

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

FUKUSHIMA

Was genau
geschah:
Chronik einer
Katastrophe

AUGUST 2011

MALARIA

Neue Strategien gegen
die tödliche Seuche

PHILOSOPHIE

Braucht das Denken
die Sprache?

EUROPEAN XFEL

Hamburg erhält einen
Röntgenlaser der Superlative

Kosmische Inflation

Ein Grundpfeiler der Urknall-
theorie gerät ins Wanken

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

8/11

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Ausstieg aus der Unsachlichkeit

Am 30. Juni beschloss der Deutsche Bundestag unter dem Eindruck der Katastrophe von Fukushima den Ausstieg aus der Atomenergie bis 2022. Nun kann man zu der grundsätzlichen Frage, ob zur Sicherung der Energieversorgung Kernkraft genutzt werden sollte oder nicht, verschiedene Positionen einnehmen – Befürworter wie Gegner haben bedenkenswerte Argumente anzubieten. Lässt man jedoch die Entwicklung seit dem 11. März 2011 Revue passieren, beschleichen einen ernsthafte Zweifel, ob Sachargumente in dieser Diskussion die wichtigste Rolle gespielt haben. Eher drängt sich der Eindruck auf, dass politisch-taktische und emotionale Aspekte den Diskurs dominierten. Doch sollten auf dieser Basis wirklich Entscheidungen von derartiger Tragweite gefällt werden? Ich bin überzeugt: Auch auf einer wissenschaftlich fundierten Basis hätte man bei entsprechendem Willen einen Ausstieg beschließen können – was ihm womöglich eine weitaus dauerhaftere Legitimation und auch Akzeptanz in der Gesamtbevölkerung verschafft hätte.

In diesem Sinn präsentiert unser Artikel ab S. 76 die Fakten. Vier Experten für Nuklearsicherheit und Reaktortechnik, darunter Joachim Knebel, Chief Science Officer am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), analysieren minutiös den Unfallhergang in Japan. Außerdem geht der französische Biophysiker Pierre Henry vom CNRS ab S. 68 der Frage nach, warum mit einem derart starken Beben wie am 11. März kaum gerechnet wurde – wo solche doch in der Geschichte Japans immer wieder vorkamen.

Erdbeben und Tsunami haben in Japan mehr als 20 000 Todesopfer gefordert. An Malaria sterben jedes Jahr rund eine Million Menschen, etwa die Hälfte von ihnen Kinder unter fünf Jahren. Schon seit Jahrzehnten versuchen Forscher, einen wirksamen Impfstoff gegen die Seuche zu entwickeln, bislang ohne Erfolg. Jetzt gibt es einen neuen, viel versprechenden Anlauf, der ein so genanntes Adjuvans nutzt – einen Impfstoffverstärker. Damit besteht offenbar eine realistische Chance, in wenigen Jahren Säuglinge in Afrika großflächig mit einer Vakzine zu impfen, die dann zumindest jedes zweite Kind vor der Krankheit schützt (S. 24).

Daneben verfolgen Wissenschaftler andere, auf den ersten Blick oft verblüffende Strategien: So immunisiert Rhoel Dinglasan von der Johns Hopkins University in Baltimore nicht die Menschen, sondern die *Anopheles*-Mücken, die den Malariaerreger beim Blutsaugen an ihre Opfer weitergeben. Forscher von der Yale University wiederum konzentrieren sich auf die hochselektiven Riechrezeptoren der Moskitos. Sie suchen nach Stoffen, die ganz spezifisch deren Funktion beeinflussen, um sie dann als Lockmittel für Fallen, zur Abschreckung der Insekten oder zu ihrer Irritation einzusetzen (S. 34). Derart vielschichtige Forschung ist wichtig: Um die Malaria eines Tages wirklich besiegen zu können, wird vermutlich ein ganzes Bündel solcher Maßnahmen nötig sein.

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



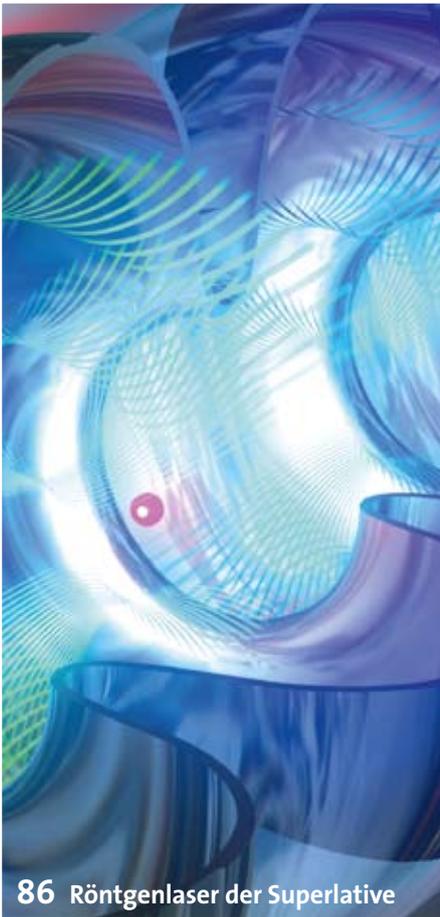
Unter Astrophysikern gilt die »kosmische Inflation« als allgemein anerkannt. Doch es gibt auch handfeste Gründe, die gegen diese Theorie sprechen. Der Physiker **Paul J. Steinhardt**, Direktor des Princeton Center for Theoretical Science an der Princeton University im US-Bundesstaat New Jersey, stellt sie ab S. 40 vor.



Pierre Henry ist Geophysiker am französischen Zentrum für wissenschaftliche Forschung (CNRS). Ab S. 68 geht er den Ursachen des schweren Erdbebens vom 11. März in Japan auf den Grund.



Den Geruchssinn von Stechmücken haben **John R. Carlson** und **Allison F. Carey** von der Yale University im Visier – speziell jenen der *Anopheles*-Moskitos, welche den gefährlichen Malariaerreger übertragen (ab S. 34). Sie fanden heraus, dass einige wenige Riechrezeptoren der Mücken hochselektiv menschliche Gerüche registrieren.



86 Röntgenlaser der Superlative



24 Tropenseuche Malaria



56 Sprache und Denken



76 Fukushima-Katastrophe

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

► 24 Neue Waffen gegen Malaria

Mary Carmichael

Rund eine Million Menschen tötet der Malariaerreger jedes Jahr. Endlich geben neue Impfstoffe Anlass zu Hoffnung. Daneben erproben Mediziner auch ungewöhnliche Strategien gegen die Tropenseuche – etwa das Immunisieren der krankheitsübertragenden Moskitos

34 Der Duft der Menschen

John R. Carlson, Allison F. Carey

Forscher haben jetzt jene Riechrezeptoren von Stechmücken identifiziert, die selektiv auf menschlichen Schweiß reagieren – ein weiterer neuer Ansatzpunkt für die Malariabekämpfung

TITELTHEMA

► 40 Kosmische Inflation auf dem Prüfstand

Paul J. Steinhardt

Was geschah direkt nach dem Urknall? Das Inflationsszenario beruht auf derart willkürlichen Annahmen, dass einige Forscher jetzt nach Alternativen suchen

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

50 Kalendergeschichten

Norbert Treitz

Wodurch genau entstehen die Jahreszeiten, und wozu braucht man eigentlich Zeitzonen?

SCHLICHTING!

54 Spaziergang am Meer

H. Joachim Schlichting

Weil sich Wasser gern um Sandkörner legt, läuft man am Strand oft wie auf einem befestigten Weg

SERIE PHILOSOPHIE

► 56 Sprache und Denken

Gottfried Vosgerau

Ist Denken immer ein innerer Monolog, oder kommt es auch ohne Wörter aus?



62 Den anderen verstehen

Albert Newen, Kai Vogetley

Was passiert, wenn wir uns in unsere Mitmenschen hinein-fühlen oder -denken? Eine neue Theorie soll diese Frage beantworten

Titelmotiv: iStockphoto / Dominic Current, iStockphoto / Vladimir Nikitin, Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet



40

TITELTHEMA

Kosmische Inflation

ERDE & UMWELT

68 Das Megabebeben in Japan

Pierre Henry

Seismologische Untersuchungen schlossen ein Erdbeben der Stärke 9 in der Region Fukushima so gut wie aus. Im Nachhinein zeigt sich, welche Warnzeichen die Experten übersehen haben und welchen Trugschlüssen sie aufgesessen sind

▶ 76 Fukushima auch in Deutschland?

Bernhard Kuczera, Ludger Mohrbach, Walter Tromm, Joachim Knebel

Was genau geschah in den Tagen nach dem 11. März im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi, und inwiefern könnten sich die Ereignisse in Deutschland wiederholen? Die Chronik einer Katastrophe

TECHNIK & COMPUTER

▶ 86 Nanowelt im Röntgenlicht

Gerhard Samulat

Bei Hamburg entsteht der über drei Kilometer lange Röntgenlaser European XFEL. Er wird die Forschung an Biomolekülen und Katalysatoren beschleunigen und Live-Einblicke ins molekulare Geschehen erlauben

INTERVIEW

92 Zukunftsbaustelle Photonenfabrik

Welche Chancen eröffnet die Umwandlung eines Beschleunigerzentrums in eine »Fabrik« für Synchrotronstrahlung? »Spektrum« sprach mit DESY-Chef Helmut Dosch

SPEKTROGRAMM

- 8 Quarks in ungesehener Eintracht • Weibchen auf Wanderschaft • Wurm lebt einen Kilometer tief unter der Erde • Warum Rauchen schlank hält • Die Quelle der Eisfontänen auf Enceladus • Endlose Nanodrähte aus dem Ofen

BILD DES MONATS

11 Biologische Schraube

FORSCHUNG AKTUELL

12 Planet der Phagen

Welche Rolle spielen Bakteriophagen in der Natur?

14 Großes Sterben durch große Brände

Vulkanismus als Ursache von Massenerlöschung bestätigt

16 Spinblockade in Solarzellen

Grund für geringen Wirkungsgrad von Plastiksolarzellen aufgedeckt

20 Das politische Gehirn

Ob konservativ oder liberal, lässt sich an der Hirnstruktur vorhersagen

21 Springers Einwürfe

Wasser entmystifiziert

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

95 Rezensionen

Stephen Hawking, Leonard Mlodinow: Der große Entwurf
Gerhard Schurz:

Evolution in Natur und Kultur

David P. Barash, Judith Lipton: Wie die Frauen zu ihren Kurven kamen
Daniel Lingenhöhl:

Vogelwelt im Wandel

Klaus Michael Meyer-Abich:

Was es bedeutet, gesund zu sein
Duncan Jones: Moon (Film) u. a.

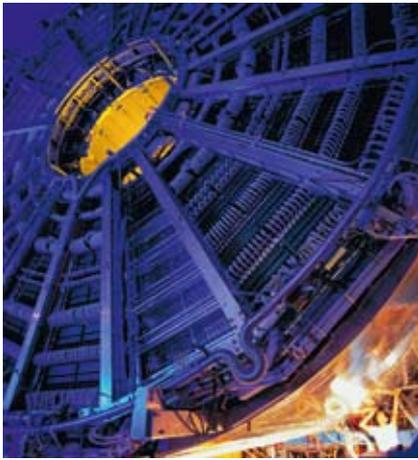
104 Wissenschaft im Rückblick

Vom Panamakanal zur Glasfaser

105 Exponat des Monats

Oskar Salas Mixturtrautonium

106 Vorschau



ANTONIO SABAY / CERN

Der Large Hadron Collider am CERN in Genf ist eines jener Großgeräte, mit denen Wissenschaftler den grundlegenden Fragen der Natur nachspüren.

dabei wahrscheinlich exponentiell. Ob wir nun Gravitationswellen-Detektoren errichten, die bislang keine Gravitationswellen nachweisen können, oder mit riesigen Teilchenbeschleunigern das theoretisch vorhergesagte Higgs-Boson suchen sollen, das aber ebenfalls unter Umständen gar nicht existiert – immer hat man den Eindruck, dass die Diskussion in der Mathematik zwischen Hilbert und Gödel zur Frage der widerspruchsfreien Mathematik (und damit einer widerspruchsfreien Theorie über die Welt) doch nicht so ganz ernst genommen wird.

Die Kunst der Wissenschaft ist es also wahrscheinlich, diese Widersprüche zu minimieren; ausräumbar oder vermeidbar sind sie aber grundsätzlich nicht. Wir messen so viel, dass aus den vielen Daten keine hinreichend einfache, sondern eine beliebig komplexe Theorie entsteht, die genau genommen nur im Stande ist, den gemessenen Einzelfall zu beschreiben. Zumindest könnten solche fundamentalen Grenzen wie die Planck-Länge der Grund sein, wa-

rum wir bei der Anwendung der althergebrachten Mathematik zur Lösung der offenen Probleme der Physik im Sinn des Artikels von Gerhard Börner in einer Sackgasse stecken.

Spirituelle Komponente in Platons Staat

Der Philosoph Julian Nida-Rümelin legte dar, welche Rolle der Gerechtigkeitssinn für den Einzelnen und die Gemeinschaft spielt. (»Was ist gerecht?«, Juli 2011, S. 62)

Martin Peschaut, St. Stefan ob Stainz (Österreich): Die modernen Spekulationen (ich kann sie nur als solche bezeichnen) über Gerechtigkeit sind zwar theoretisch brillant, scheitern aber, um Paul Watzlawick zu bemühen, an der »normativen Kraft des Faktischen«: Eine repräsentative Demokratie moderner Prägung kann nicht gerecht sein, weil die Repräsentanten vor allem ihren eigenen Vorteil und den ihrer Verbündeten im Auge haben. Das kann man schönreden und rational übertünchen, wie man will, letztlich entscheiden handfeste materielle Vorteile und die Quantität der einsetzbaren Druckmittel darüber, was gerecht ist: nämlich das, was der Stärkere als gerecht festsetzt.

Wissenschaft muss Widersprüche minimieren

Warum Forscher trotz enormer Anstrengungen fundamentale Fragen nicht beantworten können, fragte der Astrophysiker Gerhard Börner. (»Naturwissenschaft in der Sackgasse?«, Juni 2011, S. 66)

Peter Klamser, Egel: Der Autor zeigt die wesentlichen Probleme der heutigen naturwissenschaftlichen Forschung auf, die zu dem Ergebnis führen, dass mit immer höherem Aufwand immer »kleinere« oder unter Umständen gar keine Ergebnisse erzielt werden. Die Kosten pro Einheit Erkenntnisgewinn steigen

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (vi.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Jan Osterkamp (Spektrumprogramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 0 62 21 91 26-711, Fax 0 62 21 91 26-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 0 62 21 91 26-600, Fax 0 62 21 91 26-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 0 62 21 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 0 62 21 91 26-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 0 62 21 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 0 62 21 91 26-743, 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 € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L/Sfr. 14,-; im Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dözl; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0 211 887-2483, Fax 0 211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0 211 887-2481, Fax 0 211 887-2686
Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Matthias O. Hüttköper, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0 211 887-2053, Fax 0 211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 0 69 2424-4507, Fax 0 69 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 0 89 545907-18, Fax 0 89 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0 211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0 211 887-2387, Fax 0 211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 32 vom 01.01.2011.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

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: © 2011 (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

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
 Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: 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.



Was den heutigen Ansätzen fehlt, ist die Einbeziehung der Spiritualität (damit meine ich nicht die Religion) als transzendenten oder teleologischen Zweck jeder Gesellschaft oder jedes Staates. Solange dieser Punkt, den Platon sehr wohl in seine Überlegungen mit einbezogen hat, außer Acht gelassen wird, bleibt Gerechtigkeit ein theoretisches Konzept bar jeder praktischen Relevanz für den Bürger, der der Willkür einer sich selbst genügenden politischen Kaste ausgeliefert ist.

Damit wäre Gerechtigkeit auf institutioneller Ebene idealerweise platonisch in dem Sinn, dass jeder das erhält, was er braucht (nicht was er sich wünscht), und auf individueller Ebene kantianisch, indem jeder so handelt, dass die Grundlagen seines Handelns jederzeit zum universellen Gesetz erklärt werden könnten. Das dürfte auch Platon gemeint haben, als er vom »besonnenen« Bürger sprach.

Elektronenübertragung auf den Schwefel

Walkadaver sind ganze Ökosysteme, die jahrzehntelang eine Vielfalt von Lebewesen ernähren, wie der Paläontologe Crispin T.S. Little herausfand. (»Oasen der Tiefsee«, März 2011, S. 74)

Winfried Nelle, Dortmund: Der Autor behauptet, die Bakterien würden Sauerstoff aus Sulfat im Meerwasser extrahieren und damit Knochenfett verdauen. Die Aussage ist falsch, da die Bakterien die bei der (strikt) anaeroben Oxidation des Fettes zum Zweck der Energiegewinnung freigesetzten Elektronen unter anaeroben Bedingungen auf den Schwefel des Sulfats und nicht auf Sauerstoff übertragen.

Der Schwefel des Sulfats ist der Elektronenakzeptor, der von der Oxidationsstufe +VI durch Aufnahme von acht Elektronen zum Sulfid (Oxidationszahl -II) reduziert wird (dissimilatorische Sulfatreduktion). Der im Sulfat gebundene Sauerstoff spielt bei der Reaktion keine Rolle. Das kann er auch nicht, da er bereits vollständig reduziert ist (Oxidationszahl -II).

Karl Popper und der Objektbegriff

Philosoph Michael Esfeld beleuchtete, wie die Quantenphysik das philosophische Denken verändert. (»Das Wesen der Natur«, Juni 2011, S. 54)

Norbert Hinterberger, Hamburg: Ich halte Michael Esfelds Artikel nicht nur deshalb für den besten in dieser Philosophieserie, weil er bisher der Einzige war, der Karl R. Poppers Relevanz für die schwierige Diskussion des Objektbegriffs erkannt hat, sondern vor allem auch, weil ihm eine sehr dichte und geschliffene Darstellung der wichtigsten philosophischen Probleme der physikalischen Kosmologie auf diesem engen Raum gelungen ist.

Popper hat bekanntlich schon sehr früh darauf aufmerksam gemacht, dass wir nicht dazu gezwungen sind, Wahrscheinlichkeit (antirealistisch) als »Maß unseres Unwissens« zu betrachten, wie das in der Kopenhagener Interpretation (Bohr, Heisenberg, Born, von Neumann und andere) geschehen ist, sondern als »Verwirklichungs-Tendenz« beziehungsweise »Propensität« bestimmter physikalischer »Dispositionen«, etwa von Teilchen-Ensembles. All diese Begriffe stammen schon von Popper. Letzterer hat gegenüber der Untersuchung individueller Objekteigenschaften den Begriff des physikalischen Prozesses bevorzugt (im Übrigen auch für makrophysikalische Objekte), den man ja durchaus zwanglos und ohne Informationsverlust auf der fundamentalen Beschreibungsebene rein energetisch ausformulieren kann.

Anders gesagt: Auf den Materiebeziehungsweise Objektbegriff werden wir vermutlich wesentlich leichter verzichten können als auf den Begriff der Energie beziehungsweise der äquivalenten Masse. Der Begriff Materie könnte sich als idealistisch herausstellen – und damit mindestens als überflüssig, wenn nicht gar als irreführend in fundamentalen Diskussionen. Das sollten wir allein schon aus dem von Bell und Aspect hervorragend gestützten Phänomen der Nichtlokalität gelernt haben.

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

studivZ

www.spektrum.de/studivz

twitter

www.spektrum.de/twitter

Esfeld befreit uns hier mit seiner korrekten Beschreibung der Kausalität auf Quantenebene auch von der nicht funktionierenden klassischen Vorstellung von Determinismus. Das hat mir persönlich am besten gefallen – nicht zuletzt wohl deshalb, weil ich seine Auffassung von Kausalität selbst vertrete.

Glas leitet Wärme doch

Eines der ersten Rastertunnelmikroskope bestand größtenteils aus Glas. (»Exponat des Monats«, April 2011, S. 91)

Jörg Michael, Hannover: Die Behauptung, dass Glas keine Wärme leitet, stimmt so nicht. Jedes Material leitet Wärme. Glas leitet Wärme immerhin schlechter als Metalle, aber immer noch besser als gängige Kunststoffe.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter www.spektrum.de/leserbriefe

ELEMENTARTEILCHENPHYSIK

Quarks in ungesehener Eintracht

Bislang gelten Quarks als mäßig gesellige Elementarteilchen: Sie gruppieren sich lediglich zu Paaren oder Dreierbünden. Dementsprechend existieren nur zwei Sorten von Teilchen, die aus Quarks zusammengesetzt

sind: Hadronen, zu denen die Atomkernbausteine Proton und Neutron gehören, mit je drei Quarks und Mesonen, die aus einem Quark und einem Anti-Quark bestehen. Zwar erlaubt das Standardmodell der Elementarteilchenphysik Partikel, die aus mehr als drei Quarks bestehen – nachgewiesen wurden sie aber noch nicht. Nun haben Physiker möglicherweise erstmals ein Teilchen entdeckt, das sogar aus sechs Quarks besteht.

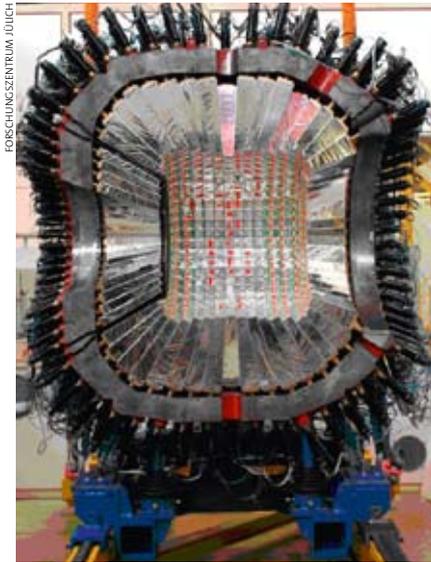
Beobachtet wurde es am Teilchenbeschleuniger COSY (COoler SYnchrotron) des Forschungszentrums Jülich, wo ein Forscherkonsortium mit 120 Beteiligten Protonen und Neutronen miteinander kollidieren lassen. Die zusammenprallenden Hadronen

Der schwedische WASA-Detektor lieferte Hinweise auf ein Teilchen aus sechs Quarks.

verschmelzen dabei zu Deuterium; zusätzlich entstehen so genannte Pi-Mesonen (Pionen). Mit Hilfe des so genannten WASA-Detektors nahmen die Wissenschaftler nun die Teilchenreaktionen mit bisher unerreichter Präzision unter die Lupe. Sie konnten so einen extrem schnell vergänglichen Zwischenzustand untersuchen, dessen Eigenschaften sich nicht allein mit herkömmlichen Teilchen erklären lassen.

Wie das Forscherteam berichtet, könnte es sich dabei um ein so genanntes Multiquark-Hadron aus sechs Quarks handeln. Allerdings ist es auch möglich, dass diese gar kein kompaktes Teilchen bilden, sondern ein winziges »hadronisches Molekül«: Es wäre analog zu einem normalen chemischen Molekül aufgebaut, aber viel kleiner und mit Quarks als Bausteinen statt Atomen.

Phys. Rev. Lett. 106, 242302, 2011



FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

ANTHROPOLOGIE

Weibchen auf Wanderschaft

Vor rund zwei bis vier Millionen Jahren lebten in Ost- und Südafrika die Australopithecinen, zu denen auch die berühmte Lucy gehörte, unsere »Urahnin«. Die Lebensweise dieser Vormenschen liegt noch weitgehend im Dunkeln, da sich Fossilfunden Informationen darüber nur schwer entnehmen lassen. Aus der Zusammensetzung von Zähnen zweier Australopithecinen-Arten schlossen nun Forscher vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, dass die Männchen ein Leben lang ihrem Geburtsort treu blieben, während die Weibchen auf Wanderschaft gingen – möglicherweise um sich anderen Gruppen anzuschließen und dort Partner zu suchen. Ähnlich verhalten sich heute Schimpansen und Bonobos, während bei den Gorillas beide Geschlechter wandern.

Die Wissenschaftler um Sandi Copeland rekonstruierten die Lebensgeschichte von 19 Individuen der Arten *Australopithecus africanus* und *Paranthropus robustus*, indem sie winzige Mengen an Zahnschmelz aus den fossilen Gebissen verdampften und darin das Verhältnis zweier Strontiumisotope bestimmten. Jede geologische Formation rund um die südafrikanischen Fundstellen Swartkrans und Sterkfontein weist ihr eigenes charakteristisches Isotopenverhältnis auf, das

Die Forscher analysierten den fossilen Zahnschmelz mittels Laser Ablation Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. Hierzu trugen sie mit einem Laser kleinste Mengen an biologischem Material ab (als Riffelung auf der Oberfläche im Bild erkennbar).

sich über die aufgenommene Nahrung im Zahnschmelz niederschlägt.

So gelang es Copeland und ihrem Team, die Reviergröße der untersuchten Australopithecinen zu ermitteln. Demnach beschränkten sich die Männchen beider Arten auf ein Gebiet von rund 30 Quadratkilometern. Ihr Revier war damit vergleichbar dem heutiger Gorillas, während etwa Schimpansen- und Bonobogruppen durchaus Gebiete von 600 Quadratkilometern durchstreifen.

Nature 474, S. 76–78, 2011



SANDI COPELAND/MPFW

LEBENSÄÄUME

Wurm lebt einen Kilometer tief unter der Erde

In tiefen Gesteinsschichten sind die Lebensbedingungen hart: Es ist heiß, Sauerstoff und Nahrung sind Mangelware. Entsprechend ließen sich dort bislang nur einzellige Spezialisten nachweisen, die immerhin bis zu drei Kilometer unter der Oberfläche ihr Dasein fristen. Jetzt entdeckten Wissenschaftler in mehr als einem Kilometer Tiefe erstmals verschiedene Fadenwürmer, darunter auch eine neue Art: *Halicephalobus mephisto*. Ein einziges Exemplar davon kam mit dem Kluftwasser aus 1,3 Kilometer Tiefe der südafrikanischen Beatrix-Goldmine ans Tageslicht.

Es ist etwa einen halben Millimeter lang, sein Körper ist deutlich geringelt und endet in einem relativ langen, fadenförmigen Schwanz. Im Labor zeigte sich das Tier recht unempfindlich gegenüber hohen Temperaturen: Erst bei 41 Grad Celsius stellte es das Wachstum ein – in seinem Lebensraum herrschen 37 Grad Celsius. Und es vermehrte

Im Kluftwasser einer südafrikanischen Goldmine, mehr als einen Kilometer unter der Erde, lebt *Halicephalobus mephisto*, ein winziger Fadenwurm.



GAETAN BORGONIE, UNIVERSITÄT GENT, BELGIEN

sich sogar, und zwar durch Parthenogenese, also mittels unbefruchteter Eizellen.

Gaetan Borgonie von der Universität Gent und seine Kollegen vermuten, dass *Halicephalobus mephisto* vor Ort Bakterienrasen abweidet. Mittels Radiokarbonmessungen datierten die Forscher das Kluftwasser auf ein Alter von 3000 bis 12 000 Jahren. Die Fadenwürmer und die Mikroorganismen bilden

dort also eine jahrtausendealte Lebensgemeinschaft. Diese wird jedoch bei der Bohrung zerstört, wenn Wasser mit hohem Druck den Biofilm aus den Gesteinsklüften spült, und regeneriert sich erst einige Zeit nach Abschluss der Arbeiten wieder. Wohl deshalb habe man zuvor noch keine Fadenwürmer in solchen Bohrungen gefunden, meint Borgonie.

Nature 474, S. 79–82, 2011

MEDIZIN

Warum Rauchen schlank hält

Rauchen ist zwar ungesund, steht aber im Ruf, schlank zu machen. Jetzt entdeckte ein Team um Marina Picciotto von der Yale University in New Haven, dass Nikotin tatsächlich über einen speziellen Rezeptor auf Hypothalamuszellen einwirkt und so das Hungergefühl dämpft.

Rezeptoren, die auf Nikotin reagieren, sind im Gehirn weit verbreitet – so auch im Hypothalamus, der den Stoffwechsel reguliert. Der von Picciotto und Kollegen identifizierte Rezeptortyp gehört dort zum körpereigenen Hungerregulationsmechanismus:

Er bindet bestimmte Signalmoleküle, die nach einer ausreichenden Mahlzeit freigesetzt werden, und aktiviert daraufhin so genannte Proopiomelanocortin-Zellen (kurz POMC-Zellen). Diese sorgen dafür, dass das Hungergefühl verschwindet. Beim Rauchen scheint das aufgenommene Nikotin den Regulationsmechanismus kurzzuschließen: Es aktiviert über den Rezeptor die POMC-Zellen, ohne dass man sich dafür vorher satt essen müsste.

Auf die Spur kamen die Forscher dem Rezeptor, indem sie bei Mäusen den POMC-Signalweg gentechnisch

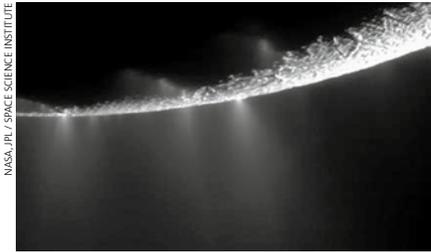
blockierten. Die Mäuse fraßen daraufhin trotz Nikotingabe genauso viel wie ihre Artgenossen, die kein Nikotin erhielten. Bemerkenswert sei, so Picciotto, dass es sich bei dem entdeckten alpha-3-beta-4-nikotinischen Azetylcholinrezeptor um einen anderen Typ handele als bei jenem, der für Nikotinabhängigkeit verantwortlich ist. Somit ließe sich ein maßgeschneiderter Appetitzügler entwickeln, der die schlank machende Wirkung von Nikotin imitiert, ohne über das Belohnungssystem Sucht auszulösen.

Science 332, S. 1330–1332, 2011

SONNENSYSTEM

Die Quelle der Eisfontänen auf Enceladus

Zahlreiche lange Risse ziehen sich nahe dem Südpol über den eisbedeckten Saturnmond Enceladus. Wasserdampf und Eispartikel schießen aus diesen »Tigerstreifen« ins All – mehrere tausend Kilometer weit – und liefern Nachschub für den diffusen E-Ring des Saturns. Doch woher stammt das ausgespiene Material? Eine neue



Entlang der »Tigerstreifen«, vulkanisch aktiver Spalten in der Südpolregion des eisigen Saturnmonds Enceladus, werden an verschiedenen Stellen Fontänen aus Eispartikeln und Wasserdampf in den Weltraum geschleudert.

Analyse zeigt nun so deutlich wie keine zuvor, dass es seinen Ursprung in einem riesigen Salzmeer hat, das sich unter der Eisdecke verbirgt.

Die Gelegenheit ergab sich, als die Raumsonde Cassini mehrfach durch die von den Fontänen gebildete Wolke flog und sich dem Saturnmond dabei bis auf 21 Kilometer näherte. Forscher um Frank Postberg vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg konnten dadurch zahlreiche frisch ausgespuckte Eiskörnchen im Massenspektrometer der Sonde analysieren. Dabei verglichen sie die Häufigkeiten der verschiedenen Typen dieser kalten Krümel. Sie stellten fest, dass nahe der Auswurfstelle gut 40 Prozent der Partikel dem salzreichen Typ angehören, der große Mengen an Natrium- und Kaliumsalzen enthält, während der von den Fontänen gespeiste Saturnring nur zu sechs Prozent aus diesem Typ besteht.

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie auf spektrumdirekt.de

Postberg und seine Kollegen extrapolieren die gemessenen Häufigkeiten auf die Ausbruchsstelle. Demnach machen die salzreichen Teilchen rund 70 Prozent aller ausgeworfenen Partikel und mehr als 99 Prozent der insgesamt ausgeworfenen Masse aus. Diese Ergebnisse seien jedoch unvereinbar mit der Annahme, dass die Eiskörnchen von der gefrorenen Eisoberfläche des Mondes stammen. Stattdessen sprechen sie für einen unterirdischen Ozean als Quelle, der aus dem Gesteinskern des Mondes ausgewaschene Salze enthält. Die salzhaltigen Teilchen seien schockgefrostete Salzwassertropfchen, die sich über dem Ozean bilden und schließlich – mitgerissen von Dampf und Gas – durch Risse in der Eiskruste ins All geschleudert werden. Da sie schwerer sind als salzarme Körnchen, schaffen es nur wenige von ihnen bis in den E-Ring des Saturns.

Nature 474, S. 620–622, 2011

NANOTECHNIK

Endlose Nanodrähte aus dem Ofen

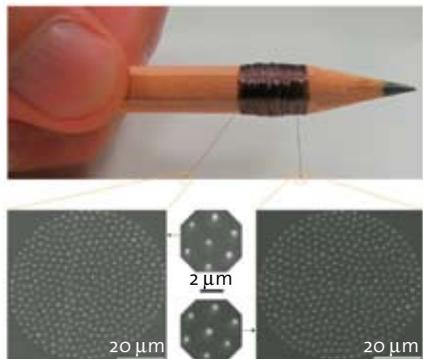
Kilometerlange Bündel aus weniger als zehn Nanometer dicken Drähten und Röhren lassen sich mit einem recht simplen Heiziehverfahren herstellen, wie Mehmet Bayindir von der Bilkent-Universität in Ankara und seine Kollegen demonstrierten. Diese Bauteile sind für sehr unterschiedliche Anwendungen begehrt – von der Mikrofluidik bis hin zu optischen Techniken. Bislang war es aber nicht gelungen, lang ausgezogene Nanofäden homogen genug zu produ-

zieren und die gewünschten Eigenschaften während des Herstellungsprozesses zu erhalten.

Die türkischen Forscher gingen von einem Rohling aus einem speziellen Halbleitermaterial mit etwa einem Zentimeter Durchmesser aus, den sie unter Vakuum langsam in einen 275 Grad heißen Ofen schoben, während sie ihn

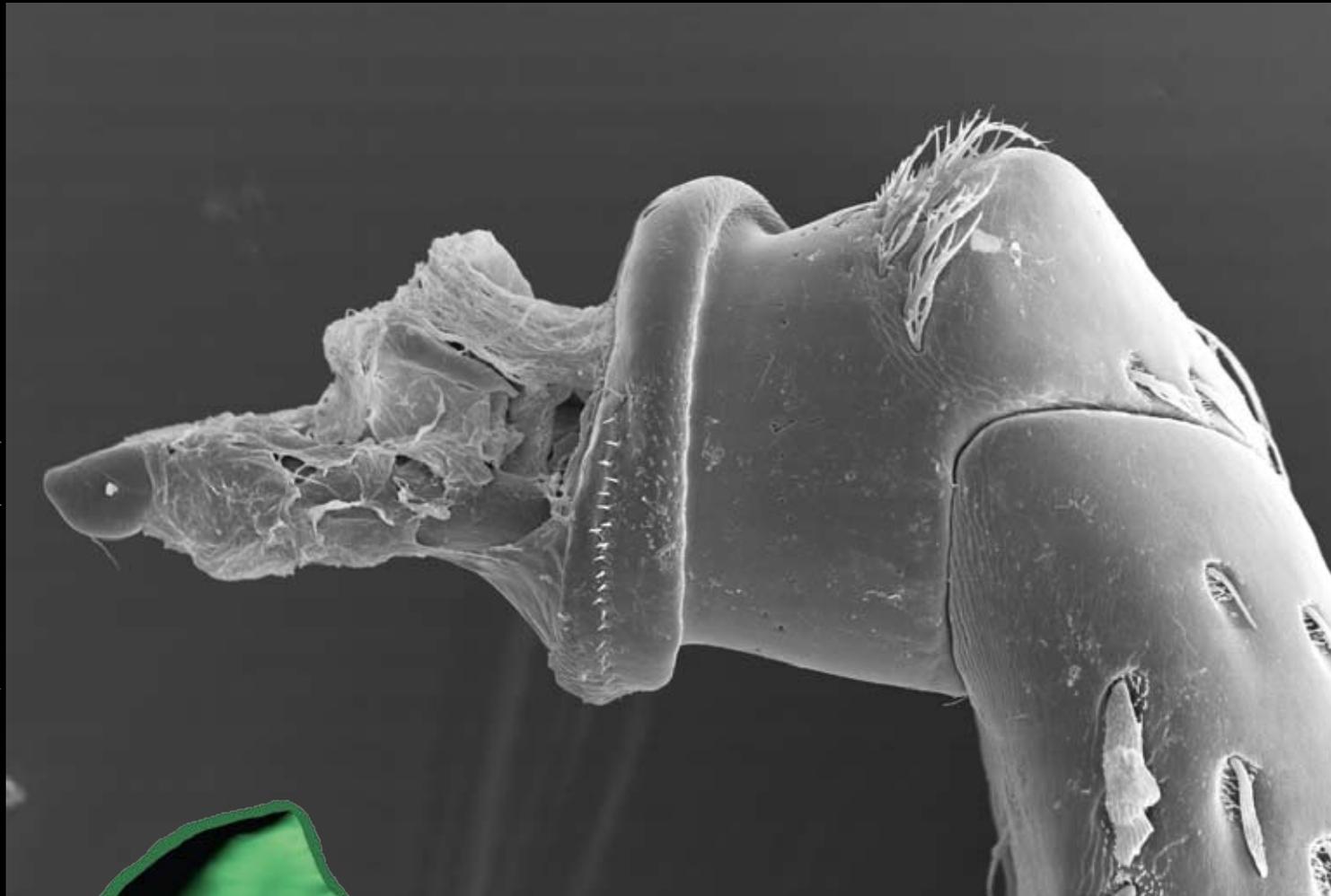
vom anderen Ende aus mit etwa 50 Zentimetern pro Minute zu einem Draht zogen. Zwar verringerte sich der Durchmesser des Rohlings dabei – je nach den Bedingungen – um den Faktor 25 bis 300, seine innere Struktur blieb jedoch bewahrt. Einzelne, dennoch entstehende Materialfehler heilten die Forscher durch Erhitzen im Vakuum aus. Die so erhaltenen, weniger als ein Millimeter dünnen Drähte verdrillten sie dann zu regelmäßigen Bündeln, die sie in einem zweiten Schritt wiederum zu Drähten auszogen. Nach drei dieser Schritte erhielten sie abhängig von Ausgangsmaterial und Ziehgeschwindigkeit Drähte oder Röhren mit Durchmessern von einigen Nano- bis Mikrometern – sowie einer Länge von mehreren hundert Metern bis Kilometern.

Nature Mat. 10, S. 494–501, 2011

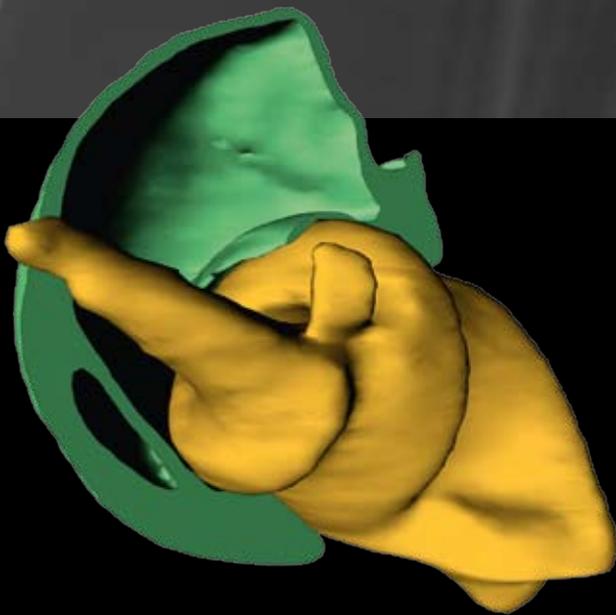


Das Herstellungsverfahren erhält die innere Struktur des knapp 60 Mikrometer starken Nanodrahts, wie Querschnittaufnahmen zeigen: Die gebündelten Fasern bleiben am Drahtanfang (unten links) und -ende (rechts) regelmäßig angeordnet.

BIOLOGISCHE SCHRAUBE



BEI DER AUFNAHME: THOMAS VAN DE KAMP ET AL., KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (WWW.KIT.EDU)



Der Mensch hat sich viele technische Prinzipien von der Natur abgeschaut – die klassische Schraube-Mutter-Verbindung schien jedoch seine alleinige Erfindung zu sein. Irrtum: Ein kleiner Rüsselkäfer verknüpft damit seit Millionen Jahren seine Beinglieder.

Trigonopterus oblongus lebt in den Wäldern Neuguineas. Das Schraubengelenk an der Hüfte verbesserte möglicherweise sein Klettervermögen. Die 3-D-Rekonstruktion links zeigt, wie das Außengewinde des Trochanters (gelb) in der Coxa (grün) verankert ist. Die lang ausgezogene Spitze des Trochanters mündet in einem Loch der Coxa und stabilisiert so das Bein entlang der Drehachse.

Science 333, S. 53, 2011

BIOLOGIE

Planet der Phagen

Bakteriophagen sind Viren, die Bakterien infizieren. In der Anfangszeit der Molekularbiologie dienten sie als einfache Modellsysteme, doch erst jetzt beginnt man, ihre Rolle in der Natur zu verstehen.

VON MICHAEL GROSS

Bakteriophagen, oft auch kurz Phagen genannt, sind der Wissenschaft schon seit rund 100 Jahren bekannt, doch wurde ihre Erforschung immer wieder vernachlässigt, sobald die Forscher ein neues Interessengebiet entdeckten. Schon früh rückte die antibakterielle Wirkung dieser für den Menschen völlig harmlosen Viren ins Rampenlicht, doch dann kamen die Antibiotika, und die so genannte Phagentherapie kam aus der Mode. Nur in der Sowjetunion – insbesondere in Tiflis, der Hauptstadt von Georgien – blieb man den Phagen treu.

Ab den 1940er Jahren benutzten die Pioniere der Molekularbiologie auf Anregung des berühmten Genetikers Max Delbrück (1906–1981) Phagen als einfache Modellsysteme. Die Forscher jener Zeit beschränkten sich dabei auf einige wenige Phagen, darunter T4 und Lambda, die das Bakterium *Escherichia coli* befallen und heute ebenso wie ihr Wirt zu den am besten untersuchten Arten gehören. Aber ein umfassenderes Interesse für Phagen und ihre Rolle in der Natur entstand daraus nicht.

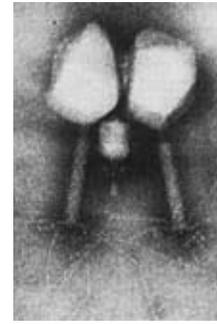
Auch die ersten vollständig sequenzierten Genome waren Phagengenome. Zuerst kam MS2, das aus RNA besteht, und dann, als erstes DNA-Genom, die Sequenz von Phi-X174. Doch dann strebten die Genomsequenzierer ebenfalls nach Höherem. Sie entwickelten ihre Methoden weiter, sequenzierten erst Bakterien, dann Pflanzen, Tiere und Menschen und ließen die Phagen wieder in Vergessenheit geraten.

Wiedererweckt wurde das Interesse an den natürlichen Bakterienkillern erst nach der Jahrtausendwende dank zweier

voneinander unabhängiger Entwicklungen: Zum einen führte die bedrohliche Verbreitung von Antibiotikaresistenzen in Bakterien zu einer Suche nach anderen Möglichkeiten, mit denen man Bakterien bekämpfen kann. Zum anderen arbeiten die Genomsequenzierer inzwischen sogar mit Proben direkt aus Gewässern oder dem Boden und entdecken, dass solche Proben aus der Umwelt sehr viel mehr Phagen enthalten, als man gedacht hatte. Selbst die von den Bakterien getrennt einzuordnenden Archäen (»Archäobakterien«) haben eigene Phagen, die bisher kaum erforschten Archäophagen. Man schätzt inzwischen, dass es auf der Erde zehnmal mehr Phagen als zelluläre Lebewesen gibt – wir leben sozusagen als tolerierte Minderheit auf dem Planeten der Phagen.

Welche Rolle diese allgegenwärtigen Viren für die Populationsdynamik und Evolution ihrer Wirtsorganismen spielen, ist noch weit gehend unbekannt. Seit 2008 wissen wir immerhin, dass Phagen in nährstoffarmen Biotopen der Tiefsee eine wichtige Funktion haben: Indem sie Bakterien auflösen, setzen sie die in ihnen enthaltenen Stoffe frei und entziehen sie so dem Zugriff von höheren Organismen. Auf diese Weise stehen die knappen Ressourcen weiterhin den Mikroben zur Verfügung.

Ein besseres Verständnis der Phagenökologie wäre auch aus medizinischer Sicht wünschenswert. Der Erreger der Cholera, *Vibrio cholerae*, wird zum Beispiel von rund 200 verschiedenen Phagenarten infiziert. Einige davon sind so genannte lysogene Phagen – das heißt, sie schleusen ihre Gene in das Genom des Wirts ein, wo sie über Ge-



DWIGHT L. ANDERSON

Elektronenmikroskopische Aufnahme von zwei T4- und einem Phizg-Bakteriophagen (Mitte)

nerationen hinweg weitervererbt werden können. Auch das Gen für das Cholera-toxin erhält *Vibrio* von solchen Phagen. Ohne diese wäre das Bakterium harmlos. Die so genannten lysitischen Phagen hingegen sind Zellpiraten, die grundsätzlich keine Gefangenen nehmen. Wenn sie eine Zelle infizieren, wird diese zur Phagenfabrik umgemodelt und im Zuge dessen zerstört. Diese Art von Phagen kann vermutlich die Übertragung der Cholera bremsen, doch um sie zu nutzen, müsste man die komplizierten Wechselwirkungen zwischen Phagen, Bakterien und Menschen besser kennen.

Modellsystem Rosskastanie

Erste Ansätze zu einem tieferen Verständnis der Rolle der Phagen in der Natur kommen aus der zoologischen Fakultät der University of Oxford – obwohl in diesen Untersuchungen gar keine Tiere vorkommen. Britt Koskella und ihre Kollegen wählten die Rosskastanie als Modellsystem. Diese Baumart leidet auch hier zu Lande seit einigen Jahren zunehmend unter einer neuen Rindenkrankheit, ausgelöst durch Bakterien der Art *Pseudomonas syringae*. Die Bakterien ihrerseits werden von Phagen infiziert.

Bisher untersuchten Forscher die wechselseitige Anpassung zwischen Phagen und Bakterien vor allem im Labor – und wenn in der Natur, dann nur in wässrigen Habitaten. Koskella konnte mit der Rosskastanie erstmals auf ein Modellsystem zurückgreifen, wo diese Wechselwirkung in einer klar definierten räumlichen Matrix stattfindet. Sie wies nach, dass der »Lebensraum« der

Phagen jeweils der ganze Baum ist: Bakterien aus anderen Blättern, auch von weit entfernten Zweigen desselben Baums, konnten die Phagen im Laborversuch ebenso leicht infizieren wie die aus demselben Blatt isolierten Bakterien. Mit aus anderen Bäumen isolierten Bakterien derselben Art taten sich die Phagen hingegen schwer. Offenbar definiert also der einzelne Baum die Grenzen der Gemeinschaft aus Bakterien und Phagen, innerhalb deren die wechselseitige Anpassung stattfindet (*American Naturalist* 177, S. 440–451, 2011).

Wie ein solches Wechselspiel zeitlich abläuft, untersuchte Angus Buckling, der auch an der Kastanienstudie beteiligt war, zusammen mit seinem Postdoc Pedro Gómez. In Laborversuchen beob-

Ein einzelner Kastanienbaum wie dieser enthält jeweils eine spezifische Gemeinschaft aus Bakterien und Phagen.

achtet man normalerweise einen »Rüstungswettlauf« der Bakterien und Phagen, wobei sowohl die Aggressivität der Phagen als auch die Resistenz der Bakterien mit der Zeit zunimmt. Dies kann man testen, indem man Phagen zu einem bestimmten Zeitpunkt der Entwicklung entnimmt und mit Bakterien aus derselben Kultur, aber von einem anderen Zeitpunkt zusammenbringt. Von den beiden Kontrahenten gewinnt stets der später entnommene – das heißt, die Kampfkraft beider Seiten nimmt mit der Zeit immer weiter zu.

Gómez und Buckling führten eine analoge Untersuchung nun erstmals in einem natürlichen Umfeld durch, nämlich in Bodenproben. Die Forscher fanden heraus, dass in der Natur kein Wettrennen stattfindet, bei dem beide Seiten immer besser werden. Zwar ändern sich beide Seiten auch in der Natur kontinuierlich und schnell, um die jeweiligen Angriffs- beziehungsweise Vertei-

digungsmaßnahmen des Gegners zu kontern. Dabei handelt es sich aber eher um ein zeitweiliges Ausweichen, nicht um eine bleibende Aufrüstung. Das zeigte sich daran, dass sowohl Phagen als auch Bakterien am wirksamsten gegen Kontrahenten kämpften, die zum selben Zeitpunkt entnommen worden waren. Sowohl gegen spätere wie auch gegen frühere Gegner sahen sie nicht so gut aus (*Science* 332, S. 106–109, 2011).

Eines ist klar: Es bleibt noch viel zu erforschen, bis wir diese zahlreichsten Bewohner unseres Planeten wirklich verstehen. Doch die Mühe könnte sich lohnen – als Belohnung winkt die Hoffnung, dass sie uns eines Tages dabei helfen können, jene bakteriellen Infektionen zu besiegen, gegen die unsere Antibiotika immer machtloser werden.

Michael Groß ist Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford, England.
www.michaelgross.co.uk



FOTOLIA / COLORELLI

Großes Sterben durch große Brände

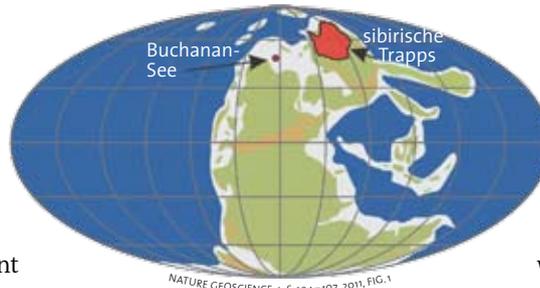
Wieso ging vor 250 Millionen Jahren fast alles Leben auf der Erde zu Grunde? Flugaschefunde in Kanada bestätigen nun die Theorie, dass verheerender Vulkanismus in Sibirien die Katastrophe auslöste.

VON KARL URBAN

Niemals in der bekannten Erdgeschichte stand das Leben so nahe am Abgrund wie vor etwa 250 Millionen Jahren. Erst vereinigten sich die Landmassen Laurasia und Gondwana im späten Karbon zum Superkontinent Pangäa. Immer mehr Arten konkurrierten um einen schrumpfenden Lebensraum, weil viele der besonders dicht besiedelten Küstenhabitate verschwanden. Dann entwickelte sich ein Treibhausklima und setzte das Leben auf der Erde weiter unter Druck – bevor schließlich eine bislang rätselhafte Folge von Ereignissen am Ende des Perms die Ökosysteme rund um den Globus fast völlig kollabieren ließ: 96 Prozent der marinen Spezies und 70 Prozent aller Arten an Land verschwanden für immer.

Die Katastrophe übertraf damit auch das viel bekanntere Artensterben, dem vor rund 65 Millionen Jahren die Dinosaurier zum Opfer fielen. Als Ursache dieser Massenextinktion gilt der Einschlag eines gigantischen Himmelskörpers, seit der Geologe Luis Alvarez 1981 weltweit an der Schichtgrenze zwischen Kreide und Tertiär das in Meteoriten häufige Metall Iridium fand.

Der Grund für das Artensterben an der Perm-Trias-Grenze ist dagegen unklar. Aus dieser Zeit existieren nur wenige Gesteine, die zudem kein eindeutiges Bild abgeben. Zwar behauptete Luann Becker von der University of Washington in Seattle 2001, an der Grenzschicht Fullerene außerirdischen Ursprungs gefunden zu haben: In den fußballförmigen Kohlenstoffmolekülen entdeckte sie Edelmoleküle, deren Isotopenverhältnis dem in einer speziellen Form von Meteoriten gleich (Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 60). Doch die Suche nach einem passenden Krater und nach ande-



Vor 250 Millionen Jahren waren alle irdischen Landmassen im Superkontinent Pangäa vereint. Damals schuf eine Serie gewaltiger Vulkanausbrüche die sibirischen Trapps: Flutbasalte mit einer Ausdehnung von 2,5 Millionen Quadratkilometern. Bei diesen Eruptionen gebildete Flugascheteilchen fanden Forscher nun am Grund eines Sees in Kanada, wohin Westwinde sie einmal um den Globus herum verfrachtet hatten.

ren Indizien für einen Einschlag blieb erfolglos; Berichte über Iridium oder durch hohen Druck zerrüttete Quarzkristalle ließen sich nicht erhärten.

Andere Forscher brachten die Flutbasalte in Sibirien mit dem rätselhaften Artensterben vor 250 Millionen Jahren in Verbindung. Dort nämlich spien just zur selben Zeit Vulkane über knapp 600 000 Jahre hinweg Unmengen an Lava aus, die mindestens 2,5 Millionen Quadratkilometer – das Siebenfache der Fläche Deutschlands – bedeckte. Mit den Ausbrüchen gelangten auch immer wieder massenhaft Kohlendioxid, Schwefelgase und Asche in die Atmosphäre.

Die sibirischen Trapps, wie die Flutbasalte fachsprachlich heißen, markieren damit eine der gewaltigsten vulkanischen Epochen der Erdgeschichte. Doch ob sie wirklich den Untergang so vieler Arten weltweit verursachten, war bisher fraglich. Einen markanten Einschnitt an der permotriassischen Schichtgrenze

können sie jedenfalls nicht allein erklären: den jähen Anstieg im Verhältnis des leichteren Kohlenstoffisotops der Atommasse 12 zum schwereren Kohlenstoff-13. Er ist so ausgeprägt, dass die Umwelt im späten Perm mit Material organischen Ursprungs geradezu überflutet worden sein muss. Denn jedes Lebewesen nimmt bevorzugt Kohlenstoff-12 aus der Umwelt auf, wodurch etwa fossile Lagerstätten aus abgestorbenen Organismen stark mit dem leichten Isotop angereichert sind. Der Paläontologe Paul Wignall von der University of Leeds (England) hat errechnet, dass selbst das Absterben fast aller damaligen Erdbewohner zusammen mit den geschätzten vulkanischen Ausgasungen nicht ausreichen würde, die anomalen Messwerte zu erklären. Deshalb müsste zusätzlich fossiler Kohlenstoff freigesetzt worden sein, der etwa in Kohlevorkommen unter Tage oder Methanhydraten am Meeresgrund gespeichert ist.

Eine mögliche Quelle dafür entdeckte ein Forscherteam um Henrik Svensen von der Universität Oslo (Norwegen) im Jahr 2008: Im sibirischen Tunguska-Becken bahnte sich das Magma einst seinen Weg durch Erdöl führende Schiefer, Karbonate und Salze, was in zweifacher Hinsicht fatale Folgen hatte. Zum einen trieben die hohen Temperaturen aus dem Ölschiefer zehntausende Gigatonnen flüchtige Kohlenwasserstoffe aus, die mit dem Magma an die Oberfläche gelangten und dort verbrannten. Dabei entstand doppelt so viel Kohlendioxid, wie die Vulkane selbst in die Luft bliesen. Zudem zeigten die norwegischen Wissenschaftler in Experimenten, dass schon bei Temperaturen von 275 Grad Celsius im Untergrund enorme Mengen an organischen Chlor- und

Bromverbindungen entstanden, die gleichfalls in die Atmosphäre ausgasen. Dort wirkten sie wie die vom Menschen freigesetzten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) und zerstörten die Ozonschicht. Dadurch konnte erbgutschädigende ultraviolette Sonnenstrahlung am Ende des Perms die Atmosphäre fast ungehindert durchdringen.

Die massive Verbrennung fossiler Kohlenwasserstoffe müsste weltweit Spuren hinterlassen haben. Die Suche danach gestaltete sich jedoch mühsam. Nun wurden Stephen Grasby vom Geological Survey of Canada in Calgary und zwei Kollegen fündig (Nature Geoscience 4, S. 104, 2011). Auf der Insel Axel Heiberg in der kanadischen Arktis entdeckten sie in Schiefen an der Perm-Trias-Grenze winzige Flugaschepartikel, die sie mit den sibirischen Trapps in Verbindung bringen. Ihrer Ansicht nach zeugen die Teilchen davon, dass das heiße Magma damals auch in Kohleflöze eindrang und sie verschmelzte, das heißt unter Luftausschluss zersetzte. Den dabei gebildeten Teer sowie Kohlegrus und geschmolzene Schlacke beförderte es mit an die Oberfläche und schleuderte das brennbare Gemisch kilometerhoch in die Atmosphäre. Dort entzündete sich das Material in der heißen Lava und erzeugte gewaltige Rauchwolken, die sich durch Luftströmungen über die gesamte Hemisphäre verteilten.

So gelangte die Asche mit dem vorherrschenden Westwind auch quer

über den panthalassischen Ozean mehr als 20 000 Kilometer weit bis in das heutige Nordkanada. »Wir sehen das gleiche Phänomen bei großen Stürmen in der Sahara«, erläutert Grasby. »Die feinen Staubteilchen sind in ihrer Größe vergleichbar mit der permischen Flugasche und werden bis nach Nordamerika geweht. Gelangen solche Partikel bei besonders heftigen vulkanischen Ausbrüchen bis in die Stratosphäre, können Winde sie spielend über sehr große Distanzen transportieren.«

Die Eigenschaften der Flugaschepartikel deuten auf sehr hohe Verbrennungstemperaturen hin. Denn nur unter diesen Bedingungen schmilzt die Asche auf und erstarrt beim Kontakt mit der kalten Luft zu winzigen tröpfchenartigen Gebilden, die von Gasbläschen durchzogen sind. Auch fest gebliebene Kohlereste in den kanadischen Schiefen lassen durch Risse und Deformationsstrukturen erkennen, dass sie stark erhitzt wurden. Tatsächlich ist die permische Flugasche laut Grasby und Kollegen kaum von den Verbrennungsrückständen moderner Kohlekraftwerke zu unterscheiden. Die Kanadier fanden in Rauchgasfiltern solcher Anlagen Partikel mit vergleichbaren Größen, Formen und optischen Eigenschaften.

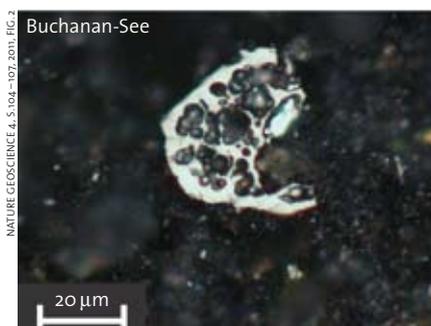
Trotzdem bleiben offene Fragen. So ist bisher unklar, wie groß die sibirischen Kohlelager am Ende des Perms wirklich waren – und ob ihr Anteil an leichtem Kohlenstoff-12 ausreichte, die abnormen Isotopenwerte der Sedimen-

te zu erklären. Außerdem lässt sich das Muster des Massenaussterbens mit dem Ascheregen allein nicht erklären. Dieser behinderte zwar die Fotosynthese und vergiftete Ökosysteme, doch legte sich die Asche gleichermaßen auf Kontinente und Meere. Warum aber war dann das Leben an Land deutlich weniger betroffen als das in den Ozeanen? Und wieso wurden im Meer vor allem solche Arten stark dezimiert, die am Boden lebten und Nährstoffe aus dem Wasser filterten – darunter Korallen, Armfüßer und Seelilien? Dagegen überlebten viele Vorläufer der modernen Fauna mit einem aktiveren Stoffwechsel (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 72).

Tote Meere

Wahrscheinlich waren die Meere schon vor dem Ausbruch des heftigen Vulkanismus in keinem guten Zustand. Auf dem Großkontinent Pangäa breiteten sich Wüsten aus. Zuvor hatten Niederschläge Kohlendioxid aus der Luft ausgewaschen, das am Boden dann bei Verwitterungsprozessen gebunden wurde. Bei der nun herrschenden Trockenheit aber reicherte sich das bei natürlichen Prozessen gebildete Treibhausgas in der Atmosphäre an und heizte die Erde auf. Dadurch löste sich auch mehr Kohlendioxid in den Meeren, so dass diese versauerten und Tiere mit Kalkgehäusen zu Grunde gingen.

