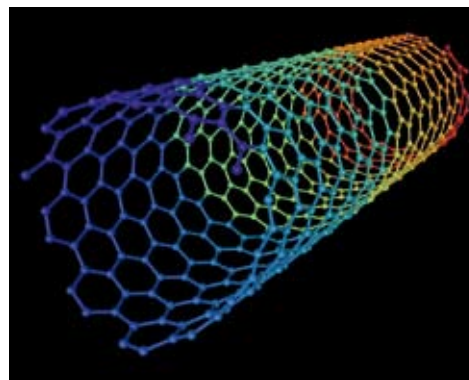
Schon seit ihrer Entdeckung werden allerdings auch immer wieder Befürchtungen laut, sie könnten unter bestimmten Umständen gesundheitsschädlich sein. Eine Studie in »Nature Nanotechnology« aus dem vergangenen Jahr zeigte, dass das Einatmen langer, dünner CNTs zu ähnlichen Folgen wie das Einatmen von Asbestfasern führen kann.

Die Supercomputersimulation (links) zeigt ein leichtgewichtiges Komposit aus einer Kohlenstoffnanoröhre (gelb) und einem Polymer. Es könnte bei einer besonderen Art von Auto zum Einsatz kommen: einem Mars-Rover der NASA. Die »Standard«-Form einer einwandigen Nanoröhre mit wabenartiger Struktur ist im mittleren Bild zu sehen. Die elektronenmikroskopische Aufnahme rechts zeigt Nanowürfel der BASF mit einer äußeren Kantenlänge von einigen Mikrometern. Die innere Struktur der Würfel, die der Wasserstoffspeicherung dienen sollen, liegt im Nanometerbereich.



cher Lacke. Im Fall der Entwicklung von Mercedes-Benz verbessert sich die Kratzfestigkeit um das Dreifache, auch glänzt das Auto selbst nach jahrelanger Nutzung noch sichtbar stärker als üblich. Offenbar nähern sich sogar noch härtere Klarlacke der Serienreife. Anders als die erste Generation von Zwei-Schicht-Lacken (wo über den eigentlichen Lack noch eine Klarlackschicht gelegt wird) soll die neue Generation als preiswerteres Ein-Schicht-System auch den Massenmarkt erschließen.

Die meisten Strukturen aus Nanoteilchen besitzen die Fähigkeit, sich selbst zu organisieren, sich also in bestimmten Mustern anzuordnen. Zerstört ein Kratzer dieses Muster, versuchen die benachbarten Teilchen, sich wieder wie zuvor zu vernetzen und gewissermaßen in den Kratzer hineinzufließen. Ein selbsteheilender Lack aus hochelastischen Kunstharzen, den Nissan 2005 als »Scratch Guard Coat« vorgestellt hat und der zum Beispiel bei den neuen Luxusmodellen der Nis-



san-Schwestermarke Infiniti zum Einsatz kommt, ist immerhin sehr kratzfest und behebt kleinere Schäden selbst – zumindest dann, wenn nicht die gesamte Dicke der Lackschicht betroffen ist. Nach drei Jahren verliert er allerdings seine Wirkung.

Praktisch schon wieder von den Straßen verschwunden ist selbstreinigender Lack, weil die Kunden die erheblich mattere Optik ihrer Autos nicht akzeptierten. Das Prinzip der Selbstreinigung basiert auf dem weithin bekannten Lotus-Effekt. Die Oberfläche dieses Lacks enthält unzählige Wasser abweisende Spitzen aus Cutin (eine polyesterartige Substanz, die in Pflanzenzellen vorkommt), die Wasser einfach abperlen lassen, wodurch es auch den Schmutz mit fortspült. Genau diese Spitzen streuen jedoch das Licht und sorgen für das matte Aussehen. Attraktiver wäre hingegen ein Lack, der aus zwei unterschiedlichen elektrisch geladenen Farbpigmenten besteht, die sich im Lack bewegen können. Abhängig vom angelegten elektrischen Feld wandern einmal die einen, dann wieder die anderen Farbpigmente an die sichtbare Lackoberfläche – das Fahrzeug wechselt seine Farbe.

Die wohl utopischste Idee auf dem Gebiet der Nanolacke besteht indessen in einer Fahrzeugaußenhaut, die Sonnenlicht in Strom umwandelt. Statt solcher Fotovoltaik-Lacke der Zukunft kommen bislang allerdings eher biegbare und nanostrukturierte Farbstoffsolarzellen, auf der Karosserie angebracht, als bescheidene Ergänzung der elektrischen Energieversorgung in Frage. Auch hier hilft die Sol-Gel-Technik. Forscher unter anderem der Fraunhofer-Institute für Silikatforschung und für Solare Energiesysteme beschichteten die Zellenoberfläche mit 10 bis 35 Nanometer großen Siliziumdioxidkügelchen. So reduzierten sie den rund zehnprozentigen Verlust, der durch Reflexion entsteht, um über fünf Prozentpunkte, weil die Zellen kaum noch Licht zurückwerfen.

Anders als bei herkömmlichen Solarzellen liefert bei den Farbstoffsolar- oder Grätzelzellen nicht Silizium die benötigten Elektro-





nen, sondern ein organischer Farbstoff, analog zum Chlorophyll bei der pflanzlichen Photosynthese. Eine nanoporöse Titanoxidschicht mit großer Oberfläche leitet die Elektronen dann weiter. Farbstoffsolarzellen funktionieren schon bei sehr schwachem Licht, allerdings sind Lichtausbeute und Wirkungsgrad vergleichsweise gering. Dafür sind sie umweltfreundlicher und in der Serienfertigung um potenziell 80 Prozent billiger als Siliziumzellen. Die großflächige Produktion der seit Anfang der 1990er Jahre bekannten Technologie steht allerdings erst noch bevor.

Weg mit dem Dreck

Nanotechnologie bietet aber nicht nur bei Sonnenschein Vorteile. Beschlagen an feuchten Tagen die Scheiben, kommt immer öfter die erstmals 2001 von Audi für Scheinwerferscheiben eingeführte Anti-Beschlag-Beschichtung ins Spiel. Wie funktioniert diese wohl älteste Serienanwendung der Nanotechnik im Fahrzeug? Normale Glasscheiben weisen an ihrer Oberfläche eine amorphe, also unregelmäßige Struktur aus Siliziumoxid auf. Silanole – Molekülgruppen aus Silizium, Sauerstoff und Wasserstoff – sorgen dort für eine Wasser anziehende Wirkung. Wassertropfen liegen daher sehr eng und flach an der Oberfläche an und perlen gleichmäßig ab, ohne die Lichtbrechung wesentlich zu verändern. In der Praxis binden sich jedoch auch winzige Wasser abweisende und organische Schmutzpartikel an die Scheibe. Dann aber fließen die Wassertropfen nicht mehr schnell ab, sondern stehen gewissermaßen von der Scheibe ab und sorgen für unerwünschte Lichtstreuung.

Ändern die Forscher jedoch die nanoskalige Struktur der Scheibe, erreichen sie »Superhydrophilie«, also eine extreme Wasseranziehung. Dazu ordnen sie negativ geladene, hydrophile Nanoteilchen in einem gleichmäßigen, transparenten Netzwerk auf der Glasoberfläche an. Ihre elektrische Ladung sorgt automatisch für gleichmäßige Abstände zueinander. Fällt Regen auf die Scheibe, wird das Wasser von den energiereichen Nanoteilchen

angesaugt, und es bildet sich eine sehr dünne, gleichförmige Schicht. Kommt mehr Wasser hinzu, als die Oberfläche binden kann, fließt die Schicht nach unten, ohne dabei ihre Form zu verändern.

Superhydrophilie bietet darüber hinaus einen Ansatz für leicht zu reinigende Autolacke. Sie verhindert zwar das Andocken von Schmutz nicht so erfolgreich wie Wasser abweisende Oberflächen, aber schon wenig Regen genügt, um die Sauberkeit superhydrophiler Flächen wiederherzustellen. Die Forscher von Audi beispielsweise stellten fest: Eis, das sich im Winter über Nacht gebildet hat, verschwindet von einer entsprechenden Windschutzscheibe binnen nur fünf Minuten, mit Scheibenwischereinsatz sogar in weniger als drei Minuten – selbst bei Außentemperaturen von minus 18 Grad Celsius. Die Lichtbrechung bleibt also gering und verändert sich überall im gleichen Maß – anders als wenn dicke Tropfen über das Glas wandern. Gleichzeitig werden auch hydrophobe, also Wasser abweisende Nanostrukturen intensiv erprobt, die auf Scheiben ähnlich dem Lotus-Effekt das Anhaften von Schmutz verhindern, Wasser leicht abperlen lassen und so auch die Blendwirkung nasser Scheiben verringern.

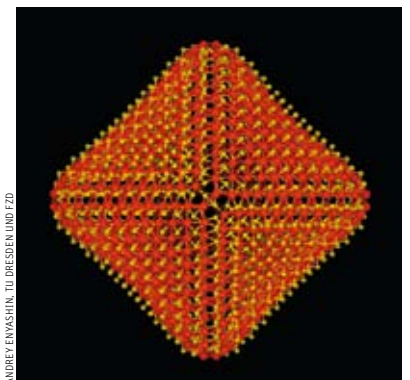
Im Autoinnenraum hingegen existieren andere Anforderungen. Während der Motteneffekt Wasser abweisende Lacke matt erscheinen lässt (Kasten S. 94), erfüllt er auf den Abdeckscheiben von Tachometern und anderen Instrumententafeln eine wichtige Funktion. Hier vermindert er nämlich die Reflexion und verbessert damit die Sicht des Fahrers. Einem ähnlichen Zweck dient auch die Elektrophoretik, eine schon von mehreren Herstellern eingesetzte Kombinationsanwendung von Mikroelektronik und Nanotechnologie. Sie sorgt dafür, dass Scheinwerferlicht, das auf die Rückspiegel trifft, den Fahrer nicht blendet. Von Fotozellen gesteuert, wird an eine elektrochrome Oberflächenschicht eine Spannung angelegt. Dies führt zu einem Fluss von Lithiumionen, die sich in einer umkehrbaren Reaktion mit Wolframoxid zu stark absorbierenden

Herkömmlicher Klarlack enthält lange Molekülketten aus Bindemittel und Vernetzer (Illustration im linken oberen Bildteil). Durch höheren Vernetzungsgrad und keramische Nanopartikel (oben rechts) wird er kratzfester. Rund 40 millionstel Meter dick, bildet er den Abschluss mehrerer Lagen (durch Farbstreifen angedeutet) der insgesamt 100 millionstel Meter dicken Lackschicht auf einer Autokarosserie.