Durch die Erderwärmung schmolzen im Lauf des Perms die Eiskappen an den Polen, wodurch möglicherweise die Umwälzpumpe erlahmte, die heute eine globale Ozeanzirkulation in Gang hält. Schlecht durchlüftete Bereiche in den Ozeanen waren also schon verbreitet, als massive Vulkanausbrüche und Brände nicht nur zusätzliches Kohlendioxid freisetzten, sondern auch den Sauerstoffmangel verschärften, indem sie die Ozeane mit Eisen und anderen Metallen aus den Aschewolken düngten. Es kam zu Algenblüten, und auch Zyanobakterien breiteten sich explosionsartig aus. Als die Organismen nach ihrem Absterben verwesten, zehrten sie die letzten Sauerstoffreste auf: Weite Meeresregionen verwandelten sich so in tote, stinkende Kloaken.



Die im Buchanan-See in Kanada gefundenen fossilen Teilchen sehen der Flugasche moderner Kohlekraftwerke sehr ähnlich. Das deutet darauf hin, dass das Magma der sibirischen Flutbasalte beim Aufstieg Kohleflöze durchquerte und sie verschmelzte, also in Abwesenheit von Sauerstoff zersetzte. Teer, Asche und Kohlegrus gelangten so mit an die Oberfläche, wo sich das brennbare Gemisch entzündete. Die Rauchwolken stiegen bis in die Stratosphäre empor und verteilten sich über die gesamte Nordhalbkugel.

Hinweise auf diese Ereignisse entdeckte Wignall schon 1996. Er fand in marinen Sedimenten auf Spitzbergen und in Südosteuropa mehrere Schichten, die auf fehlenden Sauerstoff im Wasser hindeuteten. Darin dominierte etwa das Mineral Pyrit, das sich nur unter Sauerstoffabschluss bildet. Diese Todeszone für alle Organismen mit aerober Zellatmung breitete sich mit der Zeit immer weiter aus und griff von Tiefseehabitaten auch auf die Küstenregionen über, wo heute die produktivsten Ökosysteme vorkommen. Hier ging die zuvor üppige standortgebundene Fauna, zu der etwa die Korallen gehören, komplett zu Grunde. Dagegen

konnten die mobileren Arten bis zu einem gewissen Grad ausweichen und in Bereichen mit noch ausreichend Sauerstoff überleben.

Wirklich lebensfreundlich waren zuletzt aber wohl nur noch wenige Regionen. Denn anhand von Biomarkern fanden australische Forscher im Jahr 2005 an diversen Fundstellen Anhaltspunkte dafür, dass selbst die lichtdurchflutete Zone nahe der Wasseroberfläche zeitweise keinen Sauerstoff mehr enthielt. Lediglich Mikroorganismen wie grüne Schwefelbakterien überlebten hier. Sie vertragen überhaupt keinen Sauerstoff und hausen deshalb für gewöhnlich tief im Sediment.

Auch Grasby entdeckte im kanadischen Norden noch vor der eigentlichen Perm-Trias-Grenze mehrere sauerstofffreie Phasen. Dünne Lagen mit Flugasche aus brennenden Kohlevorkommen kamen erst etwas später hinzu. »Normalerweise kann die Biosphäre die Belastung durch einen Klimawandel oder durch Flugascheemissionen einigermaßen verkraften«, vermutet er. »Doch im späten Perm war sie bereits so stark unter Druck, dass massiver Vulkanismus und seine Folgen wohl den Ausschlag für das große Sterben gaben.«

Karl Urban hat Geowissenschaften studiert und arbeitet als freier Journalist in Heidelberg.

FOTOVOLTAIK

Spinblockade in Plastiksolarzellen

Solarzellen aus Kunststoff sind preiswert, haben aber einen geringen Wirkungsgrad. Einer der Gründe dafür ließ sich nun festmachen: Ladungsträger blockieren sich gegenseitig. Diese Erkenntnis ebnet den Weg zu technischen Verbesserungen der viel versprechenden Solarstromlieferanten.

VON JAN BEHREND, ALEXANDER SCHNEGG UND KLAUS LIPS

Solarzellen sind auf dem Vormarsch. Sie sollen bis zu 30 Prozent des Stroms im erneuerbaren Energienetz der Zukunft liefern. Das setzt jedoch voraus, dass die Kosten der fotoaktiven Schicht in diesen Zellen nur noch eine untergeordnete Rolle spielen. Welche Materialien und Konzepte sich dabei durchsetzen werden, ist momentan noch nicht absehbar. Besonders große Fortschritte macht die Entwicklung organischer Solarzellen, die sich ohne hohen Energieaufwand bei niedrigen Temperaturen großflächig verarbeiten lassen – unter Einsatz erprobter Produktionsprozesse der Folienindustrie. Doch haben solche »Plastiksolarzellen« im Vergleich zu ihren Gegenstücken aus Silizium einen deutlich geringeren Wirkungsgrad von maximal 9 gegenüber 25 Prozent und eine wesentlich kürzere Lebensdauer. Bis zu ihrem Einsatz als Billigstenergiequelle ist also noch eine Menge Forschung nötig. Das

betrifft auch die zu Grunde liegenden physikalischen Mechanismen bis hin zu Quanteneffekten.

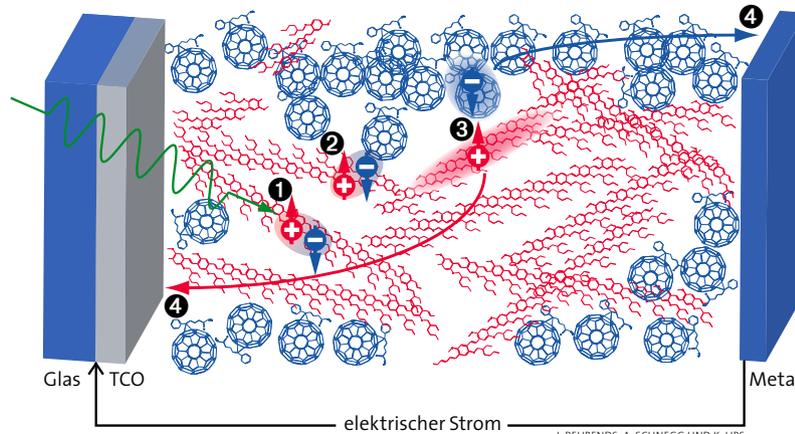
Organische Solarzellen bestehen aus dünnen Schichten Strom leitender Kohlenwasserstoffverbindungen. Bewährt hat sich unter anderem eine Kombination bestimmter Polymere mit Fullerenen, käfigförmigen Kohlenstoffmolekülen der Summenformel C_{60} . Absorbiert der Kunststoff Licht einer bestimmten Frequenz, wird ein Elektron auf ein höheres Energieniveau befördert. An seiner ursprünglichen Position bleibt ein »Loch« zurück, das einer positiven Ladung entspricht. Von der gegenseitigen elektrostatischen Anziehung gebunden, bilden Elektron und Loch – wie bei kristallinen Solarzellen auch – ein stabiles Gebilde: das Exziton. Dieses wandert durch das Polymer. Trifft das Elektron auf ein Fulleren, geht es auf das Käfigmolekül über, weil dessen Energieniveau tiefer liegen. Das Exziton zerfällt

dabei in weniger als einer Pikosekunde (10^{-12} Sekunden), und das Loch verbleibt auf dem Polymer. Von nun an können sich beide Ladungen unabhängig voneinander bewegen – allerdings nicht frei in alle Richtungen. Die Löcher bleiben auf die Polymermoleküle beschränkt und wandern bevorzugt an diesen entlang. Die Elektronen hüpfen von Fulleren zu Fulleren.

Dabei verzerren beide Ladungen auf Grund ihrer elektrostatischen Anziehungskraft die Struktur des jeweiligen Moleküls. Die Gebilde aus Ladung und elektrischer Verzerrung verhalten sich wie Teilchen – weshalb man von Quasiteilchen spricht – und werden als Polaronen bezeichnet. Positive und negative Polaronen (kurz: P^+ und P^-) übernehmen in organischen Halbleitern die Rolle der Elektronen und Löcher im Silizium. Damit der Solarzelle ein makroskopischer Strom entnommen werden kann, müssen sie zu den jeweiligen elek-

Ladungstrennung und Stromtransport

Eine **organische Solarzelle** besteht aus mehreren Schichten: einem Glasträger, einem optisch transparenten, leitfähigen Oxid (TCO) als Anode, dem fotovoltaisch aktiven Medium – hier ein Gemisch aus einem Polymer (rot) und einem Fulleren (blau) – sowie einer metallischen Kathode. Wird durch die Anode einfallendes Licht (grüner Pfeil) von einer Polymerkette absorbiert, bildet sich ein Exziton (gebundenes Elektron-Loch-Paar) (1), das zu einer na-



J. BEHREND, A. SCHNEGG UND K. LIPS

he gelegenen Polymer-Fulleren-Grenzfläche diffundieren kann (2). Dort geht das Elektron auf das Fulleren über, verzerrt es und bildet ein so genanntes negatives Polaron, während aus dem Loch im Polymer analog ein positives Polaron entsteht (3). Beide können unabhängig voneinander durch das jeweilige Material bis zu den Elektroden wandern (4). Diese lassen selektiv nur negative (Metall) oder positive Polaronen (TCO) passieren.

trischen Kontakten gelangen (siehe Kasten oben). Die beiden Elektroden sind so beschaffen, dass zur einen nur positive und zur anderen ausschließlich negative Polaronen Zutritt erhalten.

Unterwegs treffen die Polaronen auf eine Vielzahl von Molekül- und Phasengrenzen, an denen häufig strukturelle Defekte sowie chemische und atomare Unregelmäßigkeiten vorkommen. Die-

se enthalten mitunter ein energetisch tief liegendes Niveau, das im Stande ist, ein Polaron einzufangen. Außerdem können dort P^+ und P^- aufeinandertreffen und sich gegenseitig auslöschen

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

■ Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext

◀ Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält

▶ Vergünstigte Sonderhefte und das Produkt des Monats zum Spezialpreis

▶ Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

(rekombinieren). Um den Wirkungsgrad organischer Solarzellen zu steigern, müssen wir solche Vorgänge besser verstehen.

Auf seinem Weg zur Elektrode kann ein positives Polaron allerdings auch auf ein anderes P^+ treffen. Bisher ließ sich nur vermuten, was dann passiert. Demnach sollte bei einer solchen Begegnung eine quantenmechanische Eigenschaft der Polaronen eine wichtige

Rolle spielen: der Spin. Darunter versteht man den Eigendrehimpuls, also Drall, eines Teilchens, der mit einem magnetischen Moment verbunden ist. Polaronen verhalten sich somit in gewissem Sinn wie winzige Stabmagnete.

Beim Zusammentreffen zweier solcher Quasiteilchen kommt es nun entscheidend darauf an, wie ihre Spins zueinander ausgerichtet sind. Bei paralleler, also gleichsinniger Orientierung

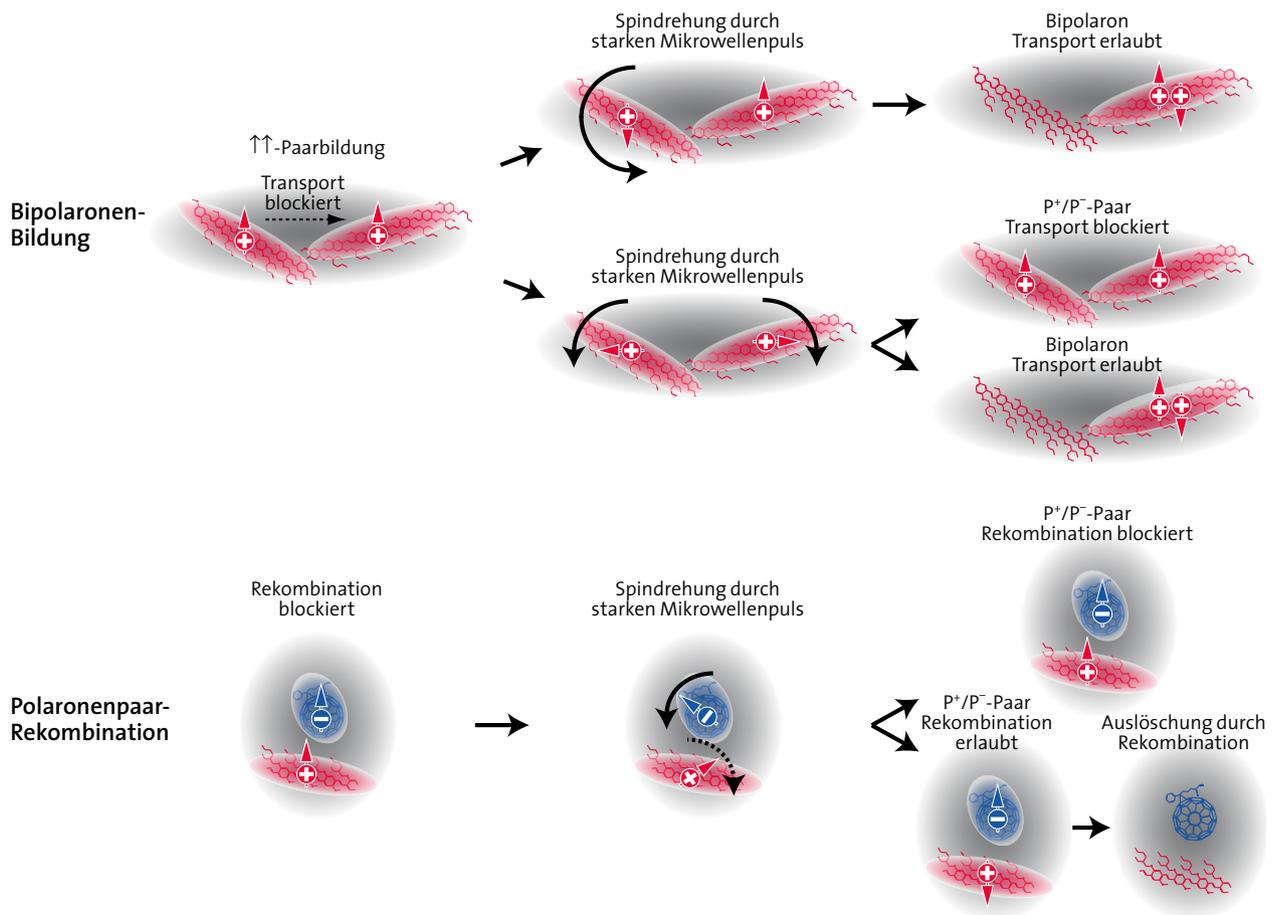
können sich die beiden Polaronen nach einer quantenmechanischen Regel, dem so genannten Pauli-Prinzip, einander nicht nähern. Der zur Elektrode wandernde Ladungsträger wird also gestoppt und kommt nicht weiter. Wenn dem so ist, beeinträchtigt das den Stromfluss in der Solarzelle.

Bei antiparalleler, also entgegengesetzter Orientierung der beiden Spins erlaubt das Pauli-Prinzip dagegen eine

Manipulation des Spins mit Mikrowellen

Wenn ein Polaron bei seiner Wanderung durch das Polymer auf ein anderes mit gleicher Spinorientierung trifft, kommt es wegen einer quantenmechanischen Regel – dem so genannten Pauli-Prinzip – nicht daran vorbei. Wird es jedoch mit einem schwachen Mikrowellenpuls (MW-Puls) einer bestimmten Länge selektiv um 180 Grad gedreht, kann es mit dem anderen Polaron vorübergehend zu einem Bipolaron verschmelzen und danach seinen Weg fortsetzen. Im Unterschied dazu dreht ein starker Mikrowellenpuls beide Polaronenspins simultan. Bei einem Drehwinkel von 90 Grad erreichen sie eine Orientierung senkrecht zum angelegten Magnetfeld, die aber nicht stabil ist.

Die Spins kippen deshalb zufallsabhängig in die parallele oder antiparallele Stellung. In der Hälfte der Fälle sind sie deshalb anschließend antiparallel ausgerichtet, so dass ein Bipolaron entstehen kann. Ein ähnlicher Fall liegt bei der Begegnung zweier entgegengesetzt geladener Polaronen vor. Die negative Ladung auf einem Fulleren und die positive eines Polymer-Polarons können sich kompensieren. Man spricht dann von Rekombination. Diese findet nicht statt, wenn beide Polaronenspins in die gleiche Richtung zeigen. Wiederum kann man mit gezielten Mikrowellenpulsen die Spins – je nach Pulsstärke einzeln oder zusammen – drehen und so die Rekombination herbeiführen.



J. BEHREND, A. SCHNEGG UND K. LIPS

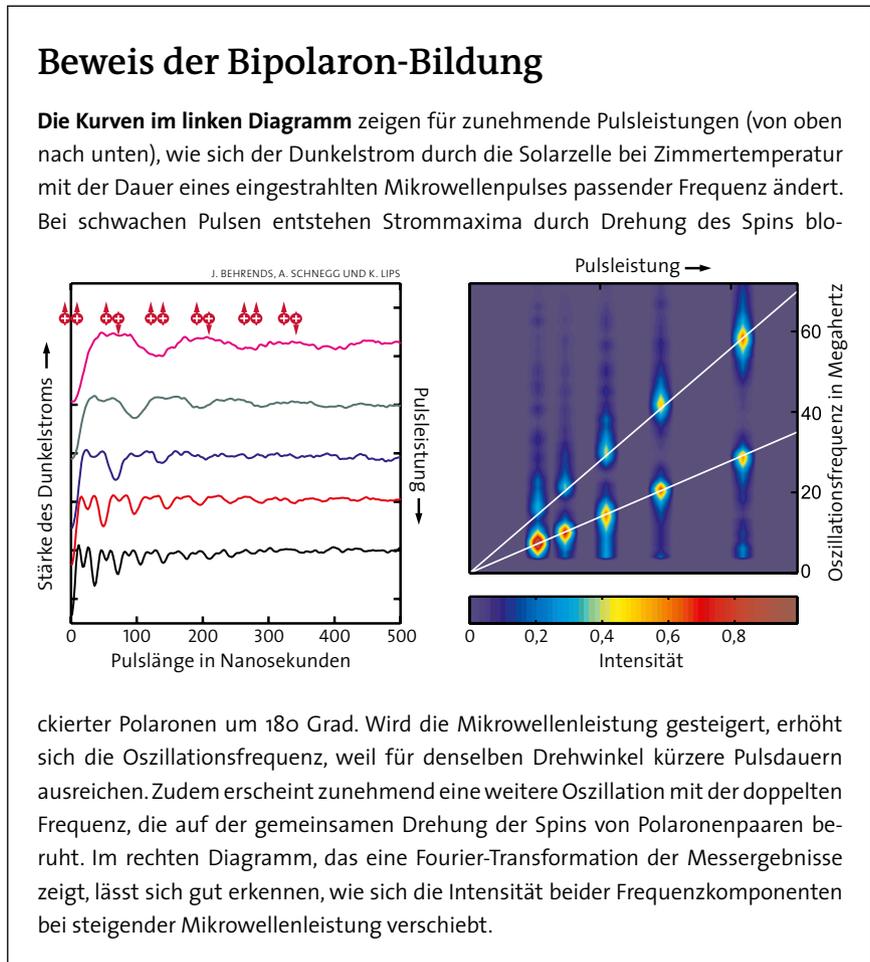
Verbindung der beiden Polaronen zu einem so genannten Bipolaron. Dieses ist allerdings instabil und zerfällt nach kurzer Zeit wieder in zwei einzelne Quasiteilchen. Damit kann sich das Polaron weiter hin zur Elektrode bewegen.

Im Institut für Silizium-Photovoltaik des Helmholtz-Zentrums Berlin wollten wir erstmals experimentell prüfen, ob diese theoretischen Vorstellungen zutreffen. Dazu bedienen wir uns einer in unserem Labor entwickelten speziellen Methode: der gepulsten elektrisch detektierten magnetischen Resonanz (pEDMR). Dabei wird die nur etwa 100 Nanometer dicke organische Solarzelle einem starken äußeren Magnetfeld ausgesetzt. Dadurch richten sich die Elektronenspins der Polaronen zufallsabhängig parallel oder antiparallel zu diesem Feld aus. Zwischen den beiden Orientierungen besteht eine Energiedifferenz, die primär von der Feldstärke abhängt. Sie wird in gewissem Maß aber auch von der lokalen Umgebung eines Polarons beeinflusst, die das Feld teilweise abschirmen kann. Indem wir diese Energien bestimmten und geeignete Messbedingungen wählten, konnten wir zeigen, dass wir es tatsächlich mit P^+ -Quasiteilchen zu tun haben.

Gezieltes Drehen von Spins

Zum Nachweis des Bipolaron-Mechanismus machten wir uns daran, Polaronenspins gezielt zu drehen. Das gelingt durch Einstrahlen kurzer Mikrowellenpulse, deren Frequenz und damit Energie der Energiedifferenz zwischen paralleler und antiparalleler Orientierung der Spins zum äußeren Magnetfeld entspricht. Da diese Differenz aber auch von der unmittelbaren Umgebung abhängt, ist sie für jedes Polaron ein wenig verschieden. Das erlaubt es, die Spins solcher Quasiteilchen selektiv zu drehen. Die Länge des Mikrowellenpulses bestimmt dabei den Drehwinkel. Wir maßen nun, wie sich der Stromtransport durch die Solarzelle änderte, wenn wir die Pulsdauer vergrößerten.

Wie sich zeigte, nahm der Strom zunächst zu, dann ab und wieder zu und so weiter. Wir beobachteten also eine



periodische Schwankung. Da wir vorher bereits wussten, dass es sich bei den wechselwirkenden Teilchen um P^+ handelt, war genau dieses Verhalten aber zu erwarten, wenn der Bipolaron-Mechanismus zutrifft. Zur Erklärung sei ein Polaron betrachtet, das durch ein anderes mit gleichsinnigem magnetischem Moment blockiert wird. Dreht man seinen Spin, so steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es über die Bildung eines Bipolarons seinen Weg fortsetzen kann. Bei einem Drehwinkel von 180 Grad ist diese Wahrscheinlichkeit am größten, weil nun eine antiparallele Anordnung vorliegt. Danach sinkt sie wieder.

Wir führten das geschilderte Experiment mehrmals durch, wobei wir die Intensität des Mikrowellenpulses schrittweise erhöhten. Diese Steigerung hat zwei Auswirkungen. Zum einen verringert sie die Pulsdauer, die nötig ist, den Spin um einen bestimmten Winkel zu drehen. Im Einklang damit erhielten wir Messkurven, die sich mit kürzeren Peri-

oden auf und ab bewegten. Zum anderen ist die Energieverteilung bei intensiveren Pulsen breiter. Dadurch lassen sich die Polaronen nicht mehr so selektiv anregen. Es kommt deshalb immer häufiger vor, dass der Mikrowellenpuls nicht nur bei einem, sondern bei beiden Quasiteilchen eines Paares den Spin dreht. Was bedeutet das?

Betrachten wir dazu ein Polaronenpaar mit nach oben weisenden parallelen Spins. Werden beide um 180 Grad gedreht, zeigen sie immer noch in die gleiche Richtung. An der misslichen Situation, dass das eine Polaron an dem anderen nicht vorbeikommt, hat sich also nichts geändert. Nach einer Drehung um nur 90 Grad verlaufen beide Spins dagegen horizontal. Dieser Zustand ist in dem äußeren Magnetfeld jedoch nicht stabil. Deshalb richten sich die Spins sofort wieder parallel oder antiparallel zu ihm aus. Die eine Hälfte kippt dabei nach oben und die andere nach unten. Auf diese Weise entsteht

VIDEOS

AUS DER WISSENSCHAFT –
SPANNEND UND INFORMATIV

ASTRONOMIE

Uni(versum) für alle!



Halbe Heidelberger Sternstunden: In Kurzvorträgen beantworten Heidelberger Astronomen nach und nach 70 Fragen über unser Universum.

GRAVITATIONSPHYSIK

Auf der Jagd nach Gravitationswellen



Pulsare sind nicht nur faszinierende Objekte. Jetzt nutzen die Forscher die schnell rotierenden Neutronensterne auch bei ihrer Jagd auf die bislang nur indirekt nachgewiesenen Gravitationswellen.

KONNEKTOMIK

Schaltplänen des Gehirns auf der Spur



Vor welche ethischen Herausforderungen stellt uns die individualisierte Medizin? Ein kritischer Dialog mit dem Genetiker Hans Lehrach und dem Philosophen Urban Wiesing.

ASTRONOMIE

Hubble – Mission Universum



2014 soll die Raumsonde Rosetta auf der Oberfläche des Kometen Churyumov-Gerasimenko eine Forschungssonde absetzen. Möglicherweise findet das Instrument dort auch Hinweise auf den Ursprung des Lebens.

TECHNIKGESCHICHTE

Der Mechanismus von Antikythera



Wüsste man nicht, dass es ein solches Wunderwerk gibt, hielt man seine Existenz für unmöglich: Dieser nach über 2000 Jahren vom Meeresgrund geborgene Zahnradmechanismus diente im antiken Griechenland der Berechnung astronomischer Ereignisse.

Diese und weitere Videos finden Sie unter:

www.spektrum.de/videos

aber – und das ist der Clou – mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Polaronenpaar mit antiparallelen Spins, das ein Bipolaron bilden kann, was die Blockade aufhebt.

Dadurch ergibt schon ein Mikrowellenpuls, der halb so lang ist wie der für eine Spindrehung um 180 Grad, ein Maximum im Stromtransport. In der Messkurve äußert sich das als Oszillation mit der doppelten Frequenz. Tatsächlich konnten wir beobachten, wie aus den ursprünglichen Maxima zunehmend Doppelhöcker wurden, wenn wir die Pulsintensität steigerten.

Unsere Messungen zeigen also klar, dass sich positiv geladene Polaronenpaare auf den Polymeren bilden können, die den Stromtransport behindern, was die Effizienz der Solarzelle be-

einträchtigt. Diese Information zeigt somit Möglichkeiten auf, den Wirkungsgrad zu verbessern. Die Polaronenblockade ließe sich zum Beispiel durch das Einbringen von Zentren verhindern, die fähig sind, den Polaronen-Spin durch magnetische Wechselwirkung schnell zu verändern. Solche »Spin-Brecher« könnten Plastiksolarzellen mit deutlich höherem Wirkungsgrad ermöglichen.

Jan Behrends, Alexander Schnegg und Klaus Lips sind promovierte Physiker und forschen über organische Solarzellen. Behrends arbeitet an der Freien Universität Berlin, Schnegg am Institut für Silizium-Photovoltaik des Helmholtz-Zentrums Berlin für Materialien und Energie (HZB). Klaus Lips ist stellvertretender Leiter dieses Instituts.

NEUROBIOLOGIE

Einblicke in das politische Gehirn

Ein Forscherteam unter Beteiligung von Oscar-Preisträger Colin Firth zeigte: Unterschiedliche politische Einstellungen laufen Hand in Hand mit Abweichungen in der Hirnstruktur.

VON PATRICK SPÄT

Mit dem Film »The King's Speech« stotterte er sich zum Oscar, jetzt ging er unter die Hirnforscher: Der britische Schauspieler Colin Firth wirkte kürzlich an einer wissenschaftlichen Studie mit, die bei Menschen unterschiedlicher politischer Orientierung die Ausmaße verschiedener Hirnregionen verglich (Current Biology, 7. April 2011, 10.1016/j.cub.2011.03.017).

Auslöser der ungewöhnlichen Konstellation war ein Auftritt von Colin Firth bei BBC Radio 4, wo er den Hirnforscher Geraint Rees traf, seines Zeichens Leiter des Instituts für kognitive Neurowissenschaft am University College London. Der Schauspieler wollte dabei von Rees wissen, ob man die politische Haltung eines Menschen im Gehirn ab-

lesen kann. Gefragt, getan: Nachdem sich zwei Abgeordnete des britischen Parlaments, der konservative Thatcher-Anhänger Alan Duncan und der linksliberale Labourpolitiker Stephen Pound, dazu bereit erklärt hatten, ihr Gehirn untersuchen zu lassen, entdeckte Rees mit Hilfe der strukturellen Magnetresonanztomografie tatsächlich Unterschiede im Aufbau der beiden Denkkorgane.

Doch für eine wissenschaftlich tragfähige Aussage genügt es natürlich nicht, nur zwei Gehirne miteinander zu vergleichen. Daher entschloss sich Professor Rees kurzerhand, 90 Versuchspersonen nacheinander in den Scanner zu schicken. Und tatsächlich bestätigten sich die Befunde von Duncan und Pound: Bei Linksliberalen nimmt der so

genannte anteriore zinguläre Kortex (ACC) im Schnitt ein deutlich größeres Volumen ein als jener von Konservativen; diese wiederum weisen eine vergrößerte rechte Amygdala (Mandelkern) auf.

Laut Studien ist der ACC vor allem dann gefordert, wenn wir Entscheidungen treffen und Fehler vermeiden müssen, etwa bei widersprüchlichen Informationen oder anderen Unsicherheiten und Konflikten. Und auch wenn wir uns in andere Menschen hinein fühlen und Mitleid empfinden, ist der ACC maßgeblich beteiligt. Die Amygdala hingegen spielt eine wichtige Rolle bei der emotionalen Bewertung von äußeren Reizen, indem sie die Freisetzung von Stresshormonen beeinflusst. Sie ist insbesondere dann aktiv, wenn wir uns bedroht fühlen. Ob ein Erlebnis in unserem Langzeitgedächtnis gespeichert wird, hängt oft davon ab, welchen emotionalen Wert die Amygdala diesem Erlebnis beimisst.

Damit sehen sich die Hirnforscher nun prinzipiell in der Lage, anhand gescannter Gehirne die politische Haltung von Probanden vorherzusagen. Allerdings: Warum Menschen auf dem Stimmzettel unterschiedliche Kreuze setzen, zeigt das Experiment nicht wirklich – sondern nur, dass die politische Gesinnung mit bestimmten Auffälligkeiten in unseren Hirnstrukturen Hand in Hand geht. Immerhin bestätigen die Arbeiten andere Studien, wonach konservative Personen tendenziell sensibler auf Angst einflößende Umweltfaktoren reagieren und Bedrohungen leichter erkennen.

Eine entscheidende Frage nach Henne und Ei ist allerdings weiterhin ungeklärt: Prägen genetische Baupläne unsere Hirnstruktur und darüber unsere politische Einstellung? Oder beeinflussen vor allem unsere Erziehung und andere kulturelle Einflüsse die Anatomie des Gehirns? Wer auf diese Frage eine wirklich abschließende Antwort fände, bekäme zwar sicher keinen Oscar – aber möglicherweise den Nobelpreis.

Patrick Spät ist promovierter Philosoph und freier Journalist in Berlin.

Wasser entmystifiziert

Keine auffälligen Strukturen an der Grenze zu Luft

Wasser ist eine besondere Flüssigkeit. Ohne sie gäbe es kein Leben, wie wir es kennen. Darum sind Exobiologen so begierig, Wasser auf anderen Himmelskörpern zu entdecken. Viele seiner Eigenschaften lassen sich durch die Molekülstruktur von H₂O erklären: zwei Wasserstoffatome, die in stumpfem Winkel an einem Sauerstoffatom hängen. Diese Asymmetrie in Verbindung mit einer ungleichen Ladungsverteilung macht Wassermoleküle zu elektrischen Dipolen. Dadurch neigen sie dazu, sich zu vergänglichen Aggregaten zusammenzulagern.

Dieser Hang zur Clusterbildung hat oft zu Spekulationen angeregt. Schon der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923), berühmt als Entdecker der nach ihm benannten Strahlen, mutmaßte, Wasser bestehe aus zwei Komponenten: Im flüssigen Milieu trieben mikroskopische Eisberge. Ähnliche Ideen über ein komplexes Innenleben von Wasser tauchen seither immer wieder auf.

Manche Wissenschaftler glauben, die lebensfreundliche Flüssigkeit ändere ihr Verhalten, wenn sie mit biologischen Substanzen in Berührung kommt. In lebenden Zellen ordne sie sich etwa zu »zellulärem« oder »vizinalem« Wasser, wobei sogar Quanteneffekte ins Spiel kommen sollen. Auf diese Weise, heißt es, fördere Wasser unter anderem die Bildung biologischer Makromoleküle.

Eine in alternativmedizinischen Internetforen heiß debattierte Variante ist ein vermeintliches »Gedächtnis« des Wassers. Es speichert angeblich die Gestalt von Biomolekülen, selbst nachdem sie durch Verdünnen völlig entfernt worden sind. Wenn sich das empirisch erhärten ließe – was bisher misslang –, ergäbe es einen Ansatzpunkt für einen naturwissenschaftlich begründeten Wirkmechanismus der Homöopathie.

Von solchen Ideen hält Pavel Jungwirth gar nichts (Nature 474, S. 168–169, 2011). Der tschechische Biochemiker begrüßt denn auch die Arbeit eines amerikanisch-kanadischen Teams um Igor V. Stiopkin, das die Wasseroberfläche genau unter die Lupe genommen hat (Nature 474, S. 192–195, 2011). An der Grenze zwischen Wasser und Luft, so die Überlegung der Forscher, müsste sich doch offenbaren, ob die Flüssigkeit ihre mikroskopische Struktur ändert, sobald sie mit anderen Substanzen, in dem Fall mit Luft, in Berührung kommt.

Stiopkin und seinen Kollegen gelang es, die Streck- und Stauchschwingungen der Wassermoleküle an der Oberfläche zu analysieren, indem sie schweres Wasser beimgen, das statt Wasserstoff das Isotop Deuterium enthält. Aus dem Spektrum der von den Vibrationen erzeugten Infrarotstrahlung schlossen sie auf die Lage der Oberflächenmoleküle und auf die Stärke ihrer Bindung an tiefere Flüssigkeitsschichten.

Das Ergebnis erfreut Jungwirth: Die Oberflächenschicht erweist sich tatsächlich als nur ein Molekül dick. Zwar erzeugen die obersten Wassermoleküle im Spektrum ein Signal, das eine quasi in die Luft ragende freie Wasserstoffbindung anzeigt; aber schon die unmittelbar darunter liegenden Moleküle sind durch Wasserstoffbrücken lose miteinander verbunden, wie es sich für normales Wasser gehört. Eine irgendwie auffällige, auch nur wenige Moleküle dicke Zwischenschicht, die durch ihre Randlage knapp unter der Oberfläche verändert wäre, gibt es nicht.

Das ist zwar ein schwerer Schlag für alle Spekulationen über ein Sonderverhalten an Grenz- und Kontaktflächen. Aber auch als passives Medium für Lebensvorgänge wirkt Wasser segensreich genug. Ob als Regen, Meer, Schnee oder Wolken – keine Substanz prägt unseren Blauen Planeten so umfassend wie das Leben spendende Nass. Dass es auch noch Biomoleküle formen und sich deren Gestalt merken soll, wäre wohl wirklich zu viel verlangt.



Michael Springer

Neue Waffen gegen Malaria

Endlich geben neue Impfstoffe Anlass zur Hoffnung. Daneben verfolgen Forscher verblüffende Strategien, um die tödliche Tropenkrankheit auszumerzen. Statt Menschen immunisieren sie – die Moskitos.

Von Mary Carmichael

Genau in diesem Augenblick arbeiten Wissenschaftler an Substanzen, mit denen sich möglicherweise der gefährlichste Krankheitserreger der Menschheit ausrotten lässt: *Plasmodium falciparum*, der Verursacher der Malaria. Mehrere viel versprechende Impfstoffe sind derzeit in Entwicklung; einer davon befindet sich sogar bereits im fortgeschrittenen Stadium der klinischen Prüfung beim Menschen. Sollte einer dieser Stoffe auch nur teilweise Schutz vor der Infektion

bieten, könnte er Millionen das Leben retten, vor allem Kindern und Schwangeren. Es wäre die erste wirksame Vakzine gegen einen Parasiten des Menschen – eine nobelpreisverdächtige Entdeckung.

»Wenn alles gut läuft, kann schon in fünf Jahren der erste Impfstoff bei sechs bis zwölf Wochen alten Säuglingen routinemäßig zur Anwendung kommen«, erklärt Joe Cohen, einer der weltweit führenden Malariaforscher. »Das ist ein fantastischer Erfolg; wir sind alle sehr stolz darauf.«

Regina Rabinovich hingegen möchte nicht so recht in den Jubel mit einstimmen. Die promovierte Medizinerin leitete eine Zeit lang die PATH Malaria Vaccine Initiative in Washington D. C. und ist derzeit Direktorin des Infectious Disease Program der Bill & Melinda Gates Foundation. Fragt man sie nach den Fortschritten der Malariaforschung in den vergangenen Jahren, zögert sie zunächst einmal.

Zwar organisiert Rabinovich eines der weltweit größten Förderprogramme für die Erforschung und Entwicklung von Malariaimpfstoffen. Dennoch lässt sie nicht mehr verlauten, als dass »im Moment manches im Gang ist«. Auf Nachfragen räumt sie ein, dass mehrere Impfstoffe sich vermutlich als nicht brauchbar erweisen werden, speziell einige, die sich noch in frühen Entwicklungsstadien befinden.

An das Auf und Ab von Hoffnung und Enttäuschung sind Malariaforscher nur allzu sehr gewöhnt. Mit einer aufwändigen Kampagne gelang es in den 1960er Jahren, die Erkranken-

AUF EINEN BLICK

STOPP DEM GEFÄHRLICHSTEN PARASITEN DER WELT

1 Bei der **Entwicklung von Impfstoffen gegen die Malaria** gab es immer wieder herbe Rückschläge. Dank technologischer Verbesserungen könnten neue Vakzine den Menschen in gefährdeten Regionen bald lebenslange Immunität gewährleisten.

2 Vor Kurzem begannen groß angelegte Studien zur Wirksamkeit eines Impfstoffs, dessen Entwicklung schon in den 1980er Jahren begann. Mediziner hoffen, dass er die **Infektionsrate** zumindest halbieren kann.

3 Daneben erproben Forscher Impfstoffe auf der Basis abgeschwächter **Parasiten** und versuchen, nicht die Menschen zu immunisieren – sondern die **Anopheles-Mücke**.



Die *Anopheles*-Mücke überträgt den Malariaerreger, der in weiten Teilen der Tropen Menschen mit Krankheit und Tod bedroht.

kung in vielen Teilen der Erde auszurotten und in anderen Gegenden zumindest stark zurückzudrängen. Doch dieser Erfolg barg bereits den Keim des Scheiterns in sich: Kaum schwand die Bedrohung durch die Malaria, wurden die Gesundheitsbehörden in vielen Ländern nachlässig. Und als sich dann auch noch herausstellte, dass die wichtigste Waffe im Kampf gegen die Seuche – das Insektizid DDT (Dichlor-diphenyltrichlorethan) – Vögel stark schädigt, wurde die Kampagne weit gehend eingestellt. Die Malaria kehrte zurück, und es erkrankten mehr Menschen als je zuvor. Zudem hatten sich viele Wissenschaftler inzwischen anderen Fragen zugewandt, weshalb die Impfstoffforschung stagnierte.

Es ist erstaunlich und zugleich beschämend, dass die Malariaforschung so lange vernachlässigt wurde und den Wissenschaftlern die nötigen Mittel dazu fehlten. Andererseits ist leicht zu erkennen, weshalb viele die Hoffnung auf Erfolg aufgegeben hatten. Die Malaria ist eben ein besonders zäher, schwer angreifbarer Gegner. Bis vor Kurzem war noch nicht einmal der Lebenszyklus des Parasiten im Detail bekannt. Die Erreger gelangen als so genannte Sporozoiten beim Stich eines Moskitos aus dessen Speicheldrüsen in den Blutkreislauf des Menschen, reifen in dessen Leber heran und wandern anschließend erneut in die Blutgefäße. Dort vermehren sie sich und werden dann von anderen Moskitos beim Blutsaugen wieder aufgenommen (siehe Grafik rechts).

Ein erster vergeblicher Anlauf

Eine kleine Gruppe von Forschern der Firma GlaxoSmith-Kline (GSK) unternahm Mitte der 1980er Jahre einen ersten ernsthaften Anlauf, einen Impfstoff herzustellen. Sie verwendeten dazu ein Oberflächenprotein von *Plasmodium falciparum*, dem Erreger der vor allem in Afrika weit verbreiteten und häufig tödlich verlaufenden Malaria tropica. Doch der Versuch scheiterte, und die Erkrankung kostete weiter jedes Jahr rund eine Million Menschen das Leben.

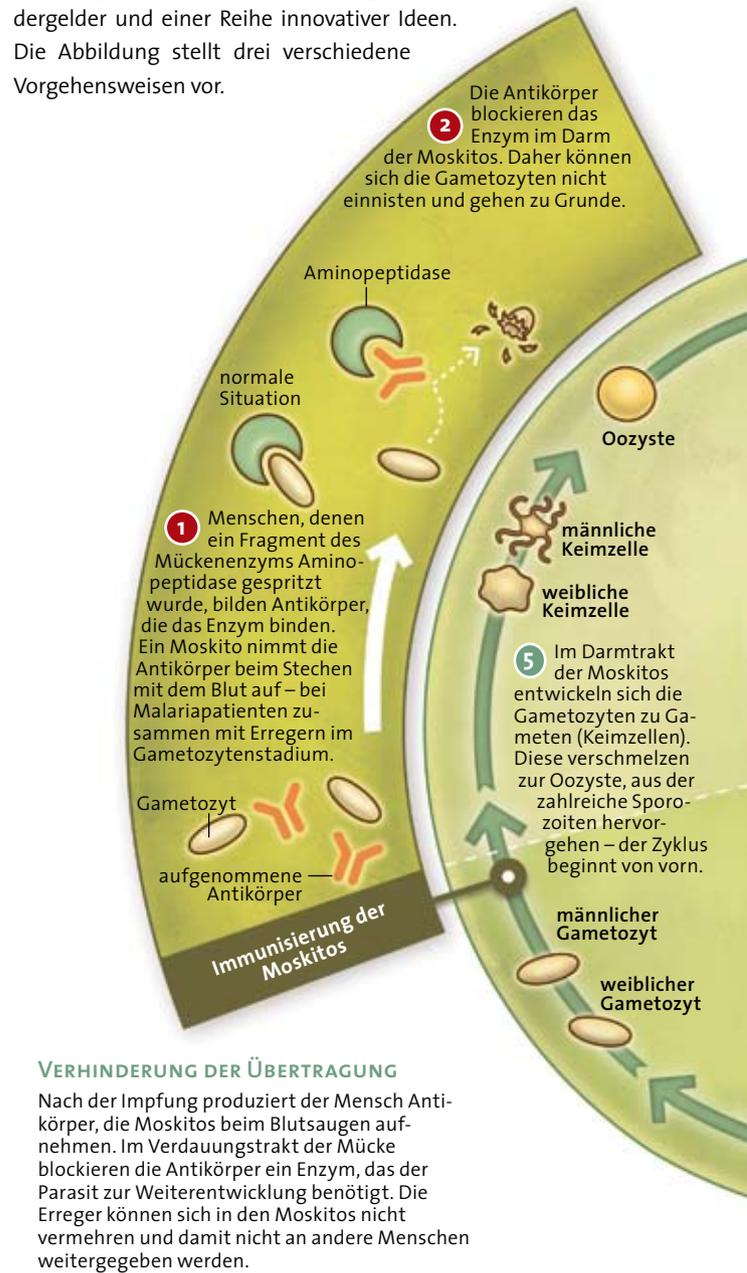
Heute finden die Impfstoffentwickler glücklicherweise weit bessere Bedingungen vor. Dank einer Reihe technologischer Innovationen und massiver finanzieller Unterstützung – in erster Linie von der Gates Foundation, die seit 1994 insgesamt 4,5 Milliarden Dollar in die Impfstoffforschung investiert hat und diesen Betrag im Lauf der nächsten zehn Jahre auf zehn Milliarden Dollar erhöhen will – laufen heute Dutzende von Projekten zur Entwicklung von Malariaimpfstoffen. Die meisten befinden sich allerdings noch in frühen Stadien.

In der Zwischenzeit haben auch die Wissenschaftler bei GSK ihren Impfstoffkandidaten fortlaufend verbessert. Nachdem sich ihre überarbeitete Vakzine namens RTS,S in Studien als sicher erwiesen hat, kann sie nun endlich an menschlichen Patienten klinisch geprüft werden. Derzeit finden an elf Orten in Afrika groß angelegte »randomisierte« Studien statt. Dabei erhalten die Teilnehmer zufallsgesteuert entweder den Impfstoff oder ein wirkungsloses Placebo. Dieser Malariaimpfstoff ist der bislang einzige, der dieses Stadium der klinischen Entwicklung erreicht hat.

Drei viel versprechende Strategien der Impfstoffentwicklung

Seit Jahrzehnten schon versuchen Forscher, einen Impfstoff zu entwickeln, der zuverlässig lebenslange Immunität gegen die Malaria erzeugt und auf diese Weise die Erkrankung ausrottet – bislang vergeblich. Der komplexe Lebenszyklus des Parasiten erschwert es, geeignete Ansatzpunkte für die Impfstoffentwicklung zu finden. In den letzten Jahren jedoch besserten sich die Erfolgsaussichten angesichts aufgestockter Fördergelder und einer Reihe innovativer Ideen.

Die Abbildung stellt drei verschiedene Vorgehensweisen vor.

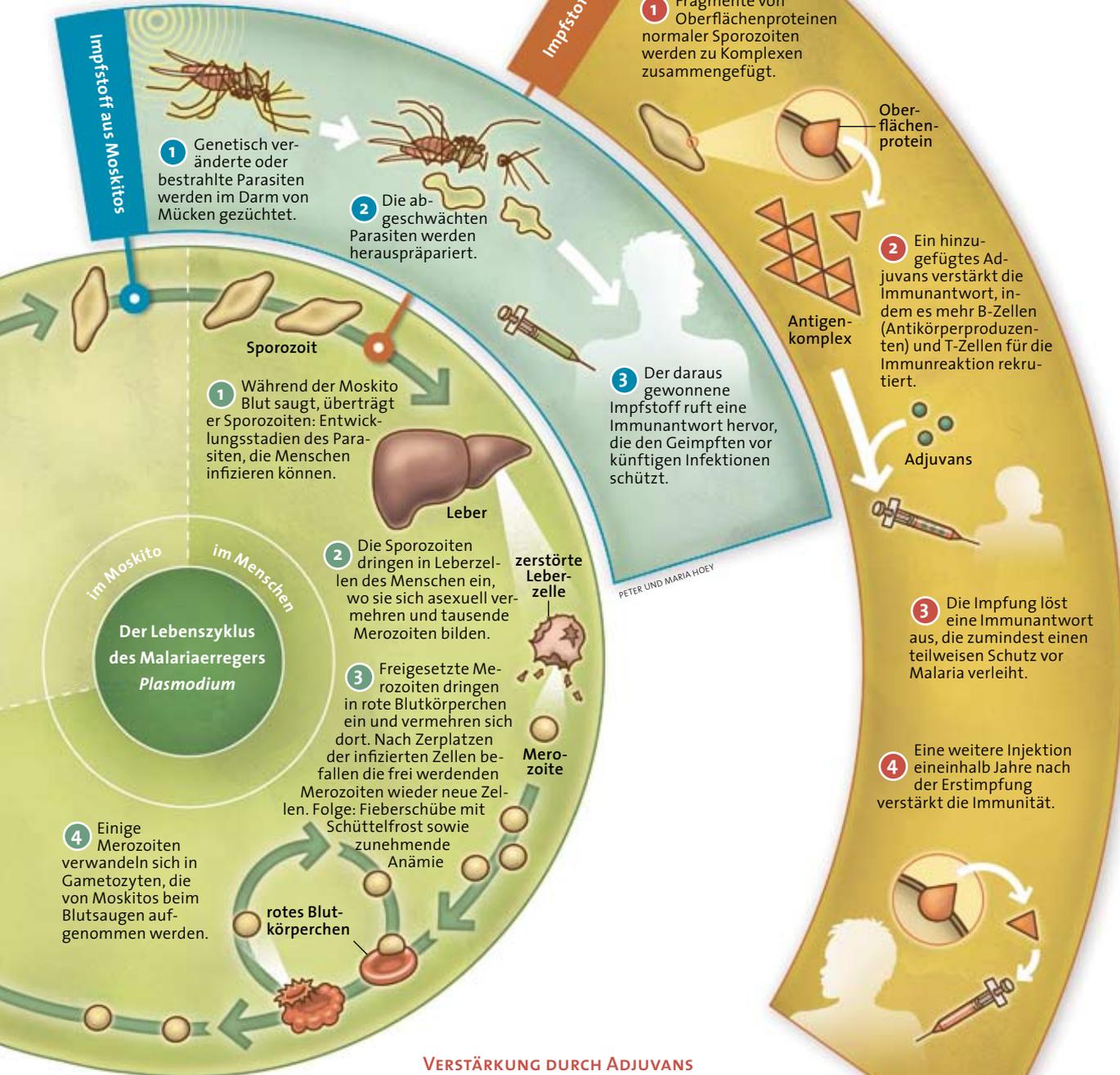


VERHINDERUNG DER ÜBERTRAGUNG

Nach der Impfung produziert der Mensch Antikörper, die Moskitos beim Blutsaugen aufnehmen. Im Verdauungstrakt der Mücke blockieren die Antikörper ein Enzym, das der Parasit zur Weiterentwicklung benötigt. Die Erreger können sich in den Moskitos nicht vermehren und damit nicht an andere Menschen weitergegeben werden.

ABGESCHWÄCHTE MALARIAERREGER

Attenuation ist eine gängige Methode, um Impfstoffe herzustellen: Dabei werden Infektionserreger so weit geschädigt, dass sie zwar noch leben, aber keine Erkrankung mehr hervorrufen. Impfstoffe aus solchen attenuierten Erregern können eine starke Immunantwort auslösen. Wissenschaftler nutzen diesen Ansatz zur Entwicklung einer Malariavakzine. Sie bestrahlen die Parasiten im Sporozitenstadium, präparieren sie aus den Mücken heraus und verwenden sie als Impfstoff. Zwar dringen die abgeschwächten Erreger bis in die Leber des Geimpften vor, sie können sich dort aber nicht weiterentwickeln und sterben ab. In ersten Studien beim Menschen wirkte der Impfstoff zu 100 Prozent.



VERSTÄRKUNG DURCH ADJUVANS

Eine von einem großen Pharmakonzern entwickelte Vakzine gegen den Malariaerregers *Plasmodium falciparum* befindet sich in einer fortgeschrittenen Phase der klinischen Prüfung. Da sich eine frühere Version dieses Impfstoffs als wenig wirksam erwiesen hatte, wurde die Immunantwort durch Zugabe eines Hilfsmittels (Adjuvans) verstärkt. Ersten Studien zufolge reduziert der neue Impfstoff das Infektionsrisiko um die Hälfte.

RTS,S beruht nach wie vor auf dem gleichen Protein von *P. falciparum* wie in den 1980er Jahren: dem Sporozoiten-Hüllprotein (englisch *circumsporozoite protein*, CSP). Damals wurde es für sich allein als Antigen eingesetzt – als derjenige Bestandteil des Impfstoffs, der die Produktion von Antikörpern oder andere Immunreaktionen auslöst, die dann den Parasiten abtöten sollen. Doch reagierte das menschliche Immunsystem zunächst nicht wie erhofft. Die nächsten 20 Jahre verbrachten die Forscher damit, den Impfstoff völlig neu zu konzipieren. Um eine stärkere Reaktion des Körpers hervorgerufen, konstruierten sie Komplexe aus vielen einzelnen der Antigene. »Dahinter stand die Idee, das Antigen mehr wie den echten Krankheitserreger aussehen zu lassen«, sagt Cohen, der die Entwicklung von RTS,S entscheidend vorantrieb.

Zwar reagierte der Körper geimpfter Probanden tatsächlich stärker auf diese neue Form des Impfstoffs, jedoch immer noch nicht genug, um einen ausreichenden Schutz gegen die Erkrankung aufzubauen. Dieses Problem tritt auch bei der Entwicklung von Impfstoffen gegen viele andere Krankheiten auf. Nach 15 Jahren gelang es den Forschern schließlich, mit Hilfe eines zugegebenen Hilfsstoffs die Anzahl der Antikörper produzierenden B-Zellen kräftig zu erhöhen. Das so genannte Adjuvans aktiviert zusätzlich T-Zellen, die im Körper viele wichtige immunologische Funktionen ausüben und die Antikörperproduktion steigern.

Diese optimierte Form des Impfstoffs wird zurzeit in der bislang größten klinischen Studie einer Malariavakzine geprüft. Insgesamt wurden 16 000 Säuglinge und Kleinkinder im Alter von 6 Wochen bis 17 Monaten geimpft. Im Lauf des Jahres ist mit ersten Daten zu rechnen. Bei viel versprechenden Ergebnissen müsste man als Nächstes die Auswirkungen des Impfstoffs bei routinemäßiger Anwendung erfassen, erklärt Christian Loucq, Leiter der PATH Malaria Vaccine Initiative, die neue Studien organisiert.

Eine 50-prozentige Erfolgsquote ist zunächst einmal gut genug

Der Nutzen einer effektiven Malariainpfung wäre enorm: Hunderttausende von Menschen könnten jedes Jahr vor dem Tod bewahrt werden – vorausgesetzt, der Impfstoff findet breite Anwendung. Allerdings gibt es hier zwei mögliche Hindernisse. Das erste ist die Geldfrage. Die Entwicklung der Vakzine bis zur Marktreife kostet mehrere hundert Millionen Dollar, weshalb der Impfstoff für die Routineanwendung in den Entwicklungsländern womöglich zu teuer wird. Glaxo-SmithKline hat jedoch angekündigt, den Preis knapp zu kalkulieren; die Gewinnspanne soll bei lediglich fünf Prozent liegen. Das Unternehmen hofft, dass internationale Konsortien und Organisationen wie UNICEF und die Global Alliance for Vaccine and Immunization den Impfstoff kaufen und in jenen afrikanischen Ländern verteilen werden, in denen er am dringendsten benötigt wird.

Ein zweites Problem besteht darin, dass RTS,S trotz Adjuvanzen wahrscheinlich weniger effektiv sein wird als übliche Impfstoffe gegen andere Krankheiten. Normalerweise



AP PHOTO / KAREL PRINSLOO

Die Generalprobe: Ein Arzt prüft die Wirksamkeit eines Impfstoffs in klinischen Studien in Afrika.

muss eine Vakzine zu mindestens 80 Prozent wirken, damit sie für den flächendeckenden Einsatz zugelassen wird. Im Fall von RTS,S zeigen selbst die günstigsten Daten aus den Studien der Phase II nur eine Reduktion der Erkrankungsrate um etwa die Hälfte. Da Malaria jedoch eine solch verheerende Seuche darstellt und der neue Impfstoff deutlich weiter entwickelt ist als andere Kandidaten, erscheint eine 50-prozentige Erfolgsquote als vorerst gut genug – entspricht dies doch bis zu 500 000 geretteten Menschenleben pro Jahr.

Kleinkinder sind die am stärksten gefährdete Bevölkerungsgruppe: Ihr Körper kann der Krankheit nicht viel entgegenzusetzen, während ältere Kinder und Erwachsene nach wiederholten Infektionen eine gewisse Immunität aufbauen und mit zunehmendem Alter weniger schwer erkranken. Selbst wenn sie überleben, tragen sie oft dauerhafte neurologische Schäden davon. Daher würde auch eine nur teilweise wirksame Impfung nützen – sollten sich geimpfte Kinder dennoch infizieren, würde die Malaria wohl zumindest milder verlaufen und nicht zum Tod führen.

Die Weltgesundheitsorganisation WHO und UNICEF impfen afrikanische Kinder bereits gegen andere Krankheiten wie Polio (Kinderlähmung) und Diphtherie. Dies geschieht etwa im gleichen Alter – um den dritten Lebensmonat herum –, in dem sie idealerweise auch RTS,S erhalten sollten. »Wir würden die Malariavakzine gerne in diese Impfprogramme einbinden«, sagt Cohen. »Vielleicht können wir uns einfach an die anderen Impfungen anhängen.« Das würde den Weg vom Labor zum Geimpften verkürzen und die Kosten niedrig halten, da kein neues Verteilungsnetzwerk aufgebaut werden müsste. »Allerdings gilt es jetzt sicherzustellen, dass die nötigen Strukturen vor Ort vorhanden sind«, erklärt Cohen. »Das wird nicht ganz einfach werden.« Zumal derzeit noch unklar ist, wie oft die Kinder Auffrischimpfungen erhalten müssten.

Hinzu kommen zwei weitere Probleme. Erstens wurde RTS,S nur gegen die afrikanischen Plasmodienstämme entwickelt. Der Impfstoff schützt nicht vor Infektionen mit

Stämmen, die auf anderen Kontinenten vorherrschen. Zweitens kann diese Vakzine auf Grund ihrer eingeschränkten Effizienz auch die afrikanische Malaria tropica nicht komplett ausrotten. Um das zu erreichen, müssten die Wissenschaftler den Impfstoff erneut verändern oder ihn zusammen mit einem anderen Präparat verabreichen.

Forscher bei GSK erwägen daher nun eine »Prime-Boost«-Strategie für die nächste Optimierungsrunde von RTS,S. Es handelt sich dabei um ein zweistufiges Impfschema, bei dem sowohl die Erst- als auch die Verstärkerimpfung das CSP enthalten sollen. Die beiden Vakzinen würden das Antigen jedoch in unterschiedlicher Weise präsentieren, was die Immunantwort verstärken sollte. Bislang fanden hierzu allerdings nur Tierversuche statt. Wenn es genauso lange dauert, die zweistufige Impfung zu optimieren wie den aktuellen RTS,S zu entwickeln, würden weitere 15 Jahre ins Land gehen, bis sich eine voll wirksame Version als Routineimpfung etabliert. »Aber wer weiß, was die Forscher in diesem Zeitraum sonst noch alles entdecken werden?«, merkt Cohen an.

Abgesehen von der momentan noch unzuverlässigen RTS,S-Impfung gibt es derzeit nur eine andere Methode, um gegen die Malaria immun zu werden, ohne zu erkranken: Man lässt sich von sehr vielen Moskitos stechen, die geschwächte Plasmodien mit geschädigtem Erbgut in sich tragen. Diese Parasiten gelangen zwar über den Blutstrom in die Leber, aber statt dort zu reifen und dann das Blut zu überschwemmen, bleiben sie in ihrer Entwicklung stecken und sterben ab. Dennoch produziert das Immunsystem derweil

fleißig Antikörper, und die sorgen für lebenslangen Schutz. Forscher der amerikanischen Marine entdeckten dieses Phänomen schon in den 1970er Jahren. Aber erst zwei Jahrzehnte später begannen Wissenschaftler, es näher zu untersuchen. Zwei von ihnen – Stefan H. Kappe vom Seattle Biomedical Research Institute und Stephen L. Hoffman, Geschäftsführer des Biotechnologie-Unternehmens Sanaria in Rockville, Maryland – betreiben heute Moskitozuchtlabors, in denen behandschuhte Mitarbeiter rund um die Uhr damit beschäftigt sind, aus den Speicheldrüsen der Mücken abgeschwächte Plasmodien zu gewinnen. Diese sollen als Grundlage für neue Impfstoffe dienen.

Genetische Manipulation stoppt den Vermehrungszyklus in der Leber

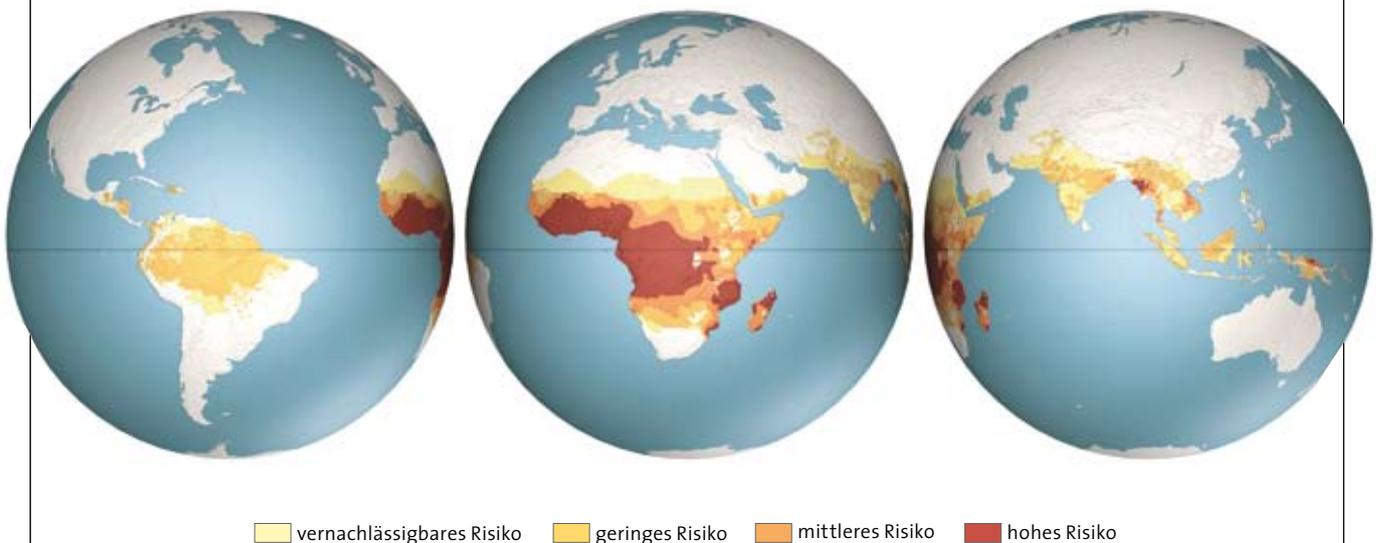
Wie lässt sich das Erbgut der Plasmodien schädigen, bevor sie sich in den Körpern der Moskitos vermehren? Zwei Wege bieten sich an. Die Forscher in Seattle zerstören gezielt bestimmte Gene, die es dem Parasiten überhaupt erst ermöglichen, in der menschlichen Leber auszureifen. Ohne diese DNA bleibt die Entwicklung der Plasmodien vorzeitig stehen. »Sie kommen zwar in die Leber hinein, aber nicht mehr heraus«, bringt Kappe es auf den Punkt.

Zurzeit inaktiviert sein Team nur zwei Gene, mit deren Hilfe der Parasit normalerweise eine Hülle aufbaut, während er sich in den Leberzellen einnistet. Diese Membran scheint zu verhindern, dass die Leberzellen die Infektion erkennen. Bei Parasiten ohne Schutzhülle sterben die infizierten Leber-

Wo die Malaria zu Hause ist

Das 2005 gegründete »Malaria Atlas Project« (www.map.ox.ac.uk), an dem die University of Oxford, das Kenya Medical Research Institute und der Wellcome Trust beteiligt sind, erfasst Tausende von lokalen Erhebungen der Parasitenhäufigkeit, um das jeweilige regionale Ansteckungsrisiko zu bestimmen. Das

Bild zeigt, welche Weltregionen am häufigsten von der gefährlichsten Art des Malariaerregers, *Plasmodium falciparum*, heimgesucht werden. Zu Grunde liegen die Prozentzahlen von Menschen, die den Parasiten in sich tragen – gleichgültig, ob sie Symptome zeigen oder nicht.



GEORGE RETSECK, NACH: HAY, S. ET AL.: A WORLD MALARIA MAP: PLASMODIUM FALCIPARUM ENDEMICITY IN 2007. IN: PLOS MED 6, 2009

zellen ab, so dass die Erreger nicht reifen können. Kappes Team verabreichte mehreren hundert Mäusen den Impfstoff aus derart geschwächten Parasiten – darunter auch gentechnisch veränderten Tieren, die menschliche Leberzellen in sich trugen.

Mit großem Erfolg: Die Forscher erzielten einen 100-prozentigen Schutz gegen eine Malariainfektion. Die Leber wird dabei nicht geschädigt, denn nur rund 10 000 Parasiten gelangen überhaupt in den Körper. Selbst wenn sie alle die Leber erreichten und jeder eine Leberzelle abtötete, wäre der Verlust im Verhältnis zur Größe des Organs mit seinen Millionen Zellen vernachlässigbar. Ganz abgesehen davon, dass die Leber eine hohe Regenerationsfähigkeit besitzt.

Bereitwillige menschliche Versuchskaninchen

Im Rahmen einer klinischen Pilotstudie sollen sich nun 20 menschliche Probanden, die zuvor mehrfach mit den abgeschwächten Plasmodien geimpft wurden, von jeweils fünf Moskitos stechen lassen, die echte Malariaerreger übertragen. Bei einer erfolgreichen Infektion würden die Plasmodien eine behandlungsbedürftige Erkrankung auslösen. Dann gehen alle Probanden eine Woche lang ihrem normalen Alltag nach, worauf sie sorgfältig untersucht werden. Sollte keiner an Malaria erkrankt sein, wäre dies ein Beweis dafür, dass der Impfstoff wirkt. Etwaige Befallene würden sofort medikamentös behandelt werden. »Dass wir mit echten Malariaerreger arbeiten können, macht die Studien besonders aussagefähig«, sagt Kappe. »Mit HIV oder anderen nicht heilbaren Infektionskrankheiten geht das natürlich nicht; hier jedoch können wir die Probanden wirksam behandeln, sollte es zu einer Infektion kommen. Trotzdem sind wir erstaunt, wie bereitwillig die Menschen an solchen Studien teilnehmen. Sie haben überhaupt keine Angst!«

Die andere Methode, das Erbgut von Malariaerregern zu schädigen, ist die althergebrachte radioaktive Bestrahlung.

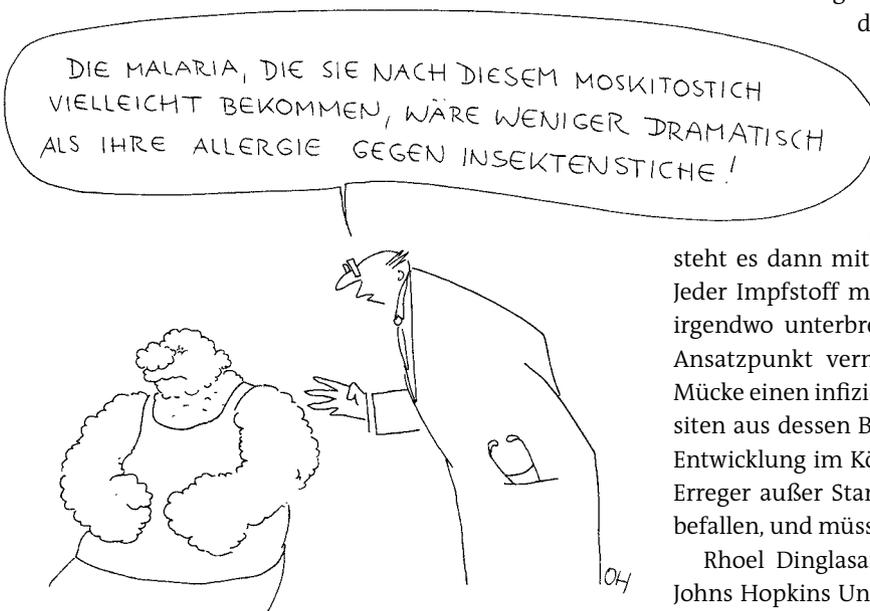
Diese Methode wird von Stephen L. Hoffman bei Sanaria verwendet. Ihr Vorteil: Sie verändert die DNA der Plasmodien an vielen Stellen statt nur in zwei einzelnen Genen. Möglicherweise ist dies ein zuverlässigerer Weg, die Weiterentwicklung des Parasiten in der Leber vollständig zu unterbinden. Parallel verfolgt Hoffman daneben allerdings auch die gezielte Vorgehensweise. Erst wenn beide Techniken empirisch getestet sind, wird sich herausstellen, welche besser ist, so Hoffman: »Die klinische Studie ist durch nichts zu ersetzen.«

Diese Erkenntnis wurde Hoffman im vergangenen Sommer überaus deutlich vor Augen geführt, als er erste Impfstudien mit bestrahlten Sporozoiten durchführte. Die Food and Drug Administration der USA (FDA) hatte Sanaria die Genehmigung für Versuchsreihen mit 100 Probanden erteilt. Hoffman glaubte damals, ein Mosquito injiziere zwischen fünf und zehn Plasmodien pro Stich, wenn es Malaria auf den Menschen überträgt. Auf dieser Schätzung basierte auch die Anzahl der Parasiten in seinem Impfstoff. Erst später stellte sich heraus, dass ein Mosquito mit einem einzigen Stich etwa 300 bis 500 Parasiten überträgt. »Die Plasmodiendosis in unserer Studienvakzine war etwa zehnmal zu niedrig«, erklärt Hoffman. »Das wurde uns aber erst klar, als die Studie schon zur Hälfte gelaufen war, und zu diesem Zeitpunkt ließ sich am Studiendesign nichts mehr ändern.« Immerhin bot selbst diese niedrige Impfdosis einen gewissen Schutz gegen Malaria, ohne jedoch die Effektivität von RTS,S zu erreichen.

Eine Zeit lang war Hoffman wegen dieser Ergebnisse recht niedergeschlagen. Das änderte sich, als er mit anderen Impfspezialisten und Biotechnologen sprach, die allesamt enthusiastisch reagierten. »Es ist doch fantastisch, was Sie da gemacht haben«, ermutigten sie ihn. »Oder dachten Sie etwa, Sie seien ein Magier, wenn Sie hofften, auf Anhieb einen kompletten Impfschutz zu erzielen? So läuft das nicht in der Wirklichkeit.« Hoffman möchte nun eine neue Studie beginnen. Er hat die Konzentration der Plasmodien in seinem Impfstoff erhöht und verabreicht ihn jetzt auch auf einem anderen Weg.

Es ist allerdings nicht völlig ausgeschlossen, dass es schlicht zu kompliziert ist, Menschen wirklich effektiv gegen Plasmodien zu immunisieren. Wie steht es dann mit dem Dritten im Bunde – dem Mosquito? Jeder Impfstoff muss den Übertragungszyklus der Malaria irgendwo unterbrechen, aber bisher wurde ein möglicher Ansatzpunkt vernachlässigt: jener Moment, in dem die Mücke einen infizierten Menschen sticht und dabei die Parasiten aus dessen Blut aufnimmt. Würde man deren weitere Entwicklung im Körper des Moskitos stoppen, so wären die Erreger außer Stande, den nächsten menschlichen Wirt zu befallen, und müssten zu Grunde gehen.

Rhoel Dinglasan, ein junger Molekularbiologe von der Johns Hopkins University in Baltimore, hatte eine Idee, wie



man dies realisieren könnte. Der gebürtige Philippiner, dem die Malaria aus seiner Heimat nur zu vertraut ist, forscht bisher lediglich an Mäusen und äußert sich entsprechend vorsichtig. Aber wenn die Strategie Erfolg hätte, würde das den Kampf gegen Malaria grundlegend verändern.

Sobald der Erreger in den Körper des Moskitos gelangt, versucht er sich im Darm des Insekts einzunisten. Dazu benötigt er ein bestimmtes Enzym auf der Schleimhaut des Verdauungstrakts, eine Aminopeptidase. Findet er dieses nicht innerhalb von 24 Stunden, wird er im Darm des Insekts verdaut und ausgeschieden, und das Mosquito kann keine Malaria übertragen. »Zumindest stellen wir uns das so vor«, fügt Dinglasan lachend hinzu. »Bisher hat noch niemand in den Hinterlassenschaften der Moskitos nachgesehen.«

Nehmen Moskitos Antikörper gegen die Aminopeptidase auf, so sind sie vor einer Infektion mit *Plasmodium falciparum* geschützt. Die Antikörper binden sich an das Enzym, blockieren es damit und verhindern, dass die Parasiten sich auf der Schleimhaut verankern. Dinglasan hat ein Teilstück der Aminopeptidase isoliert, das nur bei Moskitos vorkommt.

Spritzt er es in Mäuse, bilden sie dagegen Antikörper. Mücken nehmen diese beim Stechen der Mäuse auf, werden also bei der Mahlzeit passiv immunisiert. Wie es scheint, baut ihr Verdauungstrakt die Antikörper kaum ab. Und da der Parasit im Darm der immunisierten Mücke abstirbt, wird er nicht weiter übertragen. Falls das nicht nur bei Mäusen, sondern auch beim Menschen funktionierte, so wäre das laut Loucq eine Art immunologisches Moskitonetz.

Warum sollte ich mich impfen lassen – wenn ich dadurch nur andere schütze, aber nicht mich?

Dieser innovative Ansatz hat jedoch seine Schattenseiten. So ist es schwierig, einem Menschen zu vermitteln, dass er sich impfen lassen soll, obwohl er selbst zunächst gar nichts davon hat. Denn auch Geimpfte können sich infizieren, nämlich durch den Stich eines Moskitos, der zuvor eine nicht immunisierte Person gestochen hat und dadurch zum Überträger wurde. Wenn in einer Gegend genügend Menschen geimpft sind, wird die Erkrankungsrate letztlich sinken, da weniger infizierte Mücken umherfliegen. Zunächst jedoch werden trotzdem weitere Menschen erkranken – auch geimpfte.

Zudem könnte der Impfstoff Nebenwirkungen verursachen. Dies ist zwar bei jeder Vakzine möglich, aber normalerweise überwiegt bei Weitem der Vorteil, dass die geimpfte Person nun vor einer Infektion mehr oder weniger geschützt ist. Hier nehmen jedoch Gesunde das Nebenwirkungsrisiko auf sich, obwohl sie selbst keinen direkten Nutzen von der Impfung haben, nur einen indirekten durch die allgemeine Reduktion der Infektionsrate. Man könnte nun argumentieren, dass dies ein zentrales Gebot der Medizin verletzt: die Maxime »*primum nil nocere*« – richte vor allem keinen Schaden an.

Alternativen zu Impfstoffen

Ein effektiver Malariaimpfstoff wäre die erste erfolgreiche Vakzine gegen einen Humanparasiten. Gibt es einen Plan B, falls das Vorhaben doch noch scheitert?



JOHN STAMMER/VII

Das im Pflanzenschutz schon lange verbotene Insektizid DDT lässt sich gezielt in Innenräumen einsetzen. Dadurch soll das Umweltrisiko minimiert werden.



GETTY IMAGES / PER ANDERS PETERSSON

Moskitonetze halten die Mücken ab. Sie kosten wenig und senken nachgewiesenermaßen die Infektionsrate – sofern sie konsequent verwendet werden.



MICHAEL REEHE, UNIVERSITY OF ARIZONA

Der rote Fluoreszenzmarker zeigt es: Die Moskitolarve trägt ein Gen, das die Mücke gegenüber dem Malariaerreger resistent macht und damit auch die Übertragung auf den Menschen verhindert. Verdrängten solche Mücken nach Freisetzung ihre normalen Artgenossen, würde die Malaria allmählich verschwinden.

Es gibt jedoch bereits einige Präzedenzfälle, bei denen man Menschen impft, um andere zu schützen, beispielsweise wenn sich Männer gegen das humane Papillomvirus impfen lassen. Ihr persönliches Erkrankungsrisiko ist auch ohne Impfung gering, doch schützen sie dadurch ihre Sexualpartnerinnen vor durch den Virus ausgelösten Krebserkrankungen. Und auf lange Sicht könnte eine Vakzine, welche die Übertragung der Malaria blockiert, sogar effektiver sein als ein herkömmlicher Impfstoff, der nur diejenigen schützt, die ihn selbst erhalten haben.

Auf dem Weg zur endgültigen Ausrottung der Malaria

Die Strategie der Aminopeptidaseblockade hat mehrere Vorteile gegenüber anderen Impfmethoden. Aus technischen Gründen wäre diese Vakzine wahrscheinlich leichter im Großmaßstab zu produzieren als RTS,S oder die in Moskitos gezüchteten genmanipulierten Plasmodien. Außerdem besitzen alle gut 40 Moskitospezies, die Malaria übertragen können, dasselbe Aminopeptidaseprotein. Daher sollte die Immunisierung auch bei allen funktionieren. Und schließlich schützen die Antikörper offenbar sowohl gegen *Plasmodium falciparum*, die in Afrika vorherrschende Art, als auch gegen *Plasmodium vivax*, das in Asien häufiger vorkommt. RTS,S hingegen hilft nicht gegen *P. vivax*, da diese Spezies ein abweichendes CSP besitzt.

Tests, die Dinglasan bis dato bei Mäusen durchgeführt hat, zeigten eine 100-prozentige Wirksamkeit gegen *P. falciparum*. Bei *P. vivax* aus Thailand war die Impfung zu 98 Prozent erfolgreich. Ein enormer praktischer Vorzug, denn ein Malariaimpfstoff sollte möglichst universell wirken. »Es ist nämlich viel zu teuer, eine große Zahl verschiedener Impfstoffe herzustellen«, erklärt Dinglasan.

So weit ist er allerdings noch nicht. Aktuell versucht der Forscher herauszufinden, wie viel Antigen er im Labor maximal herstellen kann. Erst dann wird er über die praktische Anwendung nachdenken: Ließe sich sein Impfstoff mit RTS,S kombinieren? Wie viel menschliches Blut müsste ein Moskitos aufnehmen, um gegen Plasmodien immun zu werden? Und wann erfolgt der Schritt von Versuchen mit Mäusen zu größeren Impfstudien beim Menschen?

Die ganz große Frage hinter alledem lautet jedoch: Wie kann man die Malaria weltweit ein für alle Mal ausrotten? Zwar lässt sich die Krankheit auch heute schon – ohne einen effektiven Impfstoff – in Schach halten, mit Moskitonetzen und Medikamenten wie Chloroquin, Artemisinin oder Atovaquon-Proguanil. Doch dürften diese Maßnahmen nicht ausreichen, um den Erreger vollständig auszulöschen. Netze bekommen Löcher, Moskitos entwickeln Resistenzen gegen die Insektizide, mit denen die Netze behandelt sind, und Menschen möchten nicht immer unter engmaschigen Vorhängen schlafen.

»Moskitonetze sind überaus erfolgreich, solange sie unter kontrollierten Bedingungen eingesetzt werden. Dann können sie die Übertragung des Erregers effektiv verhindern«,

sagt Dinglasan. »Menschen haben jedoch Schwierigkeiten damit, Anweisungen Folge zu leisten. Die meisten Kinder schlafen tatsächlich unter den Moskitonetzen. Doch die Erwachsenen sitzen ungeschützt vor den Hütten und trinken Alkohol, der sie für die Moskitos noch attraktiver macht. Und wenn imprägnierte Netze die in den Häusern lebenden Mücken abgetötet haben, kommen andere Moskitos von draußen und besetzen die frei gewordene Nische.«

Die Malariaprophylaxe mit Medikamenten wiederum mag für Reisende sinnvoll sein, nicht jedoch für die Einwohner der betroffenen Länder: Die Präparate können unangenehme Nebenwirkungen haben, sind teuer und müssen regelmäßig eingenommen werden. Andere Maßnahmen, mit denen sich reichere Länder der Malaria entledigten – etwa die Trockenlegung von Sumpfgebieten und die großräumige Anwendung von DDT –, sind in vielen Entwicklungsländern undurchführbar.

Auf der Suche nach neuen Möglichkeiten untersuchen Wissenschaftler derzeit das Genom der Malariaerreger sowie bestimmte Abschnitte des menschlichen Erbguts, die möglicherweise eine gewisse Resistenz vermitteln können. Auch scheinbar abwegige Strategien zur Malariakontrolle werden inzwischen diskutiert, etwa die Freisetzung gentechnisch veränderter, plasmodienresistenter Moskitos, die dann mit den normalen Mücken konkurrieren und sie verdrängen sollen.

Entscheidend für einen Erfolg ist laut Dinglasan, dass die Weltgemeinschaft dauerhaft an einer Lösung des Problems weiterarbeitet. »Führende Malariaforscher haben mir gestanden, sie seien sich nicht sicher, ob es meiner Generation gelingen wird, ans Ziel zu kommen«, sagt er. »Vielleicht schaffen das auch erst unsere Kinder. Werden wir so lange durchhalten?« Der Malariaerreger wird jedenfalls nicht so schnell aufgeben. ~

DIE AUTORIN



Mary Carmichael schreibt regelmäßig für das amerikanische Nachrichtenmagazin »Newsweek« über Medizinforschung. Sie erhielt zahlreiche Auszeichnungen, darunter die Casey Medal for Meritorious Journalism. Derzeit ist sie Knight Science Journalism Fellow am Massachusetts Institute of Technology in Boston.

WEBLINKS

www.malarianexus.com

Wissenschaftliche Publikationen des Elsevier-Verlags zur Malaria

www.malaria.info

Hintergrundinformationen zu Malaria und Medikamenten für Reisende

www.who.int/topics/malaria

Sehr ausführliche, englischsprachige Website der Weltgesundheitsorganisation (WHO)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072201

Der Duft der Menschen

Anopheles-Moskitos, die Überträger der lebensbedrohlichen Malaria, finden ihre Opfer dank ihres gut entwickelten Geruchssinns. Jetzt haben Forscher jene Riechrezeptoren der Insekten identifiziert, mit denen diese menschlichen Schweiß wahrnehmen. Damit können sie bessere Mückenfallen und Abwehrstoffe für die Malariabekämpfung entwickeln.

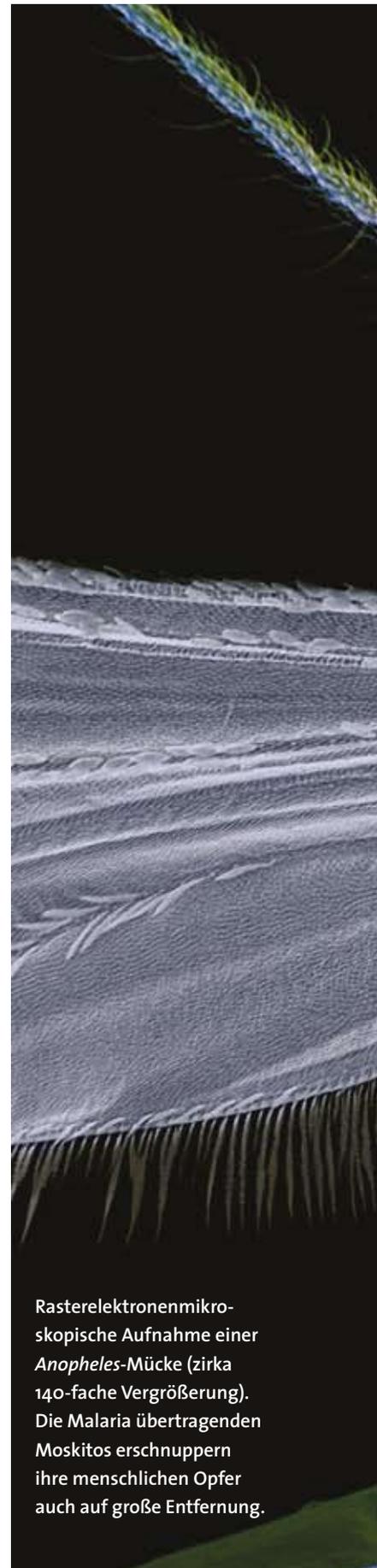
Von John R. Carlson und Allison F. Carey

Für ihre Suche nach einer Blutmahlzeit sind die Stechmücken, die in Afrika südlich der Sahara Malaria verbreiten, bestens ausgerüstet: Sie verfügen über einen außerordentlich feinen Geruchssinn, mit dessen Hilfe sie menschlichen Atem und Schweiß wahrnehmen – manchmal aus einer Entfernung von mehr als 50 Metern. Haben sie ein Opfer gefunden, stechen sie ihre kanülenähnlichen Mundwerkzeuge in ein Blutgefäß der Haut und beginnen zu saugen. Während der Mahlzeit gelangen Malariaparasiten aus dem Speichel der Mücke in den Blutkreislauf des Menschen – ein einziger Stich kann den Tod bringen.

Weitere Mosquitoarten bevorzugen andere Wirtstiere, etwa Rinder oder Vögel. Manche Mücken suchen sogar gezielt bestimmte Individuen innerhalb einer Gruppe auf: Wohl jeder hat schon erlebt, wie einige Menschen bei einem Sommerfest unbarmherzig immer wieder attackiert werden, andere hingegen gänzlich verschont bleiben.

In den Industrieländern sind Stechmücken meist nur lästig, doch in Afrika und einigen anderen tropischen Regionen der Erde verursacht die Malaria jährlich fast eine Million Todesfälle. Wir und andere Forscher versuchen, den Geruchssinn der Moskitos besser zu verstehen – also herauszufinden, mit welchen Mechanismen sie exakt jene Komposition flüchtiger Substanzen erkennen, die ihre bevorzugte Blutquelle charakterisiert. Das Ziel ist, Mittel und Wege zu finden, diese Gerüche zu maskieren oder aber das Geruchsradar der Insekten zu stören, um Stiche zu verhindern.

Unsere Forschungen zur Frage, wie der Malariaüberträger *Anopheles gambiae* seine menschlichen Opfer aufspürt, begannen allerdings mit Untersuchungen an einem ganz anderen Insekt: der Frucht- oder Taufliege *Drosophila melanogaster*. Im Gegensatz zu Moskitos vermehrt diese sich schnell, ist leicht im Labor zu halten und lässt sich genetisch einfach



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer *Anopheles*-Mücke (zirka 140-fache Vergrößerung). Die Malaria übertragenden Moskitos erschnuppert ihre menschlichen Opfer auch auf große Entfernung.



**MALARIABEKÄMPFUNG
MITTELS DUFTSTOFFEN**

1 Wissenschaftler versuchen herauszufinden, wie Stechmücken den **Schweiß** oder die **Atemluft** des Menschen von anderen Gerüchen in der Natur unterscheiden. Dies ist besonders wichtig für die Bekämpfung der Tropenkrankheit Malaria, die von der Mücke *Anopheles gambiae* übertragen wird.

2 Die Autoren des Artikels untersuchten Gene für Geruchsrezeptoren von *Anopheles* und überprüften dann deren Ansprechen auf insgesamt **110 verschiedene Duftstoffe**. Einige wenige Riechrezeptoren der Moskitos erkennen hochselektiv menschliche Gerüche.

3 **Chemische Substanzen**, die diese **Rezeptoren** stören oder blockieren, könnten helfen, wirksamere Mückenfallen und Abwehrstoffe zu entwickeln und so die Verbreitung der Malaria einzudämmen.

manipulieren. Ihre Eigenschaften machten *Drosophila* zu einem Lieblingstier der Genetiker und Molekularbiologen. Wir benutzten sie, um die grundlegenden zellulären und molekularen Mechanismen des Geruchssinns von Insekten aufzudecken. Das Wissen sollte uns dann bei Experimenten mit den weniger pflegeleichten Mücken helfen.

Wie Moskitos nehmen Fruchtfliegen Düfte mittels ihrer Antennen und Maxillarpalpen wahr, die ihnen als Riechorgane dienen. Diese Fortsätze am Kopf der Tiere sind mit feinsten Borsten bedeckt, in denen sich die Enden von auf Gerüche spezialisierten Nervenzellen befinden. Duftstoffe dringen über Poren ins Innere der Borsten und gelangen zu den auf diesen Neuronen sitzenden Rezeptoren. Bindet ein solcher Rezeptor ein Geruchsmolekül, sendet die Nervenzelle ein elektrisches Signal ins Gehirn des Insekts.

Um herauszufinden, wie genau die Tiere die zahlreichen Duftstoffe in ihrer Umgebung unterscheiden können, versuchten wir und andere Forscher, die Gene für die Geruchsrezeptoren der Insekten zu identifizieren – jahrelang vergeblich. 1999 gelang schließlich der Durchbruch: Mitglieder unseres Teams an der Yale University in New Haven, Connecticut, entdeckten die ersten Erbfaktoren, die solche Rezeptoren

kodieren. Im Lauf der Zeit fanden wir bei der Fruchtfliege insgesamt 60 Geruchsrezeptorgene. Zudem stellten wir fest, dass sich die Genetik des Riechsystems bei Fruchtfliegen und Stechmücken sehr ähnelt.

Als äußerst hilfreich erwies sich eine genetische Mutante von *Drosophila melanogaster*, die uns durch einen glücklichen Zufall in die Hände fiel. Im November 2001 hielt einer von uns (Carlson) ein Seminar an der Brandeis University in der Nähe von Boston. Das Thema seines Vortrags war der erste Geruchsrezeptor der Fruchtfliege, den wir entdeckt hatten, Or22a. Danach kam ein Assistenzprofessor der Brandeis University zu ihm und meinte, er habe in seinem Labor eine Fruchtfliegenmutante, die kein Gen für diesen Rezeptor besitzt. Ob uns diese vielleicht nützen könnte? Carlson brauchte keine Bedenkzeit. Am nächsten Tag fuhr er zurück zu unserem Labor an der Yale University, im Gepäck ein kleines Fläschchen mit einigen Exemplaren der Mutante.

Eines unserer wichtigsten Ziele war damals, herauszufinden, welcher Rezeptor auf welchen Geruchsstoff reagiert. Ein Neuron trägt Tausende identischer Rezeptoren, aber verschiedene Neurone weisen unterschiedliche Rezeptortypen auf. Da der Fliegenmutante von der Brandeis University ein bestimmtes Geruchsrezeptorgen fehlt, nahmen wir an, dass die zugehörigen Neurone keine Rezeptoren besitzen, also sozusagen nackt oder leer sind – was sich als zutreffend erwies.

Geruchsrezeptoren im Team

Mit Hilfe ausgeklügelter gentechnischer Methoden schleusten wir systematisch ein Geruchsrezeptorgen nach dem anderen in diese leeren Neurone der *Drosophila*-Mutante ein, die daraufhin die entsprechenden Rezeptoren produzierten. Dann setzten wir sie verschiedensten Geruchsstoffen aus und registrierten, welche Substanz welchen der vielen Rezeptoren aktivierte und darüber ein elektrisches Signal auslöste.

Drei Jahre lang war Elissa Hallem damals als Doktorandin an der Yale University mit dieser Aufgabe beschäftigt. Sie fand heraus, dass die einzelnen Rezeptoren jeweils nur auf relativ wenige Duftstoffe reagieren und dass bestimmte Geruchsmoleküle wiederum nur eine bestimmte Gruppe von Rezeptoren ansprechen. Untersuchungen anderer Forscher zum Riechsinn der Säuger erbrachten ähnliche Ergebnisse. Folglich erkennen Tiere wohl generell Gerüche über denselben Mechanismus: Unterschiedliche Düfte aktivieren jeweils verschiedene Rezeptorkombinationen. Dies erlaubt ihnen, sich in der ungeheuren Vielfalt von Gerüchen in der Natur zurechtzufinden, ohne für jeden einzelnen davon einen eigenen Rezeptor zu besitzen.

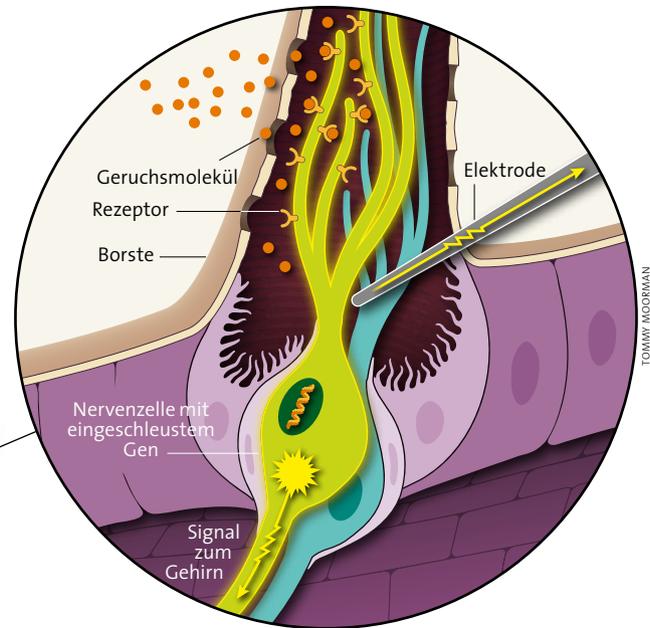
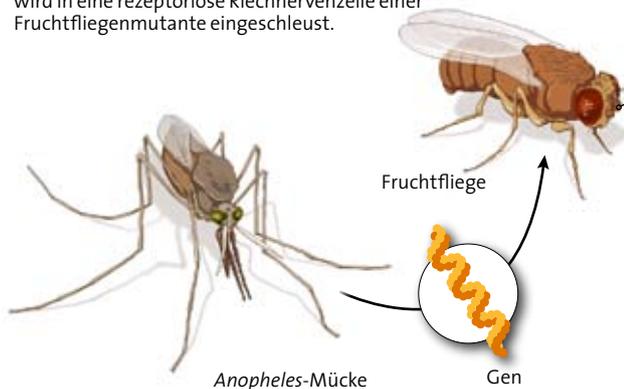
Im nächsten Schritt wollten wir nun die Rezeptorgene der Malaria übertragenden Stechmücken in nackte Fruchtfliegenneurone einbringen. In Zusammenarbeit mit Laurence J. Zwiebel von der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee) und Hugh M. Robertson von der University of Illinois in Urbana-Champaign war es uns gelungen, eine Familie von 79 Genen zu identifizieren, bei denen es sich höchstwahrscheinlich um Geruchsrezeptorgene von *Anopheles gambiae*



Analyse der Geruchsrezeptoren

Forscher identifizierten bei Stechmücken eine kleine Gruppe von Rezeptoren, die spezifisch auf menschliche Geruchsstoffe reagieren. Hierfür testeten sie zahllose Duftstoffe, einen nach dem anderen, gegen jeden einzelnen Rezeptor.

1 Ein Geruchsrezeptorgen aus einer Stechmücke wird in eine rezeptorlose Riechnervenzelle einer Fruchtfliegenmutante eingeschleust.



2 Das übertragene Gen bringt die Nervenzelle dazu, einen bestimmten Rezeptortyp zu produzieren. Dieser bindet nur Geruchsmoleküle passender Struktur. Während des Tests wird ein Duftstoff nach dem anderen der Fliege präsentiert. Dabei gelangen die Moleküle durch feine Poren in die Borste, die das Neuron umhüllt. Bindet ein Duftstoff an den Rezeptor, sendet das Neuron ein Signal ans Gehirn. Mittels einer Elektrode lässt sich dieses Signal registrieren.

handelte. Dazu hatten wir im Erbgut der Stechmücke nach DNA-Sequenzen gesucht, die denen der Rezeptorgene von Fruchtfliegen glichen. Doch würde der Transfer eines dieser Gene in das nackte Fruchtfliegenneuron wirklich zur Produktion des entsprechenden Moskitogeruchsrezeptors in der Fliege führen? Immerhin trennen rund 250 Millionen Jahre Evolution die beiden Spezies!

Die Spannung war daher groß, als wir einen ersten Versuch mit einer Serie von Duftstoffen und einem Rezeptorgen aus der *Anopheles*-Mücke unternahmen. Unser Versuchsaufbau enthielt einen Lautsprecher, der bei Feuern des Neurons eine dichte Abfolge von Klicks produzieren würde. Enttäuschenderweise blieb alles still. Wir mussten daher annehmen, dass der Riechrezeptor aus der Stechmücke im Fliegenneuron nicht funktioniert.

Doch Elissa Hallem gab nicht auf und testete unverdrossen weitere Duftproben. Als sie bei einer Verbindung namens 4-Methylphenol angekommen war, begann der Lautsprecher förmlich zu kreischen. Wir fanden später heraus, dass 4-Methylphenol, das ein wenig nach getragenen Sportsocken riecht, eine Komponente des menschlichen Schweißes ist. Wir hatten also eine Methode gefunden, jene Düfte zu identifizieren, die Riechrezeptoren der Moskitos erregen.

Daraufhin studierten wir eingehend die Literatur zu menschlichen Düften und wählten für die folgenden Untersuchungen 110 weitere Verbindungen aus – viele davon Bestandteile von menschlichem Schweiß. Dabei bezogen wir Duftstoffe mit unterschiedlichster Molekülstruktur ein, so

dass wir eine breite Palette von Substanzen testen konnten. Wir verpflanzten die 79 potenziellen Rezeptorgene aus *Anopheles* in nackte Fliegenneurone; 50 der entsprechenden Moleküle erwiesen sich in unserem Versuchsaufbau als funktionsfähig. Gegen diese setzten wir unsere 110 Duftstoffe ein, insgesamt gab es also 5500 Duftstoff-Rezeptor-Kombinationen zu testen – eine ganze Menge Arbeit.

Spezialisten für menschlichen Schweiß

Auf diese Weise identifizierten wir mehrere Rezeptoren, die nur auf einen oder wenige Duftstoffe stark reagierten. Gerade diese sehr spezialisierten Rezeptoren interessierten uns besonders. Denn wir gingen von der Überlegung aus, dass Moskitos ganz bestimmte Substanzen präzise und in geringsten Mengen erkennen müssen – nämlich solche, die eine mögliche Blutquelle anzeigen. Dazu benötigen sie hochspezifische Rezeptoren. Tatsächlich stellte sich heraus, dass die meisten dieser schmalbandigen Antennen auf Bestandteile des menschlichen Schweißes reagierten.

Auch der erste von Elissa Hallem getestete Rezeptor, der stark auf 4-Methylphenol angesprochen hatte, gehörte dazu: Von den 110 Geruchsstoffen lösten nur wenige andere eine vergleichbare Erregung aus. Ein weiterer Rezeptor reagierte sehr selektiv auf Octenol (1-Octen-3-ol), einen Bestandteil menschlicher und tierischer Gerüche. Es übt auf bestimmte Moskitospezies eine starke Anziehungskraft aus, unter anderem auch auf *Culex pipiens*, eine Stechmückenart, die in US-amerikanischen Hausgärten verbreitet ist und das West-

Nil-Virus übertragen kann. Octenol ist auch in manchen im Handel erhältlichen Moskitofallen enthalten.

Doch was ist mit dem praktischen Nutzen unserer Forschungsergebnisse? Bislang testet man Substanzen auf ihre Eignung als Lockstoff, indem schlicht beobachtet wird, ob sie Mücken anziehen. Da diese Methode recht zeitaufwändig ist, können nur relativ wenige Verbindungen getestet werden. Auch klassische Laborverfahren zum Identifizieren von Lockstoffen haben ihre Nachteile. So lassen sich etwa Versuchspersonen einen Arm mit einer Duftmischung bestreichen und halten ihn in eine durchsichtige Box, die Dutzende von Moskitos enthält. Stoffe, die Mücken vom Stechen abhalten, sind dann Kandidaten für neue Abwehrmittel (Repellents). Im Unterschied dazu ermöglicht unser experimenteller Ansatz, sehr schnell ein Vielzahl verschiedener Substanzen auszutesten, was die Entdeckung neuer, wirksamerer Lock- oder Abwehrstoffe wesentlich wahrscheinlicher macht. Dazu kommt, dass wir keine menschlichen Probanden benötigen.

Duftstoffe testen am Fließband

Lawrence J. Zwiebel etwa nutzt Zellkulturen, die Geruchsrezeptoren von *Anopheles gambiae* herstellen. Laborroboter präsentieren den Zellen in wenigen Stunden Tausende verschiedener Substanzen. Auf diese Weise hat Zwiebel bislang mehr als 200 000 Duftstoffe getestet. Mehr als 400 davon aktivierten oder hemmten die Geruchsrezeptoren; diese Kandidaten werden nun genauer untersucht und getestet.

Besonders interessant sind Verbindungen, die als »Superaktivatoren« wirken: Sie blockieren Geruchsneurone durch übermäßige Erregung, so dass entweder die Signalübertragung abbricht oder das Moskitohirn durcheinandergebracht wird. Bringt man solche Duftstoffe in der Nähe von Häusern in Schwarzafrika aus, sollten Moskitos ihre Opfer nicht mehr finden.

Andererseits lassen sich Substanzen identifizieren, die selektiv bestimmte Rezeptoren hemmen, worauf das Insekt sein Ziel ebenfalls nicht mehr ausfindig machen kann. Solche maskierenden Stoffe könnten in der Umgebung menschlicher Ansiedlungen versprüht oder als Repellent auf die Haut aufgetragen werden. Die Stechmücken würden so nicht mehr erkennen, dass sie sich in der Nähe ihrer begehrten Blutquellen aufhalten. Auch Geruchsstoffe, die Moskitos als abstoßend empfinden, kommen als Abwehrmittel in Frage. Unsere Kooperationspartner von der niederländischen Universität Wageningen testen hierzu an *Anopheles*-Mücken Kombinationen der von uns identifizierten Geruchsstoffe und stießen bereits auf einige sehr wirksame Duftmischungen.

Neben Komponenten des menschlichen Schweißes registrieren Moskitos auch ausgeatmetes Kohlendioxid und nutzen es bei der Suche nach Nahrung. Damit bietet sich der entsprechende Rezeptor als weiterer Angriffspunkt an. Erst kürzlich entdeckte ein Team um Anandasangar Ray an der University of California in Riverside verschiedene Duftstoffe, die den CO₂-Rezeptor aktivieren beziehungsweise hemmen; auch Superaktivatoren fanden sich darunter.

Viele früher eingesetzte Methoden zur Moskitobekämpfung, wie der massive Einsatz des Insektizids DDT, hatten dramatische schädliche Nebenwirkungen. Geruchsstoffbasierte Kontrollmethoden dürften dagegen weitaus ungefährlicher sein. Eine Duftfalle kommt mit kleinsten Mengen des Lockstoffs aus, da Moskitos extrem empfindliche Chemosensoren besitzen. Substanzen, die in menschlichem Schweiß und in der Atemluft zu finden sind, sollten in geringen Dosierungen nicht giftig wirken.

Zudem ließe sich die Bekämpfung gefährlicher Stechmücken mit Geruchsstoffen viel präziser auf die Zielinsekten zuschneiden als der Einsatz von Insektiziden. Unsere Daten zu Moskitos und Fruchtfliegen zeigen, dass die meisten hochselektiven Rezeptoren von *Anopheles gambiae* auf Geruchskomponenten des menschlichen Schweißes reagieren, wohingegen sie bei *Drosophila melanogaster* auf leicht flüchtige Verbindungen aus Früchten ansprechen. Bestimmte Lockstoffmischungen sollten also gezielt nur auf eine Insektenart wirken, was die Umweltbelastung deutlich reduzieren würde. Mit dem Einsatz solcher Duftstoffcocktails statt einzelner Wirksubstanzen lässt sich zudem das Risiko der Resistenzbildung effektiv verringern.

Die Malaria wird sich langfristig nur dann ausrotten lassen, wenn gleichzeitig viele unterschiedliche Strategien eingesetzt werden: Neben Moskitonetzen und verbesserten Medikamenten sowie möglicherweise bald neuen Impfstoffen (siehe Artikel S. 24) könnte die präzise Manipulation des Verhaltens von Moskitos mit Geruchsstoffen hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. ~

DIE AUTOREN



John R. Carlson ist Professor für Molekular-, Zell- und Entwicklungsbiologie an der Yale University. Er erforscht seit 25 Jahren die molekularen und zellulären Grundlagen des Geruchssinns von Insekten.

Allison F. Carey schloss vor Kurzem ihr Medizinstudium in Yale ab. Sie promovierte in Neurowissenschaften und setzt ihre Studien zur Malaria am Institut Pasteur in Paris fort.

QUELLEN

- Carey, A.F. et al.:** Odorant Reception in the Malaria Mosquito *Anopheles gambiae*. In: *Nature* 464, S. 66–71, 2010
- Goes van Naters, W. van der, Carlson, J.R.:** Insects as Chemosensors of Humans and Crops. In: *Nature* 444, S. 302–307, 2006
- Turner, S.L.:** Ultra-Prolonged Activation of CO₂-Sensing Neurons Disorients Mosquitoes. In: *Nature* 474, S. 87–92, 2011
- Zwiebel, L.J., Takken, W.:** Olfactory Regulation of Mosquito-Host Interactions. In: *Insect Biochemistry and Molecular Biology* 34, S. 645–652, 2004

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1114582

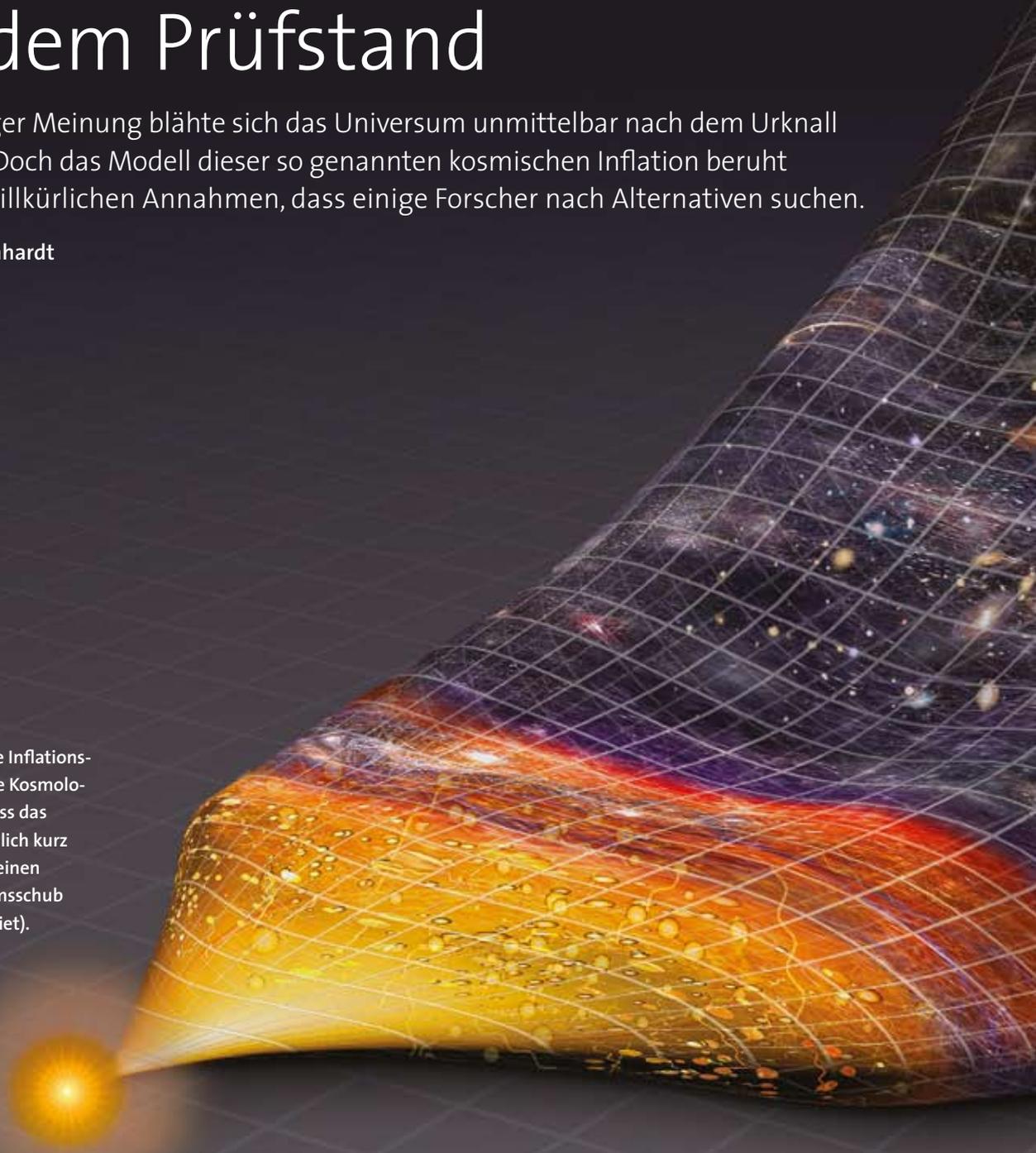
TITELTHEMA: ASTROPHYSIK

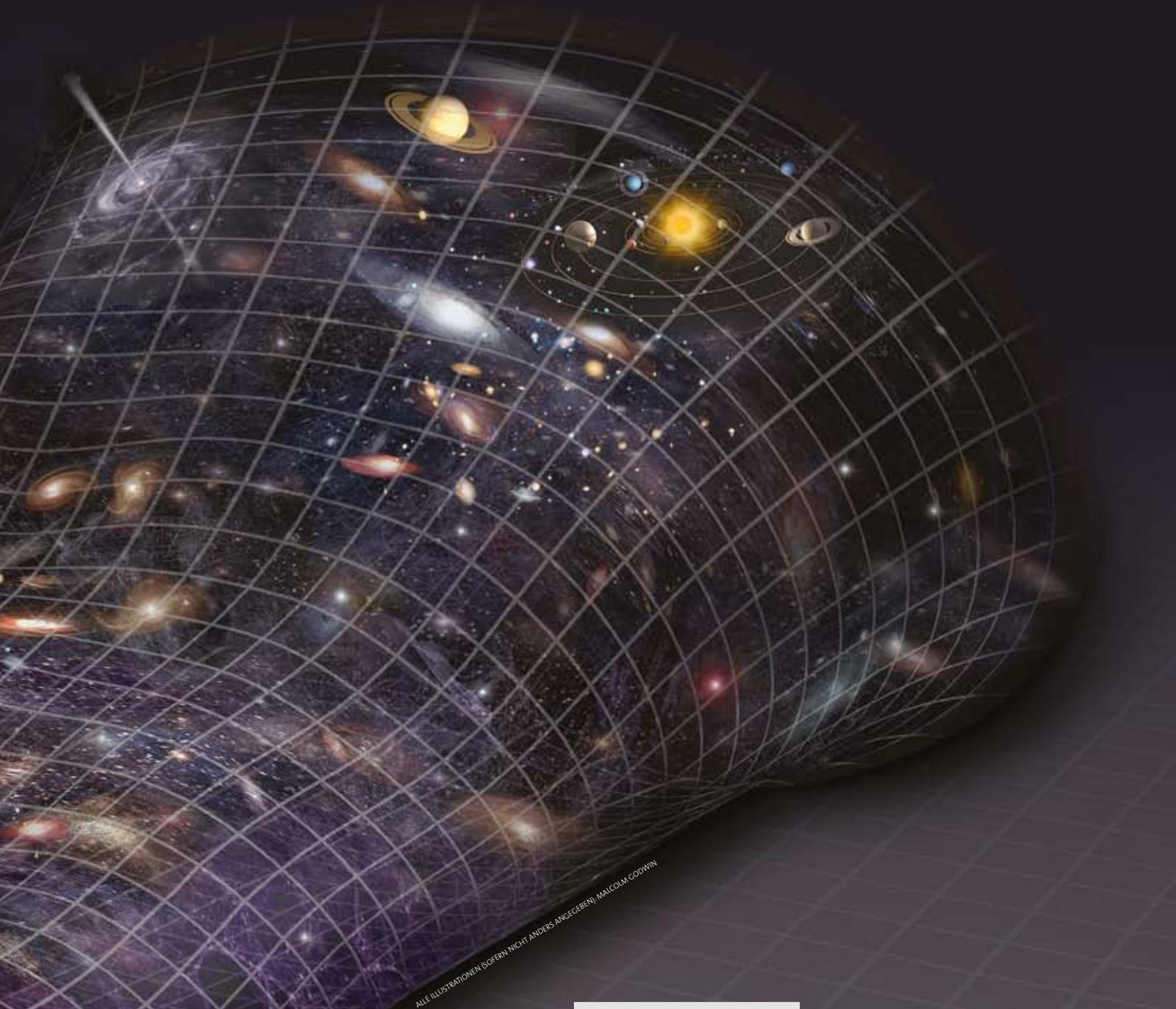
Kosmische Inflation auf dem Prüfstand

Nach gängiger Meinung blähte sich das Universum unmittelbar nach dem Urknall extrem auf. Doch das Modell dieser so genannten kosmischen Inflation beruht auf derart willkürlichen Annahmen, dass einige Forscher nach Alternativen suchen.

Von Paul J. Steinhardt

Trifft das klassische Inflationsmodell zu? Manche Kosmologen bezweifeln, dass das Universum tatsächlich kurz nach dem Urknall einen heftigen Wachstumsschub erfuhr (gelbes Gebiet).





ALLE ILLUSTRATIONEN COPERNI NICHT ANDERS ANGEZEIGT; MALCOLM GODWIN

AUF EINEN BLICK

FRAGWÜRDIGE VORAUSSETZUNGEN

1 Die **kosmische Inflation** gilt Astrophysikern als verbürgte Tatsache. Demnach lassen sich die »flache« Geometrie und die Gleichförmigkeit des Kosmos durch einen intensiven Wachstumsschub kurz nach dem Urknall erklären.

2 Doch zu Beginn der Inflation müssen höchst **unwahrscheinliche Bedingungen** vorgelegen haben. Außerdem geht sie ewig weiter und erzeugt **unendlich viele Universen**, in denen völlig beliebige Verhältnisse herrschen können.

3 Manche Forscher bezweifeln, dass es sich dabei nur um Kinderkrankheiten der Theorie handelt. Sie diskutieren daher neue Ansätze, um das Modell zu retten oder durch ein anderes zu ersetzen – etwa jenes eines **zyklisch expandierenden und kollabierenden Universums**.

Vor 30 Jahren hielt das Wort Inflation in den kosmologischen Sprachgebrauch Einzug. Alan H. Guth, damals angehender Physiker am Stanford Linear Accelerator Center in Menlo Park (Kalifornien), postulierte einen kurzen Ausbruch extrem beschleunigter Expansion in den ersten Momenten nach dem Urknall. Mich faszinierte die Idee sofort, und seither denke ich fast jeden Tag darüber nach. Vielen meiner Kollegen aus der Astrophysik, Gravitations- und Teilchenforschung geht es genauso. Da wundert es kaum, dass die Theorie der kosmischen Inflation ein besonders aktives Forschungsgebiet ist.

Ihre Aufgabe besteht darin, eine klaffende Lücke in der Urknalltheorie zu füllen. Deren Grundidee besagt, dass das Universum sich seit seiner Entstehung vor 13,7 Milliarden Jahren langsam ausdehnt und abkühlt. Expansion und Abkühlung erklären viele Merkmale des heutigen Universums bis ins Detail – allerdings nur unter einer Voraussetzung: Das Universum hatte zu Beginn ganz bestimmte Eigenschaften. Zum Beispiel war es demnach von Anfang an extrem gleichförmig; die Materie- und Energieverteilung durfte nur ganz geringfügig variieren. Zudem musste es »geometrisch flach« sein. So bezeichnen Astronomen ein Universum, in dem Lichtstrahlen und die Bahnen bewegter Objekte nicht durch weit gespannte Verzerrungen der Raumzeit gebeugt werden.

Aber warum soll das Ur-Universum so gleichförmig und »flach« gewesen sein? Eigentlich muten diese Bedingungen höchst unwahrscheinlich an. Hier kam Guths Idee ins Spiel: Selbst wenn zu Beginn beliebige Unordnung im Universum herrschte – mit höchst ungleichförmiger Energieverteilung und ausgesprochen runzliger Geometrie –, würde ein spektakulärer Wachstumsschub die Energie gleichmäßig verteilen und alle Raumverzerrungen schlagartig ausbügeln. Nach dieser Inflationsphase dehnte sich das Universum dann im gemächlicheren Tempo der ursprünglichen Urknalltheorie weiter aus – doch nun herrschten genau passende Bedingungen für die Entwicklung der heutigen Sterne und Galaxien.

Die Idee ist so unwiderstehlich, dass Kosmologen sie heute ihren Studenten und der Öffentlichkeit als feststehende Tatsache präsentieren. Im Lauf der Jahre geschah allerdings etwas Seltsames: Zwar wurden die Argumente für die Inflation immer stärker, jedoch mehrten sich auch die Einwände. Aber nur eine überraschend kleine Minderheit verfolgt die Gegenargumente – zu der auch ich gehöre. Die meisten Astrophysiker überprüfen stattdessen die Vorhersagen der etablierten Inflationstheorie, ohne sich um ihre Anfechtbarkeit zu kümmern. Sie hoffen, die Probleme würden allmählich verschwinden. Leider ist das nicht der Fall.

Da ich sowohl an der Inflationstheorie gearbeitet habe (siehe »Das inflationäre Universum« von Alan H. Guth und Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 7/1984, S. 80) als auch an konkurrierenden Modellen, bin ich hin- und hergerissen. Wie mir scheint, wissen auch viele Kollegen nicht so

recht, was sie von den Einwänden halten sollen. Um das Dilemma zuzuspitzen, stelle ich die kosmische Inflation im Folgenden quasi vor Gericht und vertrete dabei zwei entgegengesetzte Standpunkte: Zuerst präsentiere ich als Verteidiger die größten Vorteile der Theorie; dann liste ich als Ankläger die ungelösten Probleme auf.

Plädoyer der Verteidigung

Die Inflation ist so bekannt, dass die Verteidigung sich kurzfassen kann – ein paar Details genügen, um die Vorzüge zu würdigen. Das Modell beruht auf einer speziellen Größe namens inflationäre Energie, die das Universum in einem kurzen Augenblick erstaunlich stark aufzublähen vermag. Die Dichte dieser Energie muss ungeheuer groß sein und während der Inflationsphase fast konstant bleiben. Ungewöhnlich ist, dass ihre Kraft nicht anziehend, sondern abstoßend wirkt. Durch die Abstoßung schwillt der Raum rapide an.

Guths Idee wirkte so plausibel, weil Theoretiker bereits viele mögliche Quellen einer solchen Energie identifiziert hatten. Favorit ist ein hypothetischer Verwandter des Magnetfelds, ein so genanntes Skalarfeld; im Fall der Inflation heißt es Inflatonfeld. Das berühmte Higgs-Teilchen, das derzeit mit dem Large Hadron Collider am CERN bei Genf gesucht wird, leitet sich von einem ähnlichen Skalarfeld her.

Wie jedes Feld hat das Inflaton in jedem Raumpunkt eine bestimmte Stärke, welche die Kraft angibt, die es auf sich selbst und auf andere Felder ausübt. Während der Inflationsphase ist diese überall fast konstant. Je nach Stärke enthält das Feld einen bestimmten Energiebetrag; Physiker sprechen von potenzieller Energie. Der Zusammenhang zwischen Feldstärke und Energie lässt sich als Kurve in einem Diagramm darstellen. Im Fall des Inflatons verläuft die Kurve wie der Querschnitt durch ein tiefes Tal neben einem sanft

geneigten Plateau (siehe nebenstehenden Kasten). Entspricht die Feldstärke anfangs einem Punkt auf dem Plateau, so bußt das Feld allmählich sowohl Stärke als auch potenzielle Energie ein und wandert den Abhang hinab. Gewissermaßen beschreiben die Feldgleichungen einen Ball, der einen Hügel von der Form der Energiekurve hinunterrollt.

Die potenzielle Energie des Inflatons kann eine beschleunigte Expansion des Universums verursachen und es dabei glätten und »verflachen« – vorausgesetzt, das Feld bleibt lange genug (10^{-30} Sekunden) auf dem Plateau, um das Universum in jeder Richtung um einen Faktor von mindestens 10^{25} zu strecken. Die Inflation hört auf, wenn das Feld das Ende des Plateaus erreicht und in das Energietal stürzt. Dort verwandelt sich die potenzielle Energie in die Materie- und Energieformen, die heute das Universum erfüllen – Dunkle Materie, heiße gewöhnliche Materie und Strahlung. Es beginnt eine Phase mäßiger, sich verlangsamender Expansion, in deren Verlauf sich die Materie zu kosmischen Strukturen verdichtet.

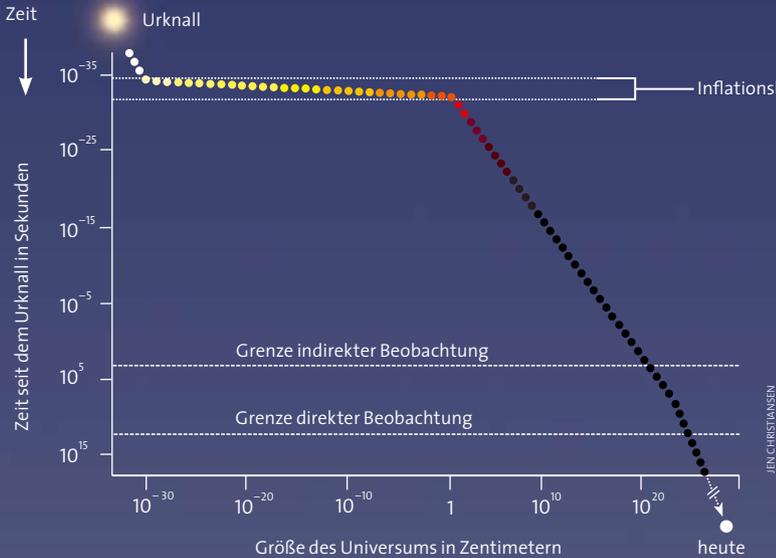
Die Inflation glättet das Universum ähnlich einem Gummitch, das bei straffer Spannung seine Falten verliert – zu-

Das Inflationsmodell füllt eine große Lücke der Urknalltheorie

Das klassische Modell

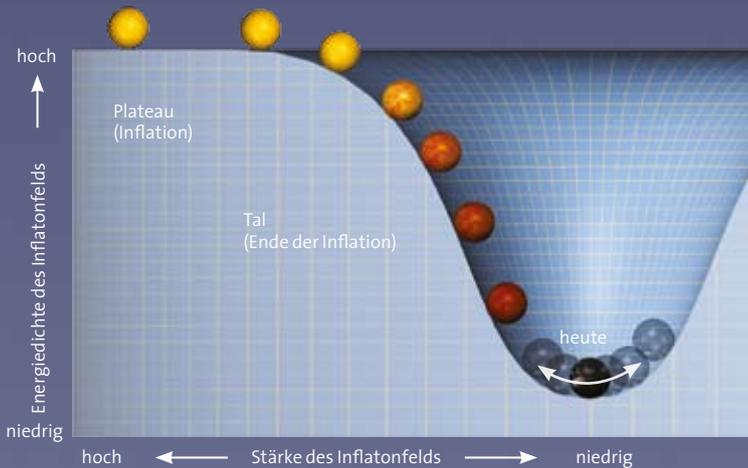
Astronomischen Daten zufolge dehnt sich das Universum seit seiner Entstehung vor 13,7 Milliarden Jahren immerfort aus. Doch was geschah in den allerersten Momenten, die sich direkter Beobachtung entziehen? Nach herrschender Auffassung blähte sich das urtümliche Universum plötzlich ungeheuer stark auf. Der inflationäre Wachstumsschub bügelte alle Verzerrungen und Krümmungen des Raums schlagartig aus. Das erklärt die »flache« Geometrie des gegenwärtigen Universums.