MERCEDES-BENZ

Auch die Form von Nanoteilchen ist für ihre Funktion wichtig, wie bei diesem mehrwandigen Nano-Oktaeder aus Molybdändisulfid. Solche Partikel helfen, Kraftstoff zu entschwefeln – umso effektiver, je kleiner sie sind.



ANDREY LEVASHIN, TU BREITENBURG

MOTTENAUGENEFFEKT

Motten, wie Nachtfalter umgangssprachlich meist genannt werden, sehen gut im Dunkeln, weil ihre Augen das Restlicht optimal nutzen. Jede normale Oberfläche reflektiert eine gewisse Menge Licht, die Oberfläche der Mottenaugen hingegen besteht aus einer dichten Ansammlung konischer Zäpfchen, die kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Zusätzlich haben die außen gelegenen Zäpfchen einen kleineren Durchmesser als die inneren. Beides zusammen bewirkt, dass sich die Brechung der Lichtstrahlen an keiner Stelle abrupt, sondern stets kontinuierlich verändert – Reflexionen bleiben aus.

Die technische Version dieses Effekts erfüllt etwa auf Abdeckscheiben von Tachometern eine wichtige Funktion. Dazu wird auf beide Seiten dieser Scheiben im Tauchverfahren eine Sol-Gel-Schicht aufgebracht. Die winzigen Noppen aus Siliziumoxid und Titanoxid verringern die Lichtreflexion an der Scheibe von vier bis acht Prozent auf weniger als ein Prozent, indem sie den Übergang zwischen der Lichtbrechung in Luft und in Kunststoff glätten. So erlauben sie auch bei ungünstigem Lichteinfall zuverlässige Durchsicht. Außer den gängigen Bedienelementen im Auto kommt dies auch »Head-up-Displays« zugute, wie sie BMW bereits 2003 in die Serienproduktion übernahm.

Farbzentren verbinden, wodurch der Innen Spiegel abdunkelt.

Nicht nur für den Fahrer, sondern auch für seine Begleiter ist ein weiteres Hilfsmittel interessant: die fotokatalytische Oberfläche. Dabei werden ultraviolette Strahlen im Sonnenlicht in Verbindung mit Feuchtigkeit in Textilien genutzt, um darin organische Substanzen abzubauen. Das hält Sitzflächen sauber, geruchs- und keimfrei. Wichtig ist eine hohe Reaktionsfreudigkeit der fotokatalytischen Oberflächen, denn gerade im Fahrzeuginnenraum herrschen nur geringe UV-Intensitäten. Momentan versuchen Forscher auch, Titanoxidteilchen so zu verändern, dass sie schon von sichtbarem Licht zur Fotokatalyse angeregt werden. Entsprechende Oberflächen sind obendrein hydrophil, der entstehende Wasserfilm ermöglicht also, Schmutz leicht fortzuwischen. Noch besser wäre natürlich, wenn an den Fahrzeugsitzen überhaupt kein Schmutz haften bliebe. Ein Netzwerk aus Silikaten etwa, in das Nanoteilchen aus Silber eingebettet sind, lässt sich mit einer Kohlenstoff-Fluor-Verbindung beschichten. Dann fungiert es als chemikalienbeständige und antibakterielle Textilimprägnierung, die zudem Schmutz und Wasser abweist.

Eine ganz andere Art von Komfort verspricht die Adaptionen, die mechanischen Strukturen zu einstellbaren Charakteristika verhilft. Beispiel: die Dämpfung des Fahrwerks. Mikro- oder nanoskalige Partikel verleihen »rheologischen« Flüssigkeiten die Fähigkeit, auf äußere elektrische oder magnetische Felder binnen Sekundenbruchteilen mit starken Änderungen ihrer Viskosität zu reagieren. So ließe sich das jeweilige Bedürfnis nach mehr Sicher-

heit durch härtere Dämpfung beziehungsweise ein komfortableres Fahrgefühl durch weichere Dämpfung erfüllen – oder die Dämpfung automatisch der Straßenlage anpassen.

Neben Komfort und Fahrsicherheit steht derzeit auch der Benzinverbrauch im Mittelpunkt des Interesses. In den letzten 20 Jahren sind Autos um mehr als ein Fünftel schwerer geworden. Sicherheitsanforderungen, Assistenzsysteme, Vorrichtungen zur Einhaltung von Emissionsrichtlinien und Komfortzubehör wie CD-Spieler und Bordcomputer gehen deutlich ins Gewicht, ohne dass Leichtbautechnik dies hätte kompensieren können. Sehr leichte Nanoverbundstoffe könnten teilweise Abhilfe schaffen. Die Daimler AG setzt unter anderem auf mit Schichtsilikaten und Kohlenstoffnanoröhrchen gefüllte Thermoplaste. Solche Kunststoffe sind sehr stabil, lassen sich aber unter Wärmezufuhr mit Hilfe des Spritzgussverfahrens in praktisch jede Form bringen. Die Fahrzeugbranche verwendet vor allem Polypropylen-Mischungen, die ihre Stärke im Karosseriebau allerdings erst entfalten, wenn sie mit Kohlenstoffnanoröhrchen gefüllt sind, winzigen maschendrahtartigen Rollen, die lediglich aus Kohlenstoffatomen bestehen. Geringes Gewicht und hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Elastizität kombinieren sie sogar mit elektrischer Leitfähigkeit. Gerade Karosserieteile, die – wie Kühlergrill oder Heckklappe – auch schon durch kleinere Unfälle in Mitleidenschaft gezogen werden, eignen sich als Einsatzfeld, verlangen aber auch nach besonders kostengünstigen Lösungen.

Materialtuning ab Werk

Schichtsilikate wiederum, der zweite mögliche Zusatz zu den Thermoplasten, sind Verbindungen aus Silizium und einem Metall. Dieser »Nanoclay« dient der Feinjustierung der Verbundstoffeigenschaften. Gibt man große Mengen hinzu, verringert sich die thermische Längenausdehnung des Materials, so dass es unabhängiger von Temperatureinflüssen wird. Die Schlagzähigkeit – also die Krafteinwirkung, die ein Material aushält, ohne zu brechen – bleibt dabei unverändert. Soll sie erhöht werden, setzt man einfach weniger Nanoclay ein. Ähnliche Eigenschaften könnte der Thermoplast zwar auch durch andere Füllstoffe gewinnen, seine Masse stiege dadurch aber um bis zu 30 Gewichtsprozent.

Neben offensichtlichen Aspekten der Stabilität und des Kollisionsverhaltens der Fahrzeuge sind beim Einsatz neuer Materialien aber weitere Fragen zu klären: Bleiben ihre Eigenschaften auch bei eisigen Temperaturen stabil? Stimmt die Optik lackierter Thermoplastbauteile mit der von Stahlelementen



Nie wieder blenden lassen: Rückspiegel mit elektrochromer Oberfläche, gesteuert durch lichtempfindliche Fotozellen, dunkeln ab, wenn das Scheinwerferlicht nachfolgender Fahrzeuge auf sie fällt.

überein? Bisher nämlich konnten Autohersteller nicht alle Karosserieteile auf ihren Fertigungsstraßen lackieren, weil Kunststoffe die dort übliche kathodische Tauchlackierung bei über 200 Grad Celsius nicht unverändert überstehen. Erst Verbundstoffe mit Nanopartikeln sind ausreichend hitzestabil.

Stahl wiederum gehört aber selbst im Leichtbau noch nicht zum alten Eisen, behauptet etwa der Saarbrücker Materialspezialist Nano-X. Er macht den Werkstoff zumindest für die nähere Zukunft fit. Stahl erreicht besonders hohe Härten, wenn er zunächst erhitzt und dann in einer kalten Presse in Form gebracht wird. Das führt jedoch zu einer Verzunderung, einer Oxidation an der Stahloberfläche, bei der grauer Staub entsteht, der die Stahloberfläche schädigt. Zudem müsste die Presse nach jedem Durchgang gereinigt werden. Vor Verzunderung schützt zwar eine üblicherweise auf den Stahl aufgetragene 25 Mikrometer dicke Legierung aus Aluminium und Silizium. Sie versagt jedoch beim zweistufigen indirekten Formhärten, das man für die Herstellung komplexerer Formen einsetzt. Bei diesem Verfahren wird der Stahl zunächst kalt in Form gepresst, dann erhitzt und abschließend in der kalten Pressform gehärtet. Die Schutzlegierung indessen wird bereits bei der Kaltfor-

mung rissig. Abhilfe schafft Nano-X durch ein anorganisch-organisches Bindemittel, in das mikrometergroße Aluminiumpartikel eingebettet werden. Direkt auf das Ausgangsmaterial aufgebracht, verhindert das die Verzunderung. Dann nämlich bildet sich beim Erhitzen des Stahls eine Schutzschicht aus Eisen, Aluminium, Silizium und Sauerstoff, die die Oxidation blockiert. So erhält der Stahl eine gleichförmige, unbeschädigte Oberfläche, und die Reinigung der Presse entfällt. Es scheint nur eine Frage der Zeit, bis diese oder vergleichbare Technologien auch in großem Maßstab verwendet werden.

In der Karosseriefertigung kommen zudem »schaltbare Klebstoffe« zum Einsatz. Sie enthalten zehn Nanometer große Eisenteilchen (Ferrite) mit einer im Verhältnis zu ihrem Volumen großen Oberfläche. Setzt man sie einem elektromagnetischen Feld aus, zum Beispiel Mikrowellen, absorbieren die Ferrite Energie und geben sie als Wärme ab. Sie beschleunigen also den Klebevorgang, indem sie die Berührungsflächen des Klebstoffs aufheizen, möglicherweise hitzeempfindliche Kunststoffe in benachbarten Materialbereichen aber unbeeinflusst lassen. Der Prozess ist sogar umkehrbar: Unter erneuter Bestrahlung lassen sich die Bauteile wieder voneinander trennen.