WIE DIE INFLATION WIRKTE

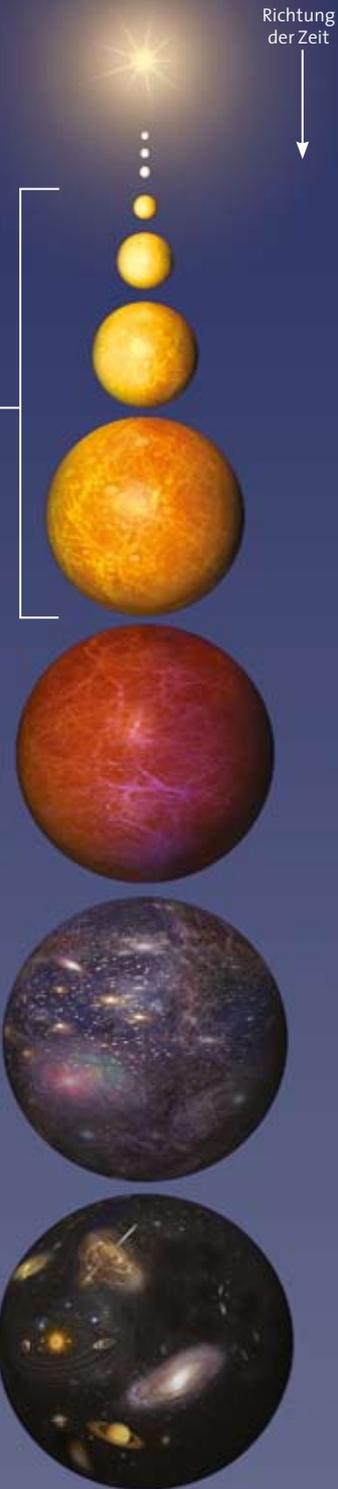


Das Wachstumstempo war selbst für astronomische Maßstäbe gewaltig. Innerhalb von 10^{-30} Sekunden wuchs das All um einen Faktor von mindestens 10^{25} in alle Richtungen. Es dehnte sich beschleunigt aus und zerrte Raumgebiete sogar mit Überlichtgeschwindigkeit auseinander.

WODURCH DIE INFLATION VERURSACHT WURDE



Das so genannte Inflatonfeld erzeugte eine abstoßende Schwerkraft, durch die der Raum augenblicklich rapide anschwell. Dafür musste die Energiedichte des Felds mit der Feldstärke so variieren, dass ihre Kurve ein hochenergetisches Plateau und ein niederenergetisches Tal bildete. Das Feld verhielt sich dadurch wie ein abwärtsrollender Ball. Auf dem Plateau wirkte es abstoßend; sobald es das Tal erreichte, hörte die Inflation auf.



Als die Inflation einsetzte, war der Radius des heute beobachtbaren Universums 100 Billionen Mal kleiner als ein Atom. Während der Inflation wuchs es auf die Größe einer Geldmünze an. In den Milliarden Jahren seither dehnte sich der Raum weiter aus, allerdings langsamer, und ermöglichte die Bildung von Galaxien.

mindest weit gehend. Auf Grund von Quanteneffekten bleiben kleine Unregelmäßigkeiten übrig, denn die Gesetze der Quantenphysik fordern, dass das Feld nicht überall gleich stark ist, sondern zufällig schwankt. Wegen dieser Fluktuationen endet die Inflation in unterschiedlichen Raumregionen zu etwas verschiedenen Zeiten und erwärmt sie auf etwas unterschiedliche Temperaturen. Diese räumlichen Abweichun-

gen sind die Keime späterer Sterne und Galaxien. Der Inflationstheorie zufolge sind die Schwankungen fast skaleninvariant; das heißt, sie hängen nicht von der Größe des Gebiets ab, sondern treten in jedem Maßstab mit gleicher Stärke auf.

Das Plädoyer für die Inflation lässt sich in drei Punkten zusammenfassen. Erstens: Sie ist geradezu unvermeidlich. Seit Guths Vorschlag haben theoretische Physiker Gründe für die Hypothese gefunden, wonach das frühe Universum Felder enthielt, welche die Inflation antreiben konnten; in der Stringtheorie und anderen »großen Vereinigungen« der Naturkräfte treten solche Felder zu Hunderten auf. Im chaotischen Urzustand des Kosmos gab es gewiss ein Raumgebiet, wo eines dieser Felder die Bedingungen für Inflation erfüllte.

Zweitens erklärt die Inflation, warum das All heute so gleichförmig und geometrisch »flach« ist. Niemand weiß, wie es unmittelbar nach dem Urknall aussah, aber wegen der Inflation muss man das gar nicht wissen, denn die Phase der beschleunigten Expansion dehnte das Universum in die richtige Form.

Drittens und vor allem liefert die inflationäre Theorie exakt zutreffende Vorhersagen. Viele Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der Galaxienverteilung bestätigen, dass die räumlichen Energieschwankungen im frühen Universum fast skaleninvariant waren.

Unwahrscheinlich gut, wahrscheinlich schlecht

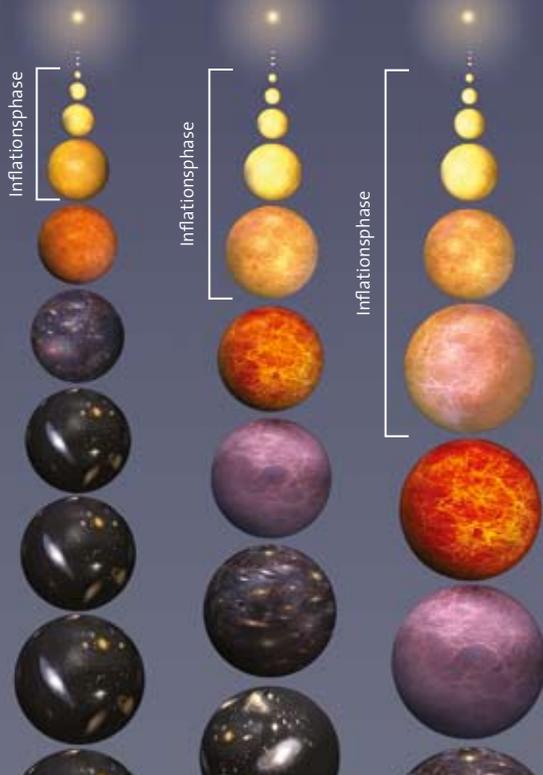
Die Inflation soll ein riesiges Raumvolumen erzeugen, das von selbst die beobachteten großräumigen Eigenschaften unseres Universums aufweist. Doch dafür muss die Energiekurve des Inflationfelds eine ganz bestimmte Form haben, die nur durch Feinabstimmung eines Parameters λ erreicht wird. Andernfalls verläuft die Inflation »schlecht« und erzeugt ein riesiges Volumen mit allzu hoher Dichte und falscher Galaxienverteilung. Angesichts des großen Bereichs möglicher λ -Werte ist eine »schlechte« Inflation viel wahrscheinlicher.

»GUTE« INFLATION:

Nur für einen kleinen λ -Bereich liefert die Inflation die beobachtete Galaxiedichte.

»SCHLECHTE« INFLATION:

Ein typischer λ -Wert erzeugt eine höhere Galaxiedichte und möglicherweise mehr Raum.



Plädoyer der Anklage

Dass eine Theorie versagt, kündigt sich oft durch kleine Diskrepanzen zwischen Beobachtung und Vorhersage an. Das ist hier nicht der Fall: Die empirischen Daten stimmen hervorragend mit den theoretischen Vorhersagen aus dem Beginn der 1980er Jahre überein. Die Argumente gegen die Inflation betreffen vielmehr das logische Fundament der Theorie. Funktioniert sie wirklich wie angekündigt? Entsprechen die Vorhersagen von vor 30 Jahren immer noch unserem heutigen Verständnis des Inflationsmodells? Tatsächlich gibt es gute Gründe, beide Fragen zu verneinen.

Das erste Argument der Verteidigung besagte, die Inflation sei unvermeidlich. Doch die Sache hat einen Haken: Schlechte Inflation ist wahrscheinlicher als gute. Mit schlechter Inflation ist eine Periode beschleunigter Expansion gemeint, deren Ergebnis den Beobachtungen widerspricht. Beispielsweise können die Temperaturunterschiede zu groß ausfallen. Das hängt von der genauen Gestalt der Energiekurve ab; diese wird durch einen numerischen Parameter bestimmt, der im Prinzip völlig beliebige Werte annehmen kann. Nur ein extrem schmaler Wertebereich führt zu der beobachteten Temperaturverteilung. In einem typischen Inflationsmodell muss der Wert bei 10^{-15} liegen, das heißt bei 0,00000000000001. Eine abweichende Zahl, etwa 10^{-12} oder 10^{-8} , würde schlechte Inflation ergeben: ähnlich stark beschleunigte Expansion, aber viel zu große Temperaturunterschiede.

Wir könnten die schlechte Inflation ignorieren, wenn sie kein Leben zuließe. Dann würden wir derart große Temperaturschwankungen, selbst wenn sie prinzipiell möglich wären, niemals beobachten. Dieses Argument ist als anthro-

phisches Prinzip bekannt. Doch hier greift es nicht. Größere Temperaturabweichungen würden zu mehr Sternen und Galaxien führen; das Universum wäre sogar noch wohnlicher als heute.

Schlechte Inflation ist wahrscheinlicher als gute, aber noch wahrscheinlicher ist gar keine Inflation. Der Physiker Roger Penrose von der University of Oxford wies darauf erstmals in den 1980er Jahren hin. Aus thermodynamischen Prinzipien, wie sie für Atome und Moleküle in einem Gas gelten, berechnete er die möglichen Anfangskonfigurationen des Inflaton- und Gravitationsfelds. Einige dieser Anordnungen führen zur Inflation und damit zu fast gleichförmiger Materieverteilung und »flacher« Geometrie. Andere Konfigurationen ergeben aber auch ohne Inflation ein derartiges Universum. Beide Fälle sind allerdings so selten, dass ein »flaches« Universum insgesamt unwahrscheinlich wird. Der Knalleffekt dabei: Ein solches Universum ohne Inflation ist laut Penrose um den Faktor 10^{100} wahrscheinlicher als eines mit Inflation!

Die Katastrophe ewiger Inflation

Ein anderer Ansatz, der zum selben Schluss kommt, nutzt geltende physikalische Gesetze, um den gegenwärtigen Zustand des Kosmos in die Vergangenheit zu extrapolieren. Die Extrapolation ist nicht eindeutig: Viele Ereignisfolgen können zum heutigen flachen und glatten Zustand geführt haben. Im Jahr 2008 zeigten Gary W. Gibbons von der University of Cambridge und Neil G. Turok vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Ontario, dass die meisten Extrapolationen nur unwesentlich Inflation enthalten. Das passt zum Ergebnis von Penrose.

Beide Schlussfolgerungen wirken zunächst nicht plausibel, denn ein flaches und glattes Universum ist erst einmal unwahrscheinlich, und die Inflation wäre ein starker Mechanismus, um das nötige Glätten und Verflachen zu erreichen. Doch dieser Vorteil wird anscheinend völlig durch die Tatsache aufgehoben, dass die Bedingungen für das Auslösen einer Inflation noch viel unwahrscheinlicher sind. Demzufolge hätte das Universum seinen gegenwärtigen Zustand wohl ohne Inflation erreicht.

Viele Physiker finden diese theoretischen Einwände allerdings weniger überzeugend als das stärkste Argument für die Inflation: Die vor drei Jahrzehnten formulierten Vorhersagen werden heute durch kosmologische Beobachtungen glänzend bestätigt. Dennoch hat dieser Triumph einen üblen Beigeschmack, denn die Prognosen der frühen 1980er Jahre beruhten auf einem naiven Bild der Inflation – und dieses Bild hat sich als völlig falsch erwiesen.

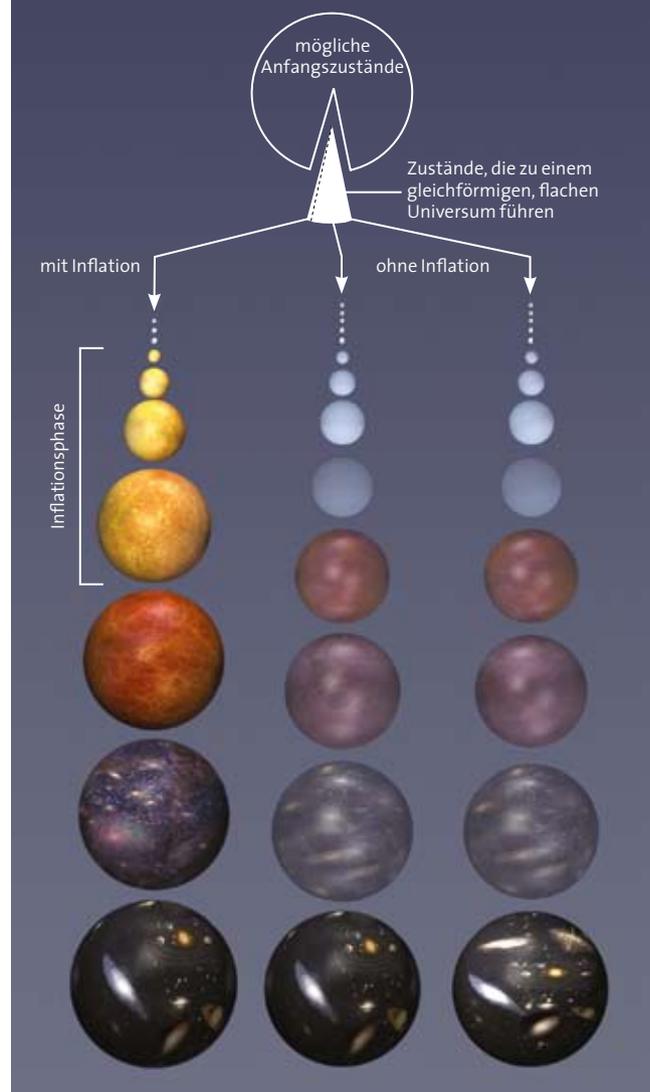
Der Umschwung begann mit der Erkenntnis, dass die Inflation ewig ist: Wenn sie einmal begonnen hat, hört sie nie wieder auf (siehe »Das selbstreproduzierende inflationäre Universum« von Andrei Linde, Spektrum der Wissenschaft 1/1995, S. 32). Diese Tatsache folgt direkt aus der Quantenphysik einer beschleunigten Expansion. Bekanntlich können Quantenfluktuationen das Ende der Inflation hier und da ein wenig verzögern. Wo diese Schwankungen klein sind, fallen auch ihre Wir-

kungen minimal aus. Doch die Fluktuationen gehorchen dem Zufallsprinzip. In manchen Raumregionen werden sie groß sein und zu erheblichen Verzögerungen führen.

Echte Verzögerungsgebiete sind freilich so extrem seltene Ausreißer, dass man versucht sein könnte, sie zu ignorieren. Das darf man aber nicht, denn sie blähen sich inflationär auf. Dadurch wachsen sie blitzartig über das Gebiet hinaus, in

Aller Anfang ist schwer

Die Inflation soll der gängigen Theorie zufolge bei beliebigen Anfangsbedingungen des Universums eintreten. Doch bei näherer Analyse führt nur ein Bruchteil aller möglichen Bedingungen zu dem gleichförmigen, »flachen« Zustand, der heute herrscht. Von diesen speziellen Anfangsbedingungen benötigt wiederum nur ein winziger Bruchteil eine ausgeprägte Inflationsphase, um den heutigen Zustand des Alls zu erreichen.



dem die Inflation rechtzeitig zum Stillstand kam. So entsteht ein Meer von inflationär expandierendem Raum um eine kleine Insel aus heißer Materie und Strahlung. Außerdem bringen Ausreißer weitere Ausreißer hervor sowie neue Materieinseln – jede ein eigenständiges Universum. Der Vorgang schreitet ungehemmt fort und erzeugt eine unbegrenzte Anzahl von Inseln, die von immer mehr inflationär expandierendem Raum umgeben werden. Dieses beunruhigende Bild ist aber noch längst nicht alles – das Beste kommt erst.

Die Inseln sind nämlich nicht alle gleich. Wegen des Zufallscharakters der Quantenphysik sind einige höchst ungleichförmig oder stark gekrümmt. Ihre Ungleichmäßigkeit scheint

der oben beschriebenen schlechten Inflation zu ähneln, sie hat aber eine andere Ursache. Schlechte Inflation tritt auf, weil die Parameter, welche die Form der Energiekurve steuern, meist zu groß sind. Hier jedoch folgt die Ungleichförmigkeit aus ewiger Inflation und zufälligen Quantenfluktuationen, ganz unabhängig von den Parameterwerten.

Und im Grunde handelt es sich nicht nur um einige Inseln, sondern um unendlich viele. In einem ewig inflationären Universum haben unendlich viele Inseln Eigenschaften, wie wir sie kennen – aber unendlich viele andere nicht. Das eigentliche Ergebnis der Inflation hat Guth am besten zusammengefasst: »In einem ewig inflationären Universum geschieht alles, was überhaupt geschehen kann; es geschieht sogar unendlich oft.«

Ist unser Universum also die Ausnahme von der Regel? Das lässt sich bei einer unendlichen Ansammlung von Inseln schwer beantworten. Angenommen, ein Sack enthält endlich viele Ein- und Zweieuro Münzen, deren Anzahl wir kennen. Greifen wir blind hinein, können wir vorhersagen, welches Geldstück wir am wahrscheinlichsten in der Hand halten werden. Doch wenn der Sack unendlich viele Münzen enthält, geht das nicht. Um die Wahrscheinlichkeiten zu bestimmen, können wir versuchen, die entnommenen Münzen in Stapeln zu sortieren.

Zunächst legen wir eine Zweieuro Münze hin, dann daneben eine Eineuro Münze, dann eine zweite Zweieuro Münze und eine zweite Eineuro Münze auf die jeweils entsprechende erste und so weiter. Diese Prozedur vermittelt uns den Eindruck, es gebe gleich viele Münzen von jeder Sorte. Doch dann probieren wir ein anderes System aus: Wir stapeln erst zehn Zweieuro Münzen, dann eine Eineuro Münze, dann wieder zehn zwei Euro, dann eine Eineuro Münze und so fort. Nun haben wir den Eindruck, auf jeden einzelnen Euro kämen zehn Zweieuro Münzen.

Das Ausmaß unseres Versagens

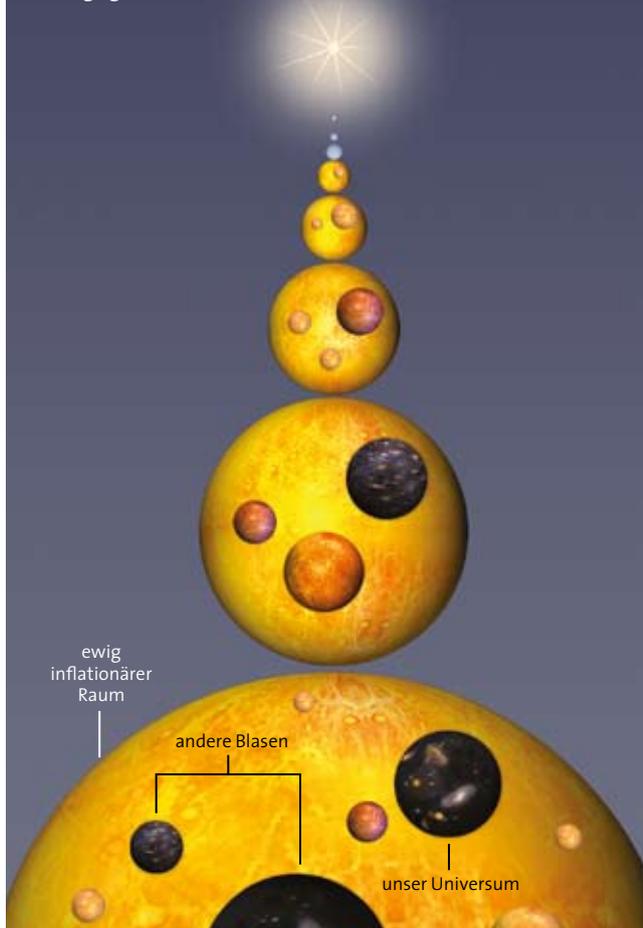
Welche Zählmethode ist richtig? Die Antwort lautet: keine. Unendlich viele Münzen lassen sich auf unendlich viele Arten sortieren, und das ergibt unendlich viele Wahrscheinlichkeiten. Es gibt kein richtiges Verfahren, um herauszufinden, welche Münze wahrscheinlicher ist. Ebenso wenig lässt sich in einem ewig inflationären Universum die Wahrscheinlichkeit eines Inseltyps bestimmen.

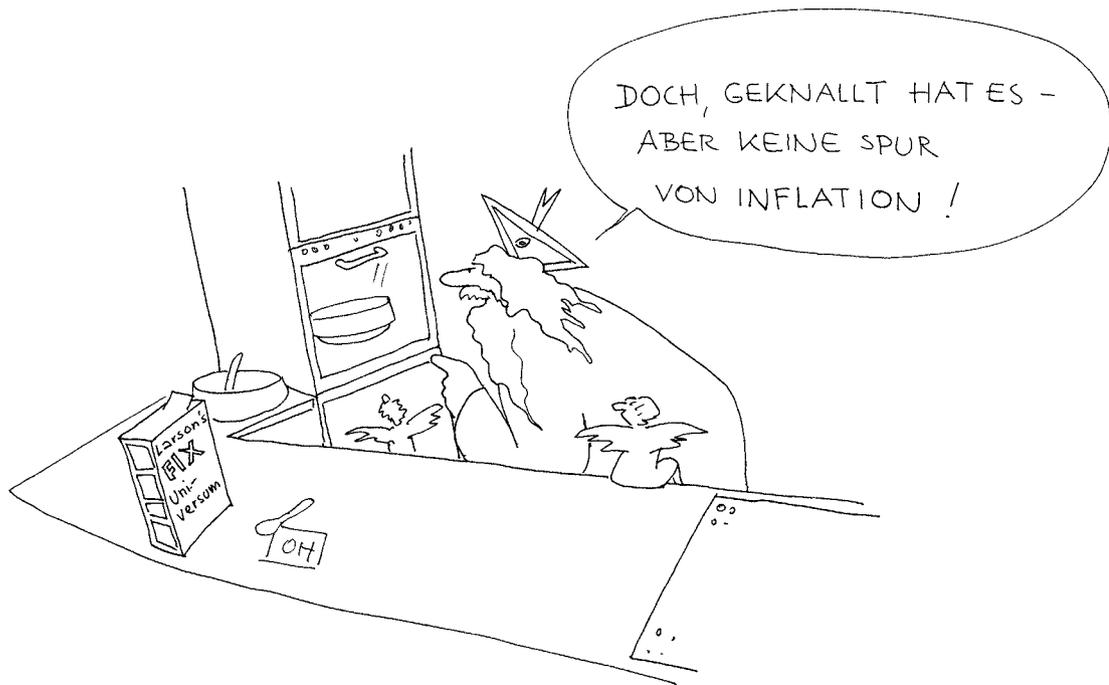
Jetzt sollten Sie wirklich beunruhigt sein. Was bedeutet die Aussage, die Inflation treffe bestimmte Vorhersagen – zum Beispiel, das Universum sei gleichförmig oder zeige skaleninvariante Fluktuationen –, wenn alles, was geschehen kann, unendlich oft geschieht? Und wenn die Theorie keine prüfbaren Vorhersagen macht, wie können die Kosmologen dann weiter behaupten, sie stimme mit den Beobachtungen überein?

Die Theoretiker sind sich zwar des Problems bewusst, aber sie halten es für lösbar. Sie hoffen, das naive Bild der Inflation aus den frühen 1980er Jahren wiederherstellen zu können – obwohl sie seither vergeblich um eine plausible Lösung ringen. Einige versuchen, nichtewige Inflationstheorien auszu-

Immer und ewig

Die Inflationstheorie soll präzise Vorhersagen treffen, die mit den Beobachtungen übereinstimmen. Doch leistet sie das wirklich? Sobald die Inflation beginnt, breitet sie sich durch Quantenfluktuationen fast überall im Raum immer weiter aus. Wo sie aufhört, bildet sich eine Blase, die ihrerseits wächst. Wir leben in einer solchen Blase, doch sie ist untypisch; die meisten sind jünger. Tatsächlich entstehen unendlich viele Blasen mit einer unendlichen Vielfalt von Eigenschaften. Alles, was geschehen kann, geschieht in irgendeiner Blase. Aber eine Theorie, die alles vorhersagt, besagt gar nichts.





hecken, um die unendliche Vielfalt der Universen im Keim zu ersticken. Doch Ewigkeit ist eine natürliche Konsequenz der Kombination von Inflation und Quantenphysik. Um sie zu vermeiden, muss das Universum in einem sehr speziellen Anfangszustand und mit einer speziellen Form von inflatonärer Energie beginnen; nur dann hört die Inflation überall im Raum auf, bevor Quantenfluktuationen eine Chance bekommen, sie erneut in Gang zu setzen. In diesem Szenario hängt das beobachtete Ergebnis äußerst empfindlich vom Anfangszustand ab. Das widerspricht jedoch dem eigentlichen Zweck der Inflation: Sie soll das Ergebnis unabhängig von den zuvor herrschenden Bedingungen erklären.

Ein anderer Ansatz nimmt an, dass Inseln wie unser Universum das wahrscheinlichste Ergebnis der Inflation sind. Zu diesem Zweck wird ein so genanntes Maß postuliert, das regelt, wie man die Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Inseln gewichtet – als würde man uns im Beispiel mit dem Sack Münzen etwa vorschreiben, wir sollten immer drei Zweieuro Münzen pro fünf Eineuro Münzen stapeln. Die willkürliche Einführung eines Maßbegriffs kommt jedoch dem Eingeständnis gleich, dass die Inflationstheorie für sich genommen gar nichts erklärt oder vorhersagt.

Theoretiker haben viele plausible Maße vorgeschlagen, die zu unterschiedlichen Schlüssen führen. Zum Beispiel besagt das Volumenmaß, dass man Inseln durch ihre Größe messen soll – auf den ersten Blick eine vernünftige Wahl, denn die Inflation soll ja große Volumina erzeugen, die so gleichförmig und »flach« sind wie unser Kosmos. Leider versagt das Volumenmaß, weil es Verzögerung bevorzugt. Das zeigt der Vergleich von Inseln wie der unseren mit anderen, die später – nach mehr Inflation – entstanden sind. Auf Grund des exponentiellen Wachstums der Inflation werden

die späteren Regionen ein sehr viel größeres Gesamtvolumen einnehmen. Darum sind Gebiete, die jünger sind als unseres, unermesslich viel häufiger, und es wäre unwahrscheinlich, dass wir überhaupt existieren.

Die Verfechter der Maßidee gehen nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum vor. Sie erfinden und erproben ein Maß nach dem anderen, bis eines vielleicht das ersehnte Resultat liefert: dass unser Universum besonders wahrscheinlich ist. Angenommen, sie haben eines Tages Erfolg. Dann werden sie erklären müssen, was dieses Maß vor allen anderen auszeichnet, und womöglich noch eine Rechtfertigung für diese Erklärung finden müssen, und so weiter.

Andere Forscher berufen sich auf das anthropische Prinzip. Während das Maßkonzept besagt, dass wir auf einer typischen Insel leben, nimmt das anthropische Prinzip an, unsere Insel sei sehr untypisch, biete aber die Voraussetzungen für die Entstehung von Leben. Die Bedingungen in typischeren Inseln seien hingegen unvereinbar mit Galaxien oder Sternen oder einer anderen Voraussetzung für Lebensformen unserer Art. Obgleich die typischen Inseln viel mehr Raum einnehmen als solche, die unserer Insel gleichen, könnten wir erstere ignorieren, denn uns interessieren nur Gebiete, in denen Menschen möglich sind.

Diese Idee hat aber leider den Nachteil, dass unser Universum flacher, glatter und präziser skaleninvariant ist, als es sein müsste, um Leben zu ermöglichen. Typischere, insbesondere jüngere Inseln sind fast ebenso bewohnbar wie unsere, aber viel häufiger.

Von der oft zitierten Behauptung, die kosmologischen Daten hätten die wichtigsten Aussagen der Inflationstheorie verifiziert, bleibt im Licht dieser Argumente wenig übrig. Richtig ist, dass die Daten die Vorhersagen der ursprünglichen

Laut Inflationsmodell ist unsere Existenz sehr unwahrscheinlich

naiven Theorie bestätigen, aber das ist nicht die inflationäre Kosmologie von heute. Der naiven Theorie zufolge führt die Inflation zu einem Ergebnis, das den Gesetzen der klassischen Physik gehorcht. In Wahrheit gehorcht die Inflation aber der Quantenphysik, und alles, was geschehen kann, geschieht auch. Doch wenn die Inflationstheorie keine klaren Vorhersagen trifft, wozu ist sie dann gut?

Das eigentliche Problem ist, dass Verzögerung nicht bestraft, sondern belohnt wird. Da Ausreißergebiete, die das Ende der Inflation hinauszögern, beschleunigt weiterwachsen, gewinnen sie unweigerlich die Oberhand. Besser wäre es, wenn jede Ausreißerregion langsamer expandieren würde – oder sogar schrumpfen. Der weitaus größte Teil des Universums bestünde dann aus braven Regionen, in denen die Glättungsphase rechtzeitig aufhört, und unser Universum wäre angenehm normal.

Gezähmte Verzögerung

Genau diese Eigenschaft besitzt die so genannte zyklische Theorie, die meine Kollegen und ich vorschlagen. Demnach ist der Urknall nicht der Beginn von Raum und Zeit (siehe »Die Zeit vor dem Urknall« von Gabriele Veneziano, Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 30), sondern eher ein »Rückprall« (*bounce*) von einer vorherigen Kontraktions- zu einer Expansionsphase, die mit der Erzeugung von Materie und Strahlung einhergeht. Die Theorie ist zyklisch, denn nach rund einer Billion Jahre geht die Expansion in Kontraktion über, und diese führt dann über einen neuen Rückprall wieder zur Expansion. Entscheidend ist, dass die Glättung des Universums vor dem Urknall stattfindet – während der Kontraktionsperiode. Alle Ausreißergebiete schaffen sich quasi selbst ab: Die Nachzügler ziehen sich noch weiter zusammen, während brave Regionen bereits rechtzeitig den Rückprall durchmachen und zu expandieren beginnen. Darum bleiben die Ausreißer vernachlässigbar klein.

Die Glättung während der Kontraktion hat eine beobachtbare Konsequenz. Im Lauf jeder Glättungsphase, ob in der inflationären oder der zyklischen Theorie, erzeugen Quantenfluktuationen kleine, sich ausbreitende Verzerrungen der Raumzeit, so genannte Gravitationswellen, die in der kosmischen Hintergrundstrahlung eine charakteristische Spur hinterlassen. Die Amplitude der Wellen ist proportional zur Energiedichte. Die Inflation müsste bei extrem hoher Dichte des Universums stattfinden, während der entsprechende Vorgang im zyklischen Modell einen praktisch leeren Kosmos voraussetzt. Darum wären die vorhergesagten Spuren völlig verschieden: Ohne Inflation wären sie viel schwächer. Freilich ist die zyklische Theorie relativ neu und mag ihre eigenen Probleme haben, doch sie zeigt, dass Alternativen denkbar sind, die nicht mit dem unkontrollierbaren Makel der ewigen Inflation behaftet sind. Unsere bisherigen Resultate legen nahe, dass das zyklische Modell auch andere hier beschriebene Probleme vermeidet.

Gewiss habe ich meine Plädoyers pro und kontra Inflation extrem zugespitzt, ohne Nuancen und ohne ein Kreuzverhör

zuzulassen. Viele führende Theoretiker sind überzeugt davon, die erwähnten Probleme seien nur Kinderkrankheiten und sollten unser Vertrauen in die Grundidee nicht erschüttern. Ich und andere wenden ein, die Kritikpunkte beträfen den Kern der Theorie; diese müsse entweder grundlegend verändert oder komplett verworfen werden.

Letzten Endes werden Daten entscheiden, insbesondere Vermessungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Schon wird auf Berggipfeln, mit Stratosphärenballons und Satelliten nach den Spuren von Gravitationswellen gesucht; Resultate sind in den nächsten zwei, drei Jahren zu erwarten. Die Entdeckung einer Gravitationswellenspur würde das Inflationsmodell stützen; ihr Ausbleiben brächte es in ernste Schwierigkeiten. Um die Inflation trotz eines Nullresultats zu retten, müssten die Kosmologen für das Inflatonfeld ein speziell geformtes Potenzial annehmen, das die Gravitationswellen unterdrückt – doch das mutet gekünstelt an. Viele Forscher würden dann eher einer Alternative wie dem Modell des zyklischen Universums zuneigen, weil es aus sich heraus ein unbeobachtbar kleines Gravitationswellensignal vorhersagt. Das Resultat wird uns jedenfalls der Antwort auf die Frage, wie das Universum so wurde, wie es ist, und was künftig aus ihm werden soll, ein entscheidendes Stück näher bringen. ~

DER AUTOR



Paul J. Steinhardt ist Direktor des Princeton Center for Theoretical Science an der Princeton University (US-Bundesstaat New Jersey). Er ist Mitglied der National Academy of Sciences und wurde 2002 für seine Beiträge zur Inflationstheorie mit der Dirac-Medaille des International Center for Theoretical Physics ausgezeichnet. Außerdem war er an der Entdeckung von Quasikristallen in der Festkörperphysik beteiligt.

QUELLEN

Carroll, S.: From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory. Dutton Adult, New York 2010

Guth, A.: Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts: Die Theorie des inflationären Universums. Droemer Knaur, München 2002

Linde, A.: Quantum Cosmology, Inflation, and the Anthropic Principle. In: Barrow, J.D. et al. (Hg.): Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology and Complexity. Cambridge University Press, 2004

Steinhardt, P.J., Turok, N.: Endless Universe: Beyond the Big Bang. Doubleday, New York 2007

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/apr2011/inflation

Ein kurzes Video illustriert die ewige Inflation; US-Blogger diskutieren den Artikel.

<http://arxiv.org/abs/hep-th/0609095>

Preprint von Gibbons, G. W., Turok, N.: The Measure Problem in Cosmology. In: Physical Review D 77, Paper Nr. 063516, 2008

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1114584

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Was können uns die Forscher heute
über unser Gehirn sagen?
Können wir die Funktionsweise des Gehirns
im Computer simulieren?
Ist das Lesen von Gedanken bereits
technisch machbar?

MI 31.08.2011 / 18.00 / HANNOVER DIE VERMESSUNG DER GEDANKEN? Wie der Mensch sich selbst erkundet

MIT **Prof. Dr. Frank Schneider** Universitätsklinikum Aachen, **Prof. Dr. Gottfried Vosgerau** Universität Düsseldorf,
Prof. Dr. John-Dylan Haynes Bernstein Zentrum für Computational Neuroscience Berlin, **Dr. Felix Schürmann**
École polytechnique fédérale de Lausanne MODERIERT VON **Steve Ayan** Redaktionsleiter Gehirn & Geist

VERANSTALTUNGSORT Schlossküche Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG mensch@volkswagenstiftung.de

MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Kalendergeschichten

Irgendwo in einer Spiralgalaxie treibt ein mittelgroßer Stern mit allerlei Planeten. Auf dem dritten wohnen Lebewesen, deren Leben zeitlich in Abhängigkeit von dessen Eigenrotation und Umlaufzeit strukturiert ist. Eine Spezies auf diesem Planeten hat dafür sogar verschiedene Abzählsysteme entwickelt, von denen hier die Rede sein soll.

VON NORBERT TREITZ

Das unsere Erde so ordentlich um die Sonne läuft, liegt ganz wesentlich daran, dass Letztere ein Einzelstern ist und insofern zu einer Minderheit der Sterne gehört. Ein Planet in einem Mehrfachsternsystem würde sich im strengen Sinn des Wortes chaotisch bewegen. Dann wären Kalender wenig sinnvoll – wenn es denn überhaupt Kalendermacher gäbe: Unter den wilden Temperaturschwankungen eines Planeten auf einer chaotischen Bahn hätten sich Lebewesen kaum entwickeln können (siehe auch S. 95).

Unsere komfortable Erde dagegen gibt uns Gelegenheit, die Zeit mit Hilfe eines astronomischen Geräts zu messen: der Sonnenuhr. Denn von der Erde aus gesehen, bewegt sich die Sonne stets in dieselbe Richtung, ist also niemals rückläufig. Das ist auf dem Merkur anders, mit der Folge, dass man aus dem Sonnenstand nicht immer eindeutig auf die Tageszeit schließen kann (Spektrum der Wissenschaft 4/2009, S. 36).

Mehr noch: Mittlerweile können wir Atomuhren konstruieren, die noch viel genauer gehen als die Erde selbst. Seit 1967 ist die Sekunde über eine gewisse Anregungsstufe in Zäsiumatomen definiert. Dass 86 400 (= 60 · 60 · 24) von ihnen gerade die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Sonnenhöchstständen (den »mittleren Sonnentag«) ergeben, ist zwar beabsichtigt, denn die neue Definition der Sekunde sollte der bisherigen, nämlich 1/86 400 des mittleren Sonnentags, möglichst nahekommen. Aber für die Physik, die sich ja ohnehin von den Zufälligkeiten unserer irdischen Existenz frei zu machen hat, ist das eigentlich ohne Belang.

Der Tradition verdanken wir eine seltsame Begriffsvertauschung: Die Anzeige der Sonnenuhr, die ja nur einen aktuellen Winkel der Erddrehung relativ zur Sonne wiedergibt, wird als »wahre Sonnenzeit« bezeichnet, ihre Umrechnung in die physikalische Zeit dagegen als »mittlere Sonnenzeit«. Das ist ungefähr so logisch, als würde man die Anzeige einer Pendeluhr ohne Temperatureausgleich in einer ungeheizten Wohnung, die im Sommer langsamer geht als im Winter, die »wahre Zeit« nennen.

Warum geht die Erde überhaupt ungleichmäßig? Einen Grund findet man in den keplerschen Gesetzen: Die Erdbahn ist eine Ellipse mit der Sonne in einem ihrer Brennpunkte. Die Entfernung beider Himmelskörper schwankt also, und die Erde läuft umso schneller, je näher sie der Sonne ist. Das folgt aus Keplers II. Gesetz (»Die Verbindungslinie überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen«), das seinerseits aus dem Drehimpulserhaltungssatz herleitbar ist. Der fordert zwar nur, dass der Gesamtdrehimpuls des Sonnensystems erhalten bleiben muss und nicht auch der einzelner Planeten; aber diese wirken so wenig aufeinander ein, dass sie – zumindest auf den ersten Blick – keine nennenswerten Mengen an Drehimpuls austauschen.

Vom irdischen Standpunkt aus geht die Sonne in der Nähe des Perihels (des Punkts größter Erdnähe) vor und in großer Entfernung von der Erde entsprechend nach. Die Abweichung macht bis zu acht Sekunden pro Tag aus und summiert sich zwischendurch auf bis zu sieben Minuten, bis sie sich im Lauf eines Jahres wieder ausgleicht.

Die Neigung der Erdachse verursacht zusätzlich eine Gangabweichung mit halbjähriger Periode von maximal 20 Sekunden pro Tag, was sich auf bis zu acht Minuten Vor- oder Nachgehen akkumulieren kann.

Dass uns die Sonne mal näher, mal ferner steht und uns entsprechend größer oder kleiner erscheint, fällt ansonsten nur bei Sonnenfinsternissen auf: Je nachdem, ob der – noch stärker schwankende – scheinbare Durchmesser des Monds größer oder kleiner ist als derjenige der Sonne, kann er sie total oder nur ringförmig bedecken. Nennenswert wärmer wird es nicht bei uns, wenn wir der Sonne am nächsten stehen; dazu ist die Abweichung der Erdbahn von der Kreisform zu gering.

Die vielen Formen der Rotation

Ein Planet ist nicht dazu verpflichtet, sich um sich selbst zu drehen – und wenn überhaupt, darf er es auch so langsam machen, wie er umläuft. Er wendet dann seiner Sonne stets dieselbe Seite zu. Auf eine solche gebundene Rotation hat sich infolge von Gezeitenkräften der Mond mit der Erde eingestellt (Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 50). Bis vor wenigen Jahrzehnten vermutete man, auch der Merkur halte es so mit der Sonne; das wurde erst 1965 durch Radarbeobachtungen widerlegt.

Sind Rotations- und Umlaufperiode verschieden, so gibt es Tageszeiten, das heißt periodische Änderungen von Beleuchtung und Heizung, bereits auf Grund der Eigendrehung. Jahreszeiten muss es deswegen noch nicht geben: Auf einem Planeten mit kreisnaher Bahn und Rotationsachse parallel zur



KARTE: ISTOCKPHOTO / ANATASA RADIC; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT. MANN MIT ZYLINDER: ISTOCKPHOTO / DUNCAN P. WALKER; FERDINAND MAGELLAN: PUBLIC DOMAIN

Als die Mannschaft des Weltumseglers Ferdinand Magellan am 6. September 1582 nach Spanien zurückkehrte (blaue und – für die Zeit nach Magellans Tod – grüne Linie), war es laut Schiffstagebuch erst der 5. September. Dagegen gewann der fiktive Phileas Fogg, zurück von einer Weltreise in Gegenrichtung (rote Linie), wider Erwarten eine Wette, weil seine sesshaften Zeitgenossen einen Tag weniger gezählt hatten als er selbst.

Bahnachse sind heller Tag und dunkle Nacht überall gleich lang. Die Rotationsachse der Erde ist allerdings gegen die Bahnachse geneigt, und zwar um 23,44 Grad; bei ihrem kleineren Bruder Mars sind es 25,2 Grad.

Stellen wir uns den Extremfall einer Neigung von 90 Grad vor. Dann liegt die Rotationsachse in der Bahnebene, und wenn sie genau auf die Sonne zeigt, hat während einer ganzen Drehung ein und dieselbe Halbkugel Sonnenschein und die andere Schatten. Liegt die Rotationsachse dagegen quer dazu, also tangential zur Bahn, so genießt die ganze Erde das Wechselspiel von Hell und Dunkel, genauso wie bei der Neigung null Grad.

Bei weniger extremen Neigungen wie unseren 23,44 Grad schwächen sich diese Effekte ab zu einer Bevorzugung der Nordhalbkugel, wenn das nördliche »Ende« der Erdachse zum Bahnninneren weist. Dann ist es bei uns Sommeranfang. Bei Tag-und-Nacht-Gleiche geht es ebenso zu wie bei 90 Grad Neigung.

Die Zeitspanne zwischen zwei Sommeranfängen ist die Periode der Jahreszeiten und wird als tropisches Jahr bezeichnet (*tropos* = Wende; die Tropen

sind der Gürtel der Erde zwischen den Wendekreisen). Es dauert 365,2419 mittlere Sonnentage. Wegen der Präzession der Erdachse – mit einer Periode von ungefähr 25750 Jahren – ist das tropische Jahr um 21 Minuten kürzer als das siderische Jahr; das ist der Zeitraum, nach dem die Sonne wieder an derselben Stelle am Fixsternhimmel zu stehen scheint.

Schalttage, fein dosiert

Wenn man alle 365 Tage Neujahr feiert, wandern die Jahreszeiten in jedem Jahr um rund sechs Stunden vorwärts durch den Kalender, also einmal ganz herum in $365 / (365,2419 - 365)$ oder ungefähr 1500 Jahren. Das kann aber nicht der Sinn eines Kalenders sein. Ein solcher sollte synchron zu den Jahreszeiten laufen, notfalls mit einer geeigneten Mischung aus Jahren mit 365 und 366 Tagen. Ein gutes Mischungsverhältnis ist offenbar 3:1, was zu 365,25 Tagen als Näherung für das tropische Jahr führt. Das ist nun aber wieder etwas zu lang und schiebt die Jahreszeiten in rund 123 Jahren um einen Tag rückwärts.

Der julianische Kalender entspricht dieser Näherung: In jedem vierten Jahr

wurde ein Schalttag nach dem 6. Tag vor den Kalenden des März (das heißt dem 1. März) eingeschoben. Nach römischer Zählweise kam dieser sechste Tag einfach doppelt vor; die französische Vokabel *année bissextile* (»zweimal der sechste«) für Schaltjahr, ähnlich in anderen romanischen Sprachen, erinnert heute noch daran.

Zur Zeit des 1. Konzils von Nicäa im Jahr 325 »nach Christi Geburt« (die ihrerseits erst sechs Jahrhunderte später und dabei vermutlich um sieben Jahre falsch datiert wurde) war der Frühlingsanfang am 21. März. Bis zum 16. Jahrhundert war er wegen der zu langen Kalenderjahre um zehn Tage nach hinten auf den 11. März gewandert.

Wenn das noch eine Weile so weitergegangen wäre, hätte man bereits in ungefähr 13 000 Jahren Ostern und Weihnachten zugleich feiern können. Denn Weihnachten ist ebenso wie die Geburt des im spätrömischen Imperium beliebten Gottes Mithras auf den 25. Dezember festgelegt – ein solches Datum sucht man in der Bibel vergebens. Dagegen ist Ostern auf Grund der Leidensgeschichte Jesu mit dem jüdischen Pessachfest verknüpft, das seinerseits von den Mondphasen und den Jahreszeiten abhängt. Ostern ist am Sonntag nach dem ersten Vollmond im Frühling und kann daher im Prinzip durch den ganzen Kalender wandern, wenn man nicht rechtzeitig die passende Menge an Schalttagen einschiebt.

Der julianische Kalender tut hier sogar zu viel des Guten, so dass die Jahreszeiten scheinbar rückwärtswandern.

Da die römische Kirche in langen Zeiträumen denkt, befand sie die Verschiebung des Frühlingsanfangs vom 21. auf den 11. März (und damit des Osterfestes: nennen wir es Problem I) und das weitere langfristige Wandern (Problem II) für nicht akzeptabel, und so verfügte Papst Gregor XIII. 1582 einen Kalender »neuen Stils«. Aus heutiger Sicht hätte er beide Probleme besser getrennt voneinander behandelt.

Problem II ist nämlich schon dadurch zu lösen, dass es nicht mehr 100, sondern nur 97 Schalttage in 400 Jahren gibt. Konkret lässt man 1700, 1800, 1900, 2100, 2200, 2300, 2500 ... als Schaltjahre aus. Damit ist das Kalenderjahr im Mittel 265,2425 Tage lang, eine sehr gute Näherung für die 365,2419 Tage des tropischen Jahrs. Die Wanderung der Jahreszeiten(anfänge) durch den Kalender wäre damit nicht nur für normale Bürger und Landwirte, sondern auch für die Kirche hinreichend langsam geworden.

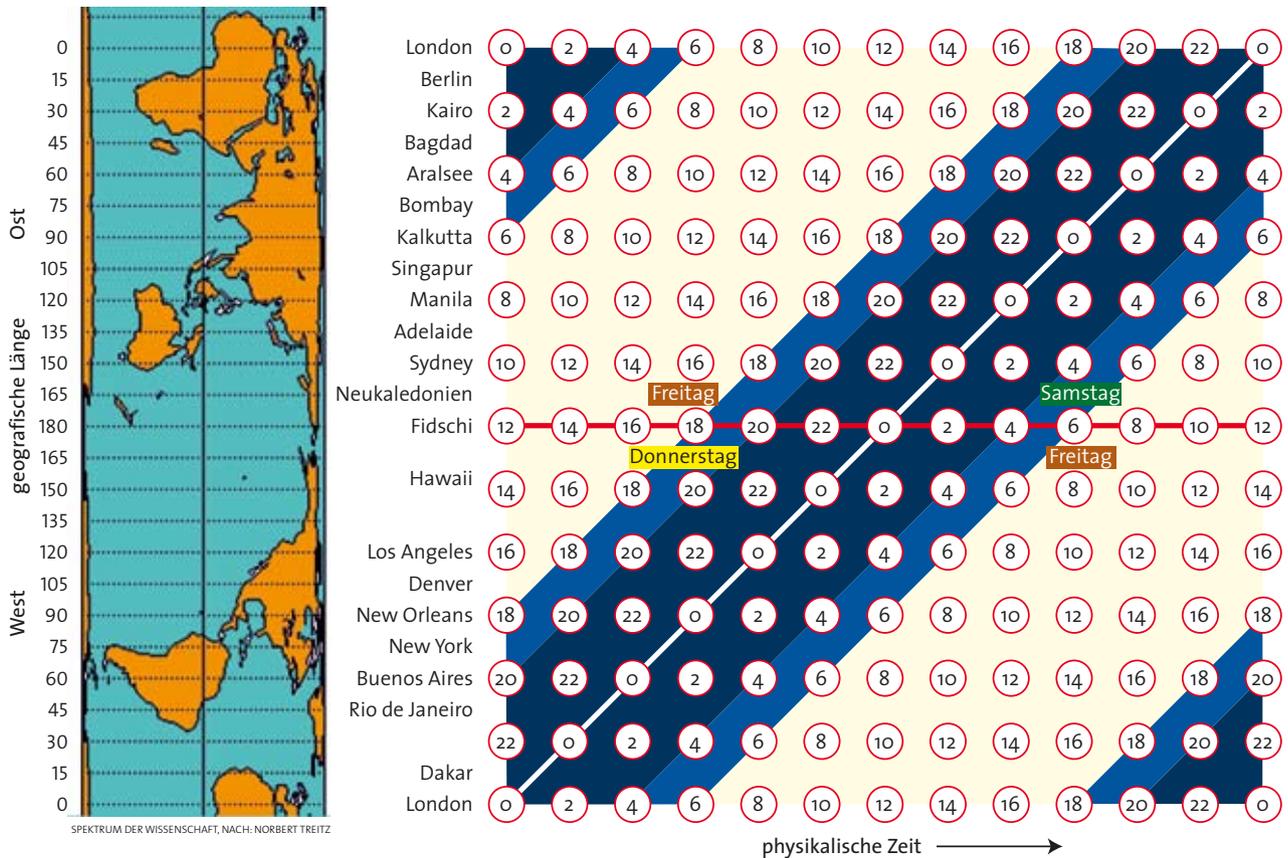
Hätte man nun 1582 nur Problem II behandelt, wäre erst einmal bis zum 28. Februar 1700 gar nichts passiert. Erst einen Tag später hätten der alte und der neue Kalender sich unterschieden, und das nur um einen einzigen Tag. Der Frühlingsanfang wäre dann bis heute ungefähr am 11. März geblieben; zwei weitere Verschiebungen um je einen Tag wären 1800 und 1900 hinzugekommen. Eine so kleine Reform hätten auch die nichtkatholischen Länder vermutlich akzeptiert. Tatsächlich hatten sich im maßgeblichen Jahr 1700 viele Län-

Alle (Orts-)Zeit der Welt

Das Diagramm zeigt Uhrzeiten und Kalendertage in den (idealisierten) Zeitzonen der Erde für einen willkürlich gewählten Zeitraum. Bei dem Schema stelle man sich Ober- und Unterkante miteinander verklebt vor, desgleichen – mit etwas Überlappung – bei der links davon abgebildeten flächentreuen (Archimedes-Lambert-)Zylinderkarte der Erde. Das Diagramm darf man sich nach rechts und links beliebig fortgesetzt denken: als eine unendlich lange, waagrecht liegende Zylinderrohre, die nur zu Darstellungszwecken parallel zur Achse aufgeschlitzt und in die Papierebene ausgebreitet wurde.

Wenn alle Uhren auf der Erde synchron gehen würden – zum Beispiel 0 Uhr zeigen, wenn es in London Mitternacht ist –, dann wäre »ein Tag«, das heißt die Menge aller Punkte im Orts-Zeit-Diagramm, an denen es zum Beispiel Freitag ist, ein Rechteck.

Dagegen ist nach der gültigen Konvention – jede Uhr zeigt 0 Uhr, wenn es in ihrer Zeitzone Mitternacht ist – ein Tag ein Parallelogramm, begrenzt von der Mitternachtsdiagonale (weiß) und der Datumsgrenze (rot). Das Parallelogramm vom Freitag ist hier in zwei Teile zerlegt (links oben und rechts unten); Teile von ihm liegen außerhalb des Schemas.



der sogar der viel drastischeren gregorianischen Reform angeschlossen.

Problem I bestand im Einfangen der zehn Tage, um die der alte (julianische) Kalender der Realität hinterherhinkte. In den katholischen Ländern einschließlich der entsprechenden Mitgliedsländer des Heiligen Römischen Reichs und Kantone der Schweiz folgte auf Donnerstag, den 5. Oktober 1582, Freitag, der 15. Oktober. Das war zu viel für Protestanten aller Art: In dieser Zeit erbitterter Gegnerschaft zwischen »Papisten« und antipapistischen Konfessionen wäre die Übernahme einer päpstlichen Kalenderreform fast einer religiösen Unterwerfung gleichgekommen. Über Jahrhunderte hinweg zählten nun verschiedene Länder Europas die Tage verschieden, mit verwirrenden und zum Teil kuriosen Folgen.

So starb Miguel de Cervantes am 23. April 1616 in Spanien, wo der neue Kalender galt. Dasselbe Datum schrieb man in England, als William Shakespeare starb. Die UNESCO hat deshalb den 23. April (jedes Jahres) zum Welttag des Buchs und des Urheberrechts gemacht. Der Börsenverein des Deutschen Buchhandels spricht sogar auf seiner Homepage von »dem Todestag« von Cervantes und Shakespeare. Wie man leicht ausrechnen kann, hat aber Shakespeare Cervantes um zehn Tage überlebt. Welch ein Mangel an sprachlicher Genauigkeit ausgerechnet auf Seiten von Institutionen, die der Sprache und der Kultur verpflichtet sind!

Als Physiker findet man es bemerkenswert, dass Newton im gleichen Jahr 1642 geboren worden sei, in dem Galilei starb, auch wenn man Seelenwanderung nicht wirklich für wahrscheinlich hält, weder im Allgemeinen noch speziell bei diesen beiden. Aber stimmt es überhaupt? Wenn Sie in der Wikipedia nachsehen, finden Sie unter Newton je nach Kalender zwei verschiedene Jahreszahlen – und nebenbei eine andere scheinbare Unstimmigkeit, die aber mit der gregorianischen Kalenderreform nichts zu tun hat: Newton starb laut Grabstein am 20. März 1726, wurde aber laut »Times« erst am 28. März 1727 beerdigt. Wie das? In England hatte man damals

den Jahresanfang – mit Wechsel der Jahreszahl! – am 25. März, dem Feiertag Mariä Verkündigung. Nach dem gregorianischen Kalender starb Newton übrigens am 31. März 1727.

Da Russland sich mit der Übernahme des gregorianischen Kalenders bis 1918 Zeit ließ, schrieb der größte Teil der Welt schon den 7. November 1917, als die Oktoberrevolution stattfand. Als der Verkauf Russisch-Amerikas an die USA wirksam wurde, folgte auf Freitag, den 6. Oktober 1867, Freitag, der 18. Oktober. Und wäre bei dieser Gelegenheit die Datums-grenze nicht von der russisch-kanadischen Grenze zur Beringstraße verlegt worden, dann wäre der erste Tag Alaskas in amerikanischer Hand Samstag, der 19. Oktober, gewesen.

Die Tücken der Datums-grenze

Wenn Flugzeug, Telefon und Rundfunk früher als Uhren erfunden worden wären, würde man vermutlich auf der ganzen Erde in jedem Augenblick eine gemeinsame Uhrzeit und ein gemeinsames Datum verwenden, und man hätte nicht überall den Mittag um 12 Uhr – was man auch heute nicht wirklich hat. Wer vom Nordosten Norwegens nach Santiago de Compostela pilgert, muss seine Uhr nicht umstellen. Wer dagegen einmal rund um die Erde reist, wie es Fernão de Magalhães, besser bekannt als Ferdinand Magellan, und – in Jules Vernes Roman »In 80 Tagen um die Welt« – Phileas Fogg getan haben, und jeden Sonnenaufgang als den Beginn eines neuen Tages zählt, fängt sich eine Unstimmigkeit von einem Tag ein (Bild S. 51). Reist man nach Osten, so sind die gezählten Tage kürzer als die richtigen.

Dummerweise haben die Menschen beim Auswandern in ferne Länder die Gewohnheit mitgenommen, ihre Uhren mittags auf 12 zu stellen, statt sie synchron zu den Uhren ihrer Heimat laufen zu lassen. So zeigen die Uhren in New York 7 Uhr, wenn es in London 12 Uhr (Mittag) ist. Aber welchen Sinn hat diese Konvention in Zeiten häufiger Fernreisen und erdumspannender Datenübermittlungen? Liegen die Zeiten, zu denen Sie aufstehen und sich schlafen legen, etwa symmetrisch zu 12 Uhr?

Wann ist bei den üblichen Ladenöffnungen Halbzeit? Wenn die Auswanderer geahnt hätten, dass man später einmal über den Ozean telefonieren kann, hätten sie möglicherweise ihre Uhren mit denen ihrer Heimatländer übereinstimmend gelassen. Natürlich müsste man sich trotzdem überlegen, ob man den Partner aus dem Schlaf klingelt, aber ob die Geschäfte von 10 bis 20 oder von 4 bis 14 Uhr angezeigter Zeit geöffnet sind, ist eigentlich egal.

Richtig schwierig wird es erst mit dem Datum. Wenn man auf der ganzen Erde die Zeitrechnung verwenden würde, bei der die Sonne um 12 Uhr in Greenwich (im Durchschnitt) ihren Höchststand hat, dann wechseln an anderen Stellen der Erde mitten am Tag das Datum und der Wochentag. Zieht man es dagegen vor, den Datumswechsel in der Regel zu verschlafen, ist es unvermeidlich, die Erde in Zeitzonen einzuteilen (Kasten links). Ebenso unvermeidlich gibt es dann benachbarte Orte mit nur einer Stunde Unterschied in der Uhrzeit, aber verschiedenem Datum und Wochentag. Das ist der Preis, den wir für die Festlegung verschiedener Zeitzonen zahlen müssen.

Damit das nicht so auffällt, nutzt man die Tatsache, dass es durch den Pazifischen Ozean einen Meridian gibt, der keine Kontinente berührt, sondern zwischen Sibirien und Alaska durch die Beringstraße läuft. Die tatsächliche Datums-grenze geht aber im Zickzack um einzelne Inselstaaten herum und ist anlässlich des Anfang 2000 um ein Jahr verfrüht gefeierten Jahrtausendwechsels noch verschoben worden, um Touristen anzulocken, die solche Willkürlichkeiten wichtiger nehmen als Fakten und nebenbei dem Irrglauben anhängen, ein Jahrtausend sei dann beendet, wenn das tausendste Jahr anfängt, und nicht, wenn es aufhört. ~

DER AUTOR



Norbert Treitz ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

Ich meine nicht den Wüstensand,
Den Tummelplatz des wilden Hirschen;
Die Körner mein' ich, die am Strand
Des Meeres unter mir erknirschen.