Wichtige Informationen wie die aktuelle Geschwindigkeit lassen sich mittlerweile in die Windschutzscheibe einspiegeln. Ihre Premiere hatte diese Technologie allerdings schon vor über zwei Jahrzehnten im Flugzeugbau. Nun aber sind solche Systeme auch für Autobesitzer erschwinglich.

Anzeige



Ihre Karriere in Lehre
und Forschung beginnt
bei academics.de



- » Größter Stellenmarkt für Lehre und Forschung im deutschsprachigen Raum
- » Personalisierter Job-Newsletter mit wöchentlich neuen Stellenangeboten
- » Informationen und Karriere-Blog für (Nachwuchs-)Wissenschaftler

Das Karriereportal der Wissenschaft von:

Forschung
& Lehre

DIE ZEIT

Verschleißschutz ist ein weiteres großes Thema für die Branche. Seit Jahrzehnten setzen Reifenhersteller Industrieruß (»Carbon Black«) als Gummizusatz ein. Nanostrukturierter Ruß erhöht dessen Vorteile noch, indem er die innere Reibung des Reifens und damit den Rollwiderstand weiter herabsetzt, gleichzeitig aber auch Dehnungsvibrationen vermindert und die Nässehaftung verbessert. Als besonders attraktiv erscheint den Herstel-

lern, den Motor vor Verschleiß zu schützen, denn das bedeutet Leistungssteigerung und Kraftstoffersparnis zugleich. 10 bis 15 Prozent der Energie im Kraftstoff fließen in die Motorreibung. Für ein Drittel dieser Verluste sorgen Kolbenringpaket und Zylinderlaufbahnen. Beschichtet man sie mit Nanoteilchen aus Eisenborid und Eisenkarbid, erhöht man ihre Gleitfähigkeit und damit die Lebensdauer. Höhere Härte etwa von Ventiltrieb und



INTERVIEW

Risiko Nanotechnologie?

René Zimmer ist Nanotechnologie-Koordinator beim Bundesinstitut für Risikobewertung. Im Gespräch mit Björn Lohmann berichtet er vom Stand der Risikoforschung in der Nanotechnologie.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Zimmer, das Bundesinstitut für Risikobewertung befasst sich auch mit der Nanotechnologie in Verbraucherprodukten. Ist Nanotechnologie gefährlich?

René Zimmer: Um abzuschätzen, ob von ihr spezifische gesundheitliche Risiken ausgehen, ist es wichtig zu wissen, ob die eingesetzten Nanomaterialien in einer Matrix gebunden oder ungebunden in Verbraucherprodukten vorliegen. Insbesondere freie Nanopartikel, Nanoröhrchen oder Nanofasern könnten durch ihre geringe Größe, ihre Form, ihre hohe Mobilität und höhere Reaktivität gesundheitliche Risiken hervorrufen. Die größten Risiken sehen Wissenschaftler in der Einatmung von Nanopartikeln. Das Eindringen von Nanopartikeln durch die menschliche Haut kann nach derzeitigem Stand des Wissens weitgehend ausgeschlossen werden. Ob es Risiken durch die Aufnahme von Nanopartikeln über den Magen-Darm-Trakt gibt, ist bislang nicht bekannt.

Spektrum: In den Endanwendungen liegen die Nanoteilchen meist gebunden vor, nicht so während der Verarbeitung. Sind Menschen, die mit Nanoteilchen arbeiten, besonderen Risiken ausgesetzt?

Zimmer: Nach derzeitigem Kenntnisstand kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Inhalation von Nanopartikeln zu Gefährdungen führen kann. Nach den Bestimmungen des Arbeitsschutzgesetzes und der Gefahrstoffverordnung ist der Arbeitgeber aber verpflichtet, Maßnahmen zur Expositionsminderung zu ergreifen. Staubförmige Nanomaterialien müssen also in flüssigen oder festen Medien gebunden sein und alle Arbeiten möglichst in geschlossenen Apparaturen durchgeführt werden.

Spektrum: Wo kommt der Verbraucher mit Nanoteilchen in Kontakt?

Zimmer: Mittlerweile enthält eine ganze Reihe an Produkten Bestandteile, die mit nanotechnologischen Verfahren herge-

stellt wurden. So wird zum Beispiel die Krawatte Schmutz abweisend, und Sonnencremes schützen besser vor UV-Licht. Und der Markt für Nanoprodukte wächst rasant. Eine Datenbank des US-amerikanischen Woodrow Wilson International Center listet derzeit etwa 600 Nanoprodukte auf.

Spektrum: Im Fall von Beschichtungen und Versiegelungen, wie sie bei Autos zum Einsatz kommen, sind die Nanoteilchen mit chemischen Gerüsten vernetzt. Was geschieht, wenn sie in die Umwelt gelangen?

Zimmer: Solange Nanopartikel fest in eine Matrix oder eine Suspension eingebunden sind, muss sich der Verbraucher keine Sorgen machen. Und tatsächlich sind die Bruchstücke, die sich aus Nanobeschichtungen lösen könnten, in der Regel mikrometergroß. Toxische Wirkungen von Nanopartikeln, die auf ihrer geringen Größe und höheren Reaktivität beruhen, sind dann nicht mehr zu erwarten.

Spektrum: Vor zwölf Jahren kamen gentechnisch veränderte Pflanzen auf den Markt, die Risikodebatte folgte erst später und mit ihr ein Aufschrei der Bevölkerung. Auch die Nanotechnologie ist mit wenig Begleitdiskussion in den Alltag vorgedrungen. Bleibt das so?

Zimmer: Trotz der Risikodebatte, die derzeit intensiv auf Expertenebene geführt wird, nimmt die deutsche Bevölkerung die Nanotechnologie ganz überwiegend positiv wahr. Das bestätigen uns sowohl die Verbraucherkonferenz zur Nanotechnologie als auch eine jüngst von uns durchgeführte Bevölkerungsbefragung. Dies kann damit zusammenhängen, dass die Nanotechnologie, anders als die Gentechnik, dem Anwender schon in der ersten Produktgeneration Vorteile bietet. Weniger putzen zu müssen, überzeugt viele Menschen. Allerdings, auch das zeigt die Umfrage, hängt die Akzeptanz stark vom Anwendungsbereich ab. Während Nanotextilien als unproblematisch angesehen werden, würde kaum ein Verbraucher Nanolebensmittel kaufen.

Kurbelwellenlager könnten den Abrieb ebenfalls vermindern und gleichzeitig leichtere Bauteile ermöglichen.

Extreme Belastungen erfahren auch die Gelenklagerschalen des Fahrgestells. Der übliche Werkstoff, der Thermoplast Polyoxymethylen, gerät dabei an seine Grenzen. Kombiniert man aber globulare und faserartige Nanopartikel zu einem Verbundstoff, wie dies bei Daimler seit Kurzem geschieht, senkt dieser die Reibung in den Gelenkschalen um bis zu 50 Prozent und verdoppelt so ihre Lebensdauer. Titanoxid bildet dabei den Grundstoff für die globularen Teilchen, während Kohlenstoffnanoröhren als Fasern dienen.

Demnächst ganz ohne Katalysator?

Für Materialeinsparungen, umweltfreundlichere Werkstoffe und Verbrauchsreduzierungen interessiert sich die Industrie vor allem aus Kostengründen, ob sie nun direkt zu Einsparungen in der Fertigung oder mittelbar zu höherer Akzeptanz bei den Kunden führen. Dass sie die Umwelt schonen, ist immerhin ein angenehmer Nebeneffekt. Am deutlichsten ist dieser allerdings bei der Abgasreinigung in Dieselfahrzeugen, deren Feinstaubausstoß weiterhin ein Problem bleibt. Sintermetallfilter lassen Ruß- und Feinstpartikel zwar nahezu vollständig aus dem Abgas verschwinden, ebenso 90 Prozent des Stickoxids. Die Langlebigkeit der Filter ist aber durch Korrosion gefährdet. Beschichtet man sie hingegen mit Nanoteilchen aus Aluminiumoxid – in einer möglichst dünnen Schicht, so dass die Poren des Sintermetalls nicht verengen und der Filter an Leistung einbüßt –, gelangt kein Sauerstoff mehr ans Metall.

Doch vielleicht sind die Sintermetalle sogar vollständig ersetzbar. Denn das günstige Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen macht Nanoteilchen auch zu besseren Katalysatoren. In vielleicht 15 bis 20 Jahren könnten Nanoteilchen die heute bei der Abgasreinigung üblichen Schwermetalle ersetzen. Neuere Studien belegen, dass nanostrukturiertes Glas oder Aluminiumoxid, gefüllt mit Kalium, ähnlich gut wirkt wie Platin. Ungelöst ist jedoch die Frage, wie sich diese Partikel an eine feste Matrix binden lassen. Noch faszinierender ist allerdings der Gedanke, Katalysatoren würden durch eine bessere innermotorische Verbrennung von Schadstoffen völlig überflüssig. Nanodüsen, die für eine optimierte Einspritzung des Kraftstoffs sorgen (und so gleichzeitig den Verbrauch senken), könnten dabei helfen.

Nanotechnologie verbessert aber auch Brennstoffzellen, die einige Experten weiterhin als Kraftstofftanks der Zukunft betrachten. Denn

deren Metallelektroden lassen sich mittlerweile durch Kohlenstoffnanoröhren mit viel größerer Reaktionsfläche ersetzen. Auch den Protonenaustausch in der Zellmitte übernimmt ein durch ein Nanonetz aus Silizium und Stickstoff stabilisierter Nanoverbundstoff. Gegenüber konventionellen Produkten lässt sich die Dicke dieser Austauschmembran so auf ein Zehntel reduzieren und damit der elektrische Widerstand verringern.