Ferdinand Freiligrath (1810–1876)



ALLE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Spaziergang am Meer

Weil sich Wasser gern um Sandkörner legt, läuft man am Strand zuweilen wie auf einem befestigten Weg.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Bei einer Strandwanderung spazieren wir wohl am liebsten direkt am Meeressaum. Schließlich ist dort das Wasser am nächsten und das Meeressauschen am beeindruckendsten. Doch für diese Vorliebe dürfte es auch noch einen sehr praktischen Grund geben: Der nasse Sand ist fest und hart, man läuft fast wie auf einem befestigten Weg (Foto oben). Weiter ab vom Wasser, beim Gang durch den trockenen – oft auch brennend heißen – »Zuckersand«, ist man hingegen froh, überhaupt voranzukommen.

Von festem Untergrund kann man sich in einer Art elastischem Stoß abdrücken. Das heißt, es geht kaum Bewe-

Man fülle eine Schale mit Wasser und Sand (links) und drücke sie zusammen (rechts). Dadurch wölbt sich der Sand auf, das Volumen zwischen den Körnchen wächst, und die oberen Schichten laufen trocken.

gungsenergie in Form von Wärme oder durch Verformung des Bodens verloren. Doch was ist, wenn sich die Sandkörnchen in trockenem Sand leicht gegeneinander verschieben lassen? Dann drücken wir sie zunächst nach unten weg. Weil der Boden dort dichter wird, weichen sie schließlich zu den Seiten hin aus, während die Füße tief einsinken. Die Wechselwirkung zwischen Füßen und Boden ist in diesem Fall sehr unelastisch: Die aufgewandte Energie dient weniger dem Vortrieb als dazu, Unmengen von Sandkörnern zu verschieben – man hat wortwörtlich keinen festen Boden mehr unter den Füßen. Erst vergleichsweise spät kommen die zunächst locker zusammengefügt Partikel durch ihre Reibung untereinander zum Stillstand.

Schon als Kinder haben wir die Erfahrung gemacht, dass Zuckersand nicht wie ein fester Körper wirkt, sondern eher einer Flüssigkeit gleicht,

wenn er durch die Finger fließt. Wir wissen auch, dass er in einem Gefäß, wenn man es nur etwas rüttelt, eine ebene Oberfläche ausbildet. Wollen wir hingegen Sandburgen bauen, hilft uns trockener Sand nicht weiter. Doch warum ist nur feuchter Sand fest? Wäre nicht das Gegenteil viel plausibler? Lässt Wasser zwischen den Körnern diese nicht besonders leicht aneinander entlanggleiten – sozusagen wie geölt?

Sandkörner umgeben sich gern mit Wasser. Häuft man eine Portion Sand in einer flachen Schale auf und gibt etwas Wasser an den unteren Rand des Schütthaufens, durchnässt es den Haufen von unten nach oben in sehr kurzer Zeit, bis jedes Sandkörnchen mit einem Feuchtigkeitsfilm überzogen ist. Zwar muss dafür Höhenenergie aufgebracht werden. Doch für die Ausbildung einer Grenzfläche zwischen Wasser und Sandkorn ist weniger Grenzflächenenergie nötig als für die Ausbildung einer Grenzfläche zwischen Wasser und Luft. Diese Differenz stellt Energie zur Verfügung, sogar mehr als nötig. Der Überschuss geht durch Dissipation verloren, wird also als Wärme an die Umge-





Lässt man Wassertropfen auf einen Haufen trockenen Sands fallen (links), so rollen mehr oder weniger wohlgeformte, feuchte Sandkugeln hinab. Denn in Kugelform sind die Körnchen maximal dicht gepackt, so dass die Grenzflächenenergie minimal wird. Die Gewichtskraft eines Fußes (rechts) kann allerdings verhindern, dass Sandkörner ihre Packungsdichte beibehalten. Ein trockener »Hof« entsteht.



Ein benetzter Finger, den man in trockenen Sand steckt, ist danach bis zur Feuchtigkeitsgrenze mit Sandkörnern bedeckt.

Die Anziehung zwischen Sand und Wasser ist sehr stark: Ein Kollektiv befeuchteter Sandkörner organisiert sich in einer Weise, dass die Körner maximal dicht »gepackt« sind. Zunächst wirkt das Wasser dabei tatsächlich wie ein Schmiermittel und setzt die Reibung zwischen den Körnern stark herab. Doch in dem Maß, in dem die Packungsdichte dem Maximalwert zustrebt – im Foto ganz oben wird näherungsweise Kugelform erreicht –, steigt auch die Energie, die nötig ist, um die Körner wieder voneinander zu entfernen.

Mit diesen Ergebnissen gerüstet können wir auf die Eingangsfrage zurück-

kommen: Warum ist feuchter Sand unter den Füßen so fest? Offenbar hat er die unter den gegebenen Bedingungen größtmögliche Packungsdichte angenommen. Verschiebt man die Sandteilchen gegeneinander, muss man dies entgegen der verbindenden Wirkung des Wassers tun, was nur unter Aufwand von (Grenzflächen-)Energie zu haben ist. Nun summieren sich die Einzelenergien so vieler Teilchen aber zu einem recht ansehnlichen Energiebetrag. Der Boden wirkt also hart, weil wir, um ihn zu verformen, diesen Betrag erst einmal durch den Druck unserer Füße aufbringen müssten.

Eine kleine Veränderung zeigt sich allerdings dennoch. Setzen wir den Fuß auf feuchten Sand, breitet sich in dem Maß, in dem wir den Druck auf den Boden steigern, ein Hof trockengelegten Sands aus (oben rechts). Hebt man den Fuß wieder an, so sammelt sich Wasser in der flachen Delle, die wir in den Boden gedrückt haben. Und während die Fußspur verschwindet, verschwindet auch das Wasser wieder.

Denn ein wenig geben die Sandkörner doch nach. Sie werden vom einsinkenden Fuß zu den Seiten weggedrückt und dort aufgewölbt. Dort bilden sie unter anderem kleine Brücken, die wie eine Torwölbung die Gewichtskraft nach den Seiten »ableiten«. Diese wirkt daher nicht nur senkrecht nach unten, sondern auch zur Seite. Durch die unelastische Wechselwirkung verschieben sich die bis dahin maximal dicht gepackten Sandkörner gegeneinander, so dass der freie Raum zwischen ihnen wächst. Bevor nun ein Vakuum entstehen kann, wird Wasser aus den benachbarten Bereichen in diesen Raum hineingesogen

und die oberste Sandschicht gewissermaßen trockengelegt. Die für all das erforderliche Energie bringt natürlich der einsinkende Fuß auf.

Das Phänomen lässt sich auch fern von Sandstränden leicht nachstellen. Dazu füllen wir ein verformbares Gefäß mit Sand und tränken ihn mit Wasser – so lange, bis er von einer hauchdünnen Wasserschicht bedeckt ist und feucht glänzend erscheint (Fotos linke Seite unten). Drückt man die Schale zusammen, wölbt sich der Sand ebenfalls etwas auf. Binnen eines Sekundenbruchteils laufen dann die oberen Schichten trocken. Dass man das Trockenlaufen so schnell wahrnimmt, liegt übrigens daran, dass trockener Sand heller erscheint als nasser – doch das ist wieder eine andere Geschichte.

»So leicht und angenehm ... auf dem glatten, festen, gespülten und federnden Sandboden am Saume des Meeres« zu gehen, das genoss schon Thomas Mann. Wir können es ihm nun gleichtun – und wissen obendrein, wie die Natur diesen Pfad für uns befestigt hat. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting

ist Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

Blossey, R.: Was eine Sandburg im Innersten zusammenhält. In: Physik Journal 7, S. 17, 2008

Sprache und Denken

Wie eng sind beide verknüpft? Vollzieht sich Denken immer als innerer Monolog? Oder kommt es auch ohne Wörter aus?

Von Gottfried Vosgerau



»Die Menschen glauben, ihr Verstand gebiete den Worten; es kommt aber auch vor, dass die Worte ihre Kraft gegen den Verstand umkehren.« Diesen »Gedanken« schrieb Francis Bacon 1620 in seinem Werk »Neues Organon« nieder. Aber was genau ist daran der Gedanke? Besteht er in dem Satz selbst oder stattdessen in einer abstrakten Idee, die in ihm nur ihren sprachlichen Ausdruck findet? Als ich einmal einen Vortrag hielt, redete ich über einen Gedanken, den ich auf einer Folie notiert hatte. Ein Kollege sagte: »Du sprichst über einen Gedanken, aber auf der Folie steht ein Satz!« Die-

AUF EINEN BLICK

WORTE ALS FLÜGEL DER GEDANKEN?

1 Bewusstes Nachdenken ist oft verbunden mit **innerem Sprechen**. Allerdings zeigt etwa das gelegentliche **Ringeln um Worte** für einen Gedanken, der klar vor unserem geistigen Auge steht, dass Denken nicht generell an Sprache gebunden sein kann.

2 Zwar kommt Denken nicht ohne **Begriffe** aus, aber auch diese können **nichtsprachlich** sein. So ergaben Versuche mit Tieren, dass sie zumindest über einfache Begriffe und damit über einfache Gedanken verfügen.

3 Philosophen streiten darüber, inwieweit Sprache unser Denken formt. Dabei geht es insbesondere um die Frage, ob sie **Strukturen** bereitstellt, die **vorsprachliches Denken** allein nicht hervorbringt.

se spitzfindige Unterscheidung mag zwar richtig sein, aber versuchen Sie mal, irgendeinen Ihrer Gedanken zu Papier zu bringen, ohne dabei Wörter zu benutzen! Das können allenfalls Mathematiker.

Das grundlegende Problem, das in diesen Beispielen sichtbar wird, ist die Frage nach dem Verhältnis von Sprache und Denken. Benutzen wir die Sprache, um unsere Gedanken zum Ausdruck zu bringen, oder ist sie selbst das Medium, in dem wir denken?

Viele werden den Eindruck haben, beim Denken so etwas wie einen inneren Monolog zu führen. Ist Denken also im Wesentlichen inneres Sprechen? Das erscheint intuitiv plausibel. Allerdings beobachten wir den inneren Monolog nur, wenn wir uns darauf konzentrieren und nichts sonst tun. Es könnte also sein, dass das innere Sprechen nur dann mit dem Denken einhergeht, wenn wir unseren Sprachapparat zu nichts anderem gebrauchen. Möglicherweise handelt es sich also lediglich um eine Begleiterscheinung des Denkens, die für es selbst nicht notwendig ist.

In der Tat liefert unsere Alltagserfahrung genügend Beispiele, die diese Vermutung stützen. In der Regel versuchen wir, unsere Gedanken sprachlich auszudrücken. Wenn diese schon in Sprachform vorlägen, wäre das keine zusätzliche Leistung. Tatsächlich kommt es aber oft genug vor, dass wir um Worte ringeln: Wir wissen, was wir denken und gerne ausdrücken möchten, finden aber nicht die richtige Formulie-



Es ist eine alte Streitfrage: Nehmen Gedanken im Kopf generell Sprachform an, oder können wir auch anders denken – etwa in Symbolen oder Bildern?

rung dafür. Oder wir versuchen krampfhaft, ein komplexes Problem zu verstehen, doch alle sprachlichen Erklärungen nutzen nichts. Erst eine bildliche Darstellung – ein Diagramm etwa – lässt den Groschen fallen. Würden wir in Sprache denken, sollten uns sprachliche Erklärungen wesentlich besser helfen als Bilder.

Wie wichtig ist es, zu wissen, was Überzeugungen sind?

Ein prominenter Verfechter der Sprachabhängigkeit des Denkens war der amerikanische Philosoph Donald H. Davidson (1917–2003). Er argumentierte, echtes Denken setze voraus, dass wir über den Begriff der Überzeugung verfügen: Nur wer wisse, was es bedeutet, eine Überzeugung zu haben, könne auch selbst Überzeugungen haben. Um den Begriff der Überzeugung zu erwerben, müssten wir uns aber mit anderen austauschen und deren Überzeugungen kennen lernen. Das wiederum setze sprachliche Kommunikation voraus. Das Argument zielt also nicht darauf ab, dass wir zum Beispiel das Wort »Regen« gelernt haben müssen, um über Regen nachdenken zu können. Vielmehr sieht Davidson in der Sprachfähigkeit generell eine Voraussetzung für Denken.

Auch diese Argumentation hat jedoch ihre Schwachstellen. Der gewichtigste Einwand ist, dass das Denken eines Gedankens nicht dasselbe ist wie das Wissen darüber, dass man gerade einen Gedanken denkt. Eine Katze zum Beispiel kann mit Sicherheit Dinge wahrnehmen. Muss sie dafür aber auch

wissen, was eine Wahrnehmung ist? Sicher nicht! Über den Begriff von Wahrnehmung zu verfügen, bedeutet unter anderem, zu wissen, dass Wahrnehmungen falsch sein können. Ob sich die Katze darüber im Klaren ist, darf bezweifelt werden. Im gleichen Sinn sollte es auch möglich sein, einen Gedanken zu haben, ohne zu wissen, was Gedanken sind.

Es gibt zwei weitere generelle Einwände gegen die These, Denken sei sprachabhängig. Erstens ist unbestreitbar, dass

SPEKTRUM-SERIE

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

	Interview mit Julian Nida-Rümelin	März 2011
Teil 1	Albert Newen: Wer bin ich?	
Teil 2	Michael Pauen: Willensfreiheit	
Teil 3	Tobias Schlicht: Bewusstsein	April 2011
Teil 4	Albert Newen: Das Verhältnis von Mensch und Tier	
Teil 5	Sabine Döring: Gefühl und Vernunft	Mai 2011
Teil 6	Elke Brendel: Skepsis und Wissen	
Teil 7	Michael Esfeld: Philosophie der Physik	Juni 2011
Teil 8	Marcel Weber: Philosophie der Biologie	
Teil 9	Julian Nida-Rümelin: Gerechtigkeit	Juli 2011
Teil 10	Wilfried Hinsch: Menschenrechte	
Teil 11	Gottfried Vosgerau: Sprache und Denken	August 2011
Teil 12	Albert Newen und Kai Vogetley: Den anderen verstehen	

wir Sprache zunächst erwerben müssen. Wie aber soll man einen sprachlichen Ausdruck erlernen, wenn man den zugehörigen Gedanken noch gar nicht denken kann?

Der Philosoph José Luis Bermúdez von der Texas A&M University in College Station hat das anhand des Wortes »ich« erläutert. Ein Kind wird die Bedeutung dieses Wortes nicht lernen, wenn es nicht in der Lage ist, sich selbst als die eigene Person gedanklich zu fassen. Wohlgedenkt geht es nicht darum, dass Kinder »ich« sagen und dieses Wort zum Beispiel wie einen Namen verwenden, sondern um das Erlernen der Bedeutung von »ich«. Diese lässt sich so umschreiben: Wer das Wort »ich« gebraucht, meint damit sich selbst. Erst wenn ein Kind Ich-Gedanken bilden kann, indem es sich zum Beispiel als Quelle der eigenen Handlungen – inklusive des eigenen Sprechens – erfasst, vermag es auch die Bedeutung des Wortes »ich« zu begreifen.

Der zweite generelle Einwand beruht darauf, dass man bei nichtsprachlichen Wesen wie Tieren und Kleinkindern inzwischen ein sehr weites Spektrum an kognitiven Fähigkeiten kennt, die sich nicht grundlegend von denen erwachsener Menschen unterscheiden. Unter diesen Umständen wäre es reine Willkür, den einen Denken zuzusprechen und den anderen nicht. Das aber zwingt zu dem Schluss, dass Gedanken unabhängig von Sprache möglich sind.

Auch ein Hund sieht, dass ein Auto rot ist

Was macht Denken aus? Ein typischer Gedanke – etwa »das ist ein rotes Auto« – zeichnet sich dadurch aus, dass er Begriffe enthält – in diesem Fall Rot und Auto –, die er auf Gegenstände anwendet. Darin liegt der Unterschied zur bloßen Wahrnehmung. Auch ein Hund kann sehen, dass das Auto rot ist, ohne einen Begriff von Rot oder Autos zu haben. Er vermag lediglich Rot von anderen Farben zu unterscheiden. Dieselbe Fähigkeit haben selbst einfache Messinstrumente – etwa ein Rotlichtdetektor, der ein Signal gibt, sobald rotes Licht auf ihn fällt. Von Denken kann da selbstverständlich keine Rede sein.

Die Frage, wie sich Begriffe am besten charakterisieren lassen, hat in der Philosophie eine lange Tradition. Laut einer aktuellen Theorie, die Albert Newen von der Universität Bochum und Andreas Bartels von der Universität Bonn aufgestellt haben, muss jemand vier Bedingungen erfüllen, um über den Begriff Rot zu verfügen. Diese sind:

- 1) die Eigenschaft, rot zu sein, an ganz unterschiedlichen Dingen feststellen zu können;
- 2) an einem Gegenstand auch andere Eigenschaften feststellen zu können wie die, aus Metall zu sein;
- 3) Rot als zusammengehörig mit anderen Farben, aber nicht etwa mit Formen zu verstehen;
- 4) den Begriff nicht reflexhaft zu verwenden, sondern bis zu einem gewissen Grad auch unabhängig von der Wahrnehmungssituation.

Die vier Bedingungen stellen sicher, dass es nicht bloß darum geht, einen Gegenstand zu klassifizieren, ihn also in eine von mehreren Schubladen einzusortieren, sondern eine echte



Versuche mit dem Graupapagei Alex ergaben, dass er über erstaunliche begriffliche Fähigkeiten verfügte – eine Voraussetzung für Denken.

Kategorisierung vorzunehmen, bei der all seine Eigenschaften richtig zugeordnet werden (etwa rot als Farbe, hölzernen als Material). Was das im Einzelnen bedeutet, lässt sich sehr schön am Beispiel des Graupapageien Alex (1976–2007) zeigen (siehe Bild oben). Die Verhaltensforscherin Irene M. Pepperberg von der Brandeis University in Waltham (Massachusetts) trainierte das Tier und zeigte in mehreren Versuchsreihen, dass es über begriffliche Fähigkeiten verfügt. Diese äußerst einflussreichen Studien trugen Alex sogar einen Eintrag bei Wikipedia ein: [http://de.wikipedia.org/wiki/Alex_\(Graupapagei\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Alex_(Graupapagei)).

Der Papagei konnte diverse Farben, Materialien und Formen voneinander unterscheiden und dieses Wissen auch auf neue Gegenstände anwenden (Bedingungen 1 und 2). Er vermochte durch Laute anzugeben, in welcher Kategorie zwei Gegenstände verschieden oder gleich sind (zum Beispiel: Farbe ist gleich, Form nicht; Bedingung 3). Zudem antwortete Alex gezielt auf die ihm gestellten Fragen und plapperte nicht einfach drauflos, wenn ihm ein Gegenstand präsentiert wurde (Bedingung 4).

Neben solchen Kategorisierungsleistungen, die auch bei Kleinkindern nachweisbar sind, geben Begriffe unseren Gedanken eine gewisse Struktur, die neue systematische Kombinationen zulässt. Wer zum Beispiel über die Begriffe Elefant und Rot verfügt, ist in der Lage, sich rote Elefanten vorzustellen, obwohl er solche Tiere sicher noch nie gesehen hat.

Der Nachweis dieser Fähigkeit fällt bei nichtsprachlichen Wesen natürlich schwer. Ein Anzeichen dafür ist, dass sie die betreffenden Begriffe auch auf Gegenstände mit neuen Kombinationen von Eigenschaften anwenden können.

Eine solche Kombinationsleistung haben Nicola S. Clayton und Anthony Dickinson von der University of Cambridge (England) bei Hähern nachgewiesen (Bild unten). Die Forscher versteckten zwei Arten von Futter, von denen das eine (A) besser schmeckte als das andere (B), aber sehr viel schneller ungenießbar wurde. Durften sich die Vögel an die Futterboxe machen, bevor A verdorben war, gruben sie dieses gezielt aus. Mussten sie dagegen länger warten, holten sie sich nur noch Futter B. Die Tiere waren demnach in der Lage, die zeitliche und die räumliche Information miteinander zu verknüpfen. Das erfordert eine mentale Struktur, die derjenigen von Gedanken gleichkommt. Hähner können – so der naheliegende Schluss – also bis zu einem gewissen Grad denken.

Was haben Straftzettel und Elektron gemeinsam?

Wir haben also gute Gründe anzunehmen, dass es Denken ohne Sprache gibt. Aber was heißt das genau? Liegt demnach jedem Satz, den wir äußern, ein Gedanke zu Grunde, der selbst nichts mit Sprache zu tun hat? Wohl nicht: Manche Begriffe setzen einen sprachlichen Hintergrund voraus. Nehmen Sie zum Beispiel den Begriff Straftzettel. Um ihn zu erfassen, müssen Sie verstehen, was gesellschaftliche Regeln sind und dass Zuwiderhandlungen Sanktionen wie Bußgelder nach sich ziehen.

Diese sehr ausdifferenzierten sozialen Konventionen werden durch Sprache vermittelt und festgelegt. Deshalb scheint es unmöglich, ohne Sprache eine Vorstellung davon zu gewinnen, was Wörter wie Straftzettel bedeuten. Ähnlich ver-

hält es sich mit theoretischen Begriffen wie Elektron. Sie erfordern ein Verständnis der ganzen Theorie, in die sie eingebunden sind. Theorien aber werden immer in Sprache verfasst. Darum sind solche Begriffe ebenfalls ihrem Wesen nach sprachabhängig. In diesem Fall mag es somit vorkommen, dass »die Worte ihre Kraft gegen den Verstand umkehren«, wie Bacon sagt.

Folglich existieren Denken und Sprache zwar unabhängig voneinander, können sich aber wechselseitig beeinflussen. Daraus ergeben sich zwei grundsätzliche Fragen:

1) Wie lassen sich (nichtsprachliche) Gedanken charakterisieren und abgrenzen von grundlegenden Phänomenen wie der Wahrnehmung?

2) Wo genau beginnt Sprache, unser Denken zu formen, und in welcher Weise geschieht das?

Bei der Beantwortung der ersten Frage ist darauf zu achten, dass die Charakterisierung genügend Erklärungskraft hat. Wenn nichtsprachliche Tiere wie Papageien und Hähner Verhaltensweisen an den Tag legen, die wir beim sprachbegabten Menschen durch Gedanken erklären, dann sollten wir ihnen gleichfalls Denkvermögen zubilligen.

Allerdings gilt es, den Begriff der Gedanken nicht zu trivialisieren, damit seine Erklärungskraft nicht verwässert wird. So sollte man von durchdacht wirkendem Verhalten nicht automatisch auf Denkvermögen schließen. Zum Beispiel tragen Ameisen tote Artgenossen aus dem Bau. Dieses Verhalten wird durch einen bestimmten Duftstoff ausgelöst, den die Kadaver absondern. Die Ameise denkt dabei nichts, son-



Blauhäher sind in der Lage, zeitliche und räumliche Informationen miteinander zu verknüpfen, was auf begriffliches Denken hindeutet. So pickten sie in Versuchen nicht mehr nach versteckten Leckerbissen, wenn deren Haltbarkeitsdauer überschritten war.

NICOLA S. CLAYTON UND IAN CANNELL, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

dem reagiert nur reflexartig. Wo allerdings die Grenze zwischen starren Reiz-Reaktions-Ketten und einfachen Gedanken genau verläuft, ist schwierig zu entscheiden und bietet noch reichlich Stoff für Diskussionen.

Bei der zweiten Frage lässt sich ein empirischer Aspekt von dem philosophischen Problem trennen; denn man kann experimentell feststellen, welche kognitiven Fähigkeiten Sprache voraussetzen. Damit beschäftigt sich der Entwicklungspsychologe Hannes Rakoczy von der Universität Göttingen. Ihm geht es vor allem um die Entwicklung der Fähigkeit, anderen Menschen geistige Zustände wie Gedanken zuzuschreiben.

Dabei zeigt sich, dass Menschenaffen und sogar Kleintiere zwar über ein grundlegendes Verständnis der Absichten anderer verfügen; doch die Fähigkeit, die eigenen Überlegungen von denen anderer zu unterscheiden, entwickelt sich nur beim Menschen zusammen mit der Sprache. So hinken taube Kinder, die lautsprachlich erzogen werden, ihren Altersgenossen nicht nur in der Sprachentwicklung deutlich

Die Fähigkeit zu sprechen ist die Voraussetzung dafür, die eigenen Überlegungen von denen anderer unterscheiden zu können. Das zeigt sich bei tauben Kindern, die lautsprachlich erzogen werden. Sie hinken ihren Altersgenossen nicht nur in der Sprachentwicklung deutlich hinterher, sondern auch bei der Zuschreibung von Gedanken. Wachsen sie hingegen mit Gebärdensprache auf, entwickeln sie beide Fähigkeiten ohne Verzögerung.

hinterher, sondern auch bei der Zuschreibung von Gedanken. Wachsen sie hingegen mit Gebärdensprache auf, zeigen sie keinerlei Verzögerung in beiden Fähigkeiten. Durch weitere empirische Forschung wird sich der Einfluss der Sprache auf die Entwicklung des Denkens immer genauer angeben lassen.

Der philosophische Aspekt der Frage ist damit allerdings noch nicht beantwortet: Welches sind die wesentlichen Veränderungen, die Sprache beim Denken bewirkt? Kann sie zum Beispiel Strukturen bereitstellen, die vorsprachliches Denken allein nicht hervorzubringen vermag? Und ermöglicht Sprache vielleicht ganz neue Arten von Begriffen, die sich nicht mehr vollständig auf einfache Gedanken zurückführen lassen?

Darüber wird unter dem Stichwort »Grounded Cognition« in jüngster Zeit heftig diskutiert. Es geht dabei um die Frage, ob unser Denken im Wesentlichen auf anderen, grundlegenden Fähigkeiten aufbaut oder ob es sich um eine eigenständige Fähigkeit handelt, die nicht von anderen abhängt. Im ersteren Fall könnte es durch Sprache nicht entscheidend beeinflusst werden. Das scheint jedoch ziemlich unplausibel. Wenn dagegen eine eigenständige Denkfähigkeit existiert, fragt sich, worin diese besteht, und wie sie sich entwickeln kann. Dass sie »aus dem Nichts« kommt, ist schwer vorstellbar. Vielmehr scheint sie in irgendeiner Form auf grundlegende Fähigkeiten gegründet (»grounded«) zu sein. Wie diese Fundierung aussieht, gehört zu den noch ungelösten großen Rätseln der Philosophie. ~



FOTOLIA / NANCY CATHERINE WALKER

DER AUTOR



Gottfried Vosgerau ist Juniorprofessor an der Universität Düsseldorf mit den Schwerpunkten Philosophie des Geistes und der Kognition, Neurophilosophie, Metaphysik des Geistes und Sprachphilosophie. Er wurde 2007 mit einer mehrfach preisgekrönten Arbeit an der Universität Bochum promoviert. Aktuell leitet er unter anderem ein interdisziplinäres Forschungsprojekt zu »Grounded Cognition«, das von der VolkswagenStiftung gefördert wird.

QUELLEN

- Bermúdez, J.L.:** The Paradox of Self-Consciousness. The MIT Press, Cambridge MA, London 1998
Clayton, N. S., Dickinson, A.: Episodic-Like Memory During Cache Recovery by Scrub Jays. In: Nature 395, S. 272–274, 1998
Newen, A., Bartels, A.: Animal Minds and the Possession of Concepts. In: Philosophical Psychology 20, S. 283–308, 2007
Rakoczy, H.: From Thought to Language to Thought: Towards a Dialectical Picture of the Development of Thinking and Speaking. In: Grazer Philosophische Studien 81, S. 77–103, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/114587

Den anderen verstehen

Was passiert, wenn wir uns in unsere Mitmenschen hineinfühlen oder -denken? Eine neue Theorie versucht, diese Frage zufrieden stellend zu beantworten.

Von Albert Newen und Kai Vogelej

Es fällt uns gewöhnlich leicht zu erkennen, was andere Menschen gerade fühlen, was sie sich wünschen oder manchmal sogar was sie planen – auch ohne dass sie darüber sprechen. Wir können etwa an ihrem Gesicht Traurigkeit ablesen oder spüren intuitiv, wenn gerade »dicke Luft« herrscht. Zumeist empfangen wir jedoch nur winzige Indizien und müssen intensiv darüber nachdenken, was jemand wirklich denkt oder »im Schilde führt«. Das gilt insbesondere dann, wenn ein Mensch seine Gedanken vor uns verbergen möchte. Dann sind wir als Detektive gefragt, die aus Mimik, Gestik, Körperhaltung oder Reaktionsweisen, die oftmals nicht unterdrückt und kontrolliert werden können, die Absichten des anderen erschließen müssen. Die Vielfalt des Verstehens anderer lässt sich mit Hilfe von drei Dimensionen ordnen, die zugleich zentrale Aspekte des Problems darstellen.

Die erste Dimension betrifft das intuitive Erfassen im Unterschied zum reflektierten Überlegen. Intuitives Erfassen liegt vor, wenn ich im Gesicht einer anderen Person zum Beispiel Freude erkenne. Gerade Emotionen können wir dort besonders gut ablesen. Der amerikanische Psychologe und Anthropologe Paul Ekman (* 1934) hat nachgewiesen, dass sich so genannte Basisemotionen wie Freude, Angst, Ärger oder Traurigkeit durch typische Gesichtsausdrücke äußern. Sie zeigen sich sogar in der gleichen Weise über alle Kulturunter-

schiede hinweg. Auch lassen sie sich – wie es etwa für das klassische Pokerface nötig wäre – kaum oder nur mit sehr viel Training unterdrücken.

Gesichtsausdrücke liefern daher besonders zuverlässige Anzeichen für die Gemütsverfassung anderer. So kann etwa ein Kommissar oftmals direkt am Gesicht eines Verdächtigen erkennen, ob sich dieser schuldig fühlt oder nicht. Dagegen muss er reflektiert überlegen, wie die Indizien am Tatort mit den oft widersprüchlichen Aussagen von Verdächtigen oder Zeugen zusammenpassen könnten. Er will herausfinden, welches Szenario am plausibelsten ist, etwa: Hätte Frau Meier ein Motiv, den Nachbarn zu vergiften? Passt das zu der Vorgeschichte der Beziehung beider Personen?

Werden Emotionen überall gleich erkannt?

Eine zweite Dimension des Verstehens betrifft die Frage, ob das Selbstverstehen mit Hilfe eines Selbstkonstrukts für das Verstehen anderer relevant ist. Jeder Mensch entwickelt eine Vorstellung seiner eigenen Person (ein Selbstkonstrukt mit den wichtigsten Merkmalen, Eigenschaften und Persönlichkeitszügen), aber auch Modelle von anderen Personen.

In welchem Maß hängt das Verstehen anderer in Form von Personenmodellen von unserem Selbstverständnis, also von unserem Selbstkonstrukt, ab? Die dritte Dimension betrifft die Frage, ob Fähigkeiten, wie etwa Emotionen an Ge-



Sich in andere hineinzusetzen, gilt als entscheidende Grundlage für das Zusammenleben der Menschen. Philosophische Theoriebildung und empirische Forschung entschlüsseln die Mechanismen sozialen Verstehens.

sichtsausdrücken zu erkennen, universal für alle Menschen gelten oder ob sie durch kulturelle Einflüsse modifiziert werden. Dieser Aspekt tritt im vorliegenden Beitrag in den Hintergrund.

Wir konzentrieren uns hier vor allem darauf, welche »Strategie« wir beim Verstehen anderer Personen verfolgen. Die folgenden beiden Ansätze dazu waren in den letzten beiden Jahrzehnten von Bedeutung:

- ▶ die Theorie-Theorie und
- ▶ die Simulationstheorie.

Der Theorie-Theorie zufolge verstehen wir andere, indem wir eine entsprechende Theorie einsetzen, das heißt, wir verwenden eine systematische Menge von Wissen und Auffassungen über Menschen, die wir zu einer Theorie darüber verbunden haben, was Menschen typischerweise denken, fühlen, befürchten oder sich wünschen und so weiter. Diese Vorstellung propagierten hauptsächlich der amerikanische Philosoph Peter Carruthers (* 1952) an der University of Maryland sowie der britische Psychologe Simon Baron-Cohen (* 1958), Direktor des Autismus-Forschungszentrums in Cambridge.

AUF EINEN BLICK

VIER EMPATHIEKONZEPTE

1 Nach der **Theorie-Theorie** verstehen wir andere, indem wir eine entsprechende Theorie verwenden. So wie wir etwa eine Theorie der Eigenschaften von Pflanzen aufbauen, wenn wir diese im Alltag beobachten, entwickeln wir auch eine Theorie darüber, was andere Personen denken oder fühlen und warum sie etwas tun.

2 Die **Simulationstheorie** behauptet dagegen: Wollen wir jemanden verstehen, wenden wir keine Theorie an, sondern versetzen uns einfach nur in seine Lage.

3 In der **Interaktionstheorie** geht es um die direkte Wahrnehmung mentaler Zustände (Erkennen in Gesichtern); um das Schlussfolgern unter Einbeziehung von Informationen aus einem pragmatischen Kontext (Erkennen von Gefühlen der Bedrohung); schließlich um ein narratives Verstehen (Deutung von Alltagsgeschichten).

4 Die **Personenmodelltheorie** der Autoren zeigt auf, dass wir andere mit Hilfe von Personenmodellen verstehen: als zusammenhängende »Pakete« von Informationen. Dazu gehören insbesondere Modelle von sehr vertrauten Menschen. Damit kann diese Theorie den deutlichen Unterschied im Verstehen von Freunden und Fremden erfassen.



DREAMSTIME / DENIS RAEV

Zwei ähnliche Szenen, doch wir verstehen die Unterschiede sofort. Die sprachliche Kommunikation bleibt immer in die vorsprachliche Interaktion eingebettet. Da Letztere etwa in der bildlosen Kommunikation per E-Mail fehlt, entstehen bei dieser viel schneller Missverständnisse als im direkten Gespräch.

Gemäß den beiden Forschern ist diese Theorie von Geburt an als ein Modul in unser Gehirn eingebaut.

Eine Variante der Theorie-Theorie vertritt die Psychologin Alison Gopnik (* 1955) von der University of California in Berkeley. Demnach wird sie ähnlich erworben wie eine wissenschaftliche Theorie. So wie wir eine Theorie der kausalen Eigenschaften von Bällen – wie Rollen, Springen, Wirkung auf Fensterscheiben – aufbauen, wenn wir diese im Alltag beobachten, so entwickeln wir auch eine Vorstellung darüber, was andere Personen denken oder fühlen und warum sie es tun. Beiden Varianten ist gemeinsam, dass wir die Theorie fortlaufend anwenden, sei sie nun angeboren oder erworben.

Das Erklärungsmodell leidet an dem Problem, dass sich das unmittelbare, intuitive Erfassen von Gefühlen oder Absichten des anderen oftmals nicht als Theoriebildung auffassen lässt. Dafür gibt es mehrere Gründe. Es hat nur dann jemand eine Theorie, wenn er eine Menge systematisch miteinander verbundener Überzeugungen über ein Phänomen besitzt. Zwar können Kinder schon bald nach der Geburt in einem Gesicht gespiegelte Emotionen erfassen und mit spätestens vier Monaten auch differenziert darauf reagieren. Da sie aber noch keine Emotionsbegriffe und schon gar keine Überzeugungen haben, kann man nicht behaupten, dass Kleinkinder über eine Theorie verfügen. Zudem ist die Fähigkeit, Emotionen zu erkennen und angemessen darauf zu reagieren, in diesem frühen Lebensstadium noch nicht mit anderen kognitiven Fähigkeiten vernetzt. Auch deshalb kann nicht von einer Theorie die Rede sein.



DPA / BERND THISEN

Der wichtigste Gegenspieler der Theorie-Theorie ist die so genannte Simulationstheorie. Ihre zentrale Behauptung lautet: Wollen wir jemanden verstehen, versetzen wir uns einfach in dessen Lage – wir simulieren sozusagen die Lage des Betroffenen in uns selbst. Dabei unterstellen wir, wir hätten vergleichbare Gefühle, Wünsche und Überzeugungen. Auf dieser Basis stellen wir uns vor, was wir selbst in einer solchen Lage tun würden, um diese Vermutung dann auf die andere Person zu übertragen.

Spiegeleffekt auch für Schmerz und Ekel

Der Hauptvertreter der Simulationstheorie, der amerikanische Philosoph Alvin Goldman (* 1938) von der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey), unterscheidet zwei Stufen des Vorgangs: intuitives und reflektiertes Simulieren. Damit trägt er einer der oben eingeführten Dimensionen Rechnung. Das intuitive Erfassen von Emotionen erläutert er mit Hilfe der so genannten Spiegelneurone.

Diese wurden von den Neurowissenschaftlern Giacomo Rizzolatti und Vittorio Gallese von der Università degli Studi di Parma entdeckt. Bei Verhaltensexperimenten stellten die beiden Forscher fest, dass einzelne Neurone nicht nur dann feuern, wenn wir etwa nach einem Glas greifen, sondern auch dann, wenn wir diese Handlung bei Artgenossen beobachten. Neben motorischen Aktivitäten wurde dieser »Spiegeleffekt« seitdem auch für Schmerz und Ekel nachgewiesen. Wenn ich jemanden beobachte, der sich offensichtlich ekel, dann feuern auch bei mir bestimmte Neurone, die aktiv sind, wenn ich mich selbst ekele. Bei mir scheint sich also ebenfalls ein Ekelzustand einzustellen, wenngleich dieser unbewusst bleiben kann.

Alvin Goldman behauptet nun, dass wir einen Zustand bei anderen genau dann intuitiv richtig erfassen, wenn in uns unbewusst derselbe Zustand ausgelöst wird. Das reflektierte Erfassen als zweite Stufe findet dann statt, wenn die äußeren

Umstände von anderen explizit mitgedacht werden. Nun ist unstrittig, dass wir oftmals Menschen verstehen, indem wir uns in sie hineinversetzen, doch hat dies erhebliche Grenzen. Wir können nämlich nur dann erfolgreich simulieren, wenn wir wissen, welche Gefühle, Wünsche oder Überzeugungen eine Person tatsächlich gerade hat. Dieses Wissen fehlt uns aber in vielen Fällen, vor allem dann, wenn wir Menschen aus anderen Kulturkreisen begegnen, deren Verhalten wir erst kennen lernen müssten, um angemessen reagieren zu können. Ähnliche Probleme tauchen auf, wenn wir uns mit psychisch kranken Menschen verständigen wollen. Nur wenige können sich in die Lage einer Person mit Verfolgungswahn, Halluzinationen oder anderen gravierenden Störungen hineinversetzen. Hier versagt das Simulieren praktisch immer, und wir sind darauf angewiesen, Vermutungen anzustellen.

Sowohl die Theorie-Theorie als auch die Simulationstheorie haben also erhebliche Mängel. Daher suchten Forscher in den letzten Jahren nach alternativen Erklärungen und orientierten sich an folgenden zentralen Fragen: Welche Strategien des Verstehens wenden wir an? Wie organisieren wir die Informationen über andere, die wir als Hintergrundwissen verwenden? Daraus entstanden zwei neuere Ansätze: die Interaktionstheorie sowie die Personenmodelltheorie.

Die Interaktionstheorie, wie sie Shaun Gallagher (University of Memphis, Tennessee) und Daniel Hutto (University of Hertfordshire, England) entwickelten, unterscheiden beim Verstehen anderer drei Strategien:

»Bei Fremden oder Kranken können wir oft nur vermuten«

- ▶ die direkte Wahrnehmung mentaler Zustände. Beispiel: Erkennen von Emotionen in Gesichtern;
- ▶ das Schlussfolgern unter Einbeziehung bereichsspezifischer Informationen aus einem pragmatischen Kontext. Beispiel: Erkennen

von Gefühlen der Bedrohung, etwa wenn eine Frau schnell und nervös durch eine dunkle, einsame Straße geht und sich dabei ständig umschaute;

- ▶ ein narratives Verstehen. Hier wird das Verhalten einer Person (Peter holt eine Pizza) durch einen Interpreten in eine Alltagsgeschichte eingebettet. Der Interpret versteht Peters Pizzaholen wie folgt: Peter holt eine große Pizza in der Pizzeria ab, weil er einige Freunde zu seinem Geburtstag eingeladen hat und diese bewirten möchte. Er konnte erst so spät von der Arbeit nach Hause aufbrechen, dass er seinen Plan, selbst Pizza zu backen, ändern musste.

Alle drei Strategien beschreiben bestimmte Aspekte des Vorgangs, wie wir andere verstehen. Aber sind damit schon alle wichtigen Merkmale erfasst? Hier sind wieder kritische Anmerkungen am Platz. Es ist doch offenbar ein großer Unterschied, ob wir versuchen, einen Familienangehörigen zu verstehen, oder ob wir einen Unbekannten bei seinen Aktivitäten beobachten. Das besondere Wissen, das wir bei uns vertrauten Personen benutzen, ändert den gesamten Eindruck, der in uns ausgelöst wird. Bei meiner Tochter etwa weiß ich, dass sie wie üblich zum Reiten aufbricht, wenn sie am Samstagmittag zum Wohnungsschlüssel greift; genauso habe ich eine ungefähre Vorstellung, wann sie wieder heimkommen

Vorsprachliche Interaktion mit Blickkontakt

Bei Babys beginnt die vorsprachliche Interaktion schon unmittelbar nach der Geburt als Imitieren von Gesichtsausdrücken. Das zeigte 1977 der Psychologe Andrew Meltzoff. Ausgehend von solchen vorsprachlichen Signalen nehmen wir eine Vielzahl von Merkmalen einer anderen Person auf: Mimik, Gestik, Körperhaltung, Gesicht, allgemeines Aussehen oder Stimme. Damit bauen wir ein Personenschema auf, das uns ermöglicht, die Person rasch wiederzuerkennen und ihre Emotionen einzuschätzen. Zumeist liefert der Gesichtsausdruck die Schlüsselinformation; der Blickkontakt spielt eine zentrale Rolle.

In ihren Untersuchungen konnten die Autoren zeigen, dass virtuelle Charaktere, die sich lediglich darin unterschieden, wie lange sie der Versuchsperson den Blick zuwandten, unterschiedliche Sympathiewerte zugewiesen bekamen. Je länger man (im Sekundenbereich) von einer Person angeschaut wird, desto sympathischer erscheint sie in der Regel. Diese bessere Bewertung ist verknüpft mit verstärkter neuronaler Aktivität im so genannten medialen präfrontalen Kortex, wo auch die Wahrneh-



Das Baby fest im Blick: Schon Neugeborene können komplexe Gesichtsausdrücke imitieren.

mung von Menschen und die Zuschreibung von mentalen Zuständen lokalisiert sind. Vermutlich werden also beim bloßen Betrachten einer Person mit zugewandtem Blick bereits neuronale Mechanismen aktiv, die der Verarbeitung sozialer Informationen dienen.

MIT FROL. GEN. VON ANDREW N. MELTZOFF, UNIVERSITY OF WASHINGTON

Personenmodelltheorie



Personenmodelle strukturieren unser Verhalten. Dabei findet eine wechselseitige Beeinflussung von Selbstkonstrukt und den Modellen für andere Personen statt.

wird. Bei einem fremden Mann könnte ich nur vermuten, was er gerade mit dem Hausschlüssel vorhat. Dieses Phänomen ist in den bisherigen Theoriebildungen noch nicht berücksichtigt worden.

Auch in einem weiteren Punkt versagt nach unserer Einschätzung die Interaktionstheorie, und zwar dann, wenn wir auf Stereotype zurückgreifen. Wenn wir andere verstehen wollen, beziehen wir uns sehr häufig unbewusst auf vorgefertigte Rollen, die andere einnehmen können: beispielsweise als Studierende, Handwerker oder Bankmanager. Allgemein kann man sagen, dass die Interaktionstheorie zwar wichtige Strategien des Verstehens anderer berücksichtigt. Andererseits erfasst sie nicht, wie wir Informationen organisieren, die wir über andere besitzen, um darauf dann die genannten drei Strategien anzuwenden.

Das Verstehen meiner selbst und anderer

Ein weiterer Kritikpunkt: Alle bisher genannten Theorien stellen die Beziehung zwischen Selbst- und Fremdverstehen nicht plausibel dar. Während die Theorie-Theorie davon ausgeht, dass das Selbstverstehen überhaupt keine Rolle für das Fremdverstehen spielt, nimmt die Simulationstheorie an, dass Fremdverstehen lediglich eine Form des Selbstverstehens ist, weil man sich stets in jemanden hineinversetzt, sich vorstellt, was man tun, empfinden würde, wenn man in sei-

ner Situation wäre. In diesem Punkt stellt die Interaktionstheorie zwar einen Fortschritt dar, weil sie neben dem beobachtenden auch interaktives Verstehen berücksichtigt. Aber die fundamentale Differenz zwischen dem Verstehen meiner selbst und anderer bleibt unberücksichtigt.

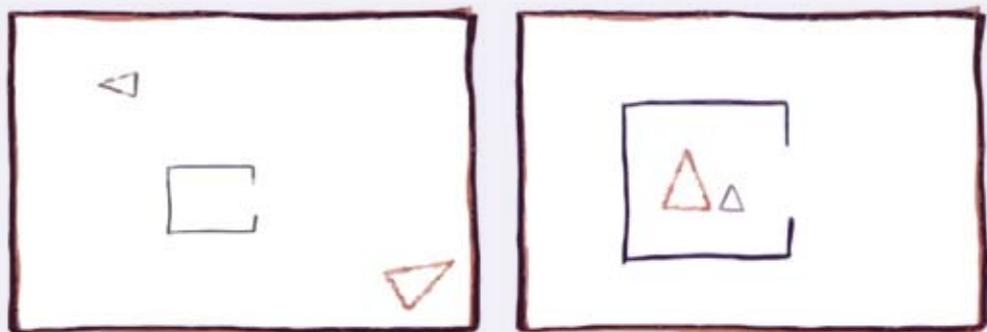
Wegen solcher Probleme propagieren wir einen eigenen neuen Weg: die Personenmodelltheorie. Ihre Hauptthese besagt, dass wir andere verstehen, indem wir unbewusste und bewusste Vorstellungen aufbauen, die wir in so genannte Personenmodelle integrieren. Dabei unterscheiden wir implizite und explizite Personenmodelle. Im ersten Fall sprechen wir von einem Personenschema und im zweiten von Personenbildern. Das klingt abstrakt, aber wir sind davon überzeugt, dass diese Kategorien helfen, die Probleme anderer Theorien zu beheben. Was also meinen wir damit genau?

Das – implizite – Personenschema integriert verschiedene Informationen wie Bewegungsmuster, Stimme, Gesicht oder Erscheinungsbild und fasst sie in der Form von »wissen, wie« (*knowing how*) über eine Person zusammen. Es soll uns helfen, diese Eigenschaften wiederzuerkennen, selbst wenn wir oft gar nicht in der Lage sind, sie explizit zu beschreiben. So dauert es manchmal Stunden, bis ein Zeuge mit professioneller Hilfe ein gutes Phantombild eines Täters erstellen kann. Dagegen würde er diese Person sofort wiedererkennen, sogar wenn sie sich in der Zwischenzeit leicht verändert hätte.

Im – expliziten – Personenbild sammeln wir Bewertungen von typischen körperlichen und geistigen Eigenschaften oder Fähigkeiten eines Menschen. Ein solches »Bild« haben wir zweifelsohne jederzeit präsent, wenn es um uns vertraute Personen geht, und können es bei Bedarf beschreiben.

Unabhängig von der Unterscheidung von implizitem Personenschema und explizitem Personenbild entwickeln wir Personenmodelle nicht nur für einzelne Menschen wie Mutter, Vater, Ehepartner oder Freunde, sondern auch für Gruppen in unserem Lebensalltag, etwa Studierende, Lehrer oder Manager. Diese Beobachtung wird durch die Sozialpsychologie bestätigt. Demnach tragen wir zahllose gruppenbezogene Personenbilder im Sinn so genannter Stereotype in uns, die oft auch Vorurteile enthalten. Das ist keineswegs nur negativ. Eine wichtige Funktion von Stereotypen besteht darin, dass wir andere Personen auf Grund von wenigen Informationen sehr schnell einschätzen können. Naturgemäß treten dabei Fehler auf, so dass wir neben dem raschen Taxieren zusätzlich ein reflektiertes Bewerten entwickeln. Dieser zweite

Soziale Wahrnehmung im Heider-Simmel-Test (nach Fulvia Castelli): Wenn geometrische Objekte sich nicht nur zufällig (wie links), sondern aufeinander bezogen bewegen (rechts), dann werden sie als interagierende Personen wahrgenommen, etwa als Mutter und Kind.



NACH CASTELLI, F. ET AL.: MOVEMENT AND MIND: THE PERCEPTION OF COMPLEX INTENTIONAL MOVEMENT PATTERNS. IN: NEURO-IMAGE 12, 5, 314–325, 2000

Schritt hilft uns dann, anfängliche Fehleinschätzungen zu korrigieren, indem wir die Stereotype weiterentwickeln und verbessern.

Unsere Theorie wird durch die Beobachtung ergänzt, dass wir Personenmodelle nicht nur von anderen konstruieren, sondern auch von uns selbst. Die These ist: Wir legen ein Bild von uns selbst an, bilden somit ein implizites Selbstschema und – ab einem gewissen Alter – ein explizites Selbstbild mit typischen Eigenschaften und Fähigkeiten (siehe auch den Artikel »Wer bin ich?« von Albert Newen, SdW 3/2011, S. 62).

Die Personenmodelltheorie bringt mehrere Vorteile mit sich. So berücksichtigt sie die Organisation unseres Wissens über Individuen und Gruppen einschließlich Stereotypen. Personenschemata erfassen das intuitive Verstehen und akzeptieren dabei die vorsprachliche Interaktion als zentralen Teil der menschlichen Kommunikation. Dazu zählen auch soziale Interaktionsmuster. Sie erkennen wir unmittelbar, sogar wenn soziale Beziehungen nur mit Hilfe einfacher Strichzeichnungen dargestellt werden. Das belegte ein berühmtes Experiment von Fritz Heider und Marianne Simmel aus dem Jahr 1944: Sie zeigten Probanden eine kurze Animation mit zwei Dreiecken und einem Kreis, welche die Versuchspersonen so interpretierten, als ob die Figuren Absichten und Motivationen hätten.

Ist es die Mutter oder nur eine Schauspielerin?

Ein weiterer Vorteil besteht im Einbeziehen der menschlichen Kommunikation. Zur vorsprachlichen Verständigung in den ersten Lebensjahren tritt später die sprachliche hinzu. Letztere bildet ein wichtiges Instrument, um explizite Personenbilder aufzubauen. Dass wir tatsächlich mental Personenbilder von Individuen entwickeln, belegt – wie so oft – ein pathologisches Phänomen, nämlich das so genannte Capgras-Syndrom. Ein Betroffener hält etwa seine Mutter nicht mehr für seine Mutter, sondern für eine identisch aussehende Doppelgängerin. Der französische Psychiater Joseph Capgras (1873–1950) hat diese seltene Erkrankung erstmals 1923 beschrieben. Wie erklärt sie sich?

Eine Person mit diesem Krankheitsbild erkennt zwar korrekt alle Merkmale der anderen Person, dennoch stellt sich bei ihr kein Gefühl der Vertrautheit ein. Sie erkennt einerseits, dass die Person genauso aussieht wie ihre Mutter, genauso spricht wie diese und den Ring der Mutter trägt und so weiter; aber dennoch hält sie die Frau nicht für ihre Mutter. Das belegt, dass diese Menschen zwar über ein Personenmodell der Mutter verfügen, es aber nur fehlerhaft anwenden können.

Unsere Theorie betrachtet Selbst- und Fremdverstehen als zwei eng miteinander verknüpfte Seiten des Verstehens von Menschen. Ob ich eine andere Person in Bezug auf mein Selbstkonstrukt bewerte oder dafür ein anderes bereits gespeichertes Personenmodell benutze, hängt davon ab, ob meiner Ansicht nach die Person mir in relevanter Hinsicht ähnelt. Wenn es zum Beispiel um Vorlieben älterer

Damen an ihren Geburtstagen geht, dann werden wir kaum unser Selbstbild eines Mannes im mittleren Alter bemühen, sondern eher das Modell unserer Mutter oder Großmutter.

Eine »Simulation« im Sinn des Hineinversetzens in andere kann nur dann stattfinden, wenn man eine hinreichende Nähe zu der anderen Person postuliert und für sie über kein besseres Modell verfügt, das ihre Besonderheiten berücksichtigt. Auch hier ist es zum Beispiel bei einer unbekanntem, auf einen Schiedsrichter schimpfenden Person oft viel aussagekräftiger, dass ich diese als »empörten Fußballfan« modelliere und daraus abgeleitet ihr Verhalten einschätze, als dass ich mich in sie hineinversetze. Ein solcher Akt der Einfühlung stellt einen Sonderfall beim Verstehen anderer dar, durchaus eine besonders intensive Form des Verstehens (empathisches Verstehen). Das Selbstkonstrukt mag somit manchmal als ein Ausgangspunkt dienen, nämlich dann, wenn man keine besseren Modelle vom anderen hat oder bereits gute Gründe kennt, warum dieser genauso »ticken« könnte wie man selbst. ~

DIE AUTOREN



Albert Newen (oben) ist seit 2007 Professor für Philosophie an der Ruhr-Universität Bochum. Als Geschäftsführer leitet er zurzeit das Institut für Philosophie II und baut dort gerade das Center for Mind, Brain and Cognitive Evolution auf. Er studierte Philosophie, Psychologie und Geschichte, promovierte 1994 in Bielefeld in Philosophie, habilitierte 2002 an der Universität Bonn und war danach Professor für Philosophie an der Universität Tübingen. **Kai Vogeley** studierte Medizin und Philosophie und promovierte in beiden Fächern. 2004 wurde er als Professor für Psychiatrische Früherkennung und Prävention an das Klinikum der Universität zu Köln berufen. Er leitet Arbeitsgruppen an der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Uniklinik Köln und am Institut für Neurowissenschaften und Medizin am Forschungszentrum Jülich.



QUELLEN

- Goldman, A. I.:** Simulating Minds. The Philosophy, Psychology, and Neuroscience of Mindreading. Oxford University Press, Oxford 2006
- Kuzmanovic, B. et al.:** Duration Matters. Dissociating Neural Correlates of Detection and Evaluation of Social Gaze. In: Neuroimage 46, S. 1154–1163, 2009
- Newen, A., Schlicht, T.:** Understanding Other Minds: A Criticism of Goldman's Simulation Theory and an Outline of the Person Model Theory. In: Grazer Philosophische Studien 79, S. 209–242, 2009
- Vogeley, K., Roepstorff, A.:** Contextualising Culture and Social Cognition. In: Trends in Cognitive Science 13, S. 511–516, 2009

WEBLINKS

www.youtube.com/watch?v=76p64j3HtNg

Link zu den Experimenten von Heider und Simmel

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1114588

DAS MEGABEBEN

Das gewaltige Beben, das im März die japanische Hauptinsel Honshu erschütterte, war deutlich schwerer als alle zuvor in Japan registrierten Erdstöße. Dabei galt die betroffene Region auf Grund seismologischer Untersuchungen als vergleichsweise sicher. Im Nachhinein zeigt sich, welchen Trugschlüssen die Experten aufgesessen sind und welche Warnzeichen sie übersehen haben. Mit den neuen Erkenntnissen lassen sich nun akkuratere Modelle zur Erdbebenprognose erstellen.

Von Pierre Henry

Um 14.46 Uhr Ortszeit fand am Freitag, den 11. März 2011, vor der Nordostküste der japanischen Hauptinsel Honshu ein Erdbeben statt, das durch seine Schwere und die resultierende nukleare Katastrophe weltweit Betroffenheit hervorrief (siehe auch den Artikel auf S. 76). Mit der Magnitude 9 war es die viertstärkste jemals auf der Erde registrierte seismische Erschütterung und um 0,8 Einheiten stärker als alle zuvor in Japan gemessenen. Weniger als eine Stunde später suchte ein riesiger Tsunami die Region heim. In einigen Buchten staute er sich auf bis zu 23 Meter Höhe auf. Bei Sendai, der größten Stadt der Region, war die Welle zehn Meter hoch. Das erklärt die schlimmen Verwüstungen in der Region mit schätzungsweise mehr als 27000 Todesopfern; 320000 Menschen mussten in Notunterkünften untergebracht werden. Doch gemessen an der Gewalt der seismischen Erschütterung hätte alles noch viel schlimmer kommen können.

Mit einem Beben dieser Größenordnung in dem betroffenen Gebiet hatten Seismologen nicht gerechnet. Wie konnten sie sich derart täuschen? Fatal war vor allem, dass die Experten, die vor Errichtung der Kernkraftwerke in Fukushima in den 1970er Jahren konsultiert wurden, ein solches Ereignis für praktisch ausgeschlossen hielten. Inzwischen haben sich die Gründe für diese Fehleinschätzung herauskristallisiert. Auch die Konsequenzen aus einer neuen seismologischen Bewertung der Region zeichnen sich ab.

Die Japaner nennen den Erdstoß vom 11. März das Tohoku-Beben – nach dem japanischen Wort für Nordosten. Der Japangraben, in dem sich das Epizentrum befand, ist für seine



in Japan

Der Tsunami, der auf das Megabebeben am 11. März folgte, riss in der japanischen Stadt Natori zahlreiche Häuser mit sich fort. Den mehr als 72 000 Einwohnern blieb nur eine halbe Stunde Zeit, sich in Sicherheit zu bringen, nachdem das verheerende Erdbeben die Stadt erschütterte hatte.

AUF EINEN BLICK

FATALE FEHLEINSCHÄTZUNG

1 Am **Japangraben** nordwestlich der **Insel Honshu** stoßen zwei starre Blöcke der Erdkruste aneinander. Dabei schiebt sich die Pazifische unter die Eurasische Platte. Die Folge sind häufige Erdbeben.

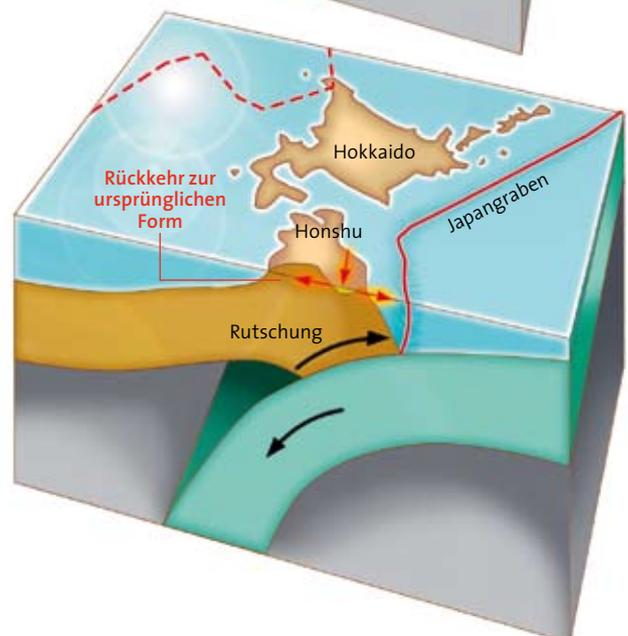
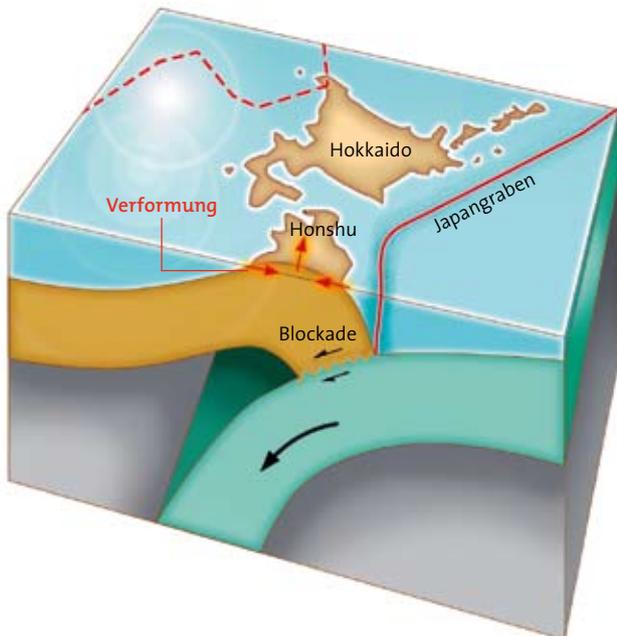
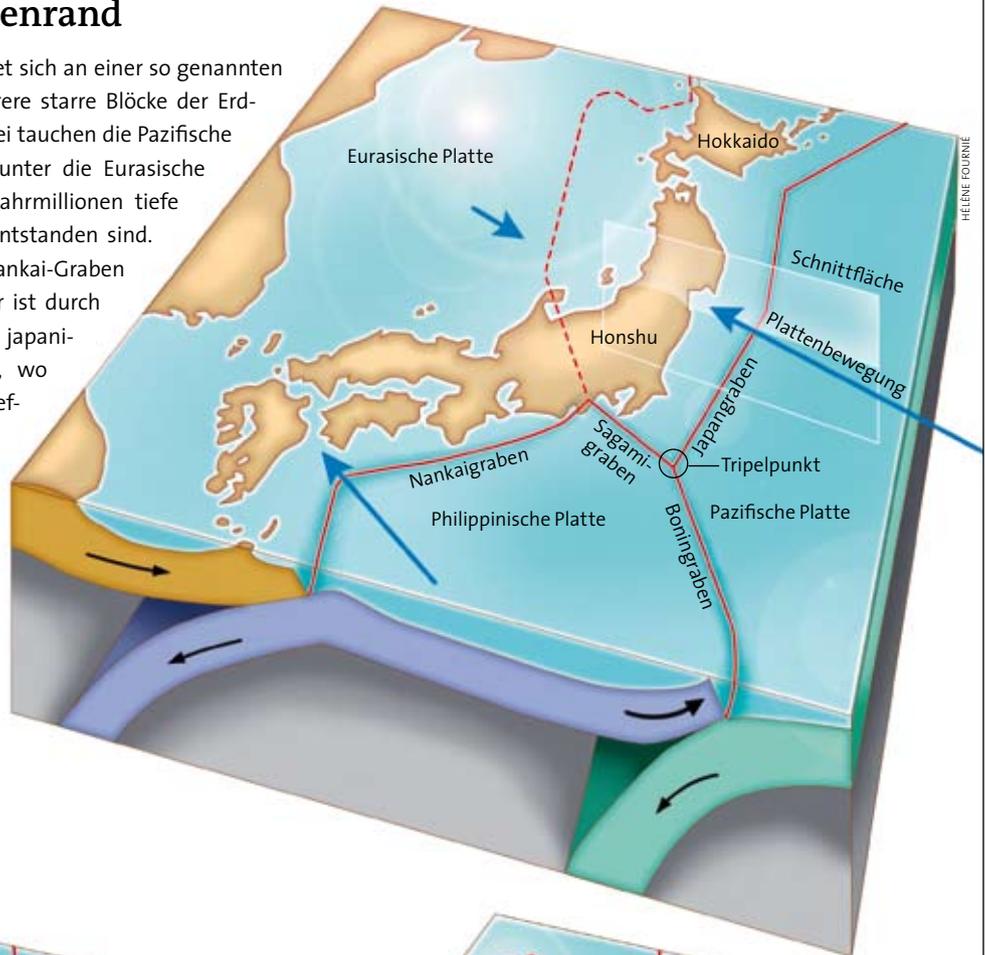
2 Auf Grund der **seismischen Geschichte** der Region und wissenschaftlicher Untersuchungen glaubten Experten allerdings, dass die Platten meist relativ glatt übereinandergleiten. Ruckartige Bewegungen schienen nur in längeren Abständen aufzutreten und keine übermäßig heftigen Erschütterungen auszulösen.

3 Es gab jedoch auch Hinweise, die diese Vorstellungen in Frage stellten. Dazu gehörten insbesondere **Krustenverformungen**, die den Aufbau starker Spannungen am Japangraben nahelegten.

4 Das Megabebeben am 11. März 2011 hat gezeigt, dass die bisherigen Vorstellungen falsch waren. Das Modell der Vorgänge am Japangraben muss revidiert werden, was auch die **Risikoabschätzung** für die Zukunft verändert.

Blockade am Plattenrand

Der japanische Archipel befindet sich an einer so genannten Subduktionszone, an der mehrere starre Blöcke der Erdkruste aufeinanderstoßen. Dabei tauchen die Pazifische und die Philippinische Platte unter die Eurasische Platte ab, wodurch über die Jahrtausende tiefe Rinnen östlich der Inselkette entstanden sind. Im Süden erstreckt sich der Nankai-Graben bis in die Gegend von Tokio. Er ist durch den Sagami-Graben mit dem japanischen Tripelpunkt verbunden, wo alle drei Platten zusammentreffen. Von dort geht Richtung Süden der Bonin- und Richtung Norden der Japangraben ab. Verwerfungen (rotbraun) ziehen sich an all diesen Gräben entlang. An ihnen baut sich durch die Subduktionsbewegung Spannung auf, bei deren Entladung Erdbeben entstehen.



Wie die unten dargestellten Schnitte durch Honshu und den Japangraben (Schnittfläche im Bild oben) zeigen, blockierte vor dem Erdbeben vom 11. März die Pazifische die Eurasische Platte, auf der die japanische Hauptinsel sitzt (links). Diese schrumpte pro Jahr um einige Zentimeter, weil sie sich in dem Maß aufwölbte, wie sich Spannung aufbaute, während der Rand der Eurasi-

schen Platte gestaucht und nach unten gezogen wurde. Als die Blockade beim Erdbeben aufbrach, ließ die Spannung plötzlich nach, und die verbogene Kruste schnellte zurück in ihre Ausgangsposition. Dadurch nahm Honshu wieder seine ursprüngliche Ausdehnung und Form an (rechts). Das abrupte Zurückfedern des niedergedrückten Plattenrands löste den Tsunami aus.

permanente seismische Aktivität bekannt. Er befindet sich nördlich des »japanischen Tripelpunkts«, an dem die Eurasische, die Philippinische und die Pazifische Platte zusammentreffen (siehe Kasten links). Hier taucht seit Jahrtausenden die Pazifische unter die Eurasische Platte ab. Diese Subduktion verursacht zahlreiche seismische Erschütterungen, die teils mit gewaltigen Tsunamis einhergehen. So schwappte im Jahr 1896 eine Woge, die mit mehr als 25 Meter Höhe noch gewaltiger war als die vom März, über die nördlich von Sendai gelegene Hälfte von Honshu.

Das Beben von 1896 hatte die Seismologen lange verunsichert. Die Höhe des Tsunamis passte nicht zur vergleichsweise geringen Intensität der wahrgenommenen Erschütterungen, weshalb die damals noch nicht messbare tatsächliche Bebenstärke unklar blieb. Auslöser war wie am 11. März der Bruch eines Abschnitts der Verwerfung in der Nähe des Subduktionsgrabens, der 120 Kilometer vor der Nordostküste von Honshu liegt. Dort schiebt sich die Pazifische Platte mit einer Geschwindigkeit von etwa neun Zentimetern pro Jahr unter Japan.

Alle weltweit registrierten Erdstöße von einer Stärke wie beim Tohoku-Ereignis wurden ebenfalls durch eine ruckartige Verschiebung entlang von Verwerfungen in Subduktionszonen verursacht. Deshalb stellt sich die Frage, wie die Seismologen zu der Einschätzung gelangten, vor der japanischen Nordostküste könne es niemals zu einem derart gewaltigen Erdbeben kommen. Die Antwort lautet: Sie ließen sich von der scheinbar regelmäßigen seismischen Aktivität an dieser Subduktionszone täuschen. Weltweit sind viele Verwerfungen oder Verwerfungssegmente bekannt, an denen nur schwache Erdbeben auftreten. Die beiden Kontaktflächen gleiten dort zwar auch nicht völlig ungestört und glatt aneinander vorbei, aber doch ohne größere Rucke. Dies trifft etwa auf den zwischen Hollister und Parkfield gelegenen mittleren Abschnitt der San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien zu, an dem die Platten allerdings seitlich aneinander entlangschrammen. Es gilt aber auch für manche Subduktionszonen – so den 11 000 Meter tiefen Marianengraben.

Üblicherweise kommt es an solchen Plattenrändern jedoch zu starken Erdstößen. In den Zeiten dazwischen beschränkt sich die Aktivität auf schwache, kleinräumige Schwarmbeben. Man sagt, die Verwerfungen seien blockiert. Die Verschiebung infolge der Subduktion vollzieht sich hier also im Wesentlichen ruckartig bei den seltenen Megabebeben, gefolgt von zahlreichen Nachbeben. Wenn solche heftigen Erschütterungen mit einer gewissen Regelmäßigkeit auftreten, bezeichnet man sie als charakteristische Beben. Dies trifft beispielsweise auf die Subduktionsstörung von Nankai zu, wo ein »Big One« in nächster Zeit erwartet wird.

Andere Verwerfungen zeigen ein wesentlich komplexeres Verhalten, was die Risikoabschätzung erheblich erschwert. Zu ihnen gehört der Japangraben. Ende der 1960er Jahre ließ sich die Subduktion der Pazifischen Platte mit plattentektonischen Modellen schon gut beschreiben. Die Seismologen machten sich in der Folge daran, die »seismische Kopplung«

zu berechnen. Diese gibt an, welcher Prozentsatz der plattentektonischen Bewegung durch abrupten Versatz der Krustenblöcke bei großen Erdbeben erfolgt. Beim Beben vom 11. März zum Beispiel dürfte die Verschiebung entlang der Verwerfungsfläche auf der Höhe von Sendai mehr als 20 Meter betragen haben. An der Nordostküste von Honshu bewegte sich der Boden immerhin noch um einige Meter.

Als Erster berechnete Hiroo Kanamori vom California Institute of Technology in Pasadena 1977 die seismische Kopplung der Pazifischen Platte vor Honshu. Er kam auf etwa 25 Prozent – ein Wert, den nachfolgende Untersuchungen bestätigten. Obwohl sich längs des Japangrabens starke Erdbeben bis zur Magnitude 8,2 ereigneten, erreichte der Versatz durch seismische Aktivität also nur ein Viertel des Betrags, der auf Grund der Bewegung der Pazifischen Platte zu erwarten war. Zum Tripelpunkt im Süden hin nahm die Kopplungsstärke sogar noch weiter ab.

Scheinbar sicherer Standort für Kernkraftwerke

In der Subduktionszone des Japangrabens fanden somit nicht genügend Erdbeben statt, um die Fortbewegung der Platte vollständig zu erklären. Die Seismologen sprechen in einem solchen Fall von einem seismischen Slip-Defizit. Ein Detail ließ diese Feststellung besonders beunruhigend erscheinen: Das Epizentrum des stärksten jemals in dem Gebiet registrierten Erdbebens, des Sanriku-Bebens von 1933 mit einer Magnitude von 8,4, lag nicht über der Verwerfungsfläche, sondern jenseits des Grabens auf der Pazifischen Platte. Dieses Beben kann also keine Spannungen an der Subduktionszone abgebaut haben.

Es gibt zwei mögliche Erklärungen für das seismische Slip-Defizit am Japangraben. Entweder fand ein Großteil der tektonischen Plattenbewegung in der Vergangenheit in Form eines »aseismischen Gleitens« statt, also ohne dass es zu Erdbeben kam, oder in Japan waren in historischer Zeit tatsächlich starke Beben aufgetreten, von denen aber keine Berichte oder schriftlichen Zeugnisse existieren. Letzteres klingt unwahrscheinlich, weil die Geschichte der seismischen Aktivität in Japan zu den am besten dokumentierten weltweit gehört. Vier größere Erdbeben sind für den Nordteil der Tohoku-Region bekannt. Sie fanden 869, 1611, 1677 und 1896 statt. Im Südteil hingegen scheint sich seit mindestens 800 Jahren kein stärkerer Erdstoß mehr ereignet zu haben. Das spricht für ein zumindest teilweises aseismisches Gleiten. Deshalb galt die Errichtung von sechs Kernreaktoren in Fukushima-Daiichi in den 1970er Jahren und von vier weiteren in Fukushima-Daini zu Beginn der 1980er Jahre wahrscheinlich als gute Idee, da der Standort sicherer schien als viele andere auf dem japanischen Archipel.

Nicht in dieses Bild passt allerdings das Ausmaß der geometrischen Verformung der Insel Honshu. Eine Analyse der klassischen, also nicht von Satelliten gelieferten geodätischen Daten zeigt, dass sich die Abmessungen Nordjapans seit Beginn der Meiji-Zeit (1868–1912) erheblich verändert haben – ein klares Zeichen für den Aufbau von Spannung durch die

Subduktion (siehe Kasten auf S. 70). Wäre die Bewegung der Pazifischen Platte zu drei Vierteln als aseismisches Gleiten abgelaufen, das nichts zum Spannungsaufbau beiträgt, hätte die Verformung sehr viel geringer ausfallen müssen.

Vor allem aus diesem Grund beschloss Japan 1994, ein dichtes Netz von GPS-Stationen zu errichten, deren Position ständig durch Satellitensignale bestimmt wird. Innerhalb von drei Jahren gingen 1000 von ihnen in Betrieb. Ihre Daten bestätigten eine erhebliche Deformation als Folge steigender Spannung an der Subduktionsverwerfung.

Was bedeutet das? Entscheidend für die Bewertung sind zwei Grundprinzipien, die James Savage von der Purdue University in West Lafayette (Indiana) schon 1983 formulierte. Sie besagen, dass erstens sich die Erdkruste nur in der Nähe einer Subduktionsverwerfung langfristig in größerem Umfang verformt und dass zweitens diese Deformation elastisch und reversibel ist.

Wenn die abtauchende Pazifische Platte also, wie die GPS-Daten zeigen, den japanischen Archipel in weit gehend erdbebenfreien Zeiträumen um etwa zwei Zentimeter pro Jahr staucht, sollte er die dabei verlorene Landfläche irgendwann ruckweise mittels starker Erdbeben zurückgewinnen. Dabei legt die Deformation, die in interseismischen Perioden stattfindet, jenen Anteil der Subduktionsbewegung fest, der nicht frei ablaufen kann. Dieser Anteil entspricht der »mechanischen Kopplung der Subduktion«. Im Fall aseismischen Gleitens ist er gleich null. Die mechanische Kopplung beträgt dagegen 100 Prozent, wenn die abtauchende Platte durch den Kontakt mit anderer Kruste vollständig blockiert ist. Dann wird diese Kruste zwangsläufig im gleichen Ausmaß gestaucht, wie die Plattenbewegung voranschreitet. Das führt eines Tages unausweichlich zum Bruch – mit einem Megabebeben als Folge.

Elastisch zurückfedernder Plattenrand

Ein französisch-japanisches Team unter Leitung von Xavier Le Pichon vom Collège de France in Paris veröffentlichte zwischen 1998 und 2001 Ergebnisse von Untersuchungen, wonach die mechanische Kopplung entlang der Subduktionsfläche des Japangrabens in der Tat 100 Prozent beträgt. Das gilt bis in eine Tiefe von etwa 50 Kilometern, also fast bis dorthin, wo die Verwerfungsfläche in die Vertikale übergeht. Damit aber war das Modell von Kanamori mit einer seismischen Kopplung von nur 25 Prozent für den Japangraben widerlegt.

Tatsächlich verhält sich der japanische Inselbogen wie ein riesiger Gummiblock, der sich unter dem Druck der Pazifischen Platte zusammenzieht und durch ein starkes Erdbeben seine einstige Form vollständig wiedererlangt. Unter diesen Umständen muss die seismische Kopplung im Japangraben – also derjenige Anteil der Bewegung der Pazifischen Platte, der in Form plötzlicher Verschiebungen bei Erdbeben stattfindet – der mechanischen Kopplung entsprechen, nämlich dem Anteil der Plattenbewegung, der zu einer Verformung während der interseismischen Periode führt. Daraus hätten die Seismologen eigentlich schließen müssen, dass

sich bis zur Jahrtausendwende eine gewaltige Menge elastischer Energie an der Japangraben-Störung aufgestaut hatte, die sich irgendwann in einem Megabebeben entladen sollte.

In die Irre geführt wurden sie jedoch durch die Begleitumstände eines Erdbebens der Stärke 7,6, das 1994 den Norden der Insel Honshu heimsuchte. Das japanische GPS-Netz registrierte im Anschluss daran eine starke postseismische Verschiebung, die erschütterungsfreie Gleitbewegungen entlang der Japangraben-Störung nahelegte. Logischerweise fragten sich die Seismologen, ob diese Rutschungen das seismische Slip-Defizit ausgleichen könnten. Sie waren rasch geneigt, dies zu glauben, als 1997 Kosuke Heki von der Universität Hokkaido zeigte, dass die postseismische Verschiebung auf Honshu einem Erdbeben der Stärke 7,7 entsprach.

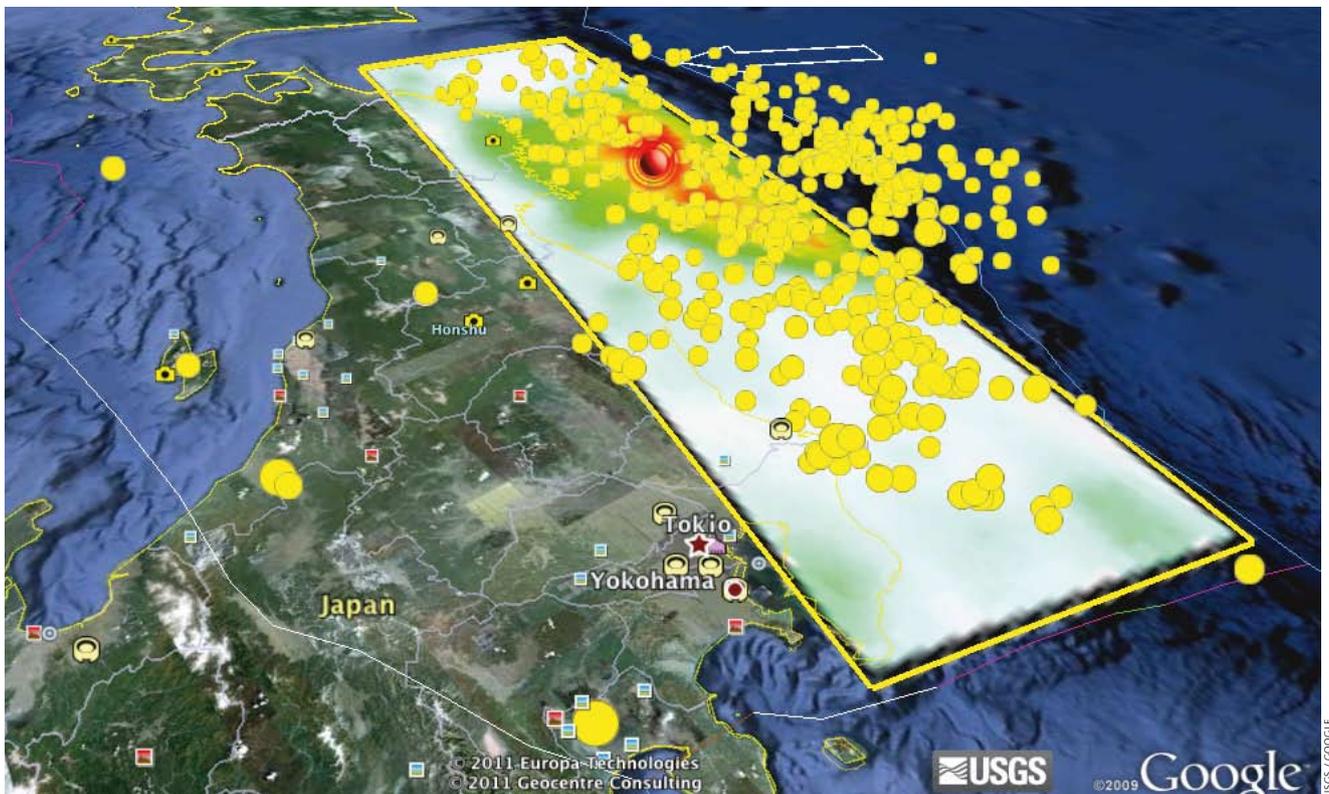
Die folgende Erklärung für das seismische Slip-Defizit der Japangraben-Störung drängte sich also auf. Nach jedem Erdbeben gleitet die abtauchende Platte in der Umgebung des zerbrochenen Bereichs noch ein gutes Stück weiter; so verteilt sich die restliche, in der Deformation gespeicherte elastische Energie, bevor die Verwerfung nach einigen Jahren wieder gänzlich blockiert ist. Der 11. März aber hat auf grausame Weise gezeigt: Diese Erklärung ist falsch oder, falls solche spannungslösenden postseismischen Verschiebungen tatsächlich auftreten sollten, höchstens die halbe Wahrheit.

Eine seismische Kopplung von annähernd 100 Prozent entlang der Subduktionsfläche des Japangrabens gilt inzwischen als sicher. Eine Bestätigung dafür lieferten kürzlich auch Simulationen mit dem Earth Simulator der Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) auf der Basis von GPS-Daten – allerdings mit einer Ausnahme: In der Nähe des japanischen Tripelpunkts scheint die Pazifische Platte kontinuierlich unter die Eurasische zu gleiten.

Leider erlaubt diese Art von Berechnungen keine Vorhersage über das Ausmaß eines Bruchs. Allenfalls lassen sich Vermutungen darüber anstellen. Vor dem Megabebeben vom 11. März rechnete jedoch niemand damit, dass die Verwerfung fast über die gesamte Länge vom Tripelpunkt im Süden bis zum Erdbebegebiet von 1896 im Norden aufbrechen könnte.

Die Seismologen hielten das für höchst unwahrscheinlich, weil sie von einer Segmentierung der Japangraben-Störung ausgingen. Tatsächlich zerfallen Verwerfungen oft in Abschnitte, die unabhängig voneinander aufbrechen. Das gilt insbesondere bei vertikalen Verwerfungsflächen, an denen die Platten seitlich aneinander entlanggleiten wie bei der San-Andreas-Störung. Es trifft aber auch für bestimmte Subduktionsverwerfungen zu – etwa die Nankai-Störung, wo sich die Subduktion entlang zweier Hauptsegmente vollzieht, die normalerweise im Abstand von einigen Stunden bis Jahren brechen. Allerdings gab es auch schon simultane Brüche.

Nach heutigem Wissensstand lässt sich die Japangraben-Störung besser beschreiben, wenn man von einer variableren Vorstellung der so genannten Asperität ausgeht. Der Begriff bezeichnet den Bereich der Verwerfungsfläche, an dem bei



Das Megabebe vom 11. März 2011 wurde durch plötzliche Verschiebungen entlang einer mehr als 500 Kilometer langen Verwerfungsfläche ausgelöst, deren Projektion an die Oberfläche in der Grafik durch einen gelben Rahmen markiert ist. Der Bereich größter Verschiebung – um mehr als zehn Meter – war dagegen nur 200 Kilometer lang; er ist auf der Karte in Rot und Grün angedeutet. Ein großer, roter Punkt zeigt das Epizentrum des Erdbebens an; die gelben Punkte stehen für Nachbeben.

heftigen Erdbeben die stärkste Scherung auftritt (Bild oben). Diese Zone maximalen Versatzes gilt auch als der Bereich größter Blockade in der Zeit zwischen zwei seismischen Ereignissen. Die Stärke eines Erdbebens hängt also sowohl von der Ausdehnung der Verwerfungsfläche als auch vom Umfang der Asperität und von der Amplitude der Bewegung ab.

Zum Beispiel wurde das Erdbeben der Stärke 9,1 vom 26. Dezember 2004 im Indischen Ozean durch einen Riss ausgelöst, der sich innerhalb von neun Minuten über 1200 Kilometer hinweg fortpflanzte. Der Bruch beim Tohoku-Beben war von kürzerer Dauer und räumlich begrenzter. Anscheinend entlud sich ein Großteil der Spannungen innerhalb von drei Minuten an einem nur 500 Kilometer langen Riss.

Im Einzelnen zeigen Berechnungen, die verschiedene Forschergruppen anhand der seismischen und geodätischen (GPS-)Daten anstellten, dass es in einer Entfernung von 200 Kilometern auf beiden Seiten des Epizentrums zu Verschiebungen von 20 bis 40 Metern kam. Auf der Website Tohoku-oki (<http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>), die dem Erdbeben vom 11. März gewidmet ist, wurden verschiedene dieser Ergebnisse veröffentlicht. Sie lassen unter ande-

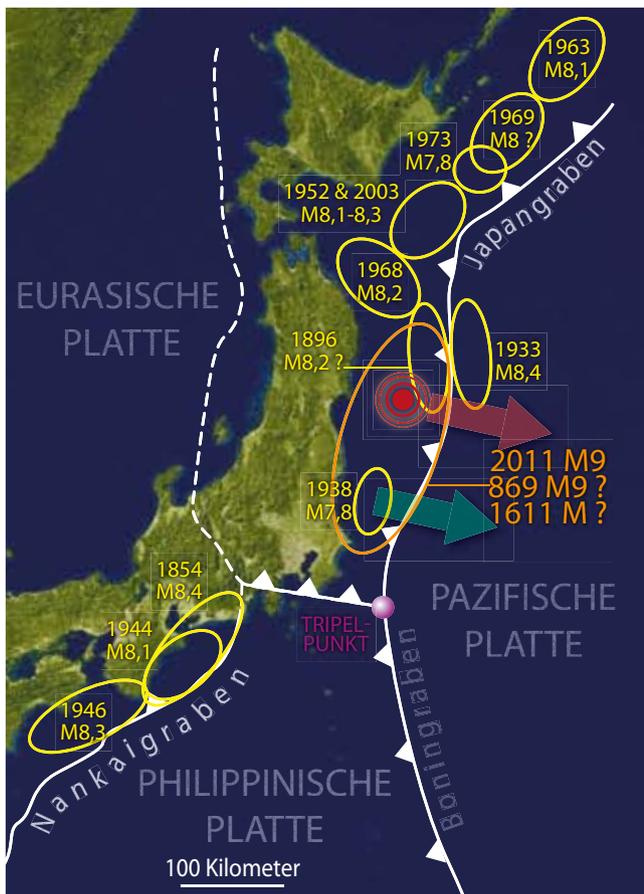
rem darauf schließen, dass der Bereich, in dem der Versatz des Meeresbodens den Tsunami ausgelöst hat, eine relativ geringe Ausdehnung hat und – wie auch bei dem Erdbeben von 1896 – in der Nähe des Grabens lag.

Was lässt sich aus diesen Erkenntnissen über die Häufigkeit von Megabebeben an der Japangraben-Störung ableiten? Bei einer Subduktionsgeschwindigkeit von neun Zentimetern pro Jahr und unter der Voraussetzung, dass nur ein Teil der Bewegung in Form von Jahrhundertbeben stattfindet, entspricht ein Versatz von 20 bis 30 Metern bei einem solchen Ereignis etwa 300 bis 400 Jahren, in denen sich Spannung an der Verwerfung aufbaut. Entsprechend lang ist die interseismische Periode.

Risiko von Jahrtausendbeben

Aus den Ergebnissen der seismografischen Überwachung seit 1896 schlossen die Seismologen auf Verwerfungssegmente von 100 bis 200 Kilometer Länge. Die Bruchzone des Megabebens vom 11. März ist aber viel länger, und ihre Asperität erstreckt sich über diejenigen mehrerer vorangegangener Erdstöße hinweg, ohne diese vollständig zu überdecken. Zudem scheint der zentrale Teil des Risses, wo die maximale Bewegung stattfand, schon wieder blockiert zu sein, während eine postseismische Bewegung, begleitet von zahlreichen Nachbeben, im Süden begonnen hat. Sie erinnert an das, was 1994 weiter nördlich geschah.

All diese Verschiebungen haben nur um die Bruchzone herum die Spannungsverteilung in der Kruste geändert. Dadurch steigt aber das Bebenrisiko in der Pazifischen Platte vor dem Japangraben – genau wie das Erdbeben von 1896



Die japanische Erdbeben­geschichte ist gut dokumentiert. Auf dieser tektonischen Karte von Japan sind die durch die jüngsten Subduktions­erdbeben betroffenen Gebiete eingetragen, jeweils mit Jahreszahl und Stärke (Magnitude M). Wie man sieht, gingen zwei Jahrhundertbeben, eines auf der Eurasischen (1896), das andere auf der Pazifischen Platte (1933), dem Megabe­ben vom 11. März voraus. Zwei Jahrtausendbeben (869 und 1611) scheinen von ähnlicher Stärke wie dieses gewesen zu sein. Der maximale Versatz der Eurasischen Platte während des Megabe­bens ist durch einen roten, die Verschiebung weiter südlich danach durch einen grünen Pfeil ange­zeigt.

dasjenige von 1933 begünstigt hat – und in den angrenzenden Bereichen der Subduktions­fläche, wo außerdem mit weiteren Nachbeben zu rechnen ist. Die Auswirkungen reichen im Süden bis zum Sagami-Graben, wo sich 1923 das starke Beben von Kanto ereignete, und zum dicht benachbarten Suruga-Graben, an dem 1854 das letzte Erdbeben stattfand.

Der Tripelpunkt macht die Verhältnisse dort jedoch komplizierter. Berechnungen zufolge kann sich jedes Verwerfungssegment unterschiedlich entwickeln. Solange der jeweilige Versatz nicht genau kartiert ist, lässt sich daher das Risiko in dieser Region noch nicht abschätzen.

Jedenfalls beweist das Erdbeben vom 11. März, dass gewaltige Brüche an der Japangraben-Störung möglich sind – was einige japanische Forscher für den Kurilengraben, die Verlängerung des Japangrabens nach Norden, zuvor schon in Betracht gezogen hatten. Außerdem ergab eine Untersuchung

von Wissenschaftlern des National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), der größten Forschungseinrichtung in Japan, aus dem Jahr 2003, dass sich die Sandablagerungen von prähistorischen Tsunamis an manchen Küsten Japans teils einige Kilometer weit ins Landesinnere hinein erstrecken. Vergleichbare Sedimente blieben nach den Tsunamis von 1952 und 1973 nicht zurück, obwohl die zugehörigen Erdbeben beachtliche Stärken von 8,1 und 7,8 erreichten. Die AIST-Forscher schlossen daraus, dass sich zusätzlich zu den Jahrhundertbeben in jedem einzelnen Segment etwa alle 1000 Jahre noch gewaltigere Erdbeben ereignen, bei denen zwei oder mehr Abschnitte der Verwerfung gleichzeitig brechen.

Die Subduktion am Kaskadengebirge in Nordamerika, das sich von Vancouver Island bis in den Norden Kaliforniens erstreckt, liefert einen bemerkenswerten Kandidaten für solch ein drohendes Jahrtausendbeben. Obwohl wenig über die Erdbeben­geschichte dieser Region bekannt ist, konnten Seismologen zeigen, dass dort mit Erdbeben einer Stärke über 9 und daraus resultierenden bis zu 30 Meter hohen Tsunamis zu rechnen ist. Die Zeitabstände zwischen solchen Megabe­ben bleiben allerdings vage. Ein Tsunami, der am 26. Januar 1700 in Japan eintraf, ohne dass dort zuvor die Erde gezittert hätte, lässt auf einen gewaltigen Erdstoß an der amerikanischen Westküste schließen. Die Wahrscheinlichkeit eines weiteren solchen Ereignisses in den kommenden 50 Jahren schätzen die Forscher auf zehn Prozent.

Im Japangraben vor Honshu könnten die seismischen Erschütterungen von 1611 und 869 ähnlichen Jahrtausendbeben entsprechen. Von der Universität Sendai durchgeführte Untersuchungen ergaben 2001, dass das Erdbeben von 869 einen großen Tsunami in der Bucht von Sendai hervorgerufen hat, dessen Sandablagerungen bis zu vier Kilometer landeinwärts reichen. Wie die Forscher herausfanden, kam es zu solchen außergewöhnlichen Ereignissen in prähistorischer Zeit ungefähr alle 1000 Jahre. Daraus schlossen sie, das nächste könne sich in naher Zukunft ereignen. Sie hatten Recht: Es fand am 11. März 2011 statt. ~

DER AUTOR



Pierre Henry ist Geophysiker und Forschungs­direktor beim französischen Zentrum für wissenschaftliche Forschung (CNRS). Er arbeitet beim Umwelt- und Geoforschungszentrum (CEREGE) in Aix-en-Provence.

QUELLEN

- Mazzotti, S. et al.:** Full Interseismic Locking of the Nankai and Japan-West Kurile Subduction Zones. In: Journal of Geophysical Research – Solid Earth 105, S. 13159–13177, 2000
- Minoura, K. et al.:** The Jogan Tsunami Deposit and Recurrence Interval of Large-Scale Tsunami on the Pacific Coast of Northeast Japan. In: Journal of Natural Disaster Science 23, S. 83–88, 2001

Fukushima auch in Deutschland?

Der Reaktorunfall von Fukushima war nicht nur eine Katastrophe für die Japaner, er hatte auch einschneidende Auswirkungen auf die deutsche Politik. Unter der Einwirkung der Hiobsbotschaften aus Japan beschloss der Bundestag am 30. Juni den sukzessiven Ausstieg aus der Atomenergie bis 2022. Kein anderes Land der Welt beabsichtigt derartige Maßnahmen. Doch auf welcher wissenschaftlichen Basis beruht der Beschluss? Vier Experten für Reaktorsicherheit analysieren, wie es zur Katastrophe kam und inwiefern sich die Ereignisse von Fukushima in Deutschland wiederholen könnten.

Von Bernhard Kuczera, Ludger Mohrbach,
Walter Tromm und Joachim Knebel



Am Freitag, den 11. März 2011, ereignete sich in Japan eine Naturkatastrophe von bisher dort unbekanntem Ausmaß. Um 14.46 Uhr Ortszeit, 6.46 Uhr unserer Zeit, erschütterte ein gewaltiges Seebeben, dessen Epizentrum im Pazifischen Ozean etwa 150 Kilometer östlich der Stadt Sendai lag, die nahe gelegene Küstenregion (siehe dazu auch den Artikel ab S. 68). Die Kombination von Beben und Flutwelle forderte eine große Anzahl

von Menschenleben und richtete schwerste Verwüstungen in Ortschaften, Infrastruktur und Umwelt an. Mindestens 23 000 Menschen starben oder werden vermisst.

Im unmittelbaren Einwirkungsbereich dieser Naturkatastrophe liegen mit Onagawa, Fukushima-Daiichi, Fukushima-Daini und Tokai die Standorte von vier Kernkraftwerken. Am schwersten betroffen war der Standort Fukushima-Daiichi. Die Anlage liegt etwa 60 Kilometer südlich von Sendai direkt



Nach dem Unglück: Blick auf die Blöcke 4 bis 1 (von links nach rechts) der Reaktoranlage in Fukushima-Daiichi, im Vordergrund die Maschinenhäuser, dahinter die bereits explodierten Reaktorgebäude.

an der pazifischen Küste, 250 Kilometer nördlich der japanischen Hauptstadt Tokio. Dort betrieb die Tokyo Electric Power Company (Tepco) sechs Siedewasserreaktorblöcke der General-Electric-Bauweise mit einer elektrischen Nettoleistung von insgesamt 4547 Megawatt elektrisch (MWe). Zusammen mit dem Nachbarstandort Fukushima-Daini mit nochmals viermal 1100 MWe bildete der Komplex das größte Kernkraftwerk der Welt.

Zum Zeitpunkt des Erdbebens waren die Blöcke 1 bis 3 in Betrieb, die Blöcke 4 bis 6 dagegen zu Revisionsarbeiten abgeschaltet. Die Brennelemente aus Block 4 waren in das zugehörige Abklingbecken im Reaktorgebäude ausgelagert. Als die Seismometer auf den Kraftwerksgeländen die heftigen Bodenerschütterungen registrierten, wurden in allen insgesamt elf am Netz befindlichen Blöcken dieser vier Standorte automatisch die Schnellabschaltungen ausgelöst. Kurz da-

nach brach, zum Teil auch durch umgestürzte Strommasten, die allgemeine Stromversorgung in vielen Regionen zusammen, darunter auch am Standort Fukushima-Daiichi. In diesem Moment übernahmen planmäßig die Notstromdieselmotoren die Stromversorgung der Kühlsysteme zur Nachwärmeabfuhr aus den Reaktoren und den Abklingbecken aller vom Netz getrennten Blöcke. Damit waren alle betroffenen Reaktoren nach dem Erdbeben zunächst in einen stabilen Zustand überführt worden. In Onagawa, nur 90 Kilometer vom Epizentrum entfernt, brach in einem der drei Turbinenräume ein Feuer aus, das allerdings nach einigen Stunden gelöscht werden konnte.

Innerhalb einer Stunde nach dem Erdbeben erreichte die Tsunamiwelle zunächst Onagawa. Dieser Standort liegt aber ausreichend hoch über dem Meeresspiegel. Danach traf die Flutwelle Fukushima-Daiichi mit einer Höhe von hier noch über 14 Metern. Die dortigen Anlagen sind mit einem lediglich 5,7 Meter hohen Betonwall gegen Taifune geschützt. Das Kraftwerksgelände selbst befindet sich auf zehn Meter Höhe über dem Meeresspiegel und wurde innerhalb von drei Minuten um bis zu vier Meter überflutet, was die Kraftwerkeinrichtungen schwer beschädigte. Die Kühlturmpumpen wurden weggerissen oder zerstört und die Gebäudetüren der Maschinenhäuser eingedrückt.

In Fukushima-Daiichi sind genau dort, also in den Kellern der Maschinenhäuser, die Notstromdiesel eingebaut. 12 der insgesamt 13 Dieselmotoren fielen durch Kurzschluss aus. Dadurch stand für die Blöcke 1 bis 4 auch die Stromversorgung der Notkühlsysteme nicht mehr zur Verfügung – zur Abfuhr der Nachwärme insbesondere aus den Reaktoren 1 bis 3 sowie aus den Lagerbecken 1 bis 4. Eine Stunde nach Abschaltung erreichte die Nachzerfallwärme aus den Brennstäben zwar nur wenige Prozent der betrieblichen Leistung, diese entsprach jedoch noch immer zweistelligen Megawattbeträgen.

In der Folge liefen zunächst die Notkühlturmpumpen, die durch Nachwärmedampf angetrieben wurden. Die Pumpen saugten ihr Wasser aus den für solche Zwecke vorgesehenen Wasservorräten aus den ringförmigen »Kondensationskam-

mern« an und förderten es in die Reaktoren. Nach einigen Stunden versagten sie ihren Dienst, da die Batterien zum Ansteuern der Hilfseinrichtungen der Antriebsturbinen erschöpft waren beziehungsweise das Temperatur- und Druckgefälle für diese Antriebsturbinen nicht mehr ausreichte. Die Füllstände in den Reaktoren begannen zu sinken, die Brennelemente wurden freigelegt.

Der Ablauf des Desasters war grundsätzlich bekannt und im Detail beschrieben

Der weitere Ablauf des Unfalls ließ sich nicht direkt beobachten, vor allem da mangels Strom auch fast alle Messgeräte ausgefallen waren. Der Verlauf ist jedoch aus Risikostudien grundsätzlich bekannt und für den Zeitraum bis Mitte April von einigen von uns (Kuczera, Mohrbach) detailliert beschrieben: Nach diesen Szenarien heizt sich zuerst der Reaktorkern auf, danach platzen oberhalb von rund 900 Grad Celsius die Hüllrohre der Brennstäbe. Dabei gelangen gasförmige – vor allem Xenon und Krypton – sowie leichtflüchtige Anteile der Spaltprodukte wie Jod, Strontium oder Zäsium ins Kühlwasser. Oberhalb von rund 1300 Grad Celsius reagiert das Hüllrohrmaterial Zirkalloy der Brennstäbe – eine Zirkoniumlegierung – in einer exothermen, also Wärme freisetzenden Reaktion mit dem Wasserdampf zu Zirkonoxid. Dabei entsteht Wasserstoff. Ab 2850 Grad Celsius beginnt das Uranoxid der Brennstoffpellets zu schmelzen. Im Bereich von Stunden verlagerten sich die Schmelzen zunächst auf die Böden der Reaktordruckbehälter, wo sie wahrscheinlich zumindest teilweise die dortigen Steuerstabstutzen-Schweißnähte aufgeschmolzen haben und damit einen Weg in die Reaktorgruben fanden. Über die Gasräume der Kondensationskammern gelangten die gasförmigen und kleine Teile der leichtflüchtigen Spaltprodukte in die Sicherheitsbehälter.

Die im Normalbetrieb mit reaktionsträgem Stickstoff gefüllten Behälter waren zu diesem Zeitpunkt mit einem Gemisch aus Stickstoff, Dampf und Wasserstoff gefüllt. Um jetzt ein Versagen durch Überdruck zu verhindern, leitete das Betriebspersonal nach Autorisierung durch die Regierung bei fast doppeltem Auslegungsdruck (etwa acht Bar) mehrfach die Druckentlastung der Sicherheitsbehälter ein, das so genannte Containment Venting. Hierzu wurden die Ventile zunächst von Hand und später mit Hilfe von mobilen Kompressoren bewegt. Unklar ist, wie der Wasserstoff sich in den Gebäuden mindestens der Blöcke 1, 3 und 4 ansammeln konnte, anstatt planmäßig gefiltert über die Kammine abgegeben zu werden. Vom Block 2 war eine interne Explosion zu hören. Von der wird angenommen, dass sie den Sicherheitsbehälter beschädigte, so dass radioaktive Stoffe bis in den Maschinenhauskeller gelangen konnten.

In der Folge kam es zu den spektakulären Wasserstoffexplosionen mit Zerstörung der Reaktorgebäudestrukturen der Blöcke 1, 3 und 4. Zugleich wurden unkontrolliert radioaktive Stoffe in die Umgebung abgegeben. Auf Grund der kumulierten Freisetzungsmenge hat die japanische Sicherheitsbehörde auf der International Nuclear Event Scale INES

AUF EINEN BLICK

VERMEIDBARE TRAGÖDIE

1 Nach dem **Erdbeben der Stärke 9,0** schalteten sich die am Netz befindlichen Reaktorblöcke 1 bis 3 von Fukushima-Daiichi planmäßig ab; die Blöcke 4 bis 6 waren wegen Wartungsarbeiten bereits vorher außer Betrieb. Danach überflutete eine 14 Meter hohe **Tsunamiwelle** die Anlage.

2 Forscher wissen, dass im Durchschnitt alle 30 Jahre ein großer Tsunami Japans Küsten erreicht. Dafür keine Vorkehrungen zu treffen, ist ein gravierender **Mangel der Gebäudeauslegung**.

3 Obwohl japanische Sicherheitsexperten in den letzten Jahren immer wieder auf diese Sicherheitsmängel hinwiesen, verblieben die **Notstromdieselmotoren** in den Kellern von Maschinenhäusern, die nicht gegen **Wassereintrich** geschützt waren.

Flugzeugabstürze als Sicherheitsrisiko

Nach dem Unfall in Fukushima bewertete die Reaktorsicherheitskommission (RSK) im Auftrag der Bundesregierung im Mai dieses Jahres erneut die Sicherheit der deutschen Kernkraftwerke. Vor allem verglich sie die mangelhaften Standards in Fukushima, die zum Unglück in Japan beitrugen, mit den entsprechenden deutschen Vorschriften. Darüber hinaus bewertete sie aber auch andere Risiken, zum Beispiel mögliche Flugzeugabstürze. Dazu entwickelte die Kommission neue Kriterien, die über die schon vorhandenen Sicherheitsbestimmungen hinausgehen. Die Betreiber hatten daraufhin mit entsprechenden Nachweisen zu belegen, inwieweit die Bestimmungen von den einzelnen deutschen Reaktoren erfüllt werden.

Bei der Auslegungsbasis der Anlagen unterschied die RSK zwischen einem kleinen Militärflugzeug vom Typ Starfighter, einem mittleren Militärflugzeug vom Typ Phantom sowie einem mittleren und einem großen Verkehrsflugzeug. Zusätzlich berücksichtigte die Kommission jeweils, dass auch der Treibstoff eines Flugzeugs einen Brand im Kraftwerk auslösen könnte. Als erfüllt galt ein Kriterium, wenn die wichtigen Grundfunktionen des Kraftwerks durch den Absturz nicht beeinträchtigt würden.

Laut dem Untersuchungsergebnis erfüllen die Kernkraftwerke Biblis A und B, Brunsbüttel und Philippsburg 1 formal nicht einmal die Schutzkriterien für den Absturz eines kleinen Militärflugzeugs. Die Betreiber verweisen jedoch auf Modellrechnungen, nach denen die Anlagen in einem solchen Fall dennoch ausreichend stabil sind. Die Anlagen Brunsbüttel und Philippsburg 1 sind zudem noch nicht genügend auf ihren Schutz

vor Treibstoffbrand untersucht. Diese vier Kraftwerke sind seit März 2011 oder schon länger abgeschaltet.

Die Kraftwerke Isar 1, Neckarwestheim 1 und Unterweser sind gegen den Aufprall eines kleinen Militärflugzeugs gewappnet. Für ein Flugzeug mittlerer Größe erfüllen sie die Richtlinien zwar formal nicht – doch liegen zu diesen Anlagen jedenfalls Untersuchungen vor, nach denen die Kraftwerke auch in dieser Situation hinreichend sicher sein könnten. Gegen ein großes Verkehrsflugzeug allerdings wären sie nicht geschützt. Die Betreiber von Neckarwestheim 1 weisen jedoch darauf hin, dass der Standort es flugtechnisch praktisch unmöglich macht, die Anlage zu treffen. Auch diese drei Kraftwerke sind seit März 2011 nicht mehr in Betrieb.

Für alle anderen Anlagen – Brokdorf, Emsland, Grafenrheinfeld, Grohnde, Gundremmingen B und C, Isar 2, Krümmel und Neckarwestheim 2 – gilt: Sie sind vor kleinen Flugzeugen sicher und erfüllen auch die Kriterien für mittlere Militärflieger. Für mittelgroße und große Verkehrsflugzeuge gibt es zwar Untersuchungen, doch sie entsprachen nicht den Kriterien der RSK. Mit Ausnahme von Krümmel, das seit längerem nicht mehr am Netz ist, laufen diese Anlagen weiter und sollen nach Regierungsbeschluss vom 30. Juni 2011 bis 2022 nach und nach abgeschaltet werden.

Die Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission ist im Internet unter www.rskonline.de zu finden.

Barbara Wolfart

Die Autorin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

der International Atomic Energy Agency (IAEA) den Vorfall in die höchste Kategorie 7 (»katastrophaler Unfall«) eingestuft. Insgesamt wurden einige 10 000 Terabequerel Jod-Äquivalent an Radioaktivität freigesetzt, rund ein Zehntel der Menge der Tschernobyl-Katastrophe von 1986.

Bezüglich der Strahlenbelastung bedeutet dies, dass beim Unfall in Fukushima hauptsächlich Jod und Zäsium in der Größenordnung von einigen Prozent des Gesamtinventars der Anlage in die Umgebung gelangten. Hierbei wurden diese Radionuklide vom Wind vor allem zunächst nach Osten und später kurzzeitig auch nach Nordwesten weggetragen. Simulationsmodelle, die durch Messungen bestätigt wurden, zeigen über Land die höchsten Kontaminationen im Nordwesten bis in eine Entfernung von etwa 30 Kilometern.

Dekontaminierung des radioaktiv verseuchten Wassers

Nachdem anfänglich Jod-131 (mit einer Halbwertszeit von acht Tagen) die Bevölkerung am stärksten belastet hat, sind dies seit Mai die Zäsiumisotope 134 und 137, die mit Halbwertszeiten von etwa 2 und 30 Jahren deutlich langlebiger und damit weniger aktiv sind als Jod-131. Der Betreiber hat einen ausführlichen Plan für die Sicherung des Kraftwerks und

aller Anlagen vorgelegt. Mit Stand Mai 2011 sind als vordringliche Maßnahmen die Sicherstellung der langfristigen Kernbeziehungsweise Schmelzekühlung definiert, auch durch die teilweise Flutung der Sicherheitsbehälter mit Wasser oder durch Einleitung von weiterem Stickstoff. Mittelfristig sollen die bestehenden Kühlsysteme zur langfristigen Abfuhr der Nachwärme wieder aktiviert oder durch neue ersetzt werden, um zur Kreislaufkühlung übergehen zu können. Diese verhindert weitere Freisetzungen und ermöglicht, den Salzgehalt in den Reaktoren (sie wurden zeitweise über externe Mobilpumpen mit Meerwasser gekühlt) und damit die Korrosionsgefahr zu verringern.

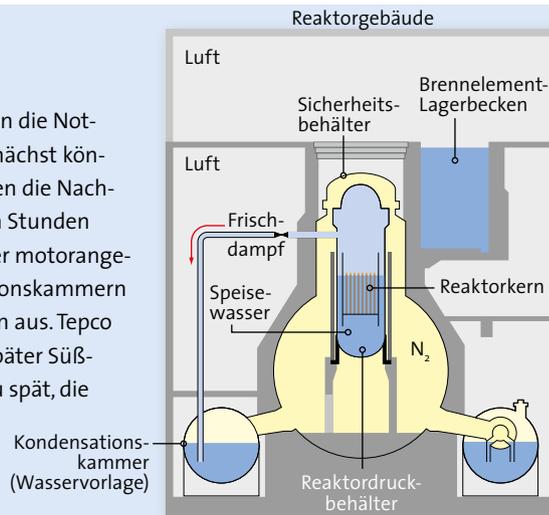
Voraussetzung für weitere Maßnahmen an den Reaktoren ist die Dekontaminierung der über 100 000 Tonnen Wasser besonders in den Maschinenhäusern, die mit radioaktiven Stoffen belastet sind. Dafür werden hauptsächlich die am Standort befindliche Wasseraufbereitungsanlage und externe, zum Teil schwimmende Tanks eingesetzt. Das gereinigte Wasser wird auch zur Kühlung der Reaktoren verwendet.

Grundsätzlich versuchen die Ingenieure der Betreiberfirma, die Messinstrumente der Anlagen wieder in Gang zu

Chronik einer Katastrophe

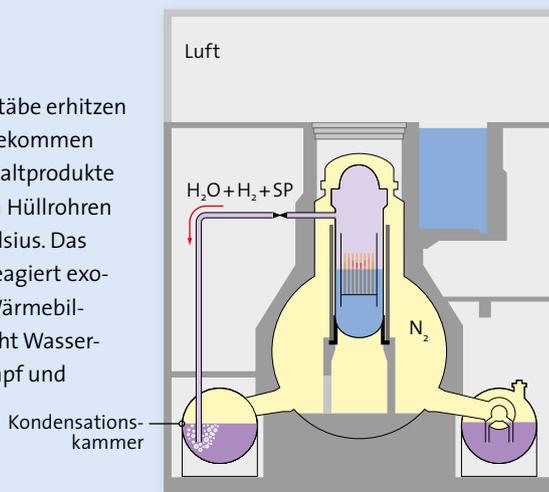
NOTKÜHLSYSTEME FALLEN AUS

11. März 2011: Durch den Tsunami fallen die Notstromdiesel der Blöcke 1 bis 4 aus. Zunächst können dampfgetriebene Notkühlumpfen die Nachwärmeabfuhr aufrechterhalten. Nach Stunden sind die Batterien für den Betrieb ihrer motorangesteuerten Ventile leer, die Kondensationskammern heizen sich auf, und die Pumpen fallen aus. Tepco leitet die Einspeisung von See- und später Süßwasser in die Reaktoren ein, jedoch zu spät, die Reaktorkerne werden über Stunden nicht mehr gekühlt. Das Kühlwasser verdampft, die Füllstände sinken.



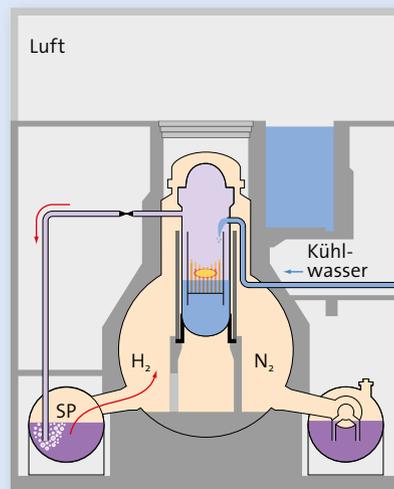
DIE TEMPERATUR STEIGT

Erste Phase: Die Hüllrohre der Brennstäbe erhitzen sich auf über 900 Grad Celsius und bekommen erste Risse; Edelgase und flüchtige Spaltprodukte (SP) entweichen. Zweite Phase: In den Hüllrohren erreicht die Temperatur 1200 Grad Celsius. Das Zirkonium in der Hüllstablegierung reagiert exotherm, das heißt unter zusätzlicher Wärmebildung, mit Wasser (H₂O). Dabei entsteht Wasserstoffgas (H₂). Wasserstoff, Wasserdampf und Spaltprodukte gelangen in die Kondensationskammern.



DER REAKTORKERN WIRD ZERSTÖRT UND GEFLUTET

Ab 2700 Grad Celsius beginnt der keramische Brennstoff Uranoxid zu schmelzen. Metallische oder keramische Schmelzgemische bilden sich, der Reaktorkern schmilzt vollständig. Zu diesem Zeitpunkt lassen die Betreiber in Fukushima Kühlwasser ein: in Block 1 am 12. März, um 5.20 Uhr (nach 14 Stunden ohne Kühlung); in Block 2 am 14. März, um 16.34 Uhr (nach drei Stunden ohne Kühlung); in Block 3 am 13. März, um 13.12 Uhr (nach acht Stunden ohne Kühlung).



setzen oder zu ersetzen. Ein wichtiger Punkt ist die Absicherung der zerstörten Reaktorgebäude gegen weitere Erdstöße. Dies gilt vor allem für das Brennelement-Abklingbecken von Block 4, das zeitweise – wie auch die Lagerbecken von Block 1 und 3 – über Betonpumpen mit Auslegern von 55 bis 70 Meter Höhe wieder aufgefüllt wurde.

Unklare Ursache

Weiterhin unklar ist die Ursache für die Explosion in Block 4. Zunächst befürchteten die Experten, die Brennelemente seien zumindest im Lagerbecken von Block 4 durch Wasserverlust zerstört worden. Das erscheint inzwischen wieder unwahrscheinlich, denn Fotos zeigen die intakten Lagergestelle mit sichtbaren Brennelementköpfen.

Im Lagerbecken von Block 3 waren zum Unfallzeitpunkt insgesamt 32 bestrahlte Plutoniumbrennelemente vorhanden. Diese unterscheiden sich in radiologischer Hinsicht jedoch nicht wesentlich von Uranbrennelementen.

Mittel- bis langfristig plant Tepco jetzt, die Trümmer am Standort zu beseitigen. Außerdem sollen der Boden sowie das kontaminierte Wasser in den Gebäudedeckeln und den Leitungsschächten dekontaminiert werden. Schließlich gilt es, die Reaktor- und Maschinengebäude wieder zugänglich zu machen.

Wie gut seine Kernkraftwerke etwa gegen Erdbeben und Überflutungen durch Tsunamis gesichert sein müssen, legte Japan in den 1960er Jahren fest. In dieser

Zeit begann auch der Bau des Kernkraftwerks Fukushima. Während der Schutz der Anlage vor Erdbeben stets großzügig ausgelegt und im Lauf der Jahre neuen Erkenntnissen angepasst wurde, hatte man in Bezug auf Tsunamis die Standorte nur gegen die jeweils bekannte historische maximale Wellenhöhe mit einer geringen, nicht systematisch festgesetzten Reserve geschützt. Abschätzungen, welche Wellenhöhen realistischerweise auftreten könnten (»probabilistischer Ansatz«), haben bis zum Fukushima-Ereignis keinen Eingang in die behördliche Aufsichtspraxis und damit die Sicherheitsgestaltung der Anlagen gefunden.

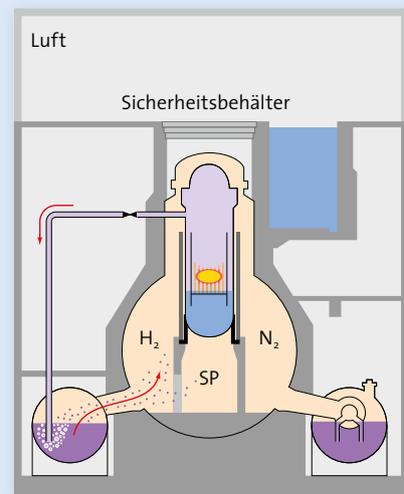
Deutsche Kernkraftwerke sind so ausgelegt, dass sie einem Hochwasser standhalten, wie es statistisch nur alle 10 000 Jahre auftritt, sowie einem Erdbeben einer Stärke, wie es im Mittel lediglich alle 100 000 Jahre vorkommt. Zu den Absicherungen gehören verbunkerte, das heißt gegen alle Einwirkungen von außen wie etwa Überflutungen geschützte Notstromeinrichtungen.

Die Kernkraftwerke in Fukushima weichen auch im Detail von der sicherheitstechnischen Auslegung deutscher Kernkraftwerke ab: zum Beispiel bei der Anzahl der redundant (mehrfach) und diversitär (mit unterschiedlicher Technik) gestalteten Systeme zur Nachwärmeabfuhr und Notkühlung sowie der Notstromsysteme. So waren in Fukushima-Daiichi jeweils nur zwei Notstromdieselaggregate pro Block und ein 13. als Reserve für den gesam-

Chronik einer Katastrophe (Fortsetzung)

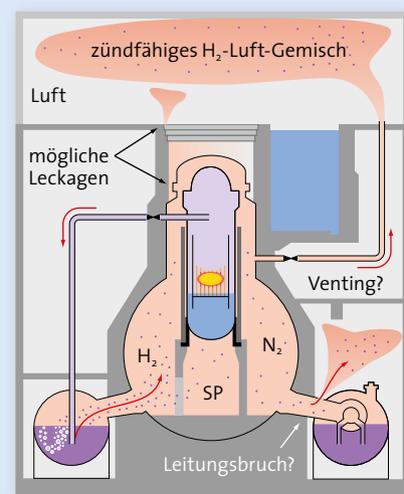
DER SICHERHEITSBEHÄLTER WIRD KONTAMINIERT

Edelgase wie Xenon gelangen durch die Kondensationskammer in den Sicherheitsbehälter. Leichtflüchtige Spaltprodukte wie Jod, Zäsium und Strontium werden weitgehend in der Wasservorlage zurückgehalten, wenige Prozent gelangen in die Sicherheitsbehälter. Uran und Plutonium verbleiben im Reaktorkern.



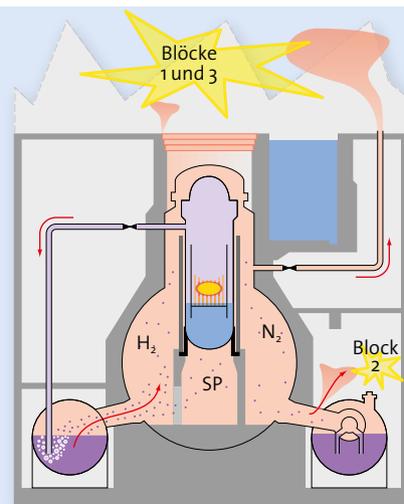
DRUCK STEIGT IM SICHERHEITSBEHÄLTER

Der Druck im Sicherheitsbehälter erreicht zirka acht Bar. Seine drei Zentimeter starke Außenhülle ist aber nur für vier bis fünf Bar ausgelegt. Die Mannschaften leiten gezielte Druckentlastungen der Sicherheitsbehälter ein (»Containment Venting«). Die hierfür installierten Entlastungsventile werden pneumatisch mit Hilfe von Mobilkompressoren bedient, in Block 1 am 12. März, um 10.17 Uhr, in Block 2 am 13. März, um 11.00 Uhr, in Block 3 am 13. März, um 8.41 Uhr. Die vorgesehenen Druckentlastungswege über Filter zu den Kaminen funktionieren jedoch nicht.



WASSERSTOFF EXPLODIERT

Der Wasserstoff sammelt sich unter den Dächern und bildet mit dem dort vorhandenen Luftsauerstoff zündfähige Knallgasgemische. Das Knallgas explodiert und zerstört die Stahlkonstruktion der Reaktorgebäude: im Block 1 am 12. März, um 15.30 Uhr, im Block 2 am 15. März, um 6.10 Uhr, und im Block 3 am 14. März, um 11.01 Uhr.



ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: BERNHARD KUCZERA

ten Standort vorhanden. In Deutschland gibt es dagegen pro Block in der Regel vier Notstromdiesel plus mindestens zwei (bis zu vier) weitere diversitäre Systeme. In Deutschland werden die benötigten Treibstoffvorräte zudem zusammen mit den Notstromsystemen in verbunkerten Gebäuden untergebracht. Die Dieselmotoren können somit autark betrieben werden.

Für den Fall von – auch erdbebenbedingten – Störungen der Stromversorgung, bei denen keine Grenzwerte für das Auslösen der Reaktor-Schnellabschaltung erreicht werden, verfügen alle deutschen Anlagen als Besonderheit über Einrichtungen zum automatischen »Abfahren auf Eigenbedarf«. Das heißt, sie können sich über einen extrem langen Zeitraum (theoretisch solange der Kernbrennstoff reicht) selbst mit Strom versorgen.