Der nächste größere Umbruch, den uns die Nanotechnologie vielleicht beschert, könnte indessen von der Leuchttechnik ausgehen. Mitte 2008 berichtete Timothy Sands vom Birk Nanotechnology Center der US-amerikanischen Purdue University im Fachjournal »Applied Physics Letters« über ein neues Verfahren zur Herstellung weißer Leuchtdioden (LEDs). Legt man Strom an solche Halbleiterelemente an, werden sie zum Leuchten angeregt. Weißes Licht entlockt man ihnen üblicherweise aber nur, wenn man zunächst Galliumnitrid auf eine teure Saphirgrundlage aufdampft. Dem Nanoforscher gelang es nun, Saphir durch billiges Silizium zu ersetzen und so die Basis für die Massenproduktion zu legen. Damit ist möglicherweise der Weg offen, den Preis dieser leuchtkräftigen und sparsamen Lichtquellen – schon jetzt wandeln sie bis zu über 60 Prozent der Elektrizität in Licht um und könnten bis zu 15 Jahre halten – auf ein Zwanzigstel zu senken und konkurrenzfähig zu machen.

Auf die Realisierung manch anderer Ideen werden wir hingegen noch lange warten müssen. »Buckypaper«, eine extrem dünne Folie aus Kohlenstoffnanoröhrchen, wiegt im Vergleich zu Stahl nur ein Zehntel, ist aber – wenn man es zu einem Kompositmaterial stapelt – bis zu 500-mal stärker. Prinzipiell könnte es also im Karosseriebau Verwendung finden, dürfte aber angesichts der Kosten wohl eher im Kleinen eingesetzt werden, zum Beispiel in Motorelementen, in denen große Drehmomente durch kleine Bauteile übertragen werden müssen und zudem Temperaturstabilität gefragt ist.

Wer sein Fahrzeug gerne mit zahlreichen nanotechnologischen Innovationen ausgerüstet sähe, wird aber ohnehin Geduld aufbringen müssen. Viele Neuerungen sind noch nicht ausgereift, andere zu teuer. Viel wahrscheinlicher als eine technische Revolution ist daher das stetige und allmähliche Vordringen der Nanotechnologie im Auto. Mittel- und langfristig jedoch, so viel dürfte feststehen, wird praktisch jeder Bestandteil unserer Autos optimiert werden – dank winziger Veränderungen in der Größenordnung von milliardstel Metern. ◀



VOLKSWAGEN/AUDI DESIGN CENTER CALIFORNIA

So weit denken nur Marketingstrategen: Die Volkswagen-Studie »nanospyder« soll vollständig aus zahllosen sensor-gesteuerten Nanomaschinen aufgebaut sein. Diese würden auf bevorstehende Unfälle reagieren, indem sie ihre Verbindungen untereinander systematisch lockern oder stärken, um den Insassen größtmöglichen Schutz zu gewähren.



Björn Lohmann ist freier Wissenschaftsjournalist in Stuttgart.

André, G. et al. (Hg.): nano. Chancen und Risiken aktueller Technologien. Springer, Heidelberg 2007.

Boeing, N.: »Alles Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts«. Rowohlt, Reinbek 2006.

»Leitinnovation NanoMobil« des Bundesforschungsministeriums: <http://www.bmbf.de/de/1846.php>

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/977242.



»Nur wer selbst Begeisterung zeigt, kann andere motivieren«

Gut 1250 Wissenschaftler unterschiedlicher Fachrichtungen forschen bei der BASF allein am Standort Ludwigshafen. Lässt sich bei einer solchen kaum überschaubaren Zahl noch von Teamarbeit sprechen? Für Dr. Andreas Kreimeyer, Mitglied des Vorstands und Forschungssprecher, ist das vor allem eine Frage der Organisation und Motivation.

Andreas Kreimeyer wurde 1955 in Hannover geboren. Er studierte Biologie an den Universitäten Hannover und Hamburg. Nach der Promotion trat er 1986 bei der BASF ein. Sieben Jahre später wurde er Leiter des Stabs des Vorstandsvorsitzenden. Von 1995 bis 1998 organisierte Dr. Kreimeyer die BASF-Aktivitäten in Südostasien und Australien, danach unterstanden ihm verschiedene Produktparten im Mutterwerk in Ludwigshafen, bis er 2003 in den Vorstand berufen wurde. In dieser Funktion leitet er heute zum einen das Segment Chemicals, das die Bereiche Inorganics, Petrochemicals und Intermediates umfasst. Er ist zum anderen Sprecher der BASF-Forschung und verantwortet die Forschungsstrategie sowie das Innovationsmanagement des Unternehmens. Darüber hinaus engagiert sich Dr. Kreimeyer in verschiedenen Gremien wie dem Kuratorium der Zeitschrift »Angewandte Chemie«, dem Beraterkreis des Pharmaunternehmens Boehringer Ingelheim und im Senatsausschuss Acatech.

Spektrum der Wissenschaft: Ein Biologe als Forschungsvorstand des weltweit größten Chemiekonzerns, das klingt nach einer interessanten Biografie.

Dr. Andreas Kreimeyer: Dabei wollte ich eigentlich Medizin studieren und Therapieansätze entwickeln. Die Biologie war zunächst eine Alternative. Doch Zusammenhänge der lebendigen Umwelt zu erkennen, ist einfach unglaublich spannend. Außerdem bestand das Grundstudium in Hannover damals zu 70 Prozent aus Chemie. So mancher Kommilitone stöhnte, aber mir machte das solchen Spaß, dass ich sogar nach Hamburg wechselte, um dort die Hauptfächer Biochemie, Mikrobiologie und Immunologie zu belegen.

Spektrum: Während der Diplom- und Doktorarbeit forschten Sie an der Universitätsklinik Eppendorf. Wie lautete Ihr Thema?

Kreimeyer: Es ging um Krebstherapie, es ging um Histone. Das sind Proteine, die mithelfen, die Struktur der DNA und damit ihre Aktivität zu organisieren. Veränderungen an bestimmten Aminosäuren ihrer Polypeptidkette sollten, so damals die Theorie, den Zelltod auslösen.

Spektrum: Waren Sie erfolgreich?

Kreimeyer: Also, ich habe sehr viele Histone isoliert (*lacht*), aber letztlich konnte ich diese Theorie nicht beweisen.

Spektrum: Auch die Widerlegung einer These bringt die Grundlagenforschung voran. In der Industrie wäre eine solche

Erkenntnis wohl ein bitterer Fehlschlag. Als Sie 1986 in die BASF eintraten, mussten Sie vermutlich umdenken?

Kreimeyer: Natürlich ist Zeit Geld, und eine Sackgasse verbraucht Ressourcen. Doch so funktioniert Forschung nun einmal, auch in der Industrie. Wenn eine Entwicklung nicht vorankommt, ist das keine Schande. Dann muss man aber frühzeitig überlegen, woran es liegt, und gegebenenfalls die Notbremse ziehen.

Spektrum: Gab es noch andere feine Unterschiede zur Hochschule, an die Sie sich gewöhnen mussten?

Kreimeyer: Die Größenordnung! Ich sollte für die Interferon-Herstellung ein Produktionsverfahren entwickeln und eine Anlage aufbauen. Im Forschungslabor hatte ich mit Milligramm und Mikrolitern hantiert, jetzt ging es gleich um Kilogramm und 200 Liter.

Spektrum: Noch einmal zurück zur Eingangsfrage: Seit 2001 widmet sich die BASF ganz der Chemie im Alltag. Wie haben Sie diesen Rückzug aus der pharmazeutischen Industrie erlebt?

Kreimeyer: Sie wollen wissen, ob ich meinen Jugendtraum aufgegeben habe? Ja, und das tat durchaus weh. Auch das ist eine Erfahrung, auf die man während des Studiums kaum vorbereitet wird: Um auf dem Markt eine Spitzenposition einzunehmen, muss ein Unternehmen bereit sein, selbst gut funktionierende Bereiche zu veräußern und sich auf seine Kernkompetenzen zu besinnen.

Der weltweit größte Chemiekonzern BASF erwirtschaftete im Jahr 2007 mehr als sieben Milliarden Euro Gewinn mit den Sparten Chemikalien (Grund- und Zwischenprodukte für zahlreiche andere Industriezweige), Kunststoffe (insbesondere für Verpackung, Baugewerbe, Automobilbau und Elektroindustrie), Veredelungsprodukte in der Konsumgüter- und Nahrungsmittelindustrie, Systemlösungen, Pflanzenschutz sowie Öl- und Gasförderung. Etwa 1250 Naturwissenschaftler sind in Ludwigshafen im Unternehmen tätig (8600 Mitarbeiter in der Forschung weltweit), davon zwei Drittel Chemiker, 18 Prozent Ingenieure, sechs Prozent Biologen und vier Prozent Physiker. Hinzu kommen Agrarwissenschaftler, Mathematiker, Informatiker, Mediziner und Pharmazeuten.



Spektrum: Offenbar gehört dazu aber auch die Übernahme anderer Firmen. Wenn die BASF auf Einkaufstour geht, ist dann der Forschungsvorstand beteiligt?

Kreimeyer: Natürlich. Als wir 2006 die Bauchemiesparte von Degussa und den amerikanischen Katalysator-Spezialisten Engelhard übernahmen, kauften wir gezielt Knowhow ein, das zu unseren Strategien passt.

Spektrum: War Ihr Übergang in eine Managementfunktion geplant?

Kreimeyer: Nein, eher die Konsequenz aus einem wachsenden Aufgabenfeld. Schon das Biotechnikum und die großtechnische Interferon-Anlage hatten 40 Mitarbeiter, ich musste Personal- und Budgetverantwortung übernehmen, betriebswirtschaftlich denken. Heute arbeite ich mit 1250 Naturwissenschaftlern, die in 2300 Projekten forschen.

Spektrum: Woher haben Sie die entsprechenden Kenntnisse?

Kreimeyer: Learning by doing und intensiver Austausch mit Kollegen. Außerdem hatte ich immer Mentoren, die ich um Rat fragen konnte. Heute bieten manche Hochschulen Seminare in BWL für Wissenschaftler an, die in die Industrie wollen. Das kann ich nur begrüßen.