In Fukushima wurden die Notfallmaßnahmen zu spät eingeleitet

In Kernkraftwerken sind zusätzliche Maßnahmen für Notfälle vorgesehen, wenn der so genannte Auslegungsfall überschritten wird. Um in so einem Fall die Kernschmelze zu vermeiden, soll etwa über mobile Pumpen Notkühlwasser in den Reaktor eingespeist werden. Generell sind aber Kriterien für einen rechtzeitigen Beginn solcher Maßnahmen definiert. Diese sind in Notfallplänen beschrieben und von der Mannschaft geübt. In Fukushima erfolgte die Einleitung der Notfallmaßnahmen jedoch zu spät.

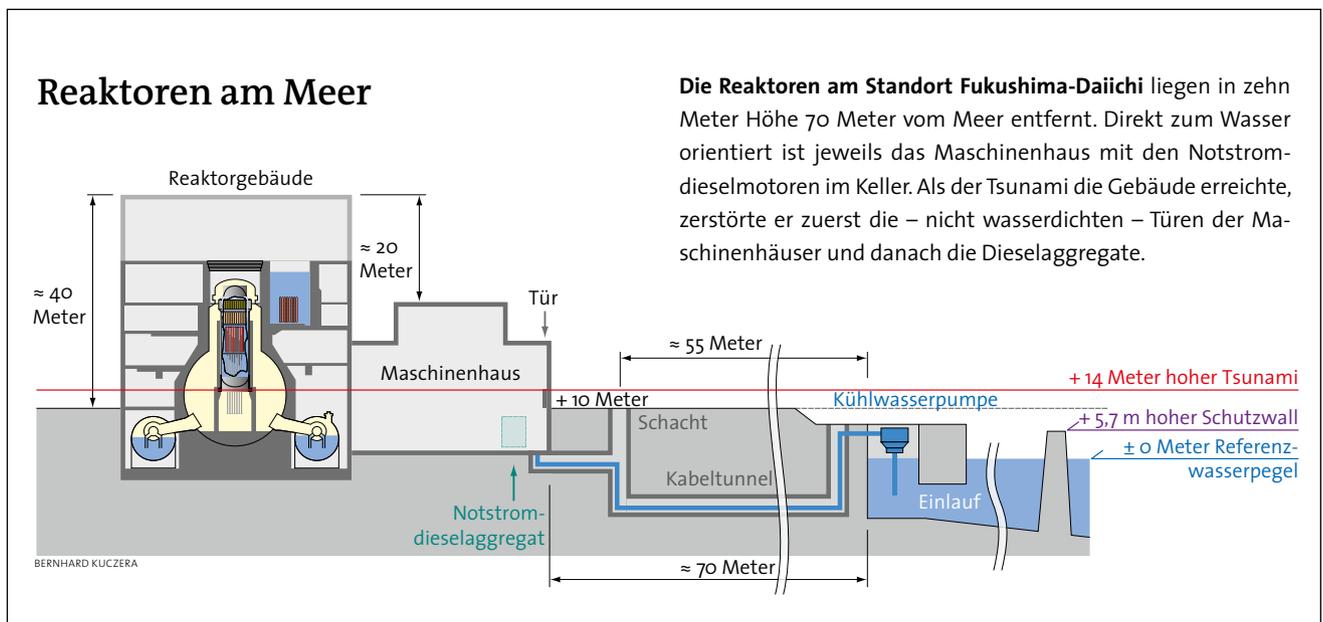
Doch was geschieht, falls es dennoch zu einer Kernschmelze kommt? In Fukushima gelangte aus den Sicherheitsbehältern mindestens der Blöcke 1 bis 3 Wasserstoff in die Reaktorgebäude und führte dort zu den starken Explosionen. Möglicherweise haben die Silikongummi-Flanschdichtungen der Sicherheitsbehälterdeckel den Druckanstieg bis fast zum doppelten Wert, für den sie ausgelegt waren, nicht ausgehalten. In diesem Fall hätte nur die rechtzeitige

Druckentlastung den Austritt des Wasserstoffs verhindern können. In den deutschen Kernkraftwerken sind im Gegensatz zu Fukushima zuverlässige Systeme für eine gezielte, gefilterte Druckentlastung der Sicherheitsbehälter installiert. Die Filter sind so konstruiert, dass sie über 99,9 Prozent der radioaktiven Aerosole und Partikel zurückhalten. Die gefilterte Abluft wird danach über den Kamin weiträumig verdünnt, so dass Auswirkungen auf die Umgebung minimiert werden. Vergleichbare Einrichtungen in Fukushima haben ihre vorgesehene Funktion aus noch nicht vollständig bekannten Gründen nicht erfüllt.

Nochmals die Frage: Warum gab es eine Explosion in Block 4, obwohl doch dessen Reaktor zum Unfallzeitpunkt entladen war? Nach neueren Angaben des Betreibers ist offenbar über gemeinsam genutzte Leitungen aus Block 3 ungeplant Wasserstoff in Block 4 gelangt. Eine solche blockübergreifende Verbindung von Sicherheitssystemen gibt es in vergleichbarer Form in deutschen Anlagen nicht.

Eine der ersten Maßnahmen der japanischen Aufsichtsbehörde nach dem Reaktorunfall bestand darin, für alle japanischen Kernkraftwerke zusätzliche Nachweise zur Beherrschung von Überflutungen zu fordern. Tatsächlich werden derzeit Wasserschutztüren an den sicherheitstechnisch wichtigen Gebäuden nachgerüstet, insbesondere bei Gebäuden, in denen die Notstromdiesel untergebracht sind. Solche Türen hätten in Fukushima-Daiichi die Katastrophe verhindert. Ministerpräsident Naoto Kan hat Ende Mai eingeräumt, dass die Aufsichtsbehörde NISA nicht unabhängig von den Betreibern war, und umfassende organisatorische Gegenmaßnahmen angekündigt.

Gesundheitsschäden durch den Reaktorunfall in Fukushima halten sich zum Glück in Grenzen: So gab es am Kraftwerksstandort Fukushima bisher keine nuklear bedingten Todesfälle, jedoch einen beim Erdbeben ums Leben gekommenen Mitarbeiter (in Daini).



Zwei Menschen ertranken, einer starb an Erschöpfung, etwa 30 wurden verletzt, jedoch traten keine sofortigen und bisher auch praktisch keine Langzeitstrahlenschäden auf. 30 Personen waren maximalen Strahlendosen zwischen 100 und 180 Millisievert ausgesetzt, zwei weitere Arbeiter erhielten bei Aufräumarbeiten Strahlendosen zwischen 180 und 250 Millisievert (Juni 2011). Bei 200 Millisievert erhöht sich das individuelle Langzeitrisiko für Krebs um ein Prozent, das heißt, von 100 Personen mit dieser Dosis wird eine Person zusätzlich langfristig an Krebs erkranken.

Inzwischen liegen hinreichende Informationen für eine Zwischenbilanz vor. Als der entscheidende Faktor für den Unfall in Fukushima-Daiichi kristallisiert sich heraus, dass die Anlagen schlicht nicht gegen große, aber in Japan immer wieder vorkommende Tsunamis ausgelegt waren. Damit fällt die Katastrophe nicht in den Bereich des anlagentechnischen Restrisikos, sondern betrifft die Gestaltung der Basisauslegung. Diese bot gegenüber durchaus absehbaren Einwirkungen von außen kaum Schutz.

Ein großer Tsunami durchschnittlich alle 30 Jahre

Alle betroffenen Kernkraftwerksblöcke an den oben genannten vier japanischen Standorten haben die direkten Bebenwirkungen dank deutlicher Sicherheitsreserven in der Konstruktion relativ unbeschadet überstanden. Die Bodenbeschleunigungen übertrafen die angenommenen Höchstwerte maximal um 25 Prozent, und die Schnellabschaltungen und der Notstrombetrieb haben wie vorgesehen funktioniert. Das war jedoch nur der Fall, bis der Tsunami mit einer Überflutungshöhe von rund vier Metern auf dem Kraftwerksgelände eintraf.

Die Hochwasserauslegung für Fukushima-Daiichi betrug zehn Meter. Im Schnitt trifft alle 30 Jahre ein Tsunami von mindestens zehn Meter Wellenhöhe einen japanischen Küstenabschnitt. Vorsichtige Abschätzungen setzen diesen Wert für Fukushima standortspezifisch bei 100 bis 1000 Jahren an. Tsunamis dieser Art können auch durch wesentlich kleinere Erdbeben als das Seebeben vom 11. März 2011 mit einer Magnitude 9,0 ausgelöst werden, und zwar hinunter bis zu einer Magnitude von 7,4.

Kernkraftwerke in Deutschland sind gegen weit seltenere interne und externe Ereignisse wie das 10 000-jährige Hochwasser (langsam auflaufend) oder das 100 000-jährige Erdbeben für den jeweiligen Standort ausgelegt. Die Anforderungen an die Anlagenauslegungen (etwa die Deichhöhen) sind – im Gegensatz zu Japan – unter Berücksichtigung aller denkbaren Ursachen quantifiziert: Ihre Überschreitung durch extreme Einwirkungen von außen (Naturkatastrophen) oder innen (Komponentenversagen) ist so selten, dass sie dem Restrisikobereich (seltener als einmal in mindestens 100 000 Jahren) zuzuordnen ist. Es gibt somit keinen sicherheitstechnischen Grund, deutsche Kernkraftwerke vorzeitig abzuschalten. Ein Problem stellen jedoch denkbare terroristische Anschläge dar. Die Sicherheitsanalysen hierzu fallen in den Bereich staatlicher Vorsorge (siehe Kasten S. 79). ~

DIE AUTOREN



Von links nach rechts: **Bernhard Kuczera** promovierte 1974 an der TH Karlsruhe auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit und war im ehemaligen Forschungszentrum Karlsruhe (heute: Karlsruher Institut für Technologie, KIT) sowie ab 2001 vier Jahre bei der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) in Wien tätig. **Ludger Mohrbach** studierte Maschinenbau und Reaktortechnik in Bochum und promovierte dort 1989 zur Thermohydraulik des Schnellen Brütters. Heute leitet er bei VGB PowerTech e. V. das Kompetenzzentrum »Kernkraftwerke«. **Walter Tromm** arbeitet seit seinem Maschinenbaustudium an der Technischen Universität Karlsruhe in verschiedenen Positionen am KIT auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit. Seit 2003 arbeitet er dort im Programm Nukleare Sicherheitsforschung und leitet dieses seit 2010. **Joachim Knebel** ist seit 1993 nach einem Maschinenbaustudium in Karlsruhe und anschließender Promotion am KIT tätig. Zunächst leitete er das Programm Nukleare Sicherheitsforschung, danach das Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik. Seit Oktober 2010 ist er Chief Science Officer des KIT.

QUELLEN

- Ehrhardt, J., Weis, A. (Hg.):** RODOS: Decision Support System for Off-Site Nuclear Emergency Management in Europe. Europäische Kommission, Brüssel. Report EUR 19144, 2000
- Kuczera, B.:** Das schwere Tohoku-Seebeben in Japan und die Auswirkungen auf das Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi. In: atw 4/5, S. 234–241, 2011
- Mohrbach, L.:** Unterschiede im gestaffelten Sicherheitskonzept: Vergleich Fukushima Daiichi mit deutschen Anlagen. In: atw 4/5, S. 242–249, 2011: www.vgb.org

LITERATURTIPPS

- IAEA,** IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Nuclear Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami – Preliminary Summary, 24. 5.–1. 6. 2011
- Onishi, N., Glanz, J.:** Japanese Rules for Nuclear Power Plants Relied on Old Science. In: New York Times, 26. März 2011
www.nytimes.com/2011/03/27/world/asia/27nuke.html?_r=1&hp
- RSK-Stellungnahme** (437. RSK-Sitzung): Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan). 11.–14. 5. 2011

WEBLINKS

- www.kit.edu/besuchen/6042.php
Hintergrundinformationen zu Fukushima und den nuklearen Folgen
- www.vgb.org
Präsentationen zum Ablauf in Fukushima und zur »Deutschen Risikostudie Phase B«
- www.spektrumdirekt.de/artikel/1066570
Interview mit Joachim Knebel zur Lage in Fukushima am 16. März 2011
- www.wissenschaft-online.de/artikel/1069213&_z=859070
In diesem zweiten Interview beleuchtete Joachim Knebel die Situation in Fukushima einen Monat später.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/114591

Nanowelt im Röntgenlicht

In Hamburg entsteht die wohl längste Lichtquelle der Welt: ein 3,4 Kilometer langer, unterirdischer Röntgenlaser. Mit Hilfe des European XFEL werden Forscher ab 2015 die Strukturen von Biomolekülen in kürzester Zeit aufklären und chemische Reaktionen live verfolgen können.

Von Gerhard Samulat

Das Experiment erinnert ein wenig an den Comic-Helden Lucky Luke, der den Revolver schneller als sein eigener Schatten zieht. Ein Forscherteam um Henry Chapman vom Hamburger Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) beschießt eine Probe winziger Nanokristalle. Seine »Waffe«: der Freie-Elektronen-Laser LCLS (*Linac Coherent Light Source*) im US-amerikanischen Stanford, der zurzeit leistungsstärkste Röntgenlaser der Welt. Innerhalb einer Pikosekunde (10^{-12} Sekunden) zerplatzen die Moleküle des Photosystem-I-Protein-Komplexes unter den gewaltigen elektromagnetischen Kräften des grellen Lichts. Es ist gut eine Milliarde Mal heller als das herkömmlicher Strahlungsquellen und erhitzt die fragilen Biomoleküle auf Temperaturen, die jene der Sonnenoberfläche um gut das Zehnfache übertreffen.

Rund um die Probe hat Chapmans Team empfindliche Nachweisgeräte angeordnet. Sie registrieren jedes der an den Molekülen gestreuten Photonen. Um die in der Photonen- glut verdampften Nanokristalle zu ersetzen, fällt knapp

2000-mal pro Minute ein weiteres der nur einige hundert milliardstel Meter großen Objekte in den Röntgenstrahl. Mehrere Tage lang erfasst und digitalisiert die Arbeitsgruppe Millionen von Beugungsmustern. Die Datenrate ist höher als die der Teilchenphysikexperimente am Large Hadron Collider LHC in Genf.

Aus über 10 000 der besten Beugungsmuster setzen Chapman und sein Team schließlich ein 3-D-Bild zusammen und vergleichen es mit früheren Ergebnissen anderer Wissenschaftler, die noch mit normaler Röntgenstrahlung arbeiteten. Und tatsächlich: Die Daten ergeben einen perfekten Kristall des für die Fotosynthese so wichtigen Photosystem-I-Protein-Komplexes. Die Ersten, die die Struktur des Moleküls aufklärten, benötigten für diese Arbeit 13 Jahre, die Arbeitsgruppe um Chapman nur wenige Tage. Ein weiterer Vorteil der neuen Technik: Nanokristalle sind viel einfacher herzustellen als die zum Teil 100-mal größeren Proteinkristalle, die für herkömmliche Synchrotronstrahlungsuntersuchungen notwendig sind.

AUF EINEN BLICK

LIVESZENEN AUS DEM REICH DER MOLEKÜLE

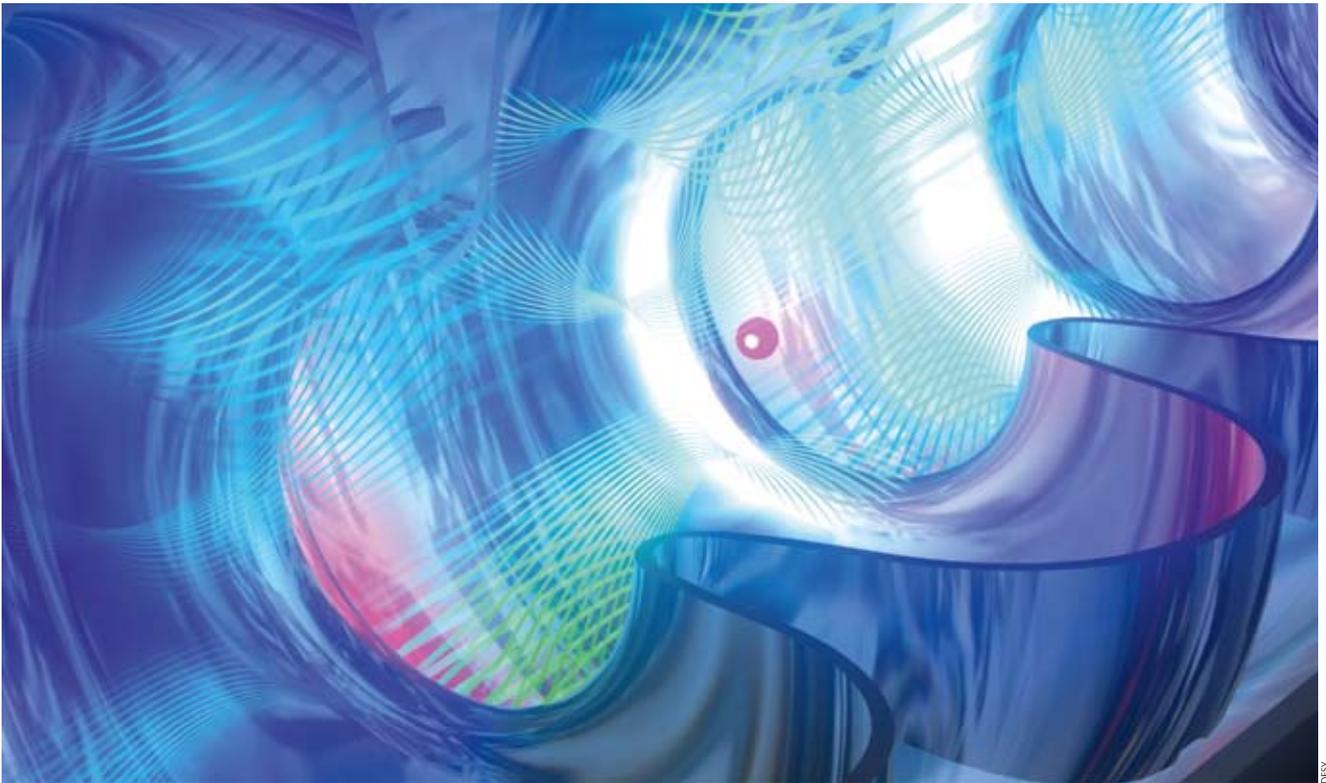
1 Weltweit werden immer mehr Teilchenbeschleuniger statt für Partikelphysik für Forschung mit Photonen eingesetzt, als Lichtquelle quasi. Zu diesem Zweck entsteht auch der **European XFEL** in Hamburg: ein riesiger Freie-Elektronen-Laser, der **Röntgenlicht** abstrahlt.

2 Mit den **energiereichen Photonen** lassen sich beispielsweise die dreidimensionalen Strukturen komplexer Biomoleküle innerhalb weniger Tage aufklären. Früher brauchten Forscher dazu Jahre. Auch kann man mit Röntgenlasern gewissermaßen live verfolgen, wie **chemische Reaktionen** ablaufen oder **Katalysatoren** wirken.

3 Eines Tages, so hoffen die Wissenschaftler, werden sie ihre Untersuchungen auf **lebende Zellen** ausdehnen können.

Vermessen und sofort zerstören

Im Anschluss an seine Proteinuntersuchung gelang dem Forscherteam Anfang dieses Jahres auch die Strukturanalyse des Mimivirus, eines der größten der bekannten Viren. Normalerweise müssen die Forscher ein Biomolekül erst einmal kristallisieren – oft in monate- oder jahrelanger Arbeit –, um seine Struktur mit Beugungsexperimenten untersuchen zu können. In einem Kristall sind nämlich viele Exemplare des Moleküls regelmäßig angeordnet, so dass das Beugungsbild verstärkt wird. Mit ihren Studien am Mimivirus zeigten die Forscherinnen und Forscher um Chapman jedoch, dass leistungsstarke Röntgenlaser den beschwerlichen Umweg über eine Kristallisation komplett überflüssig machen können. Wahrscheinlich lassen sich mit dieser Methode eines Tages sogar lebende Zellen analysieren: Experimentatoren würden dann mit einem einzigen Röntgenblitz eine so hohe In-



tensität auf eine Probe konzentrieren, dass sie deren Struktur komplett analysieren können – obwohl sie praktisch unmittelbar nach dem Auftreffen des Lichts zerstört wird.

Auch aus diesem Grund soll nun ein großer Röntgenlaser errichtet werden. »Die hohe Intensität und Brillanz (siehe Glossar) des European XFEL, der derzeit bei Hamburg gebaut wird, erlauben uns künftig, blitzschnell einzelne Nanoobjekte oder Makromoleküle zu untersuchen«, erklärt Massimo Altarelli, geschäftsführender Direktor der European XFEL GmbH. Der in Rom geborene Physiker besitzt große Erfahrung mit dem Bau von Beschleunigern. Schon als Student beschäftigte er sich mit Röntgenphysik, später arbeitete er am Stuttgarter Max-Planck-Institut für Festkörperforschung. Anschließend war Altarelli Direktor am Hochfeld-Magnetlabor in Grenoble ebenso wie am dortigen ESRF, der europäischen Synchrotronstrahlungsquelle, und am Elettra Synchrotron Light Laboratory im italienischen Triest. Dann rief man ihn für das europäische XFEL-Projekt, das 2015 für die wissenschaftliche Nutzung bereit sein soll, nach Hamburg. »Offenbar gehört es zu meinem Schicksal, den Bau und Betrieb wissenschaftlicher Großgeräte zu organisieren«, sagt Altarelli schmunzelnd.

Typisch für viele große Beschleunigeranlagen auf der Welt ist, dass zunehmend Material- oder Festkörperphysiker wie Altarelli das Sagen haben. Sie drängen die angestammten Teilchenphysiker mehr und mehr in den Hintergrund. Denn neben der strukturellen Biologie – ein sich abzeichnendes Hauptanwendungsgebiet der Röntgenlaser – eignen sich die

2015 soll der Freie-Elektronen-Laser European XFEL bereit sein, seine wissenschaftlichen Aufgaben zu erfüllen. Mit seinem gebündelten Röntgenlicht wollen Forscher atomare Details von Viren und Zellen entschlüsseln und chemische Reaktionen filmen. Bislang mussten solche Proben aufwändig kristallisiert werden. Das Röntgenlicht wird von Elektronen abgestrahlt, die zuvor durch elektromagnetische Felder in Hohlraumresonatoren wie in dieser künstlerischen Darstellung extrem stark beschleunigt werden.

Glossar

► **SYNCHROTRONSTRAHLUNG** entsteht, wenn Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann durch magnetische Felder abgelenkt werden. Wegen relativistischer Effekte senden die Partikel die elektromagnetische Strahlung vorwiegend in Flugrichtung aus. Für den harten Röntgenbereich fehlten den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern bislang aber gute Laserquellen, weil es derzeit keine Spiegel gibt, welche die energiereiche Strahlung ausreichend gut reflektieren könnten. Die Freie-Elektronen-Laser erweitern daher das Spektrum der Forschung mit Synchrotronstrahlung in den harten Röntgenbereich hinein.

► **BRILLANZ** ist ein Maß sowohl für die Anzahl der in einem bestimmten Wellenlängenbereich erzeugten Photonen als auch dafür, wie klein die Lichtquelle ist und wie eng gebündelt der Lichtstrahl ausgesandt wird.

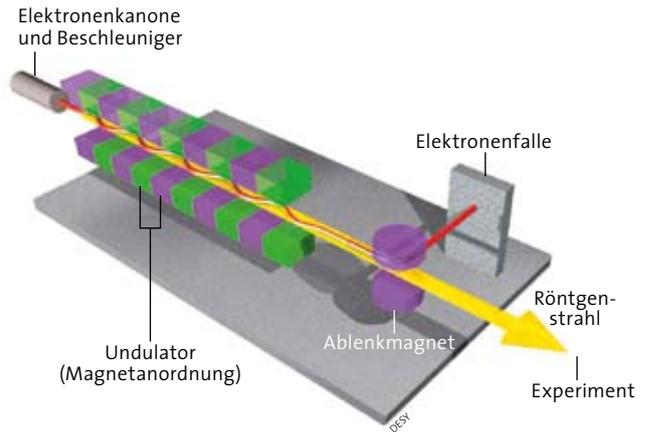
Scheibchenweise Licht

Ein **Freie-Elektronen-Laser** ist ein Lichtverstärker: In ihm werden Elektronen auf hohe Energien beschleunigt und in speziellen Magnetanordnungen – so genannten **Undulatoren** – zum Abstrahlen intensiver Lichtblitze angeregt. Seinen Namen verdankt der Freie-Elektronen-Laser der Tatsache, dass die Licht emittierenden Elektronen nicht an Atome gebunden sind, sondern sich frei bewegen.

Zunächst katapultiert ein Beschleuniger die Ladungsträger auf nahezu Lichtgeschwindigkeit und damit auf hohe Energien. Im Fall des XFEL ist allein der Beschleuniger 2,1 Kilometer lang (siehe Skizze S. 92/93). Danach fliegen die Teilchen in den Undulator hinein. Dort werden sie von einer alternierenden Abfolge magnetischer Nord- und Südpole auf einen Schlingerkurs gebracht (siehe Grafiken), also fortwährend von links nach rechts geschleudert. Wie jede beschleunigte Ladung senden sie dann elektromagnetische Wellen aus.

Der Trick besteht nun darin, dass jedes Elektron mit dem Strahlungsfeld der anderen Ladungsträger wechselwirkt. Dazu stimmen die Beschleunigerexperten die Energie der Elektronen genau auf die magnetischen Eigenschaften des Undulators ab. Die vorher in relativ homogenen Ladungswolken fliegenden Elektronen (fachsprachlich *bunches* oder Pakete genannt) strukturieren sich unter dem Einfluss der von ihnen selbst abgegebenen Strahlung – langsame Elektronen werden beschleunigt, schnelle etwas gebremst.

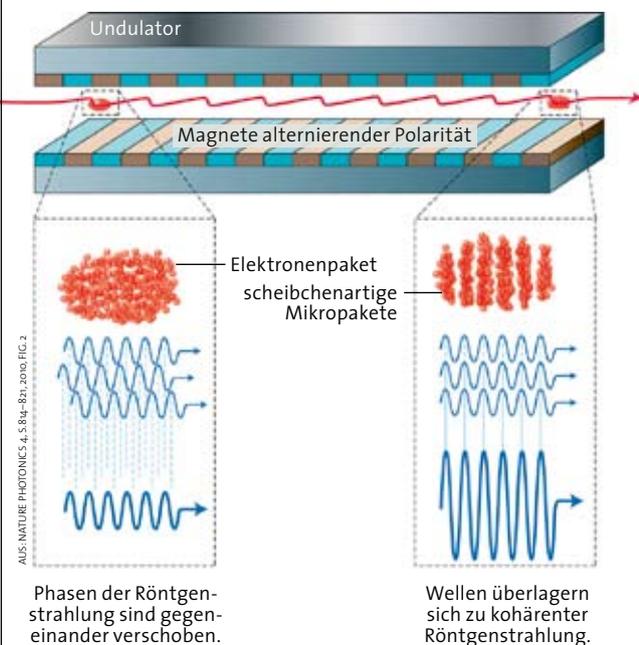
Als Folge davon rücken sie zu scheibchenartigen, kleinen Gruppen zusammen; es bilden sich so genannte Mikropakete aus, deren Abstand genau eine Wellenlänge der Strahlung beträgt. Daher überlagert sich das von ihnen ausgesandte Licht nahezu perfekt zu einem intensiven, laserartigen Blitz. Fach-



Die in einer Elektronenkanone erzeugten Teilchen werden beschleunigt und durch einen Undulator geführt. Dort beginnen sie, Röntgenlicht auszustrahlen – auf Grund von relativistischen Effekten vorwiegend in Vorwärtsrichtung. Anschließend werden die Elektronen durch einen Magneten abgelenkt und »entsorgt«.

leute nennen das Prinzip *SASE*, was für selbstverstärkte spontane Abstrahlung (*self-amplified spontaneous emission*) steht. Damit es in der Praxis funktioniert, müssen die Undulatoren sehr lang sein: Beim Hamburger Flash sind es 30, beim European XFEL bis zu 250 Meter.

Alternativ kann man in einem Verfahren namens *Impfung* oder *Stimulation* (englisch *seeding*) einen Laserstrahl geeigneter Wellenlänge von außen auf die Elektronenpakete schießen und sie so anregen, Mikropakete mit zeitlich präziser Verteilung auszubilden. Das *seeding* soll voraussichtlich am European XFEL, aber auch am Flash sowie etwa am geplanten SwissFEL am schweizerischen Paul Scherrer Institut eingesetzt werden. Am European XFEL ist geplant, dafür sogar einen vorgeschalteten Undulator einzusetzen, um die gewünschten kleinen Wellenlängen zu erreichen.



Tritt ein Bündel Elektronen in den Undulator ein, werden die Teilchen durch die wechselnden Magnetfelder hin- und hergeschleudert und emittieren deshalb Röntgenlicht. Unter dem Einfluss der von ihnen abgegebenen Strahlung strukturieren sie sich allmählich selbst: Sie formen scheibenförmige Mikropakete, die einander in einer Wellenlänge Abstand folgen. Dadurch überlagern sich die von ihnen ausgesandten Wellen zu kohärentem, laserähnlichem Röntgenlicht.

Superlichtquellen ebenso gut zur Untersuchung von Festkörpern oder Oberflächen. Schwerpunkte der Forschung sind Phasenübergänge oder der Ablauf chemischer Reaktionen beispielsweise in der Photochemie oder Katalyse. Schließlich funktionieren die meisten Prozesse, bei denen die Industrie Katalysatoren einsetzt, bislang wie Kochen nach Rezept: Man weiß, was man tun muss, aber nicht unbedingt, warum. »Das ist ein wenig wie Risotto kochen«, erklärt Altarelli. »Wenn man aber versteht, was bei der Katalyse auf atomarer Ebene wirklich passiert, kann man die Reaktionsbeschleuniger gezielt optimieren«, fügt er hinzu. So lässt sich die Energie- und Materialeffizienz von Herstellungs- oder Reinigungsprozessen deutlich erhöhen.

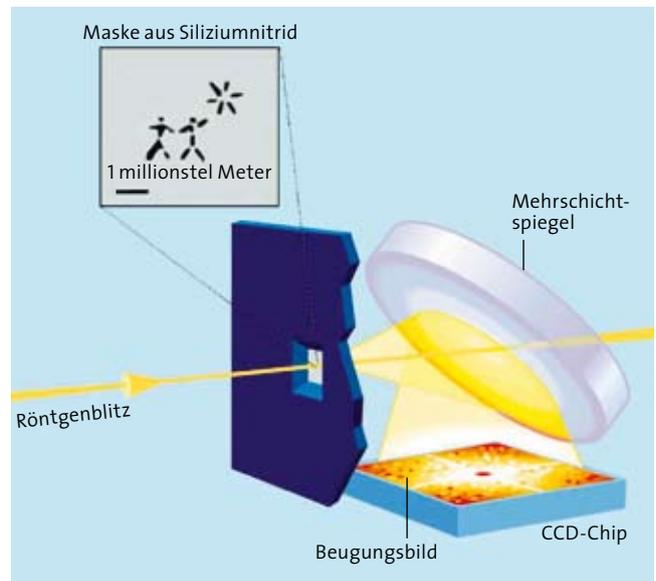
Das sehen nicht nur die Forscher so. Auch die Nachfrage der Industrie wächst, ergänzt Helmut Dosch, Vorsitzender des DESY-Direktoriums (siehe Interview auf S. 92). DESY steht für das ebenfalls bei Hamburg gelegene Forschungszentrum Deutsches Elektronen-Synchrotron. Gemeinsam mit der Max-Planck-Gesellschaft und der Universität Hamburg begründete es das CFEL. Auch DESY-Chef Dosch ist gelernter Festkörperphysiker. »Chemische Reaktionen sind viel komplizierter, als wir an den Universitäten oder Hochschulen lehren«, sagt er. Viele Wissenschaftler sind beispielsweise davon überzeugt, dass die Funktion der Ribosomen, die in Zellen als Eiweißfabriken arbeiten, nicht ausschließlich durch den Aufbau oder die Faltung der Moleküle bestimmt wird. Auch die Dynamik der Ribosomen sei entscheidend. »Diese Vorgänge könnten wir mit dem Röntgenlaser verfolgen«, sagt Altarelli, »und innerhalb weniger Femtosekunden holografische Bilder von diesem Nanokosmos aufnehmen und sie zu einer Art Film kombinieren.« Auf dieser Zeitskala – eine Femtosekunde ist eine milliardstel Sekunde – laufen die meisten chemischen Reaktionen ab.

Harte Röntgenstrahlung höchster Qualität

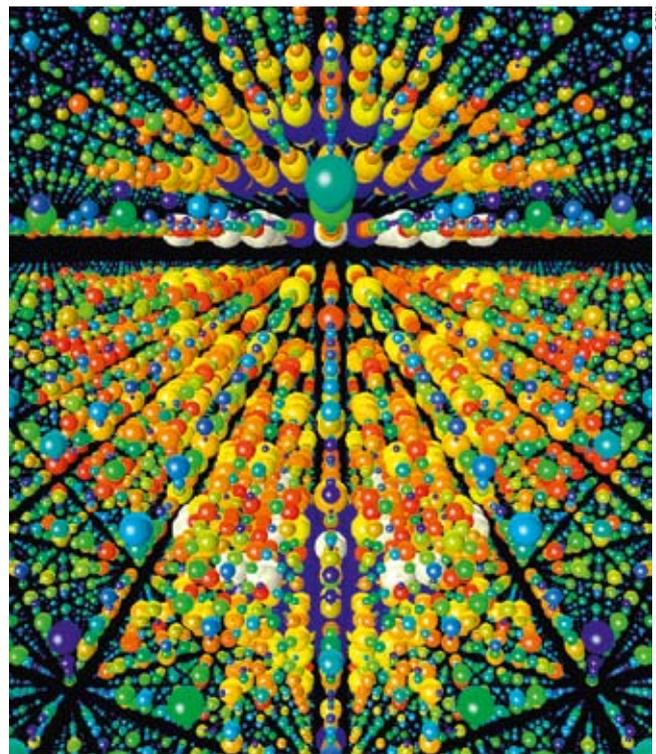
Mit dem Beschleuniger Flash besitzt das DESY zwar bereits einen Freie-Elektronen-Laser, der wie auch der künftige European XFEL mit supraleitender Technik arbeitet. Doch ist er zu klein, um die notwendigen kurzen Wellenlängen von unter einem Nanometer (milliardstel Meter) zu erreichen. Gleichwohl konnten die Forscher mit ihm wichtige Erkenntnisse sammeln: »Beim European XFEL entsteht die extrem energiereiche harte Röntgenstrahlung, bei Flash weiche«, erläutert Altarelli. »Die Anwendungsgebiete ergänzen sich daher.«

Mit PETRA III und DORIS III verfügt das DESY auch über zwei Kreisbeschleuniger, die ebenfalls Synchrotronstrahlung im Röntgenbereich aussenden. »Die haben aber nicht die notwendige Intensität und Zeitauflösung, um schnelle chemische oder biologische Vorgänge sichtbar zu machen«, sagt der Italiener. Die Pulsdauern in einem Synchrotron liegen typischerweise bei 20 bis 50 Pikosekunden (billionstel Sekunden) und sind damit rund 1000-mal länger als beim XFEL.

Ursprünglich waren die Kreisbeschleuniger für Teilchenphysiker gebaut worden. Mit ihrer Hilfe entdeckten die For-



Beugungsaufnahmen im Röntgenlicht funktionieren nach einem einfachen Prinzip. Ein Röntgenblitz trifft auf eine Probe. In der Grafik ist das eine Maske aus Siliziumnitrid, auf der Muster eingraviert sind. Das daran gestreute Licht wird durch einen Spiegel auf einen digitalen »Film« umgelenkt, einen CCD-Chip. Ein Algorithmus rekonstruiert aus den dort erfassten Daten die ursprüngliche Grafik, die durch den intensiven Röntgenstrahl binnen einer tausendstel Nanosekunde zerstört wird.



3-D-Darstellung der Beugungsbilder, die ein Team um CFEL-Forscher Chapman von rund 15 000 Nanokristallen ermittelte. Zwar wurden die Kristalle durch den Röntgenlaserblitz zerstört, ihre Struktur konnte aber zuvor vermessen werden. Größe und Farbe der Kugeln geben die Streuintensität am jeweiligen Ort wieder.

scher exotische Elementarteilchen und analysierten die zwischen ihnen wirkenden Kräfte. Nach mehreren Umbauten dienen die Geräte jetzt aber ausschließlich der Forschung mit der von ihnen emittierten Synchrotronstrahlung. Sie sind ein Musterbeispiel für die Metamorphose des DESY: Das internationale Zentrum der Teilchenphysik wird in diesen Jahren zu einer Photonenfabrik, zu einem Dienstleistungszentrum für eine große wissenschaftliche Gemeinde aus Forscherinnen und Forschern so verschiedener Disziplinen wie der Physik, Chemie, Biologie oder Medizin. Selbst Geologen und Planetenforscher arbeiten hier, denn mit Hilfe von Röntgenstrahlung lässt sich auch analysieren, wie sich Materie unter extremen Drücken und bei hohen Temperaturen wie im Inneren der Erde oder bei der Entstehung von Planeten verhält.

»Die Röntgenlaser werden die Synchrotrone trotzdem nicht überflüssig machen«, betont Altarelli. »Für viele Forschungsfragen sind diese sogar besser geeignet.« Der Rönt-

gen-XFEL entspreche einem Formel-1-Ferrari, während die Synchrotrone eher für Pkw oder Motorräder der Oberklasse stehen. Das heißt aber auch: »Jedes Instrument hat seine eigenen Anwendungsgebiete.« Der European XFEL wird nach seiner Fertigstellung bis zu 27 000 ultrakurze Röntgenblitze pro Sekunde erzeugen – gegenüber 120 Blitzen pro Sekunde am US-Beschleuniger in Stanford. Jeder davon ist milliardenfach heller als die Blitze aus den besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art. Dazu katapultieren 800 supraleitende Hohlraumresonatoren die Elektronen auf eine Energie von 17,5 Milliarden Elektronvolt (GeV), bevor sie in so genannten Undulatoren von starken Magnetfeldern systematisch hin- und hergeschleudert werden. Erst hier geben sie die laserartigen Röntgenpulse ab (siehe Kasten S. 88).

»Wir starten zwar später als die Anlagen in den Vereinigten Staaten oder in Japan, können aber extrem viele Pulse pro Sekunde erzeugen«, resümiert Altarelli. Wie auch Henry Chapmans Arbeiten zeigen, die auf Millionen von Bildern

Von der Elektronenkanone in den Beschleuniger

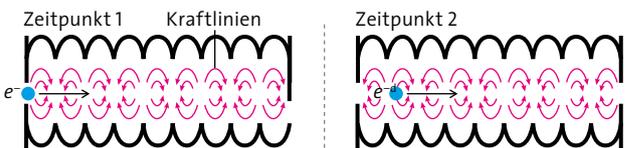
Die Güte des Röntgenstrahls steht und fällt mit der Elektronenkanone, die ganz am Anfang seiner Erzeugung steht. Am Beispiel vom DESY-Laser Flash funktioniert das so: Ein ultraschneller ultravioletter Laserblitz schlägt eine Wolke aus Milliarden von Elektronen aus einer Fotokathode aus Zäsium-Tellurid. Die Kunst dabei: Die Wolke muss einen möglichst kleinen Durchmesser besitzen sowie eine extrem hohe Dichte.

Damit die Ladungsträger wegen ihrer gleichnamigen Ladung nicht sofort wieder auseinanderlaufen, beschleunigen die Maschinenphysiker die Elektronen nun so schnell wie möglich auf Geschwindigkeiten nahe der des Lichts. Denn nach den Gesetzen der Relativitätstheorie stoßen sich die Ladungsträger dann nicht mehr so stark gegenseitig ab. Unmittelbar hinter der Elektronenkanone von Flash befindet sich daher ein Beschleunigerelement: ein kleiner, normalleitender Hohlraumresonator aus Kupfer, an dem eine Wechselspannung anliegt. Er arbeitet mit einer gepulsten Leistung von fünf Millionen Watt, die in jeweils wenigen Millisekunden freigesetzt wird. Dadurch erzeugt er Feldstärken von 40 bis 50 Megavolt pro Meter. In dem Resonator bilden sich daraufhin stehende Mikrowellen aus, deren Phasen so auf die Elektronenwolken abgestimmt sind, dass die Teilchen eine starke Beschleunigung in Vorwärtsrichtung erfahren. Ein Magnetfeld fokussiert die Elektronenpakete noch. So entsteht ein aus vielen Paketen zusammengesetzter Elektronenstrahl mit außerordentlich hoher Qualität.

Der Resonator wird auch deshalb gepulst betrieben, damit er nicht überhitzt und dadurch seine Eigenfrequenz verändert. Dann wäre er »verstimmt« und würde nicht mehr synchron mit dem Teilchenbeschleuniger arbeiten.

Beim European XFEL mit seinen supraleitenden Beschleunigungselementen besitzen die Mikrowellen eine Frequenz von 1,3 Gigahertz, was einer Wellenlänge von etwa 23 Zentimetern

Über 800 so genannte Hohlraumresonatoren (rechts), jeweils gut einen Meter lang und aus neun Einzelzellen bestehend, werden zusammenschaltet, um die Elektronen auf Trab zu bringen. Längs der Achse des Moduls schwingen stehende Mikrowellen, auf denen die Ladungsträger »reiten« und so Energie gewinnen.



Die stehenden Wellen in den Resonatoren sind genau so abgestimmt, dass die Elektronen stets beschleunigt werden (Grafik links). Bevor sich die Polarität der Welle umkehrt und bremsend wirken würde, treten die Teilchen bereits in die nächste Zelle ein (rechts), wo sie wiederum beschleunigt werden.

entspricht. Ausgelegt sind sie für Feldstärken um 24 Megavolt pro Meter. Allerdings haben sie noch Spielraum nach oben, verrät Hans Weise, Leiter eines Teilprojekts des Vorhabens. Die Resonatoren bestehen aus Niob. Kühlt man das silberglänzende Metall auf minus 271 Grad Celsius ab – das sind zwei Kelvin oberhalb des absoluten Nullpunkts –, verliert es seinen elektrischen Widerstand, es wird supraleitend. Weil der Strom nun verlustfrei fließt, kann praktisch die gesamte elektrische Leistung von den Mikrowellen auf die Teilchen übertragen werden.

beruhen, ist das gerade für die Analyse von Nanokristallen wichtig. »Hier werden Dinge machbar, die anderswo nicht durchführbar sind«, ist sich der European-XFEL-Chef sicher. Zwar werden weitere Nationen nachziehen, »doch Konkurrenz belebt auch die Wissenschaft«, sagt Altarelli und lächelt selbstbewusst. Mit Recht: Schon an den Synchrotronstrahlungsquellen des DESY sind die Messplätze doppelt und dreifach überbucht.

Aus Kostengründen wird der europäische Röntgenlaser, der jährlich rund 4000 Stunden in Betrieb sein soll, zunächst als Basisversion mit drei Undulatoren gebaut. Trotzdem bohren die Ingenieure bereits Tunnel für insgesamt fünf dieser Anordnungen von Dipolmagneten. »Das kann man später nicht mehr nachholen«, erläutert Altarelli und ergänzt: »In einem späteren Stadium werden wir wahrscheinlich auch versuchen, die Wellenlänge der Röntgenstrahlung weiter zu verkleinern.« Nach Erfahrungen an der LCLS in Stanford ist die Beschleunigermannschaft ziemlich sicher, die Auflösung ohne große technische Anstrengungen und ohne weitere Finanzmittel auf ein halbes Ångström senken zu können – auf 0,05 Nanometer. Das entspricht etwa der Hälfte eines Atomdurchmessers.

Auch für das Platzproblem am European XFEL haben die Forscherinnen und Forscher Lösungen. An Kreisbeschleunigern können mehrere Experimente zur gleichen Zeit stattfinden, weil die Strahlung den Beschleunigerring überall tangential verlässt. Doch das Hamburger Instrument verläuft geradlinig. Magnetische Weichen (siehe auch Skizze S. 92/93) sorgen daher künftig dafür, dass bereits die Elektronenpakete innerhalb von Sekundenbruchteilen auf mehrere Undulatoren verteilt werden. »Wir gehen davon aus, dass wir anfänglich drei Experimente zur gleichen Zeit laufen lassen können«, kalkuliert Altarelli, später werden es vielleicht sechs sein. Die Weichenstellung soll nach jeweils 2700 Pulsen erfolgen, die ihrerseits je einen Abstand von etwa 220 Nanosekunden (milliardstel Sekunden) haben.

Optimierung kurz vor Schluss

Die Techniker überlegen auch, den Laserprozess im Undulator durch so genanntes *seeding* mit Licht einer bestimmten Wellenlänge gezielt anzuregen (siehe Kasten S. 88). Ein Femtosekunden-Titan-Saphir-Laser, wie er für eine Ausbaustufe von Flash vorgesehen ist, kommt dafür aber nicht in Frage: Dessen Wellenlänge wäre noch zu groß. Die benötigte Strahlung will die Beschleunigermannschaft daher aus dem Spektrum herausfiltern, das sie in einem weiteren Undulator erzeugt. Vorher will man das Verfahren aber in Stanford ausprobieren. Falls sich der Plan als so einfach herausstellt, wie ihn Techniker und Theoretiker erdacht haben, wird das Gerät dann wohl auch gleich in den European XFEL eingebaut.

So oder so: Ab 2015 werden die Forscher den Nanokosmos im Röntgenlicht studieren. Dank ihres neuen Handwerkszeugs, des European XFEL, werden sie das präziser tun können als je zuvor. Und vor allem werden sie viele unserer Wissenslücken in geradezu rasantem Tempo schließen können. ☞

Die Lichtquellen der Zukunft

Die Idee zum Bau eines Freie-Elektronen-Lasers (FEL) stammt aus den späten 1960er Jahren. 1976 entwickelte der US-Physiker John M.J. Madey mit Kollegen an der kalifornischen Stanford University das erste Exemplar. Das Sase-Prinzip (siehe Kasten S. 88) diskutierten zum ersten Mal die russischen Physiker Anatoli M. Kondratenko und Evgeni L. Saldin. Saldin erprobt seine Theorie seit 1995 an der Tesla-Testanlage des DESY, aus welcher sich mittlerweile der heutige Flash-Beschleuniger entwickelt hat.

Weltweit sind etwa zwei Dutzend FEL in Betrieb, weitere befinden sich in Bau oder Planung. Sie sind meist auf bestimmte Wellenlängen optimiert. So arbeiten die beiden FEL am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf im mittleren bis fernen Infrarot (mit Wellenlängen von 4 bis 250 Mikrometern), Flash am DESY hingegen im Ultraviolett sowie im weichen Röntgenspektrum (mit Wellenlängen von 4 bis 30 Nanometern). Die mit 0,15 Nanometer zurzeit kurzwelligste Strahlung erzeugt die Linac Coherent Light Source (LCLS) in Stanford.

Künftige FEL werden ihre Vorgänger unter anderem an Brillanz, der Zahl der Blitze pro Zeiteinheit und anderen Parametern weit übertreffen. Die Wellenlängen ihres Lichts reicht bis hinab zu 0,1 Nanometern. Zu diesen als Röntgenlasern bezeichneten Geräten gehört der bereits eingeweihte SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser am japanischen Beschleunigerzentrum SPring-8 nahe Osaka, der im Bau befindliche European XFEL bei Hamburg sowie der geplante SwissFEL am Paul Scherrer Institut in der Schweiz.

DER AUTOR



Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

QUELLEN

Chapman, H.N. et al.: Femtosecond X-Ray Protein Nanocrystallography. In: Nature 470, S. 73–77, 3. Februar 2011
Tschentscher, T. et al.: Bewegte Bilder aus dem Nanokosmos. Der Freie-Elektronen-Laser European XFEL. In: Physik in unserer Zeit 41, S. 64–69, März 2010

WEBLINKS

www.xfel.eu/ueberblick/im_vergleich

Der European XFEL im internationalen Vergleich mit LCLS (Stanford, USA) und SPring-8 FEL (nahe Osaka, Japan)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/114592

Zukunftsbaustelle Photonenfabrik

Helmut Dosch ist Chef des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY), der Heimat des im Bau befindlichen Lasers European XFEL. Mit Gerhard Samulat und Reinhard Breuer sprach er über die Aussichten, die sich durch die Umwandlung des Hamburger Beschleunigerzentrums in eine »Fabrik« für Synchrotronstrahlung eröffnen.

Spektrum der Wissenschaft: Wir sitzen hier in dem deutschen Forschungsinstitut für Teilchenphysik, und kaum jemand redet noch über Quarks und Co. Wie kommt's?

HELMUT DOSCH: Nach wie vor ist das DESY eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren. Wir nutzen die Maschinen jetzt aber vorwiegend, um hochbrillante Röntgenstrahlung zu erzeugen. Anfänglich galt diese nur als Abfallprodukt, das beim Beschleunigerbetrieb anfällt. Doch wir experimentieren damit bereits seit den 1960er Jahren; schon damals war das DESY einer der Pioniere auf diesem Gebiet.

Was ist so interessant daran?

DOSCH: Mit der so genannten Synchrotronstrahlung können wir vorzüglich die molekularen Strukturen und Funktionen von Materie analysieren. Um etwa den Wirkmechanismus von Medikamenten auf molekularer Ebene zu verstehen, braucht es hochauflösende Bilder aus dem Nanokosmos. Das funktioniert nur mit einer Lichtquelle, deren Wellenlänge vergleichbar ist mit den Abständen zwischen den Atomen in einem Molekül. Röntgenlaser erfüllen diese Bedingung.

Gibt es nicht bereits genug ähnliche Strahlungsquellen? Viele Teilchenforschungszentren bauen ihre Beschleuniger ebenfalls nach und nach zu so genannten Photonenfabriken um. Zudem werden neue Instrumente in Betrieb genommen.

DOSCH: Das zeigt, wie gewaltig der Bedarf ist. Hier beim DESY sind die Experimentierplätze kontinuierlich ausgebucht. Höchstens die Hälfte der Wissenschaftler, die bei uns anfragen, bekommen die gewünschten Messzeiten, und alle durchlaufen zuvor ein strenges Gutachterverfahren.

Mussten Sie sich nicht eher gezwungenermaßen der Photonophysik zuwenden? Schließlich dominiert in der exper-

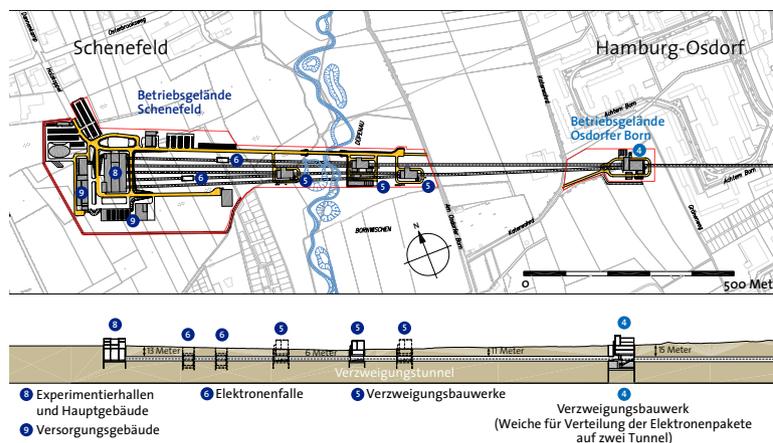
imentellen Teilchenphysik derzeit der Beschleuniger LHC, den das Forschungszentrum CERN bei Genf errichtet hat.

DOSCH: Die Forschung mit Synchrotronstrahlung ist beim DESY seit den 1960er Jahren systematisch entwickelt und ausgebaut worden. Spätestens seit Mitte der 1980er Jahre trafen sich Teilchen- und Photonenforschung hier auf Augenhöhe. Dies war, wenn Sie so wollen, das Resultat der visionären Weitsicht meiner Amtsvorgänger.

Heute ist die Forschung mit Synchrotronstrahlung und Röntgenlasern in der Tat zur Zukunftsmission des Forschungszentrums geworden. Geräte wie den LHC, für den ganz Europa die Verantwortung trägt, kann sich kein Land mehr allein leisten. Viele DESY-Forscher sind daher intensiv an den CERN-Experimenten beteiligt. Aber auch der XFEL ist ein europäisches Milliarden-Euro-Projekt.

In der Teilchenphysik arbeitet man vorzugsweise mit Kreisbeschleunigern. Hier beim DESY hatten Sie mit PETRA und

»Forschung mit Synchrotronstrahlung ist unsere Zukunftsmission«





INGO BOELTER

Helmut Dosch ist von Haus aus Festkörperphysiker. Bevor er 2009 Vorsitzender des DESY-Direktoriums wurde, war er lange Zeit Direktor am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart. Seine Forschungsarbeiten unter anderem über Strukturen der Materie im Nanometerbereich hatten ihn bereits an verschiedene europäische Teilchenbeschleuniger geführt.

HERA ebenfalls sehr erfolgreiche Maschinen dieses Typs. Wieso setzen Sie bei Röntgenlasern nun auf Linearbeschleuniger?

DOSCH: In einem Kreisbeschleuniger beeinflussen sich die abgestrahlten Photonen und die beschleunigten Elektronen gegenseitig. Das ist für Teilchenphysiker kein Problem. Da kommt es im Wesentlichen auf die Energie der Teilchen an. Synchrotronlicht verliert durch diesen Effekt jedoch an Brillanz. Vor zehn oder mehr Jahren störte das die Experimentatoren noch nicht. Heute sind ihre Ansprüche gestiegen.

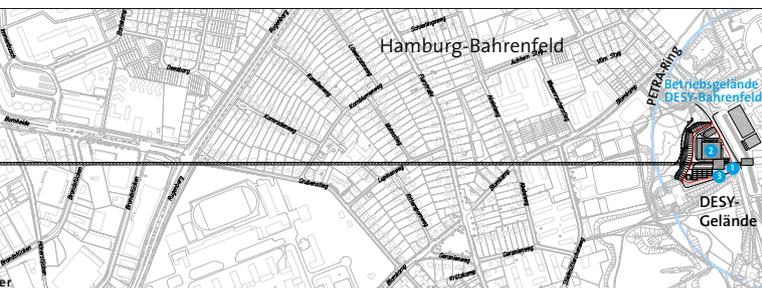
Diesen negativen Einfluss auf die Strahlung gibt es bei Linearbeschleunigern praktisch nicht. Mit ihnen kann man deshalb Licht sehr kleiner Wellenlänge und hoher Güte erzeugen. Der XFEL-Beschleuniger arbeitet zweistufig. Erst beschleunigt er die Elektronen bis fast auf Lichtgeschwindigkeit. Wenn die Teilchen dann hochrelativistische Energien besitzen – bei dem hier geplanten Röntgenlaser sind das über 17 Gigaelektronvolt –, gelangen sie in bis zu 250 Meter lange Magnetstrukturen. Diese Undulatoren sind Ketten von abwechselnd angeordneten Dipolen. Sie zwingen die Elektronen zu einer Art Schlangelbewegung, so dass sie Strahlung aussenden.

Wegen ihrer relativistischen Geschwindigkeit laufen die Elektronen in den Undulatoren zudem mit ihrem eigenen Licht mit. Dessen elektrisches Feld wirkt auf die Ladungsträger zurück. Dadurch entstehen in den Ladungswolken Unterstrukturen, deren Abstände der Wellenlänge des Strahlungsfelds entsprechen. Die Elektronen laufen nach kurzer Zeit im Gleichtakt, und die von ihnen abgegebene Strahlung überlagert sich kohärent – das ist die Bedingung für die Entstehung von Laserlicht.

Wieso baut das DESY eigentlich als einzige der großen Forschungseinrichtungen Beschleuniger in supraleitender Technik? Kann es da nicht zu ähnlichen Unfällen kommen wie beim LHC?

DOSCH: Mittlerweile ist die Supraleitung eine etablierte Technologie. Das Problem beim LHC war wohl eher ein handwerklicher Fehler eines Unterauftragnehmers. So etwas kann bei uns aber schon deshalb nicht vorkommen, weil wir nicht mit so hohen Strömen arbeiten wie der LHC.

Obwohl die supraleitenden Komponenten etwas teurer sind als die normaleitenden, nutzen wir sie unter anderem, weil sie im Betrieb weniger Energie vergeuden. Neuland ist jedoch, dass wir für den XFEL nicht wie bei HERA oder dem LHC supraleitende Ablenkmagnete nutzen. Diese Magnete spielen beim Linearbeschleuniger sowieso keine große Rolle. Bei uns sind stattdessen die Beschleunigungseinheiten supraleitend. Damit erreichen wir bei Hochspannungsfrequenzen von 1,3 Gigahertz Beschleunigungsspannungen von etwa 30 Milliarden Volt pro Meter.



Die 3,4 Kilometer lange Anlage des Röntgenlasers erstreckt sich vom DESY-Gelände bis in die schleswig-holsteinische Stadt Schenefeld. Die untere Grafik deutet den Verlauf des Höhenprofils an.



DESY-Direktoriumsvorsitzender Helmut Dosch (Mitte) mit Reinhard Breuer (rechts) und Gerhard Samulat. Im Hintergrund: eine der Hallen des Freie-Elektronen-Lasers Flash, der bereits seit 2005 im Frequenzbereich des weichen Röntgenlichts arbeitet

Warum arbeiten Amerikaner und Japaner dann mit normalleitenden Beschleunigern?

DOSCH: Die Freie-Elektronen-Laser sind eine noch sehr neue, unerforschte Technologie. Die zukunftsreichste Bauweise kennen wir noch nicht. Die Japaner bauen beispielsweise alles sehr kompakt, bei ihnen befindet sich selbst der Undulator im Vakuum. Dadurch sind sie aber weniger flexibel, wenn sie etwas umbauen müssen. Stanford nutzt dagegen die normale Technik, weil der Beschleuniger schon zuvor existierte. In Berkeley, ebenfalls in Kalifornien, wollen die Amerikaner nun aber eine Art *Valley of Light* – ein Tal des Lichts – etablieren. Dort soll ein Freie-Elektronen-Laser für weiche Röntgenstrahlung errichtet werden, der ebenfalls über supraleitende Bauteile verfügt.

Ein entscheidender Vorteil der supraleitenden Technik ist zumindest, dass wir extrem viele Röntgenblitze in kurzer Zeit erzeugen können. Das ist etwa dann wichtig, wenn Sie Reaktionen in wässrigen Lösungen verfolgen wollen. Wenn Sie nur jede hundertstel Sekunde einen Impuls bekommen – wie in Stanford oder Japan – statt nahezu 30 000 pro Sekunde wie beim European XFEL, dann dauern die Experimente entsprechend länger. Daher wage ich zu prognostizieren, dass wir hier in Hamburg mit unserer supraleitenden Technik garantiert einige Früchte ernten werden, an die andere nicht so schnell oder gar nicht herankommen.

Wie könnte ein solcher »Obstkorb« denn aussehen?

DOSCH: Nachdem wir im letzten Jahrhundert ausschließlich Kristalle oder Phasendiagramme im Gleichgewicht analysieren konnten, wollen wir nun die komplexe Welt der Unordnung erschließen, die Welt der Ungleichgewichte, also die lebende Welt. Wenn Sie beispielsweise etwas in einem Phasen-

diagramm sehen, dann können Sie sagen: Das ist tot. Denn das Diagramm stellt ein Gleichgewicht dar. Nur was nicht im Gleichgewicht ist, lebt. Davon verstehen wir aber noch viel zu wenig.

In der Zukunft werden wir beliebige Materialien mit solcher Raffinesse analysieren, wie uns dies heute nur mit kristallinen Proben gelingt. Ein Beispiel: Wir verstehen jedes Detail von Eis; aber von Wasser verstehen wir nahezu nichts. Wir stehen praktisch vor der gleichen Herausforderung wie Max von Laue vor gut 100 Jahren, als er die ersten Beugungsmuster von Kristallen sah. Wir müssen jetzt versuchen, schneller zu »fotografieren«, als sich die Moleküle bewegen. Für die Dynamik von Substanzen ist eine Zeitskala um die 50 bis 100 Femtosekunden typisch, und das liegt im zeitlichen Auflösungsvermögen der Röntgenlaser.