Spektrum: Betriebswirtschaftliche Kenntnisse sind aber noch keine Garantie für eine Managerkarriere?

Kreimeyer: Nein, es geht nicht ohne Begeisterung und Engagement. Wer mit der Einstellung kommt, »ich forsche ein biss-

chen und mache ganz schnell Karriere im Management«, der ist bei der BASF fehl am Platz. Wir sind ein Unternehmen, das durch Spitzenforschung groß geworden ist. Wir haben das Ziel, ab 2010 vier Milliarden Euro jährlich allein aus Produktinnovationen zu generieren.

Spektrum: Wie schafft es Ihre Begeisterung aus der Vorstandsetage in ein Labor am Rande des Firmengeländes?

Kreimeyer: Die gesamte BASF ist als Netzwerk aufgebaut. Das beginnt schon bei den Produktionsmitteln Energie, Wasser, Rohstoffe. Bleibt bei einem Prozess etwas übrig, wird es einem anderen zugeführt. Diese Effizienz durch Verbund setzt sich in den Teams auf allen Hierarchieebenen fort. Und ob Sie es glauben oder nicht – ich verlasse mein Büro auch gerne, um mit vielen Mitarbeitern zu reden.

Spektrum: Wie wurden Sie nun vom Forscher zum Forschungssprecher?

Kreimeyer: Während meiner sieben Jahre in der Forschung wirkte ich auch an der Entwicklung des Gentechnikgesetzes mit. Das erweiterte meine Tätigkeitsfelder. Als mich der damalige Vorstandsvorsitzende Dr. Strube 1993 fragte, ob ich nicht sein Assistent sein wolle, löste ich mich ganz von der Wissenschaft.

Spektrum: Später widmeten Sie sich dem Asien-Geschäft der BASF.

Kreimeyer: Was sich in meinem Büro durchaus widerspiegelt. *(Er deutet auf eine Reihe von Buddhafiguren.)*

Spektrum: Sie hatten kein Problem mit der fernöstlichen Mentalität, über die westliche Manager mitunter klagen?

Kreimeyer: Absolut nicht. Man muss den Menschen respektvoll begegnen und sich für das, was andere leisten, ehrlich begeistern.

Spektrum: Ihre Spezialität: Motivation von Mitarbeitern.

Kreimeyer: Mein Arbeitstag dauert 12 bis 14 Stunden. Da wäre es doch schlimm, wenn ich keinen Spaß daran hätte. Aber das gilt nicht nur für mich. Ich gebe Ihnen ein Beispiel. Wir drosseln angesichts der Weltwirtschaftslage die Produktion und müssen dabei auch die Steamcracker herunterfahren, die aus Rohöl kurze Kohlenwasserstoffe machen. Technisch bedingt ist bei 75 Prozent der Kapazität eigentlich Schluss, sonst nimmt so eine Anlage Schaden. Vom Techniker bis zum Petrochemiker haben alle, die dort arbeiten, es geschafft, unsere Cracker bei knapp 35 Prozent zu fahren. Das geht eben nur, wenn man mit Herz und Verstand dabei ist.

Spektrum: Eine letzte Frage: Was hat es mit dem Gitarrenkoffer auf sich, der neben Ihrem Schreibtisch steht?

Kreimeyer: Meine knappe Freizeit gehört der Familie – und der E-Gitarre. Ein schöner Blues-Riff von Gary Moore, der Blick ist wieder frei – und die Zukunft der chemischen Industrie liegt klar vor mir.

Das Interview führte **Klaus-Dieter Linsmeier**.

UMWELT

Erde, wie hast du dich verändert

Zwei Bildbände zeigen unseren Planeten von oben in schönen und zum Teil erschreckenden Bildern.

Der britische Journalist Fred Pearce («Die Erde früher und heute») ist für seine unzähligen Artikel zu Umweltthemen bekannt geworden. Und tatsächlich stellt sich bei der Lektüre seiner geschwätigen Einleitung das vertraute, schale Greenpeace-Gefühl ein: Alles wird schlimmer, wir sind schuld, und wenn wir nicht auf der Stelle handeln, wird die Erde zu Grunde gehen – alles richtig, aber man hat es etwas zu oft gehört.

Unter den Bildern finden sich dagegen wahre Schätze. Haben Sie gewusst, dass von der berühmten Chinesischen Mauer nur noch zwei Drittel stehen? Der Rest ist dem

Solche Verwüstungen richtete das Erdbeben von 1995 in der Provinz Hyogo, Japan, an.



Materialhunger zahlloser Bauvorhaben oder schlicht einer Autobahntrasse zum Opfer gefallen. Und wie langweilig hat der Mount Rushmore in South Dakota ausgesehen, bevor die spektakulären Präsidentenköpfe in den Fels gehauen wurden!

In der Mischung finden sich auch die vertrauten Vorher-nachher-Gegenüberstellungen: Kölner Hohenzollernbrücke und Dresdner Frauenkirche vor und nach dem Wiederaufbau, Mount St. Helens vor und nach dem Ausbruch, Hongkong, Benidorm an der spanischen Mittelmeerküste und Zermatt in den Alpen vor und nach dem Bauboom, das World Trade Center.

Die Standard-Umweltschreckbilder wie das ehemals liebliche, heute von einer Autobahnbrücke verschandelte Tal, der ausge-

trocknete Aralsee und die verschwundene Gletscherzunge sind selbstverständlich auch vertreten.

Es wird nicht alles schlechter: Der Smog über Mexiko-Stadt hat sichtlich nachgelassen. Das Ozonloch über der Antarktis kann sich – zumindest zeitweise – wieder schließen. Auf den Satellitenbildern sehen die sattgrünen Kreise – so weit die Bewässerungsanlage reicht – in der Wüste beeindruckend aus und stimmen den Betrachter hoffnungsvoll.

Insgesamt ist «Die Erde früher und heute» ein opulentes, leicht verdauliches Bilderbuch, «Globaler Wandel» hingegen ein mit spektakulären Bildern versehenes Sachbuch. Jeder der vielen Texte bietet etwas Neues und ist zudem so unterhaltsam geschrieben, dass man wie nebenbei soeben wieder etwas Wissenschaftliches konsumiert hat. Die Autoren sind dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) eng verbunden und schöpfen aus dessen reichhaltigem Archiv ebenso wie aus dem Material von NASA, ESA und zahlreichen Kooperationspartnern.

Vorher-nachher-Bilder gibt es, dem Titel zum Trotz, nur sehr wenige, dafür zahlreiche spektakulär aufbereitete Satellitendaten. Häufig geben die Bilder wegen des unüblichen Blickwinkels oder der Falschfarben nicht auf den ersten Blick ihr Geheimnis preis. Oder hätten Sie gedacht, dass die Abgase von Schiffen, von oben gesehen, ebensolche Streifen hinterlassen, wie wir sie von Flugzeugen gewohnt sind?

Eindrucksvoll ins Bild gesetzt sind die Überfischung der chinesischen Küstengewässer durch zahllose kleine Fischerboote, die weit gehende Zerstörung von Mangrovenwäldern durch Anlegen von Shrimpsfarmen und die Aushöhlung des Naturschutzes in den Everglades von Florida durch ihre Erschließung bis in den letzten Winkel.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Fred Pearce

Die Erde früher und heute

Bilder eines dramatischen Wandels

Aus dem Englischen von Martina Fischer.
Fackelträger, Köln 2007. 288 Seiten, € 39,95

Stefan Dech, Rüdiger Glaser, Robert Meisner

Globaler Wandel

Die Erde aus dem All

Frederking & Thaler, München 2008.
260 Seiten, € 50,-

Der Geist weht, wo er will

Gibt es Quanten in Gedanken? Besteht das Universum vor allem aus Information?

Die ersten Philosophen der Antike, die Vorsokratiker, suchten die Antwort auf das Wesen der Natur in Form eines einzigen einfachen Satzes. Alles ist Wasser, erklärte Thales von Milet. Alles ist das Unbestimmte-Unendliche (*apeiron*), fand sein Schüler Anaximander. Alles ist Luft, sagte Anaximenes. Heraklit hielt die Veränderung für allgemein («Alles fließt»), Parmenides und sein Schüler Zenon erklärten sie für Schein, denn das Sein sei ewig und unveränderlich.

Seither suchen die Philosophen hinter der Vielfalt der Erscheinungen ein einheitliches Grundprinzip: Atome (Demokrit), Zahlen (Pythagoras), Ideen (Sokrates und sein Schüler Platon), das Ding an sich (Kant). Im 20. Jahrhundert erklärten die Positivisten all diese Gedanken für sinnlose Metaphysik, denn ob sie zutreffen, lasse sich empirisch nicht entscheiden. Doch damit wurde die Philosophie nicht arbeitslos: Die Deutung der Quantentheorie, die Konsequenzen der Hirnforschung für unser Selbstverständnis, das Verhältnis von Evolution und Religion und viele Fragen mehr liefern weiterhin reichlich Stoff für philosophische Debatten.

Allerdings ist es heutzutage selten geworden, dass jemand im Stil der Vorsokratiker mit einem einzigen Satz sämtliche Welt-rätsel auf einen Schlag lösen möchte. Thomas Görnitz tut das mit der Behauptung: Alles ist Information.

Ganz unplausibel ist die These nicht. In der DDR, wo Görnitz aufwuchs, wurde gelehrt: Die Versuche, die Wirklichkeit auf eine Grundsubstanz zurückzuführen, lassen sich in zwei Rubriken einordnen, nämlich Materialismus und Idealismus. So hatte das jedenfalls Friedrich Engels im 19. Jahrhundert gesehen und die Wahl zwischen diesen Alternativen zur »Grundfrage der Philosophie« erklärt – wobei für den Materialisten Engels klarerweise nur die eine Antwort als richtig galt.

Den in der DDR zur Staatsdoktrin erklärten Materialismus empfand der promovierte Physiker Görnitz als Denkwang und erlebte den 1979 vollzogenen Umzug nach Westdeutschland als geistige Befreiung. Sein Mentor wurde Carl Friedrich von Weizsäcker, der naturphilosophische Antworten auf die Probleme der modernen Physik

suchte. Heute lehrt Görnitz Didaktik der Physik an der Universität Frankfurt am Main und vertritt zusammen mit seiner Frau Brigitte, einer promovierten Tierärztin und Diplompsychologin, in bisher zwei Büchern die These, der Grundstoff der Welt sei Information.

Damit erledigt sich für Görnitz der Zwang zur engelsschen Entscheidung, denn Information gilt ihm als etwas Drittes jenseits von Materie oder Geist. Um Information zu übertragen, braucht man zwar ein materielles Substrat – Zeichen auf Papier, Morse-signale per Funkwellen –, aber die übertragene Nachricht ist dieser Materie aufgeprägt, quasi eingehaucht, und darum hält Görnitz – und nicht nur er – Information für etwas Nichtmaterielles, Geistiges. In einer absolut gesetzten Information sieht Görnitz die Lösung aller Probleme: Sie beende die Kluft zwischen Natur- und Geisteswissenschaften, erledige das Leib-Seele-Problem, begründe den freien Willen, versöhne Wissenschaft und Religion. Fairerweise erwähnt Görnitz, dass sein Mentor von Weizsäcker diese Meinung nicht teilte, weil er einen »absoluten« Informationsbegriff für sinnlos hielt.

Belege für seine These sucht Görnitz in der Quantenphysik. Dort gibt es das Phänomen der Verschränkung, der engen Korrelation zwischen den Komponenten eines Quantensystems. Es ist nicht möglich, verschränkte Quantenzustände als unabhängig voneinander zu betrachten; sie bilden – anders als die Teile eines klassisch-mechanischen Teilchensystems – ein untrennbares Ganzes. Auf »Fragen«, das heißt Messungen, reagieren Quantensysteme ganzheitlich, so als würden ihre verschränkten Komponenten sich augenblicklich auf übereinstimmendes Verhalten »absprechen«. Insofern spielt der Informationsbegriff für Quantensysteme eine Rolle: Je nachdem, ob man das System als Teilchen- oder als Wellenzustand untersucht, Informationen über Teilchen-orte oder Welleninterferenzen beschafft, erhält man unterschiedliche »Antworten«, das heißt Messresultate.

Quantenphänomene widersprechen dem »naiven Realismus«, weil sie die herkömmliche Vorstellung sprengen, es gebe eine von dieser oder jener »Frage an die Natur« unabhängig existierende Wirklichkeit. Ris-



Darwins Erbe



2008. 360 S. mit 30 Abb., geb. mit SU
€ 29,90 [D]/ sFr 49,90 · ISBN 978-3-89678-383-7

Chris Buskes' preisgekröntes Buch zeigt erstmals, wie die Evolutionstheorie unser Weltbild veränderte und welchen Einfluss sie bis heute in den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen hat.

»Jeder, der sich an der aktuellen Diskussion über Kreationismus beteiligen möchte, sollte dieses Buch lesen.«

NRC Handelsblad

kant wird es, wenn man die in den vorigen Absätzen gesetzten Anführungszeichen weglässt und dadurch aus metaphorischen Hilfsformulierungen Tatsachenfeststellungen macht. Es ist ein großer Unterschied, ob man vorsichtig sagt, die Quantenwelt verhalte sich, als ob es in ihr auf die bewusste Vorentscheidung des Beobachters ankäme, oder ob man wie Görnitz behauptet, die Quantenphysik reiße eine ohnedies künstliche Barriere zwischen Geist und Materie ein, und dies wiederum beweise, dass die Natur aus absoluter Information bestehe und letzten Endes geistig sei.

Der größte Teil des Buchs enthält »ganzheitliche« Behauptungen über das Wesen der Welt, des Bewusstseins und der Religion, vorgetragen wie kühne Erkenntnisse. Stets ist das Ehepaar Görnitz bestrebt, Unterschiede einzuebnen – unter Berufung auf die vermeintlich informationelle Beschaffenheit der Quanten. Ob man diese Nivellierung jeglicher Differenz als erhebend empfindet wie eine rauschhaft durch den Ideenhimmel rasende Planierdraupe oder als ermüdend, da gänzlich unfruchtbar, ist letztlich Geschmackssache. Für mich kommt das Buch einer Warnung gleich: Mit der

Idee, Information müsse als zentraler Begriff der Grundlagenphysik anerkannt werden, gerät man leicht in einen Wirbel spiritueller Beliebigkeit.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

Thomas Görnitz, Brigitte Görnitz

Die Evolution des Geistigen

Quantenphysik – Bewusstsein – Religion

Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2008.
372 Seiten, € 49,90



HIRNFORSCHUNG

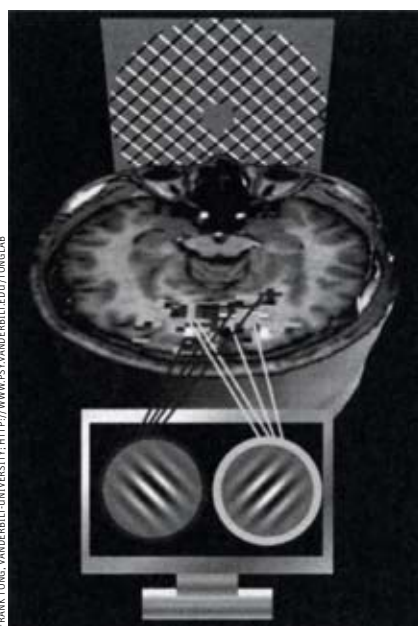
Woran denkst du gerade?

Wenn du bereit bist, dich in die große Röhre zu legen, kann ich es vielleicht ausmessen.

Die technische Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte, gepaart mit den jüngsten Ergebnissen der Hirnforschung, hat Grundlagen geschaffen, um systematisch die Signale im Gehirn zu entschlüsseln. Damit scheint die bislang unantastbare Freiheit der Gedanken in Gefahr, und die perfekten Gedankenlese-Maschinen düsterer Sciencefiction-Filme drohen Realität zu werden.

Es ist daher an der Zeit, dass wir unseren Standpunkt bestimmen und die weitere Richtung voraussehen, findet Stephan Schleim, Philosoph, Psychologe und Informatiker an der Universität Bonn und Autor von »Brainlogs« (<http://www.brainlogs.de/blogs/blog/menschen-bilder>). Der Untertitel »Pionierarbeit der Hirnforschung« deutet an, dass die professionellen Gedankenleser noch am Anfang stehen. Ihre Methode der Wahl ist momentan ein bildgebendes Verfahren, die funktionelle Magnetresonanztomografie oder kurz fMRT: jene Methode, bei der letztlich von verändertem Sauerstoffbedarf und Blutfluss auf die Hirnaktivität geschlussfolgert wird. Inzwischen finden sich in Zeitungen und Zeitschriften aller Art die bunten Bildchen, die uns zeigen sollen, mit welchen Gehirnregionen wir denken.

Die suggestive Kraft dieser Bilder ist so groß, dass ihr Konsument die zugehörigen Behauptungen der Forscher häufig unkritisch übernimmt. Erst jüngst veröffentlichten Wissenschaftler im »Journal of Cognitive Neuroscience« Ergebnisse, wonach die pure Erwähnung der Methode das Urteils-



Blicken Sie gerade auf die weißen oder schwarzen Linien? Im visuellen Kortex konnten Hirnforscher den Unterschied feststellen.

vermögen des Lesers betäubt und diesen von unlogischen Erklärungen ablenkt. Vorsicht ist also geboten, vor allem dann, wenn fMRT-Daten angeblich eindeutig etwas belegen. Diese Warnung ist das Fundament, auf dem Schleims Buch ruht und auf deren Notwendigkeit bereits der Mainzer Philosoph Thomas Metzinger im ersten Vorwort hinweist.

Im zweiten Vorwort wünscht der Hirnforscher John-Dylan Haynes dem Leser viel

Spaß. Das Vergnügen findet man insbesondere dort, wo Schleim über die Geschichte des Gedankenlesens plaudert und bizarre Anekdoten zu Lügendetektoren erzählt. Aber »Gedankenlesen« ist kein oberflächliches Spaßbuch. In Aufbau, Stil und Inhalt steht es in der Tradition guter Sachbücher, die nicht nur unterhalten, sondern informieren und aufklären.

Auf die Einleitung und einen kurzen historischen Abriss folgt die Darstellung der methodischen Grundlagen. Schleim findet die wohl dosierte Mischung von Physik und Neurobiologie, die den Laien ausreichend mit Informationen versorgt, ohne ihn zu langweilen. Der Leser lernt, wie Wissenschaftler Rohdaten weiterverarbeiten müssen. Unvermeidlich haben in den präsentierten Bildern immer schon Deutungen ihre Spuren hinterlassen. Die für den Laien beeindruckende fMRT wird durchschaubar.

Die darauf folgenden zwei Kapitel führen Beispiele aus der Grundlagen- und Anwendungsforschung vor Augen, um klar abzustechen, was derzeit technisch möglich ist. Der Logik des Themas folgend, erörtert das letzte Kapitel kurz gefasst gesellschaftliche und ethische Aspekte.

Sicher hätte das Buch ausführlicher diskutieren können, was überhaupt ein Gedanke ist. Als Philosoph könnte sich Schleim kompetent dazu äußern, doch würde er damit vom Kernthema nur abweichen.

Überhaupt gewinnt das Buch durch die weise Beschränkung des Autors. Für das Kapitel zur Grundlagenforschung hat er sich aus der Fülle der Daten Ergebnisse von sie-



ben Arbeitsgruppen herausgesucht, die er benennt, erläutert und diskutiert. Dem Leser wird schnell die innere Folgerichtigkeit der Entwicklung klar. Anfangs konnten Wissenschaftler nur angeben, ob sich Versuchspersonen ein Haus oder ein Gesicht vorstellten. Einige Jahre später war es möglich, aus den Versuchsdaten bestimmte Absichten der Teilnehmer herauszulesen.

»Gedankenlesen« vermeidet die sprachlichen und inhaltlichen Trivialitäten anderer populärwissenschaftlicher Titel und legt die Inhalte in ruhigem Ton dar. Im Gegensatz zu einigen Gehirn-Büchern, die uns bunte Cocktails aus vielen verschiedenen Zutaten auftischen, die in ihrer Fülle kaum mehr verdaulich sind, führt Schleim den Leser zu den Kernbotschaften der Hirnforschung.

Olaf Schmidt

Der Rezensent ist promovierter Molekularbiologe und Wissenschaftsjournalist in Duisburg.

Stephan Schleim

Gedankenlesen

Pionierarbeit der Hirnforschung

Heise, Hannover 2008. 169 Seiten, € 18,-

ENERGIE

Technologie der Zukunft

Eine handwerklich gut gemachte und reichhaltig illustrierte Sammlung zum Thema regenerative Energiequellen, mit einigen Defiziten

Angesichts steigender Benzinpreise und galoppierender Teuerung bei Strom, Gas und Heizöl braucht ein Titel wie »Erneuerbare Energie« nicht lange auf Interessenten zu warten. Eine übersichtliche Gliederung, Hochglanzpapier und viele, durchweg farbige Bilder und Grafiken machen einen guten ersten Eindruck.

Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass die Herausgeber Thomas Bührke und Roland Wengenmayr, beide Redakteure der Zeitschrift »Physik in unserer Zeit«, eine Hand voll teilweise nicht mehr ganz aktueller Zeitschriftenartikel genommen haben und hofften, es werde sich schon ein Buch ergeben. Der auf den ersten Blick so übersichtlichen Gliederung fehlt jede Systematik. Die »Informationen zu aktuellen Förderprogrammen« bestehen aus mageren sieben Internetlinks und waren beim Erscheinen

des Buchs schon veraltet. Und weshalb die Herausgeber im einführenden Kapitel das komplette Thema erneuerbare Energieträger einem Ministerialbeamten überlassen, der es dann vorwiegend durch die nationale Brille sieht, bleibt ihr Geheimnis.

Dennoch enthält das Buch viel Interessantes und Überraschendes: Die regenerativen Energieträger erlebten in Deutschland innerhalb der letzten Jahre einen ungemeinen Aufschwung und haben 2005 schon einen Anteil von 4,6 Prozent am Primärenergieverbrauch erreicht (inzwischen sind es bereits 8,5 Prozent). Dass davon fast die Hälfte auf das Konto von Holz geht, das bloß verheizt wird, verblüfft einen dann schon.

Technisch anspruchsvoller ist die Windenergie, die mit fast 18 Prozent am Anteil der »Erneuerbaren« die traditionelle Wasserkraftnutzung überflügelt hat. Weit abge-

IHRE VORTEILE ALS ABONNENT VON

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Als Abonnent erhalten Sie **Spektrum der Wissenschaft** zum Vorzugspreis von nur € 79,20 (ermäßigt auf Nachweis € 66,60) inkl. Versandkosten Inland und haben Zugriff auf das Archiv des Magazins.

Unter www.spektrum.de/plus finden Sie weitere Vorteile:

- Ihren persönlichen Mitgliedsausweis zum Herunterladen mit zahlreichen Vergünstigungen bei vielen wissenschaftlichen Einrichtungen, Museen und Filmtheatern
- einen monatlichen Bonusartikel und den Zugriff auf das Archiv mit allen bisher erschienenen Bonusartikeln
- kostenlose Downloads verschiedener Hefte der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
- das spektrumdirekt-Premiumabo zum Vorteilspreis und natürlich
- ein vergünstigtes Produkt des Monats

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissen aus erster Hand

www.spektrum.de/plus



Das größte Solarkraftwerk der Welt steht in der kalifornischen Mojave-Wüste.

schlagen kommen dann Solarthermie (1,8 Prozent) und Fotovoltaik (0,4 Prozent).

Dominiert wird der deutsche Mix nach wie vor durch die fossilen Rohstoffe (82,8 Prozent), vor allem Erdöl (36 Prozent) und Erdgas (22,7 Prozent), während die Kernenergie weitere 12,5 Prozent beisteuert. Doch der Beamte prophezeit: »Das 21. Jahrhundert wird das Jahrhundert der Sonne, von Wind- und Wasserkraft ... werden« und verschweigt, dass nicht der technische Fortschritt, sondern der politische Wille die wesentliche Triebkraft dieses Wandels ist. Und wie viel man pro Kilowatt investieren muss, um regenerative Energiequellen für Strom, Wärme und Verkehr anzuzapfen, kann der Leser nur ahnen.

Weltweit gesehen läuft auf den ersten Blick ebenfalls alles bestens: So sollen die erneuerbaren Energien bereits auf beachtliche 13,4 Prozent der Energieerzeugung kommen, in Afrika sogar auf über die Hälfte! Klammert man allerdings die wenigen großen Staudämme aus, so zeigt sich, dass einfach nur Holz verfeuert wird. Und das wächst gerade in Afrika nicht so ohne Weiteres nach.

Für richtige Technikfreaks schreibt der einzige deutsche Windmühlen-Professor Martin Kühn. Der Leser erfährt vieles über Stall-, Aktiv-Stall- oder Pitch-Konzepte von Rotorblättern oder über Probleme mit der Netzintegration des unregelmäßig anfallenden Stroms. Aber warum die im Wind enthaltene Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ansteigt, erfährt man bei Kühn nicht. Dabei beschränkt er sich auf horizontalen Wind; Aufwindkraftwerke werden an ganz anderer Stelle des

Buchs präsentiert – ebenfalls mit viel Mathematik und Technik.

Bei der Wasserkraft, die weltweit rund ein Sechstel des Stroms produziert, ist der Autor sich bei aller Wertschätzung der Energiebilanz nicht ganz sicher, wie er neue Großstaudämme beurteilen soll, die in den aufstrebenden Wirtschaftsmächten China und Indien entstehen. Sie könnten dort Ökosysteme und soziale Strukturen zerstören, wären aber möglicherweise »das kleinere Übel«, vor allem im Hinblick auf das Weltklima.

Wellenkraftwerke haben zwar Kostenvorteile gegenüber Windkraftwerken, so erfährt man, derzeit werden aber erst Prototypen getestet; Gezeitenkraftwerke finden im Buch gar keine Erwähnung. Schade auch, dass der Schwerpunkt in allen Fällen auf der Erzeugung von Elektroenergie liegt und die Nutzung für Wärmezwecke nur bei der Wärmespeicherung für Bauwerke auftaucht. Dass Wärmepumpen einen wahren Boom bei Neubauten, insbesondere bei Eigenheimen, erleben, erfährt man aus diesem Buch nicht; das Wort kommt im Stichwortverzeichnis nicht einmal vor. Über Fotovoltaik gibt es immerhin drei Kapitel, deren Übersichtsartikel vieles zum technischen Fortschritt sagt, doch den Hauslebauer zur Vorsicht mahnt. Selbst bei Ausschöpfung aller staatlichen Förderungen amortisiere sich eine Anlage auf dem eigenen Dach erst nach 18 Jahren.

Der Artikel über Folienzellen ist wieder etwas für Technikverliebte – mit schönen Grafiken, Spektren und sogar Formeln. So ökologisch korrekt und aufschlussreich die Darstellung des Karlsruher »bioliq«-Verfahrens zur Erzeugung von Kraftstoff aus Biorohstoffen ist, fehlt doch der Hinweis, dass auch andere die technologische Basis des 1925 entwickelten Fischer-Tropsch-Verfahrens

nutzen. Beispielsweise ein Konsortium aus Volkswagen und Daimler sowie Shell und der sächsischen Firma Choren. Diese Unternehmen haben in Freiberg bereits eine Produktionsanlage aufgebaut, die rund 18 Millionen Liter Biokraftstoff pro Jahr erzeugen kann. Angesichts der jüngsten Bio- rohstoffverteuerung und der politischen Umsteuerungen bedarf dieses Kapitel am dringendsten einer Überarbeitung.

Am besten gefällt mir das Kapitel von Eisenbeiß über Wasserstoff als Energieträger. Es ist flüssig geschrieben, technisch wie wirtschaftlich ausgewogen und kommt zu dem nüchternen Schluss, dass das 21. Jahrhundert wohl keine Wasserstoff-Wirtschaft erleben wird. Elektrischer Strom wird der wichtigste Energieträger bleiben. Allenfalls bei mobilen Anwendungen habe Wasserstoff einen Platz, am besten in Verbindung mit Brennstoffzellen.

Fazit: Den Leser, der wissenschaftlich-technisch nicht weiter vorbelastet ist, bedient das Buch mit vielen Informationen und stellt keine großen Anforderungen. Tiefere Einblicke erlangt man jedoch nicht überall, und eine Einordnung in die globalen Herausforderungen wie Klimaerwärmung und Welternährung fehlt an vielen Stellen. Das aber wäre nötig, um dem Thema »Erneuerbare Energie« den richtigen Stellenwert beizumessen.

Reinhard Löser

Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Ebenhausen bei München.

Thomas Bürhke, Roland Wengenmayr (Hg.)
Erneuerbare Energie
 Alternative Energiekonzepte für die Zukunft
 Wiley-VCH, Weinheim 2007.
 104 Seiten, € 39,80



PSYCHOLOGIE

Mensch, erkenne dich selbst

Und siehe, dass deine Vorstellung, du seist vernünftig, an vielen Stellen eine Illusion ist.

Dan Ariely, Professor für Verhaltensökonomie am Massachusetts Institute of Technology, führt uns ein beeindruckendes Panorama unserer Irrationalität vor. Schritt für Schritt demontiert er unsere Vorstellung, wir würden unsere Entscheidungen nach reiflicher Überlegung und nur von der Vernunft gesteuert treffen.

Es beginnt beim biederen Preisvergleich. Wir wägen verschiedene Alternativen ab und wählen dann die, deren Preis-Leistungs-Verhältnis unseren Vorlieben am ehesten entspricht – glauben wir. Ariely weist durch geschickt ersonnene Experimente nach, dass wir nicht etwa mit unseren eigenen Präferenzen vergleichen – so genau wissen wir gar nicht, was wir wollen –, sondern mit einem »Ankerpreis«, den wir aus unseren bisherigen Erfahrungen für normal halten. Einem Anbieter, der diesen Mechanismus durchschaut, gelingt es mitunter, diesen Ankerpreis zum eigenen Vorteil zu manipulieren. Ariely nennt die Preisstrategie der Kaffeehauskette Starbucks als Beispiel.

Wir sind zwar bereit, unsere Arbeit für einen guten Zweck zu verschenken, nicht aber, sie unter Preis abzugeben. In unserem Kopf haben wir zwei verschiedene »Abrechnungsbereiche«, einen privaten und einen geschäftlichen, und es kommt entscheidend darauf an, auf welches Konto wir unsere Leistungen verbuchen. Es kommt dann zu merkwürdigen Verwerfungen, wenn äußere Umstände – zum Beispiel Arielys Experimente – die Grenzen zwischen den Bereichen verwischen.

Im Zustand sexueller Erregung ist ein Mensch bereit, Dinge zu tun, die er bei klarem Kopf entrüstet von sich weisen würde. Schlimmer noch: Selbst wenn ihm dieser Erregungszustand so geläufig und alltäglich ist wie einem Collegestudenten in Berkeley mit Anfang 20, schätzt er völlig falsch ein, wie er sich in diesem Zustand verhalten wird – wenn er sich beim Einschätzen im Zustand der Seelenruhe befindet.

Wir schätzen etwas, was wir besitzen, viel höher ein, als wir dafür zu bezahlen bereit sind, wenn wir es nicht besitzen. Wir treiben mehr Aufwand, um etwas geschenkt zu bekommen, als dafür, es für einen Cent zu erwerben. Wir sind bereit, unseren Geschäftspartner, Arbeitgeber oder eben Ver-

suchsleiter um Kleinigkeiten zu betrügen, aber nur, wenn es sich um Naturalien und nicht um echtes Geld handelt. Das gilt selbst für Plastikchips, die man wenige Sekunden später in Geld eintauscht. Ein Placebo wirkt nicht nur, es wirkt auch umso besser, je teurer es ist (SdW 5/2008, S. 10).

Was macht man mit einer so geballten und eloquent formulierten Ladung der Nachricht »Du bist nicht Herr deiner selbst«? Na ja – als erste Reaktion ist Demut immer gut. Sich bewusst zu machen, dass man die eigenen Dinge nicht so im Griff hat, wie man sie gerne hätte, hilft gegen Selbsttäuschung mitsamt deren Spätfolgen. Ariely schlägt auch praktikable Vorkehrungen gegen zwei der häufigsten Selbsttäuschungen vor: »Ich kann am Ende alles bezahlen« und »Ich kriege diese Termsache noch rechtzeitig fertig«.

Aber dann regt sich doch Widerspruch. Ich will einfach nicht glauben, dass ich im Grunde meiner Seele so unvernünftig bin. Jedenfalls wenn es wirklich um die Wurst geht. Und die Versuchspersonen in Arielys Experimenten haben doch bestimmt so reagiert, wie es ihnen spontan in den Sinn kam, und nicht die Selbstdisziplin aufgebracht, die in einer echten Situation geboten wäre.

Leider ist das wahrscheinlich eine Ausrede. Das Buch liefert kein Argument, das sie stützen würde, und die Realität, zum Beispiel was meine eigene Selbstdisziplin angeht, eigentlich auch nicht.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Dan Ariely

Denken hilft zwar, nützt aber nichts

Warum wir immer wieder unvernünftige Entscheidungen treffen

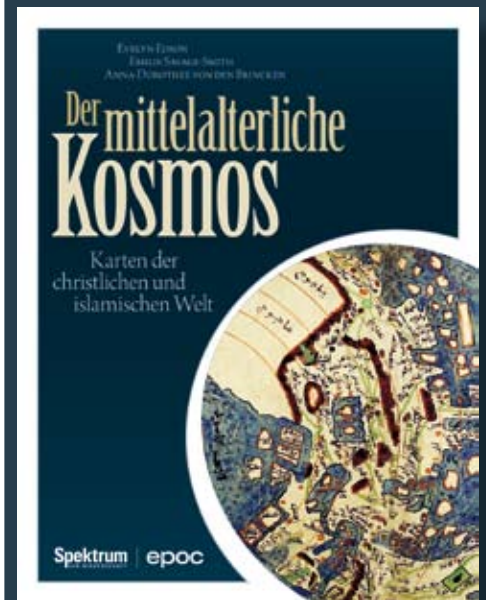
Aus dem Amerikanischen von Maria Zybak und Gabriele Gockel. Droemer-Knauer, München 2008. 320 Seiten, €0 19,95

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

SPEKTRUM GALERIE

»Der mittelalterliche Kosmos«



Welches Bild von Welt und Kosmos hatten das lateinische Abendland und der islamische Orient?

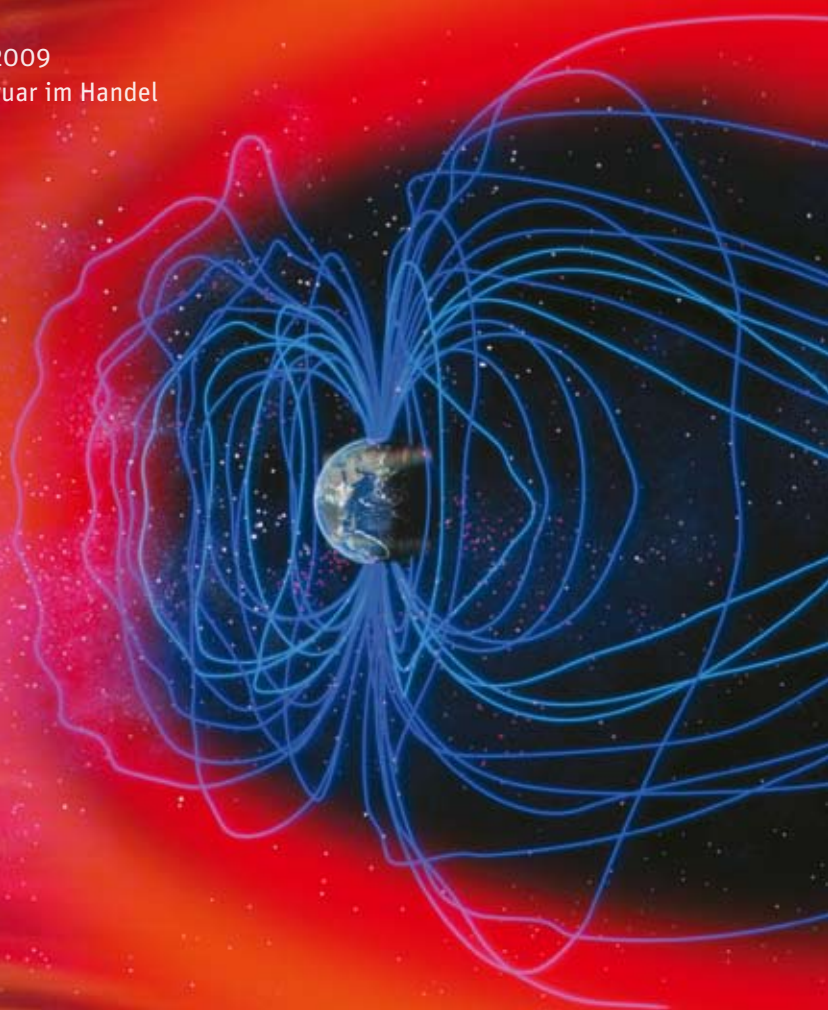
»Der mittelalterliche Kosmos« bildet den Auftakt der neuen Reihe »Spektrum Galerie«. Dort bieten wir unseren Lesern ein- bis zweimal pro Jahr von unseren Redaktionen ausgewählte Bücher aus den Bereichen Naturwissenschaften, Gehirnforschung, Medizin, Geschichte und Archäologie in einem exklusiven Nachdruck zum Sonderpreis an. Ein Buch kostet € 14,90 (zzgl. Versand). Wenn Sie sich für eine Standing Order entscheiden, erhalten Sie »Der mittelalterliche Kosmos« und alle künftig erscheinenden Bücher dieser Reihe automatisch nach Erscheinen zum Vorzugspreis von € 12,90 (inkl. Versand Inland) zugeschickt.

Eine Bestellmöglichkeit finden Sie unter:

spektrum.com/galerie

Superstürme auf der Sonne

Gigantische Sonnenstürme, wie sie etwa alle 50 Jahre einmal auftreten, könnten Satelliten zerstören, Strom- und Kommunikationsnetze lahmlegen. Wie können wir uns davor schützen?



PAT RAWLINGS / SAIC

WEITERE THEMEN IM MÄRZ

Fortschritte im Kampf gegen Brustkrebs

Personalisierte Therapien und neue Medikamente verbessern die Heilungschancen

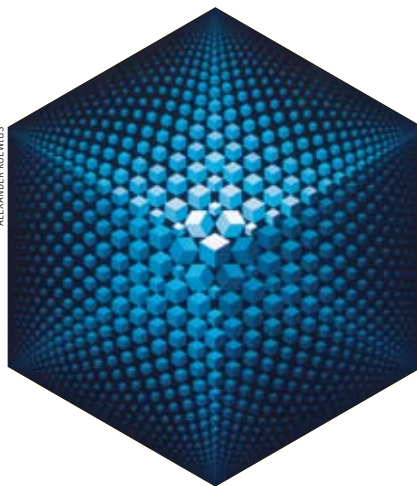
Mobil mit Strom

Dank besserer Batterien, intelligenter Elektronik und regenerativer Energien beginnt die Renaissance der Elektrofahrzeuge

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



ALEXANDER KOEVLIS

Wie unendlich ist unendlich?

Das Unendliche gibt den Forschern weiterhin Rätsel auf. In unserer Mathematik-Serie geht es diesmal um die Geheimnisse der so genannten Kontinuumshypothese



ETAN HADDOK

Geburt eines Ozeans

Eine Fotoreportage vom Afar-Dreieck in Äthiopien dokumentiert die ersten Stadien beim spektakulären Auseinanderbrechen eines Kontinents