Wenn Sie mit harter Röntgenstrahlung auf empfindliche Moleküle schießen, gehen die aber doch kaputt.

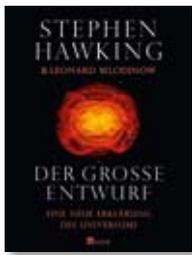
DOSCH: Allein sie zu treffen, ist schon nicht trivial. Wenn das Molekül dann aber tatsächlich von zehn Milliarden Photonen gleichzeitig bombardiert wird, zerlegt es sich in der Tat. Das Spiel heißt, schneller zu fotografieren als zu zerstören. Unsere Vision lautet: Wir wollen mit einem einzigen Schuss eine Strukturanalyse machen. Es gibt Versuche, die zeigen, dass man das schafft, und ich glaube, wir stehen damit am Beginn einer neuen Ära. Mit dieser und weiteren Techniken können wir dann im Prinzip einen Film einer molekularen oder chemischen Reaktion aufnehmen und genau schauen, wie die abläuft. Hierüber weiß man heute noch sehr wenig. Wenn Sie zum Beispiel Wasserstoff und Sauerstoff miteinander reagieren lassen, dann macht es einen Knall und Sie haben Wasser. Aber kein Mensch kann sagen, was in der Zwischenzeit passiert. Das Gleiche gilt bei Festkörperreaktionen oder Phasenübergängen. Schon durch simples Abkühlen verlassen Sie das bekannte Phasendiagramm. Was da genau passiert, wissen wir nicht! Die Industrie kommt schon jetzt auf uns zu und will wissen, wie die atomaren Prozesse im Zusammenhang mit Medikamenten oder Katalysatoren ablaufen. Denn nur dann kann sie ihre Materialien verbessern. Doch chemische Reaktionen sind viel komplizierter, als wir das selbst an den Hochschulen lehren.

Stört es Sie nicht, dass die Beschleuniger quasi zu Hilfsgeräten verkommen und andere den Ruhm ernten?

DOSCH: Synchrotronstrahlungsquellen waren schon immer Werkzeuge. Aber wir können mit ihnen wichtige wissenschaftliche Fragestellungen rund um neue Energien, Medikamente und anderes bearbeiten. Das ist die Aufgabe, die ein Labor wie das DESY erfüllen muss. Diesen gesellschaftlichen Auftrag nehmen wir gerne an. ~

Die Fragen stellten **Reinhard Breuer** von »Spektrum der Wissenschaft« und **Gerhard Samulat**, freier Journalist für Wissenschaft und Technik aus Wiesbaden.

»Wir wollen die Struktur von Molekülen mit einem einzigen Schuss analysieren«



Stephen Hawking, Leonard Mlodinow
Der große Entwurf
Eine neue Erklärung des Universums
Aus dem Englischen von Hainer Kober.
Rowohlt, Reinbek 2010. 190 S., € 24,95

THEORETISCHE PHYSIK

Stephen Hawking geht aufs Ganze

Ungeduldig nimmt er die Theorie von Allem vorweg.

Niemand verkörpert die theoretische Physik so sinnfällig wie Stephen Hawking. Obwohl sein Leib durch eine unheilbar fortschreitende Krankheit zu fast völliger Bewegungslosigkeit verurteilt ist, bleibt sein Geist unermüdlich regsam. Mit den Pupillen steuert er einen Sprachcomputer, dessen Automatenstimme stets originelle und oft witzige Sätze zu Grenzfragen der modernen Physik äußert. Hawkings bahnbrechende Beiträge zur Theorie Schwarzer Löcher garantieren ihm einen Platz im Pantheon der Physik neben Isaac Newton und Albert Einstein. Und obendrein hat er mit »Eine kurze Geschichte der Zeit« 1988 das wohl erfolgreichste populärwissenschaftliche Buch seit Menschengedenken verfasst.

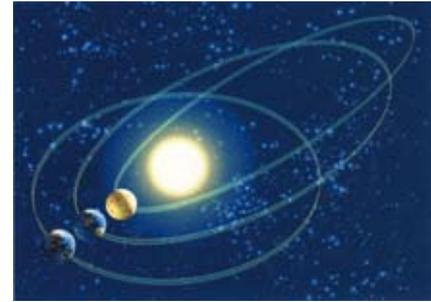
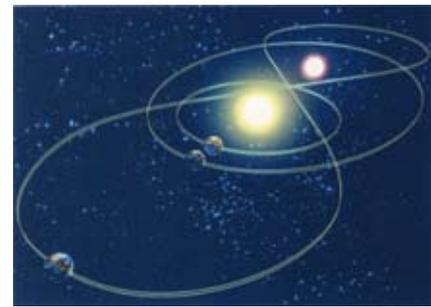
Schon damals behauptete Hawking, die endgültige Theorie von Allem stehe kurz bevor. Es sei nur eine Frage weniger Jahre oder Jahrzehnte, bis die Vereinigung sämtlicher Naturkräfte in Gestalt eines mathematischen Formelgebäudes gelingen würde. In seinem neuen Buch skizziert der Theoretiker nun die Umrisse dieser universellen Welterklärung. Dabei erweckt er den Eindruck, das Gebäude sei so gut wie fertig und an der Skizzenhaftigkeit seiner Darstellung sei nur die Schwierigkeit schuld, mathematische Konzepte umgangssprachlich zu umschreiben.

Hawking unterschlägt freilich, dass der »große Entwurf« bis auf Weiteres pure Theorie bleibt, das heißt eine Umrisszeichnung ohne empirisch gesichertes Fundament. Und sogar als reine

Theorie ist diese »neue Erklärung des Universums« mehr als lückenhaft. Die für Kosmologen peinliche Tatsache, dass das Universum zu 95 Prozent aus unbekannter – »Dunkler« – Materie und Energie besteht, erwähnt Hawking mit keinem Wort.

Auch verschweigt er ein fundamentales Problem der Grundlagenphysik: Die von ihm favorisierte Stringtheorie wird zwar möglicherweise die Große Vereinigung der Teilchenphysik zu Wege bringen, indem alle Partikel als Schwingungen winziger Saiten (*strings*) erscheinen, aber damit ist die Theorie von Allem kein Stück näher gerückt. Denn dafür müsste auch die Gravitation eingebaut werden; doch deren Theorie – Einsteins allgemeine Relativitätstheorie – sträubt sich hartnäckig gegen eine Formulierung, bei der sich Gravitationsquanten in einem festen mehrdimensionalen Raumzeitgerüst bewegen, wie das die Stringtheorie vorsieht. Vielmehr krümmt die Materie die Raumzeit, die ihrerseits die Bewegungen der Materie bestimmt; in den Stringtheorien gibt es nichts dergleichen.

Zwar existiert – wiederum nur in Umrissen – ein mit der Stringtheorie konkurrierender Ansatz, der die Theorie von Allem über eine Quantentheorie der relativistischen Raumzeit anstrebt, doch diese »Schleifen-Quantengravitation« ist mathematisch ungeheuer schwer zu bändigen, vor allem wenn man versucht, Teilchen und Felder darin zu beschreiben. Über diese Alternative zur Stringtheorie schweigt Hawking sich aus.



Annähernd kreisförmige Bahnen eines Planeten um seine Sonne sind lebenszutraglich; in einer Achter-Bahn um ein Doppelsternsystem (oben) oder einer stark elliptischen Bahn (unten) schwankt die Temperatur zu stark.

In Hawkings gelähmtem Körper steckt offenbar ein heroischer Optimist, der das halb leere Glas der Theorie lieber als halb voll betrachtet. Aus dem Stückwerk unseres Wissens – mit dem er sich unter der Bezeichnung »modellabhängiger Realismus« abfindet – entwirft er die grandiose Vision eines Multiversums ohne Anfang und Ende, in dem unser Kosmos nur als einer unter unendlich vielen figuriert. In dieser Vision hat kein Gott etwas verloren, und der Tod ist nur ein unscheinbarer Übergang.

Ähnlich faszinierende Entwürfe haben mich seinerzeit als Schüler für die Physik begeistert. Auch sie malten das Ziel der umfassenden Welterklärung aus, als liege es zum Greifen nah. In der Realität jedoch erstreckt sich vor dem Forscher an Stelle eines fast fertigen Gebäudes die unübersichtliche Baustelle einer gewaltigen Stadt, an der unzählige Wissensarbeiter emsig werken – und diese Arbeit wird so bald kein Ende finden.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.



Sam Kean

Die Ordnung der Dinge. Im Reich der Elemente

Deutsch von Stephan Gebauer, Hoffmann und Campe, Hamburg 2011. 448 S., € 22,-

Chemie gilt vielen als schwierig und langweilig. Tatsächlich muss man sich wohl in keinem anderen Fach für ein tieferes Verständnis so viel Wissen aneignen. Populäre Chemiebücher stürzen sich daher vor allem auf die Anwendungen und kratzen allenfalls an der Oberfläche der Wissenschaft dahinter. Dieses Buch ist eine rühmliche Ausnahme. Der US-Journalist und studierte Physiker Sam Kean handelt sich an den chemischen Elementen entlang und macht sie zum Gegenstand unterhaltsamer Geschichten. Dabei präsentiert er eine Menge Stoff und geht auch in die Tiefe – etwa beim Konzept der Lewis-Säuren und -Basen. Am Ende hat der Leser trotz kleinerer sachlicher Fehler eine gute Vorstellung von dem Fach und ahnt etwas von seiner Faszination, auch wenn es wegen der selektiven und unsystematischen Darstellung nicht für ein wirkliches Verständnis reicht. GERHARD TRAGESER



Mick O'Hare (Hg.)

**Wie man einen Wirbelsturm auslöst
und andere überraschende Erkenntnisse aus der wunderbaren Welt der Wissenschaft**

Aus dem Englischen von Birgit Brandau. Fischer Taschenbuch, Frankfurt am Main 2011. 267 S., € 8,95

Mick O'Hare, Redakteur beim »New Scientist«, präsentiert ein Sammelsurium skurriler Forschung, über die seine Zeitschrift in den letzten 60 Jahren berichtete. Die kurzen, humorvollen Texte erzählen von Chirurgen, die unter wahren Körpereinsatz neue Narkosemittel an sich selbst testeten, und von vergessenen Bierflaschen, die in einem großen Teilchenbeschleuniger den Elektronenstrom blockierten. Andere Anekdoten stimmen den Leser eher nachdenklich, etwa wenn Forscher in den 1950er Jahren euphorisch über Versuche berichten, die Kernenergie für Eisenbahn, Raumschiffe und sogar Armbanduhren nutzbar zu machen. Insgesamt eine leichte und unterhaltsame Lektüre, bestens geeignet für den Strand oder das Gäste-WC. BARBARA WOLFART

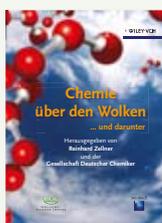


Christopher Chabris, Daniel Simons

Der unsichtbare Gorilla. Wie unser Gehirn sich täuschen lässt

Aus dem Amerikanischen von Dagmar Mallett. Piper, München 2011. 396 S., € 19,95

Das Video eines Basketballspiels (www.youtube.com/watch?v=vJG6g8U2Mvo) ist weltberühmt geworden: Der Zuschauer wird gebeten, die Pässe zu zählen – und bemerkt nicht, dass ein Mensch im Gorillakostüm prominent durch die Szene läuft! Hier liefern die Autoren des Experiments die wissenschaftlichen Hintergründe. Niemand muss sich der »Aufmerksamkeitsblindheit« schämen; sie trifft Männer wie Frauen, Junge wie Alte, Kluge wie Dumme, Wache wie Verträumte in ungefähr gleichem Maß. Man kann sie sich auch nicht abtrainieren, sondern allenfalls Situationen vermeiden, in denen sie gefährlich werden kann. Beispiel: Telefoniere nie beim Autofahren, auch nicht mit Freisprechanlage! Schlimmer als die Blindheit selbst ist unsere feste Überzeugung, »so etwas hätte einem doch auffallen müssen«. Diese Fehleinschätzung hat schon manchen Unschuldigen ins Gefängnis gebracht, wie Chabris und Simons an einigen spektakulären Fällen darlegen. CHRISTOPH PÖPPE



Reinhard Zellner und Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) (Hg.)

Chemie über den Wolken ... und darunter

Wiley-VCH, Weinheim 2011. 237 S., € 29,90

Reinhard Zellner, Altmeister der Atmosphärenchemie, hat gemeinsam mit der GDCh und pünktlich zum Jahr der Chemie ein 2007 erschienenes Themenheft der Zeitschrift »Chemie in unserer Zeit« zum vorliegenden Buch erweitert. Nun geht es auch um die Chemie »unter den Wolken«, natürliche Vorkommen und Abbauewege klimarelevanter Substanzen sowie Lösungsansätze für aktuelle Probleme. So befasst sich eines von elf Kapiteln mit dem Treibhausgas Methan: von der natürlichen Entstehung über die Gewinnung als Erdgas und die Speicherung in Form von Methanhydrat bis zur Fülle der Syntheseprodukte. Aufbau und Themenspektrum sind wohlgedacht; aber die Vielzahl an Autoren macht das Buch zu einer sehr inhomogenen Ansammlung von Einzeltexten, denen teilweise sogar der Bezug zur Atmosphärenchemie fehlt. Insgesamt ein guter Überblick mit stellenweise großem Tiefgang – der den Laien gelegentlich zu überfordern droht. JANINA FISCHER



Gerhard Schurz
Evolution in Natur und Kultur
Eine Einführung
in die verallgemeinerte Evolutionstheorie
Spektrum Akademischer Verlag,
Heidelberg 2011. 436 S., € 39,95

PHILOSOPHIE

Darwin durch die philosophische Brille betrachtet

Die Denkfiguren der Evolutionstheorie lassen sich weit über ihr ursprüngliches Gebiet hinaus anwenden – bis zu einer Widerlegung des Marxismus.

Dieses Buch führt zwar die Evolution im Titel, aber es berichtet nicht über Stammbäume und Fossilien. Vielmehr geht der Düsseldorfer Philosoph Gerhard Schurz den gedanklichen Hintergründen der Evolutionstheorie nach.

Muss ein Biologe sich überhaupt mit solch philosophischen Fragen befassen? Aber ja! Und sei es nur, um für die Diskussion mit Kreationisten gewappnet zu sein. Mutationen sind zufällig, die Selektion dagegen gibt Richtungen vor – so weit das Standardwissen. Aber was entgegnen Sie dem Kreationisten, der behauptet, diese Richtungsvorgaben seien ein teleologisches Prinzip in der Natur?

Darwins Evolutionstheorie erklärt eben nicht nur die Entstehung der Arten, sondern stellt auch einen Paradigmenwechsel dar, der weit ins Weltanschauliche hineinwirkt. Mit den drei Eckpfeilern Vermehrung (Reduplikation), Veränderung (Mutation) und Selektion vollzieht sie eine Abkehr von bestimmten Denkstrukturen, welche die Philosophie und Naturwissenschaft seit der Antike geleitet haben. Warum hatten die griechischen Naturphilosophen noch nicht diese Vorstellung von der Selbstorganisation komplexer Systeme? Warum ist Derartiges selbst den neuzeitlichen Rationalisten wie Descartes und Leibniz nicht in den Sinn gekommen? Warum hat die scheinbar un-

ausweichliche Vorstellung von einem Schöpfer und Planer unser Denken so lange beherrscht? Im Gegensatz dazu hatten andere große Errungenschaften der Neuzeit wie die Abkehr vom geozentrischen Weltbild, die Atomtheorie oder die Relativität von Raum und Zeit antike Vorläufer.

Der Placeboeffekt des Glaubens

In den beiden ersten großen Teilen erarbeitet Schurz biologische Fakten sowie die wissenschaftstheoretischen Grundlagen der Evolutionstheorie. Teil III behandelt die Parallelen zwischen der biologischen und der kulturellen Evolution, für die der britische Zoologe Richard Dawkins 1976 in seinem Buch »Das egoistische Gen« den Begriff »Mem« in Analogie zu »Gen« geprägt hat. Teil IV zeigt, dass zahlreiche evolutionstheoretische Erkenntnisse den mathematischen, computergestützten Modellen der Populationsdynamik zu verdanken sind. Durch rein intuitive Überlegungen hätten sie sich nicht eingestellt.

Der fünfte und letzte Teil geht auf Probleme ein, die uns im Alltagsleben berühren: die Evolution von Moral und Religion. Als wissenschaftliche Theorie, die nur gelten lässt, was man überprüfen kann, ist die Evolutionstheorie der geborene Gegner jeder Religion und hat gute Argumente auf ihrer Seite. Die Weltbilder insbesondere der christlichen Religion – Schöpfungsgeschich-

te, Geozentrismus, Wunderglaube, Seelenlehre – sind wissenschaftlich immer wieder widerlegt, ihre Werte und Handlungen – Missionsbefehl, Keuschheitsgebot, Minderwertigkeit der Frau, Hexenverbrennungen, Teufelsaustreibungen – als inhuman erkannt worden. Nur hat darunter zwar die Autorität der kodifizierten religiösen Weltbilder gelitten; aber das religiöse Bedürfnis der Menschen ist selbst im gegenwärtigen Hightech-Zeitalter ungebrochen.

Die Hartnäckigkeit, mit der sich religiöse Überzeugungen in allen Kulturen der Welt halten, deutet auf eine genetische Grundlage hin. Wäre Religion nur ein Mem im Sinn von Dawkins, so hätte sie in gewissen Kulturen auch aussterben müssen und dort nicht spontan wieder entstehen dürfen. Dies ist jedoch nicht der Fall.

Die genetische Verankerung erfordert einen Selektionsvorteil, und diesen sieht Schurz in einem »verallgemeinerten Placeboeffekt des Glaubens«: Wenn ein Mensch zum Beispiel glaubt, dass ihn bald eine geliebte Person besuchen wird, so macht ihn dieser Glaube froh und glücklich, unabhängig davon, ob diese Person dann auch wirklich kommt. Bereits durch diesen Seelenzustand kommt er besser durchs Leben und hat tendenziell mehr Nachkommen als sein weniger leichtgläubiger Zeitgenosse – so muss man Schurzens Gedankengang ergänzen.

Insbesondere seien die evolutionär erfolgreichsten Erkenntnisformen nicht notwendig diejenigen, welche die Realität am getreuesten wiedergeben. Damit wendet sich Schurz auch gegen die evolutionäre Erkenntnistheorie, die einen systematischen Zusammenhang zwischen Wahrheit und evolutionärem Erfolg behauptet.

Über die Religionen hinaus, so Schurz, sei das darwinistische Weltbild ein Affront gegen jede Weltanschauung, die eine der Natur immanente Orientierung zur Höherentwicklung postuliert. Das betrifft vor allem den dialektischen Idealismus von Johann Gottlieb Fichte und Georg Wilhelm Friedrich Hegel sowie den dialektischen Materialismus von Karl Marx und

Friedrich Engels. Damit scheint die letzte Möglichkeit gefallen zu sein, aus wissenschaftlichen Tatsachenerkenntnissen eine Sinn stiftende Weltanschauung herauszulesen.

Schließlich sei die Evolutionstheorie mit dem modernen Anthropozentrismus unvereinbar, wonach der Mensch als Gipfel der Evolution beliebig über die Natur regieren oder sich völlig von Naturzwängen befreien könne. Das stellt auch das handlungszentrierte Machbarkeitsdenken der politischen Linken insgesamt in Frage. Dieses deutet die kulturelle Evolution als die Geschichte von machtvollen Herrschern oder Gruppen und schreibt die Übel dieser Welt dem planmäßigen Wirken irgendwelcher Bösewichte oder Ausbeuter zu, die man nur politisch beseitigen müsste, um die Probleme zu lösen.

Allgemein hat das anthropozentrische Machbarkeitsparadigma die Eigenart, die älteren Generationen regelmäßig ziemlich dumm aussehen zu

lassen, weshalb es sich bei der jungen Generation besonderer Beliebtheit erfreut, nach dem Argumentationsmuster: Hätten nur genügend Menschen sich rechtzeitig von der richtigen Gesinnung leiten lassen, dann wären die aktuellen Fortschritte schon weit früher erreicht worden. Aber Evolutionsprozesse lassen sich nicht durch bloßen Gesinnungswandel ändern, und selbst wenn sie es tun, dann meist nicht so wie beabsichtigt, wie sich bei Umwälzungen von der Französischen Revolution bis hin zur Studentenbewegung der 1960er Jahre gezeigt hat.

Schurz setzt sich auch mit dem Sinn der Suche nach den »Letzt-tatsachen« auseinander: Was war vor dem Urknall? Woher kommt es, dass die Naturkonstanten so fein aufeinander abgestimmt sind? Aber dazu kann die Evolutionstheorie nichts beitragen. Und irgendwelche »Letzterklärungen«, die beispielsweise den unerklärten Urknall auf Ereignisse davor zurückführen, schaffen nichts wei-

ter als einen unendlichen Regress und sind insofern nicht besser und nicht schlechter als die Religionen, denen Dawkins genau das zum Vorwurf macht.

Das am meisten biologisch orientierte Kapitel I/2 enthält Schwächen. Schurz stellt die Beispiele für die Evolution der Organismen zu zusammenhanglos und ohne hinreichenden Bezug zum Gesamtanliegen seines Werks dar. Außerdem klammert er sich zu sehr an eine einzige Quelle (nämlich »Evolution« von Mark Ridley).

Diese Einzelkritik soll den Gesamteindruck nicht schmälern: Wer nachdenken will und sich nur dem »zwanglosen Zwang« des besseren Arguments beugt, der wird von dem Buch begeistert sein.

Werner Kunz

Der Rezensent ist Professor für Biologie an der Universität Düsseldorf. Er veranstaltet zusammen mit Dozenten der Philosophie interdisziplinäre Seminare.



David P. Barash, Judith Eve Lipton

Wie die Frauen zu ihren Kurven kamen

Die rätselhafte Evolutionsbiologie des Weiblichen

Aus dem Amerikanischen von Andrea

Kamphuis. Spektrum Akademischer Verlag,

Heidelberg 2010. 323 S., € 24,95

EVOLUTIONS BIOLOGIE

Von Kurven, Orgasmen und anderen Merkwürdigkeiten

»Cherchez la femme« haben sich zwei Wissenschaftler vorgenommen – und müssen allerlei Rätsel des Weiblichen ungelöst lassen.

Frauen sind rätselhafte Wesen – dieser Behauptung würde so mancher Mann ohne Zögern zustimmen. Aber die Ursache dafür ist vielleicht nicht vorrangig im natürlichen Unverstand des männlichen Geschlechts zu finden, sondern in der Evolutionsbiologie – sagt der Evolutionsbiologe David P. Ba-

rash gemeinsam mit Judith Eve Lipton, Psychiaterin mit Schwerpunkt Frauengesundheit.

Die Weibchen von *Homo sapiens* unterscheiden sich in vielem von denen anderer Säugetierarten: Sie haben volle Brüste selbst dann, wenn es keine Babys zu versorgen gilt. Sie menstruieren, ver-

bergen aber ihren Eisprung, so dass – ohne Hilfsmittel – keiner so recht zu sagen vermag, wann frau empfängnisbereit ist. Irgendwann kommen wir in die Menopause, während andere Säugetierweibchen bis ins hohe Alter Nachwuchs produzieren. Ach ja, und dann erleben Menschenfrauen (zumindest viele von ihnen) ein Vergnügen, das bei Weibchen anderer Spezies höchst selten zu finden ist und anders als sein männliches Gegenstück nicht mit einem offensichtlichen Transportzweck verknüpft ist: den Orgasmus.

Gleich zu Anfang muss sich der Leser durch 50 Seiten Betrachtungen zur Menstruation kämpfen. Vielleicht wollen die Autoren mit dieser »Schocktherapie« gegen die verbreitete Neigung angehen, die Monatsblutung »in aller Form zu ignorieren oder sie als etwas Lästiges zu erachten, das man am besten nicht anspricht«. Schließlich sei sie »ein wichtiger Bestandteil des Daseins jeder normalen, gesunden Frau«. Das mag stimmen, aber welche Frau (und welcher Mann) mag sich schon gerne

mit diesem Thema auseinandersetzen, wo es doch allzu oft mit Schmerz und anderen Unpässlichkeiten einhergeht? Und um den zahlreichen Spekulationen noch eine eigene hinzuzufügen: Vielleicht ist die ganze Heimlichtuerei ja nur eine weitere Strategie, um den Zeitpunkt des Eisprungs noch besser zu verbergen, selbst vor Zeitgenossen, die des Rechnens mächtig sind?

Täuschung oder Selbsttäuschung?

Dagegen haben die Autoren zu dem – wirklich spannenden – Thema »verborgene Ovulation« wissenschaftlich Fundiertes zu bieten. Dass der Eisprung bei Menschenweibchen so still, heimlich und von ihnen selbst praktisch unbemerkt abläuft, ist tatsächlich eine Besonderheit unserer Spezies. Schimpansendamen tun ihre Empfängnisbereitschaft unübersehbar durch dick angeschwollene, rosarote Genitalien kund. Die Weibchen anderer Primatenarten, etwa Gorillas oder Orang-Utans, denen

die Empfängnisbereitschaft nicht schon von Weitem anzusehen ist, machen durch ihr Verhalten unmissverständlich klar, was sie von ihren männlichen Artgenossen erwarten.

Aber auch bei uns geht der Eisprung mit Veränderungen einher, selbst wenn wir sie nicht bewusst wahrnehmen. So beurteilen Männer Bilder von Frauen als attraktiver, wenn diese gerade empfängnisbereit sind. Stripperinnen bekommen an ihren fruchtbaren Tagen mehr Trinkgeld als sonst. Umgekehrt scheinen sich die Damen zur Zeit ihrer Empfängnisbereitschaft bevorzugt auf besonders männlich wirkende Herren zu stürzen – wohl weil von ihnen der beste Nachwuchs zu erwarten ist.

Aber all diese Signale sind mehr als subtil, und so bleibt die Frage: Wozu dient die ganze Geheimniskrämerei? Konnten unsere weiblichen Vorfahren etwa Männer an sich binden, indem sie ihnen verheimlichten, ob sie gerade empfängnisbereit waren, sich der Sex

also auch reproduktionsbiologisch betrachtet lohnte? Oder galt es eher, die Konkurrentinnen im Unklaren darüber zu lassen, ob frau ihre »gefährlichen Tage« hat, um so ganz klammheimlich und ungestört zum Erfolg zu kommen? Vielleicht half der verborgene Eisprung aber auch, die Spuren von Seitensprüngen zu verbergen: Wenn er nicht weiß, wann genau sie empfängnisbereit ist, kann er auch nicht nachrechnen, ob sie seinen Nachwuchs oder ein Kuckuckskind unterm Herzen trägt. Schließlich führt das Autorenduo noch eine seltsam klingende, aber vielleicht doch zutreffende Erklärung an: Könnte es sein, dass die Ovulation im Verborgenen abläuft, um die empfängnisbereite Frau selbst zu täuschen, die vielleicht lieber eine Schwangerschaft und damit auch die Schmerzen und Gefahren der Niederkunft vermeiden würde?

In dieser Art gehen die amerikanischen Autoren die vielfältigen Rätsel des Weiblichen Schritt für Schritt durch.

ANZEIGE



DEINE Ideen verändern
Messegelände Hannover
27.08. - 04.09.2011

Bring

deine

Ideen

mit



Besucht uns auf der
IdeenExpo 2011

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

www.ideenexpo.de



Sind volle Brüste eher ein Signal an die Männer, das wohlgenährten Nachwuchs verspricht, oder doch eher eine Art Vorratsspeicher für schlechte Zeiten? Dient der weibliche Orgasmus eher als Ansporn für Frauen, sich auf den Paarungsakt einzulassen, oder verbessert er vorrangig die Befruchtungschancen, indem er die Spermien in die Gebärmutter geleitet? Und ist die Menopause möglicherweise einfach eine Begleiterscheinung einer drastisch verlängerten Lebensspanne? Schützt sie Mutter und Nachwuchs vor den Risiken einer späten

Schwangerschaft, oder zwingt sie die älteren Damen, zu Gunsten junger Frauen zurückzutreten?

In jedem Kapitel fassen Barash und Lipton die erörterten Hypothesen in einem kurzen Kasten zusammen. Das hilft, den Überblick über die vielfältigen Theorien zu behalten, der bei den etwas ausschweifenden und umständlichen Erklärungen gelegentlich verloren geht.

Am Ende bleiben uns die Autoren eine Lösung des Rätsels Frau schuldig. Schließlich sei das Phänomen »weiblicher Körper« noch nicht erschöpfend

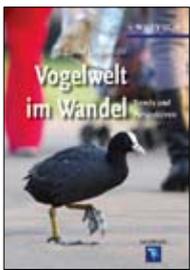
Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

erforscht. Und das ist gut so – erlaubt es uns Frauen doch weiterhin, ein bisschen geheimnisvoll zu bleiben.

Stefanie Reinberger

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.



Daniel Lingenhöhl
Vogelwelt im Wandel
Trends und Perspektiven
Wiley-VCH, Weinheim 2010.
282 S., € 24,90, Taschenbuchausgabe € 14,90

ZOOLOGIE

Hoffnung für die Vögel

Es gibt durchaus Möglichkeiten, den bislang ungebrochenen Trend zur Ausrottung der europäischen Vogelwelt noch zu stoppen oder gar umzukehren.

Von den rund 260 heimischen Vogelarten werden 110 auf der Roten Liste der bedrohten Arten geführt, 30 stehen unmittelbar vor dem Aussterben. Bei solcher Ausgangslage hätte Daniel Lingenhöhl durchaus ein Untergangsszenario entwerfen können. Doch der Wissenschaftsjournalist und passionierte Ornithologe zieht lieber eine differenzierte Bilanz der aktuellen Entwicklung, um zu einem Wandel in unserem Verhalten zu ermutigen.

In neun reichhaltig bebilderten und mit jeweils eigenen Literaturverzeichnissen versehenen Kapiteln werden alle für den Vogelschutz relevanten Themen erörtert. Lingenhöhls umfassende und allgemein verständliche Darstellung bietet neben detaillierten Problembeschreibungen stets auch konkrete Lösungsvorschläge. Allein schon

wegen der Vielzahl vorgestellter Vogelartenschutzmaßnahmen, die vergleichsweise wenig kosten und dennoch viel bewirken, lohnt die Lektüre.

Ursächlich für den drohenden Artenschwund ist der Verlust an naturbelassenen Lebensräumen. Vor allem die fortschreitende Industrialisierung der Landwirtschaft schadet der heimischen Vogelwelt. Hinzu kommen die Jagd, das ausgreifende Freizeitverhalten sowie zunehmend auch die Veränderungen durch den Klimawandel.

Dass Vogel- und Naturschützer nicht nur lokale, sondern auch globale Herausforderungen zu bewältigen haben, ergibt sich schon aus der Tatsache, dass allein aus Europa und Sibirien jeden Winter mehr als 200 Vogelarten mit rund fünf Milliarden Individuen west- und südwärts ziehen. Mindestens 200

Millionen dieser Zugvögel werden bereits innerhalb des EU-Gebiets – insbesondere in Spanien, Frankreich und Italien – Opfer der Jagdleidenschaft. Noch größer ist der Blutzoll auf dem Balkan und im Nahen Osten.

In Frankreich landen – trotz offiziellen Fangverbots – jede Saison mindestens 65.000 Ortolane (*Emberiza hortulana*) auf den Tellern der Gourmets; in Unterfranken ist der Bestand dieser Ammernvögel binnen 20 Jahren um mehr als 70 Prozent gesunken. Aber auch Deutschland bietet Anlass zur Empörung: In der Jagdsaison 2007/2008 erlegten heimische Waidmänner mehr als 18.000 Waldschnepfen (*Scolopax rusticola*), obwohl diese Spezies auf der Roten Liste steht.

Vielorts sind die beharrlichen Kampagnen der Vogelschützer jedoch von Erfolg gekrönt und sorgen für eine bessere Umsetzung der EU-Vogelschutzrichtlinie: So wurde auf Malta – wohl



Trotz eines dramatischen Comebacks ist die Zukunft des Uhus noch nicht gesichert.



Früher galt der Feldsperling als Landplage; heute steht er auf der Roten Liste.

erstmals seit der Zeit der Ritter – inzwischen die Frühjahrsjagd verboten. Slowenien stellte die Bejagung der Zugvögel völlig ein; in Belgien ist der Fang von Singvögeln nunmehr endgültig verboten. Und die Niederlande haben die Jagd auf Gänse, die als Gäste aus der Arktis im Wattenmeer überwintern, zumindest eingeschränkt.

Nicht nur der Mensch geht auf Vogeljagd: In Großbritannien beispielsweise gibt es rund neun Millionen Hauskatzen, in deren Fängen jährlich zwischen 100 bis 275 Millionen Vögel verenden. Ein Glöckchen um den Hals der Stubentiger, so eine Studie der University of Glasgow, würde bereits genügen, um die Opferzahlen zu halbieren.

In Deutschland schießt man weniger auf Vögel, und die Katzendichte ist deutlich geringer als anderswo. Aber dafür werden hier zu Lande naturnahe Lebensräume geradezu systematisch zerstört. Das »Schweigen der Felder« ist vor allem eine Folge der industriellen Landwirtschaft. Chlororganische Gifte wie DDT sind zwar erfreulicherweise inzwischen verboten, doch auch die neuen Chemikalien sind fatal. Sie vergiften nicht mehr die Vögel selbst, sondern vernichten ihre Nahrungsgrundlage. 2007 waren in Deutschland 660 verschiedene so genannte Pflanzenschutzmittel zugelassen. 41 000 Tonnen davon wurden auf die Fläche ausgebracht – 15 Prozent mehr als im Jahr 2000.

Geradezu in den »Schwitzkasten« gerät die Vogelwelt durch den Klimawandel. Die globale Erwärmung bringt

den Rhythmus der Natur durcheinander, verschiebt Verbreitungsgebiete und verändert das Zugverhalten. Kurz- und Mittelstreckenzieher wie Hausrotschwanz (*Phoenicurus ochruros*), Star (*Sturnus vulgaris*) und Stieglitz (*Carduelis carduelis*) passen sich an, indem immer mehr Individuen bei milder Winterwitterung auf den Zug ans Mittelmeer verzichten.

Eine andere Anpassungsstrategie besteht darin, früher aus den Überwinterungsgebieten heimzukehren und entsprechend früher zu brüten. Denn infolge des Klimawandels verlagert sich das massenhafte Auftreten vieler Raupenarten nach vorne. Nur wenn die Vögel diesem Trend folgen, haben sie eine Chance, das Nahrungsmaximum noch zur Aufzucht ihrer Jungen zu nutzen.

Im Vergleich zu 1960 haben bereits 24 Arten ihre Ankunft vorverlegt – im Schnitt um 8,6 Tage. Feldlerchen (*Alauda arvensis*) kehren sogar einen ganzen Monat früher ins Brutgebiet zurück, Mehl- und Rauchschnäbel (*Delichon urbicum* und *Hirundo rustica*) immerhin zwei Wochen. Zusätzlich lassen sich die Weibchen immer weniger Zeit, sich von den Strapazen des Zugs zu erholen, beeilen sich mit dem Eierlegen und bringen entsprechend schwächeren Nachwuchs hervor.

Manchen Vögeln misslingt die Anpassung an den vorverlegten Zeitplan ihrer Nahrungsquelle. Durch diese Desynchronisation sind manche Populationen der Trauerschnäpper (*Ficedula hypoleuca*) zusammengebrochen – Bestandsrückgang bis zu 90 Prozent.

Auch ohne Klimawandel bilden Feldvogelarten die am stärksten bedrohten Artengruppe. Sie sind die eigentlichen Modernisierungsverlierer. Dabei ist es oftmals recht einfach, bedrängten Bodenbrütern zu helfen, etwa durch Anlegen von »Feldlerchenfenster« – kleineren Flurstücken, die inmitten großer Felder von der intensiven Bewirtschaftung ausgespart bleiben. Die besten Erfolge bringt eine Rückkehr zu extensiveren Formen der Landwirtschaft. So wurde 2001 in Schleswig-Holstein eine größere Versuchsfläche auf Ökolandbau umgestellt – und schon ein Jahr

später waren dort dreimal so viele Feldlerchen zu finden.

Obwohl sich in den letzten 30 Jahren die Lage der heimischen Vogelwelt insgesamt dramatisch verschlechtert hat, gibt es beachtliche Erfolge zu vermelden. So konnten sich Waldvogelbestände erholen, etwa durch den Erhalt totholzreicher Bestände, die Ausweisung zusätzlicher Schutzzonen sowie die Umwandlung von Monokulturen in Mischwälder.

Naturschutz bringt also etwas. Manch düsterer Prognose zum Trotz nahmen in den vergangenen beiden Jahrzehnten in Deutschland Weiß- und Schwarzstorch (*Ciconia ciconia* und *Ciconia nigra*), Fischadler (*Pandion haliaetus*), Blaukehlchen (*Luscinia svecica*), Eisvogel (*Alcedo atthis*), Uhu (*Bubo bubo*) und Kolkrabe (*Corvus corax*) in ihren Beständen zu. Diese Arten stehen entweder nicht mehr auf der Roten Liste oder sind kurz davor, wieder herausgenommen zu werden. Erreicht wurde dies durch konsequente Schutzmaßnahmen, teilweise in enger Zusammenarbeit mit Jägern, Anglern, Freizeitsportlern und Landwirten.

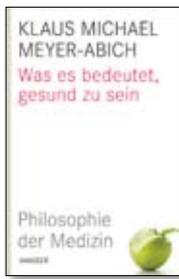
Auch für den Naturschutz gilt: Zustimmung erhält nur, wer stimmig argumentiert. Lingenhöhls überzeugende Darstellung bietet nicht nur wertvolle Hilfen zur Argumentation, sondern auch zum Handeln.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.



Mit dem Weißstorch geht es in Deutschland langsam wieder aufwärts.



Klaus Michael Meyer-Abich

Was es bedeutet, gesund zu sein

Philosophie der Medizin

Hanser, München 2010. 639 S., € 29,90

PHILOSOPHIE

Traum einer idealen Welt

Klaus Michael Meyer-Abich liefert ein Potpourri aus Psychosomatik, Kommunismus und Anthroposophie.

»E in Mensch, der sich in seinem persönlichen und gesellschaftlichen Umfeld wohl fühlt und im Einklang mit der Natur lebt, wird nicht krank«, sagt Klaus Michael Meyer-Abich. Der Physiker und Philosoph ist emeritierter Professor für Naturphilosophie in Essen und war Mitglied im Sachverständigenrat verschiedener Enquete-Kommissionen zu umweltpolitischen Fragen.

Mit seinem neuen Buch entwirft er ein ganzheitliches Bild vom Menschen in der Gesellschaft und seiner Umwelt. Damit will er zur öffentlichen Diskussion über einen dringend benötigten, geisteswissenschaftlichen Rahmen unseres Gesundheitssystems beitragen. »Da noch niemand eine Philosophie der Medizin entworfen hat, musste ich das Buch selber schreiben«, sagt er in seinem Nachwort. Ein hochgestecktes Ziel, das er nicht ganz erfüllt hat.

Sein Verständnis von guter Medizin ist deutlich geprägt durch den Heidelberger Mediziner Viktor von Weizsäcker (1886–1957), einen der Begründer der psychosomatischen Medizin. Für Meyer-Abich sind alle Krankheiten psychosomatisch und damit Konsequenz eigenen Handelns. Ein guter Arzt – der, wie von Paracelsus gefordert, die Eigenschaften eines Priesters, Arztes, Psychologen und Pädagogen in sich vereinen müsse – habe den Kranken auf seine Eigenverantwortung zu verweisen. Das geht so weit, dass er dem Patienten nicht einfach die Symptome wegnehmen dürfe, da er ihn so einer Entwicklungschance berauben

würde. Das verklärte Bild von den »guten alten Ärzten«, die ihren Patienten schon an der Nasenspitze ansehen, was ihnen fehlt, klingt allerdings etwas altbacken.

Jedoch kann Meyer-Abich nicht leugnen, dass die These, jeder Mensch sei für seine Krankheit selbst verantwortlich, nicht immer bis in die letzte Konsequenz durchzuhalten ist, leidet er doch selbst unter familiärem Diabetes. Und da dürfen die Gene dann doch ein bisschen mit schuld sein.

Oder auch die Lebens- oder Arbeitsverhältnisse. Den meisten Menschen fehle es in ihren Arbeitsverhältnissen an Anerkennung, Selbstbestimmung und vor allem an intrinsischer Motivation: Wer seine Arbeit für sinnvoll hält, hat auch Freude daran. Ob man sie aber für sinnvoll hält, das hänge primär von der eigenen Bewertung ab. Aber bevor Meyer-Abich daraus die Konsequenz zieht und jedem Angestellten empfiehlt, er möge sich seine Tätigkeit als sinnvoll zurechtinterpretieren, weist er doch lieber der Gesellschaft und den Arbeitgebern die Verantwortung dafür zu, die Arbeitsverhältnisse zu verbessern, damit Gesundheit möglich wird.

In der Folge entwirft der Autor nichts weniger als eine ideale, kommunistisch inspirierte Gesellschaftsordnung, mit Grundeinkommen für Lebensunterhalt, Recht auf Arbeit und sozialpflichtigem Privateigentum. Jeder solle das arbeiten können, für das er intrinsisch motiviert sei, unabhängig von der Bezahlung. Dies würde er dann auch tun,

denn der Mensch habe ein tief verankertes Bestreben, sinnvoll zu handeln und sich gesellschaftlich produktiv einzubringen. Ein bisschen Kapitalismus darf dabei sein: Wer den Wettbewerb liebe und besser sein wolle als die anderen, dürfe ruhig etwas mehr verdienen. Aber gesünder sei das nicht.

Am liebsten würde Meyer-Abich auch die Wirtschaft für unsere Gesundheit zur Verantwortung ziehen und sie verpflichten, nur noch gesunderhaltende Konsumgüter zu produzieren. In letzter Konsequenz hieße das: keine Autos, keine Fernseher. Denn diese tragen direkt zum weit verbreiteten Bewegungsmangel und den damit verbundenen Krankheiten bei.

Jeder Mensch sei Teil der Natur und habe dementsprechend eine positive, genetisch verankerte Reaktion auf seine natürliche Umwelt. Nachweislich sind Patienten weniger depressiv und werden schneller gesund, wenn sie aus einem Fenster mit einer schönen Aussicht, zum Beispiel auf Bäume, schauen können. Der Mensch solle in seinem Leben die seinen Bedürfnissen entsprechenden Rhythmen – Tag und Nacht, Pausen, Feiertage, Urlaub – finden und einhalten, um eine Balance zwischen Aktivität und Passivität erreichen und sich an den Ursprung alles Seins erinnern zu können. Wer geistig arbeite, solle sich einen Ausgleich in körperlicher Betätigung suchen, wer analytisch arbeite, in künstlerischen Tätigkeiten.

Solche Betrachtungen walzt Meyer-Abich in epischer Breite aus. Besonders dieser Teil des Buchs erinnert immer wieder an die Ausführungen Rudolf Steiners (1861–1925), des Begründers der Anthroposophie, zum selben Thema; der Autor erwähnt ihn allerdings nicht ein einziges Mal.

Ohne Zweifel ist die hier skizzierte ideale Welt, die konsequenterweise von besseren Menschen bevölkert ist, wünschenswert. Aber die Ideen sind nicht neu, und dadurch, dass er viele namhafte Denker zitiert, schafft er noch keine neue Philosophie. Meyer-Abich bedient sich aus verschiedensten Schubladen und scheint dabei manchmal selbst den Überblick zu verlieren. Eine

klare Linie ist in dem Buch jedenfalls nicht zu erkennen. Letztlich lässt er den Leser ziemlich allein mit einem Potpourri an philosophischen Gedanken. Ein bisschen Individuum, ein bisschen Gesellschaft, dazu ein wenig Natur – wenn alles harmonisch ist, dann ist man gesund. Wer hätte das gedacht.

Ja, unsere Gesellschaft benötigt ein Umdenken, gerade was die heute gängigen Vorstellungen zur Wirtschaft und zum Umgang mit der Gesundheit an-

geht. Aber um dieses Gedankengut in das Bewusstsein der Menschen zu rücken, hätten dem Buch eine deutlich schlankere und klarere Struktur und ein jüngeres, präziseres Deutsch gutgetan. So werden es gerade die Menschen, die Meyer-Abich erreichen möchte, kaum zu Ende lesen. Störend für den Lesefluss sind auch die zahlreichen englischen Zitate, die gerade in wichtigen Passagen mitten im Text auftauchen und weder vorher noch nachher aus-

reichend übersetzt oder erklärt werden. Statt Klartext finden sich oft kryptische Anspielungen.

Wer gerne ein bisschen vor sich hin philosophiert, den mag das Buch erfreuen. Alle anderen werden es eher anstrengend und überflüssig finden.

Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.



Moon

Ein Film von Duncan Jones

Mit Sam Rockwell und Kevin Spacey

(Computerstimme)

Zwei DVDs, Koch Media 2011.

93 Minuten, € 12,99

auch als Blu-ray erhältlich

SCIENCEFICTION-FILM

Ein, zwei Mann auf dem Mond

»Moon« ist ein kleines, kluges Weltraum-Monodram.

Vorneweg ein bisschen Science zu der Fiction: Angenommen, in Zukunft wird es der Menschheit gelingen, ihren Energiebedarf mittels Kernfusion zu decken. Dafür braucht man das Isotop Helium-3, mit nur einem statt der üblichen zwei Neutronen zusätzlich zu den zwei Protonen im Kern. Auf der Erde ist das Isotop rar, auf dem Mond kommt es häufiger vor. Also wird es lohnen, Helium-3 dort zu fördern und mit Raketen zur Erde zu schießen. Aus Kostengründen soll alles möglichst au-

tomatisiert ablaufen. Zur Überwachung genügt pro Mondstation ein Mann.

Im Debut des Briten Duncan Jones – er hat sein Handwerk als Werbefilmer gelernt – begegnen wir einem solchen Mondarbeiter. Er ist schon fast drei Jahre dabei und freut sich auf die Ablösung. Sein einziger Ansprechpartner ist der Computer Gerty, der als dienstbarer Geist und verständnisvoller Zuhörer unermüdlich zur Stelle ist.

Den Arbeiter spielt Sam Rockwell, Sciencefiction-Fans eher als schwatzhaftnervige Nebenfigur aus den Filmen »Galaxy Quest« und »Per Anhalter durch die Galaxis« bekannt. Hier muss er einen ganzen Film allein tragen – und das macht er hervorragend. Nach jahrelanger Einsamkeit ist er fast selbst zum Automaten geworden. Jeder Handgriff sitzt, wenn er wieder einmal in den Raumanzug steigt und den Laster zur Förderstation steuert, ohne einen Blick für die Mondlandschaft übrig zu haben. Nur wenn er Fertignahrung aus der Mikro-

welle nimmt, verbrennt er sich gewiss nicht zum ersten Mal daran die Finger.

Die ihn umgebende Technik – die Wohnmaschine, das lunare Fördergerät, Computer Gerty – wird plausibel ins Bild gesetzt. Alles sieht abgenutzt und billig aus. Offensichtlich spart die Helium-3-Förderfirma, wo sie nur kann. Übrigens war auch das Produktionsbudget von »Moon« mit drei Millionen Pfund für einen Sciencefiction-Film eher bescheiden, aber es ist erstaunlich, was ein kluger Regisseur und geschickt eingesetzte Computertricks damit anstellen können.

Nachdem wir uns am Alltag des müden Mondarbeiters sattgesehen haben, nimmt die Geschichte Fahrt auf. Die gewohnten Abläufe geraten durcheinander, Unerklärliches ereignet sich. Macht die lange Isolation den Mann langsam verrückt? Sieht er Gespenster? Hat ihn die Firma vergessen?

An dieser Stelle weiterzuerzählen, hieße den Film verraten. Nur so viel: Das ist kein Mysterythriller, in dem Untote den Mond unsicher machen. Wer Sciencefiction mag, wird Anspielungen auf fast jeden besseren Film des Genres erkennen, von »2001« über »Solaris«, »Lautlos im Weltraum«, »Alien«, »Blade Runner« bis »Outland«. Aber die in »Moon« gebotene Auflösung der rätselhaften Ereignisse hat mich dann doch aufs Angenehmste überrascht. Sie ist nämlich logisch.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

Der Mondarbeiter in der Wohnmaschine



Hilfe fürs Herz

»Das gesunde Herz kann die zur Kontraktion führenden Reize selbst bilden. Im Rahmen von Erkrankungen tritt zuweilen eine Störung der Fortleitung dieser Reize auf. Sogenannte ›elektrische Schrittmacher‹ liefern Gleichstromimpulse. Man kann die Impulse durch dem Brustkorb aufliegende Hautelektroden, durch eine dem Herzbeutel angelegte Elektrode, einen in den Herzmuskel eingestochenen Draht und auch durch einen Herzkatheter zuführen.« Naturwissenschaftliche Rundschau, August 1961, S. 315

Licht auf neuen Wegen

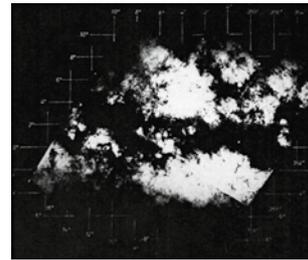
»Wenn man einen Lichtstrahl in einen dünnen Glasstab schickt, der von einer winzigen das Licht weniger brechenden Glashaut überzogen ist, so kann dieser Lichtstrahl nicht mehr entweichen, weil er im Glasstab immer wieder total reflektiert wird. Dies trifft auch zu, wenn man den Stab biegt. Werden tausende Glasfasern zu einem Glasfaserbündel zusammengeschlossen, so erhält man ein neues optisches Instrument.« Neuheiten und Erfindungen, August 1961, S. 128

Dehnt sich die Milchstraße aus?

»Da das galaktische Zentrum ein starker Strahler für kontinuierliche Radiowellen ist, sollte man eine Absorptionslinie bei 21 cm (verursacht durch atomaren Wasserstoff) beobachten. Dies ist auch der Fall, aber merkwürdigerweise liegt diese Absorptionslinie nicht bei der



Wellenlänge, die man nach dem Rotationsmodell der Milchstraße erwarten sollte, sondern ist zu den kürzeren Wellenlängen verschoben. Das Gas zwischen dem Zentrum und uns bewegt sich auf uns zu. Es müssen Expansionen in dem Modell vorkommen.« Umschau, August 1961, S. 457–460



Ein Mosaik des galaktischen Zentrums, zusammengesetzt aus Rot-Aufnahmen des Palomar Sky Survey



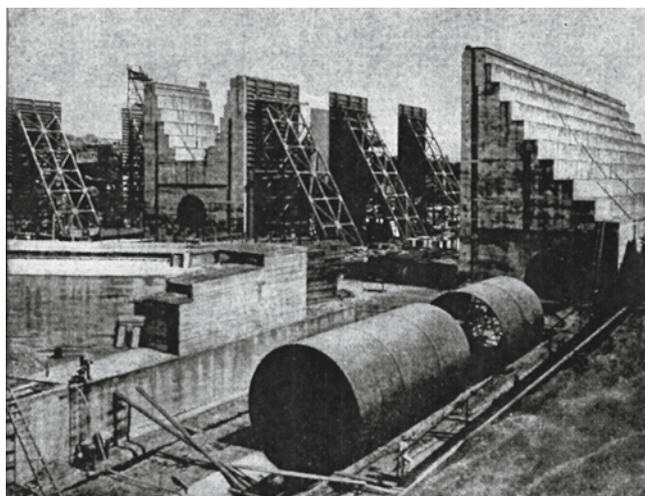
CSI anno dazumal

»Es ist bekannt, daß die photographische Platte viel empfindlicher für gewisse Farbenunterschiede ist, als unser Auge. Diese Eigenschaft wird

von der Kriminalistik mit größtem Erfolg benutzt. Es sollen auf einem gewaschenen Taschentuch etwa Blutüberreste gesucht werden. Das Tuch erscheint gleichmäßig weiß. Die Aufnahme durch ein dunkelblaues Filter zeigt nun deutlich Flecken an, die sich als Blutflecken herausstellen.« Umschau, August 1911, S. 688

Funkspruch an (Eiffel-)Tower

»Versuche mit drahtloser Telegraphie von Bord eines Aeroplans wurden in Paris mit gutem Erfolge ausgeführt. Der Funkspruchapparat wiegt nur 14 kg, jedoch mußten zu seiner Anbringung Verstärkungen des Flugzeugs im Gewicht von 11 kg vorgenommen werden. Der als Antenne dienende Draht kann erst abgewickelt werden, wenn der Aeroplan sich im Flug befindet. Er hängt in einer Länge von 120 m herab. Es gelang, Funkentelegramme an die Station des Eiffelturms aus Entfernungen von 45 bis 56 km zu senden.« Elektrotechnische Zeitschrift, August 1911, S. 835



Zukünftige Weltmacht

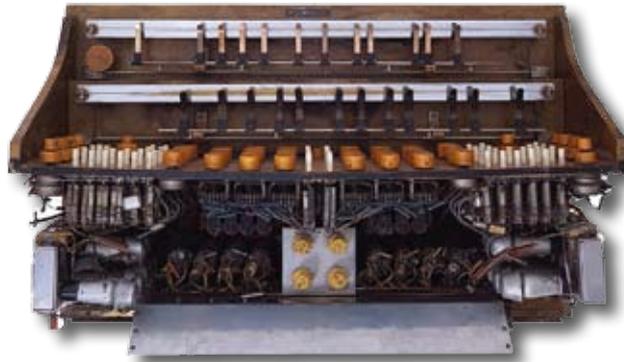
»Im Jahre 1902 erhob der Kongreß in Washington den Bau eines zentralamerikanischen Kanals zum Gesetz. Heute sind die Arbeiten soweit fortgeschritten, daß man den für die Eröffnung festgelegten Termin, den 1. Januar 1915, wohl einhalten können. Auf jeden Fall wird er eine Wendung bringen, wie sie Völkern in Jahrhunderten meist nur einmal beschieden ist. Wir zanken uns in der Alten Welt um Elsaß-Lothringen und ähnliche Kleinigkeiten, und über dem Ozean streckt eine erstarkende Macht die Hände aus, um den Welt-handel an sich zu reißen.« Kosmos, August 1911, S. 313–320

Schleusen leiten den Schiffsverkehr durch den aufgestauten Gatunsee in Panama.

Als die Töne elektronisch wurden



Synthetisch erzeugte Klänge waren bis in das frühe 20. Jahrhundert Zukunftsmusik. Zu den Pionieren gehörte der Musiker und Physiker Oskar Sala (Foto rechts), dessen »Mixturtrautonium« (links und Mitte) auch Alfred Hitchcock faszinierte.



FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

Mit seinem Film »Die Vögel« setzte Alfred Hitchcock 1963 einen Meilenstein im Horrorgenre. Auch heute noch geht dem Zuschauer das Kreischen der wild gewordenen Tiere durch Mark und Bein. Doch der geniale Regisseur verwendete keine irgendwie verarbeiteten Naturlaute, sondern setzte auf damals neueste Technik: das »Mixturtrautonium«, einen Verwandten der Synthesizer.

Der eigentliche Vater dieses elektroakustischen Instruments war der Rundfunkpionier Friedrich Trautwein (1888 – 1956), der seit 1930 musikalische Akustik an der Staatlichen Hochschule für Musik in Berlin lehrte. Als Tongenerator verbaute er in seinem »Trautonium« eine Glimmlampe. Die periodische Zündung der Gasentladung erzeugte eine Kipp-schwingung mit annähernd sägezahnförmigem Verlauf, die nach Filterung mit einem Lautsprecher ausgegeben wurde. Die Tonhöhe ließ sich über ein Spielmanual wählen, das dem eines anderen frühen Synthesizers namens Hellertion nachempfunden war: eine Metallschiene, über die eine mit Widerstandsdraht umwickelte Saite gespannt war. Berührten sich beide infolge des Fingerdrucks, veränderte sich der elektrische Widerstand der Anordnung und damit die Frequenz der Kipp-schwingung; durch ein Pedal ließ sich zudem die Lautstärke regeln.

Paul Hindemith, Professor für Komposition in Berlin, schrieb die ersten Stücke für das neue Instrument. Er brachte Trautwein mit seinem Studenten Oskar Sala (1910–2002) zusammen, der nun eigens Physik studierte, um bei der von der Firma Telefunken geförderten Weiterentwicklung mitzuwirken. Das Unternehmen folgte damit der damals populären Idee, die Hausmusik durch den Einsatz elektrischer Instrumente zu beleben.

Auf der Berliner Funkausstellung 1933 wurde das später als »Volkstrautionium« bezeichnete Gerät präsentiert. Eine Thyratronröhre ersetzte die Glimmlampe, da sich so die

Zündspannung der Gasentladung und damit die Tonhöhe präziser einstellen ließ. Drehknöpfe und Schalter über dem Manual ermöglichten Oktavtranspositionen und die Wahl von Klangfarben.

Doch der Absatz blieb hinter den Erwartungen zurück, das Instrument war nicht leicht zu spielen. Trautwein verließ Berlin. Sala setzte die Entwicklung allein fort und präsentierte 1952 schließlich das Mixturtrautonium (siehe Bilder). Unter den inzwischen zwei Manualen brachte Sala Flüssigkeitswiderstände an, um die dynamische Feinabstufung zu verbessern. Vor allem aber erzeugten zehn Thyratronröhren dank einer Frequenzteilerschaltung so genannte Untertöne (Subharmonische). Im Unterschied zu Obertönen handelt es sich nicht um ganzzahlige Vielfache eines Grundtons, sondern um Bruchteile davon wie $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$. Dergleichen kommt in der Natur nur bei wenigen Instrumenten wie Gong oder Glocke vor. Sala verstand Untertöne als Spiegelbild der Obertöne, was neue Möglichkeiten der Komposition bot. Als Mixturen bezeichnete er subharmonische Akkorde, also Kombinationen von Grund- und Untertönen.

Sala blieb der einzige Virtuose auf diesem Instrument. Er spielte zeitgenössische Kompositionen ebenso wie Tanzmusik. In seinem eigenen Studio komponierte er bis in die 1990er Jahre hinein Soundtracks zu Hörspielen, Theaterproduktionen, Kultur-, Industrie- und Spielfilmen, darunter neben dem erwähnten Hitchcockklassiker auch die Geräusche des »HB-Männchens« der Zigarettenwerbung. Sein künstlerischer Nachlass von 1900 Tonbändern, Dokumenten sowie die Studioausstattung gelangte 2002 an das Deutsche Museum. Das Mixturtrautonium ist seit 1995 in der Bonner Zweigstelle zu bewundern.

Die promovierte Kunsthistorikerin **Andrea Niehaus** leitet das Deutsche Museum Bonn.

Wie groß ist die Quantenwelt?

Die Gesetze der Quantenmechanik beherrschen nicht nur den Mikrokosmos, man kann sie auch in der uns vertrauten Welt aufspüren. Vielleicht machen sich sogar Pflanzen bei der Fotosynthese und Zugvögel bei der Orientierung Quanteneffekte zu Nutze

KEVIN VAN AELST



Der unbekannte Leibniz

Es gibt kaum ein Wissenschaftsgebiet, das diesem Universalgenie nicht entscheidende Anstöße und Fortschritte verdankt. Doch zu Lebzeiten hat Gottfried Wilhelm Leibniz nur wenig publiziert. Knapp drei Jahrhunderte nach seinem Tod könnte sein Nachlass noch immer mit etlichen Überraschungen aufwarten

Schädliche Umwelthormone

Pestizide, Plastikzusätze, Konservierungsmittel: Die Tierwelt leidet schon seit Längerem unter Chemikalien, die in die Umwelt gelangen und hormonähnlich wirken. Auch der Mensch wird über die Nahrungskette zunehmend belastet. Wie gefährlich sind diese Pseudohormone?



KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Die Zukunft der Mobilität

Autos lernen in dicht gepackten Kolonnen zu rollen – ganz ohne Fahrer; Verkehrsstaus werden im Rechner simuliert; der Zugfahrplan eines Landes wird von Grund auf neu berechnet



ISTOCKPHOTO / TREVOR KELLY

Ruf der Krokodile

Die lautliche Verständigung der »Panzerrechen«, etwa Kontaktrufe zwischen Mutter und Jungem, funktioniert in vielen Fällen ähnlich wie bei Vögeln. Die Tiere benutzen dabei auch die gleichen Hirnstrukturen. All das spricht für ein gemeinsames Erbe, das von den Vorfahren der Dinosaurier herrührt

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter