

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Gesellschaft 3.0

Familiengründung:
Wie sich Ost- und
Westdeutsche
unterscheiden

MAI 2011

MEDIZIN

Die biologischen Ursachen
psychischer Störungen

KLIMA

Das tropische Regenband
verschiebt sich

LARGE HADRON COLLIDER

Die Jagd nach dem Quark-
Gluon-Plasma

Das Ende der Zeit

Untergangsszenarien
für das Universum

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



Spektrum
DER WISSENSCHAFT
5/11



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Ausbruch aus dem Gefängnis der Zeit

Ticktack, ticktack – beobachtet man den Sekundenzeiger einer Uhr, kann man sich kaum etwas anderes vorstellen, das so strikt regelmäßig, so starr und invariabel ist wie die stetig voranschreitende Zeit. Sind wir nicht letztlich alle ihre Gefangenen? Während wir uns in den drei Raumdimensionen prinzipiell frei bewegen können, bleibt uns schlicht nichts anderes übrig, als dem Zeitpfeil Richtung Zukunft zu folgen. Wohl gerade deshalb hat Menschen schon immer die Vorstellung stillstehender oder gar rückwärtslaufender Zeit fasziniert. Das fand auch seinen Niederschlag in der Sprache: So gilt etwas als »zeitlos«, das genauso gut auch vor einem, zehn oder gar 100 Jahren gewesen sein könnte. In gewisser Hinsicht kehrt sich hier der Zeitpfeil um, zumindest in unseren Köpfen.

Psychologisch gesehen erweist sich die Zeit ohnehin als überraschend flexibel. Jeder von uns kennt die subjektiv empfundene Beschleunigung und Verlangsamung der Zeit, je nach der eigenen Befindlichkeit. In einer unangenehmen Situation kriechen die Minuten nur so dahin, während sie oft geradezu davonrasen, wenn wir uns gut amüsieren. Und bei einem Déjà-vu-Erlebnis, einer lebhaften Erinnerung oder Traumszene zerbricht quasi unser subjektiver Zeitpfeil für einige Momente. Für Sciencefiction-Autoren war das Thema ohnehin schon immer eine wunderbare Spielwiese: Von Zeitreisen in die Zukunft und Vergangenheit bis hin zu Zeitpolizisten und -technikern reichen die detaillierten Fantasien. Kleiner Literaturtipp dazu: »Das Ende der Ewigkeit« von Isaac Asimov, ein wahres Juwel der klassischen SF-Literatur.

Und doch: All diese Gedankenspiele stellen die Existenz der Zeit nicht in Frage. Dass die Zeit zu einem absoluten Ende kommen könnte, aufhört zu existieren, scheint für uns nur schwer vorstellbar. Ab S. 36 geht George Musser der spannenden Frage nach, wie ein solcher Fall eintreten könnte und welche Konsequenzen das hätte.

Traditionell dominieren in »Spektrum der Wissenschaft« die Naturwissenschaften, Mathematik und Medizin. Allerdings bringen wir immer wieder auch relevante Forschung aus den Kultur-, Geistes- und Sozialwissenschaften. Unsere aktuelle Serie über die zentralen Fragen der Philosophie da nur ein Beispiel – ein höchst erfolgreiches, wie Ihre Resonanz zeigt (siehe Leserbrief ab S. 6). Fortan möchten wir uns auch vermehrt gesellschaftlichen Fragen widmen; die Beiträge werden Sie im Inhaltsverzeichnis an der Bezeichnung »Gesellschaft 3.0« erkennen. In diesem Heft erläutern Forscher vom Max-Planck-Institut für demografische Forschung ab S. 58, wie Ost- und Westdeutsche jeweils die Familiengründung in Angriff nehmen – und wie die markanten Unterschiede zu erklären sind.

Zum Schluss noch ein kleiner Hinweis in eigener Sache: Als Redaktionsleiter von »Spektrum der Wissenschaft« werde ich Sie zukünftig an dieser Stelle in losem Wechsel mit unserem Chefredakteur Carsten Könneker begrüßen.

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Ozeanograf **Julian P. Sachs** (links) von der University of Washington in Seattle untersucht zusammen mit seinem Assistenten **Conor L. Myhrvold**, wie sich die Niederschlagsverhältnisse in den Tropen als Folge des Klimawandels verändern – mit möglicherweise dramatischen Auswirkungen auf die dortige Landwirtschaft (S. 78).



Um mehr über den Zustand des Universums unmittelbar nach dem Urknall zu erfahren, messen die Physikerin **Johanna Stachel** und ihr Kollege **Peter Braun-Munzinger** am LHC bei Genf, was passiert, wenn energiereiche Bleiatome aufeinanderprallen. Ab S. 86 berichten sie über ihre ersten, überraschenden Ergebnisse.



Die Philosophin **Sabine A. Döring** von der Universität Tübingen interessiert sich besonders für Emotionen: Ab S. 64 ergründet sie das Wesen unserer Gefühle.



24 Psychiatrie



64 Gefühle



46 Merkurmission Messenger



78 Niederschläge in den Tropen

BIOLOGIE & MEDIZIN

► 24 Gestörte Schaltkreise

Thomas R. Insel

Neuroforscher identifizieren immer mehr fehlerhafte Nervenverbindungen im Gehirn als Ursache psychischer Störungen. Die Erkenntnisse weisen den Weg zu einer verbesserten Früherkennung und Therapie

ESSAY

32 Tierische Trinker

Andreas Gerloff und Manfred V. Singer

Warum neigen Menschen zu hohem Konsum von Alkohol? Zwei Suchtforscher betrachten das Laster unter dem Blickwinkel der Evolution

PHYSIK & ASTRONOMIE

TITELTHEMA

► 36 Kann die Zeit enden?

George Musser

»Nein«, sagen die einen. Die anderen entwerfen eine neue Physik, die zur Not ohne Zeitbegriff auskommt

46 Reise zum Merkur

Scott L. Murchie, Ronald J. Vervack jr. und Brian Anderson

Seit Kurzem umkreist die Raumsonde Messenger den Planeten

INTERVIEW

52 »Das war ein schöner Schreck«

»Spektrum« spricht mit dem Merkur-Experten Jürgen Oberst

SCHLICHTING!

54 Verwirrende Beugung

H. Joachim Schlichting

Rätselhafte Lichtmuster einer CD

MENSCH & KULTUR

Gesellschaft 3.0

INTERVIEW

► 58 Kultur der Familiengründung

Holger von der Lippe und Andreas Klärner

Die Entscheidung für ein Kind fällt noch heute im Osten Deutschlands deutlich anders als im Westen

SERIE PHILOSOPHIE

64 Gefühl und Vernunft

Sabine A. Döring



68 Was können wir von der Welt wissen?

Elke Brendel

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

73 Der sechseckige Einstein

Christoph Pöppe

Ein neues Modell für Quasikristalle

36

TITELTHEMA

Das Ende der Zeit

ERDE & UMWELT

► **78 Tropisches Regenband auf Nordkurs**

*Julian P. Sachs und
Conor L. Myhrvold*

Die meisten Niederschläge fallen in einem schmalen Gürtel nahe dem Äquator. Nach neuen Erkenntnissen wird sich dieses Regenband mit zunehmendem Klimawandel nach Norden verlagern – mit dramatischen Folgen für die Landwirtschaft in den Tropen

► **86 Die Jagd nach dem Quark-Gluon-Plasma**

*Johanna Stachel und
Peter Braun-Munzinger*

Am Teilchenbeschleuniger LHC schießen Physiker die Kerne von Bleiatomen mit großer Energie aufeinander. Der entstehende Feuerball verrät ihnen, was im Innersten der Materie vor sich geht

Nach S. 72 folgt eine 36-seitige Sonderbeilage des Deutschen Krebsforschungszentrums Heidelberg

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet

TECHNIK & COMPUTER

SPEKTROGRAMM

- 10** Pilze bekämpfen Malaria • Warum die Sonnenflecken so lange ausblieben • Schon Ammoniten litten unter Schmarotzern • Stoffwechselferz zur Verteidigung • Kraken schauen, wohin sie greifen • Glaskügelchen machen Mikroskop so richtig scharf

BILD DES MONATS

- 13** **Schwer verdaulicher Happen**

FORSCHUNG AKTUELL

- 14** **Das eiserne Herz des Mondes**
Auch der Erdtrabant besitzt einen teils geschmolzenen Kern
- 16** **Wie Wasser Vulkane befeuert**
Kreislauf des Wassers in Subduktionszonen im Detail verfolgt
- 19** **Marker für Krebs**
Manche RNA-Moleküle kommen in Tumoren besonders häufig vor
- 21** **Schieblehre inspiriert Aufbau von Nanoringen**
Gezielte chemische Synthese komplexer Moleküle
- 22** **Springers Einwürfe**
Wenn Dinge verschwinden

WEITERE RUBRIKEN

- 3** Editorial
- 6** Leserbrief/Impressum
- 90** Wissenschaft im Rückblick
Sommerzeit, Armprothese u. a.
- 91** Exponat des Monats
Eine Hundehütte aus Stahlbeton
- 104** Rezensionen
John Michell und Allan Brown:
So ist die Welt gebaut
Allan J. Hobson:
Das optimierte Gehirn
Gerhard Roth et al.:
Kopf oder Bauch?
Andreas Kilian:
Die Logik der Nicht-Logik
u. a.
- 110** Vorschau

Mutige Entscheidung der Redaktion

Eine zwölfteilige Serie stellt die derzeit wichtigsten offenen Fragen der Philosophie vor. (»Die größten Rätsel der Philosophie«, März 2011, ab S. 56)

Helmut Fink, Erlangen: Philosophie ist Geisteswissenschaft. Wer Wissenschaft nur im Sinn von »science« versteht, wird daher skeptisch sein. Doch konnten Naturwissenschaftler auch schon vor der neuen Spektrum-Serie den Mehrwert philosophischer Konzepte entdecken: Beispiele sind die Unterscheidung von Gründen und Ursachen (in Neurowissenschaft und Psychologie), das Ineinandergreifen von Funktionalerklärungen und Kausalmechanismen (in Biologie und Medizin) oder die Anforderungen an die Interpretation der Quantentheorie (in der Physik).

Nicht nur Ethiker, auch Wissenschaftsphilosophen haben den Forschern und der Öffentlichkeit etwas Wichtiges zu sagen. Deshalb gebührt der Philosophie ein Ort im Spektrum der Wissenschaft – und der Redaktion Dank für ihre mutige Entscheidung!

Zwei Formen des Ichs?

Der Philosoph Albert Newen beleuchtet den Beitrag der Neuropsychologie zur Theorie des Selbst. (»Wer bin ich?«, März 2011, S. 62)

Karl Hostettler, Aadorf (Schweiz): Newen erwähnt entscheidende Schritte in der Entwicklung der kognitiven Eigenschaften des Kindes. Er spricht von Ich-Gefühl. Ich würde eher von »kognitivem Ich« sprechen. Wir könnten es einem Empfindungs-Ich gegenüberstellen. Denn um die Entwicklung unseres kognitiven Bereichs geht es Newen offensichtlich; um die Reifung desjenigen, welches wir im Alltag als Bewusstsein bezeichnen. Natürlich fühlt sich die kognitive Beschaffenheit unseres Denkens auch an. Insofern passt der von Newen verwendete Ausdruck Ich-Gefühl. Doch kann er Identität der kog-

nitiven Seite mit der empfindenden Seite unserer Gefühle vortäuschen.

Wir müssen unsere Gefühle eben von verschiedenen Seiten betrachten. Da ist die kognitive Seite, die Seite des Wissens um uns selbst. Wir könnten, um den vieldeutigen Ausdruck Bewusstsein zu vermeiden, von Bewusstheit sprechen. Newen erwähnt wichtige Schritte in der kleinkindlichen kognitiven Entwicklung. Diese ist natürlich mit dem Bestehen des »False-Belief-Tests« nicht abgeschlossen. (Das behauptet auch Newen nicht.) Eine wesentliche Eigenschaft der reifen Bewusstheit bildet die Fähigkeit, uns in unserem Sein zu hinterfragen, uns Gedanken zu machen über Sinn und Zweck unseres Tuns und auch unseres Lebens.

Aber alle diese Fähigkeiten oder Eigenschaften spielen in bestimmten Fällen überhaupt keine Rolle, obschon wir in solchen Situationen durchaus über Empfindungen verfügen, nämlich in unseren Träumen. Daher scheint es mir unvermeidbar, ein Kognitions-Ich und ein Empfindungs-Ich zu unterscheiden. Beide nehmen Anteil an unseren Gefühlen. Beide entwickeln sich im Lauf unserer Ontogenese. Das kann nicht anders sein. Aber es handelt sich ganz klar um zwei Sachen, und ihre Entwicklung muss nicht im Gleichschritt verlaufen.

Antwort von Prof. Dr. Albert Newen:

Zwei Punkte möchte ich aufgreifen. Der erste ist die Frage nach der Rolle von Empfindungen bei der Entwicklung des Ichs. Da in meiner Theoriebildung klar zwischen einem Ich-Gefühl und einem begrifflichen Selbstbild unterschieden wird, sind damit genau die beiden Aspekte erfasst, die Herr Hostettler als Empfindungs-Ich und Kognitions-Ich unterschieden haben möchte. Hier sehe ich höchstens kleineren Dissens im Detail. Der zweite Punkt ist eine allgemeine Anmerkung über die Voraussetzung, die in der Geschichte der Philosophie eine große Rolle spielt, nämlich die Substanz-Eigenschaft-Unterscheidung mit der Annahme, dass jede Eigenschaft einen Träger benötigt, dem diese Eigenschaft anhaftet. Sie geht auf Aristoteles



zurück und ist bei Descartes eine wesentliche Voraussetzung für die Cogito-Überlegung.

Die einfache Form der Kritik ist durch das Zwiebelbeispiel schön illustriert. Wenn alle Eigenschaften weg sind (alle Zwiebelschalen), dann ist nichts mehr übrig, auch kein vermeintlicher Träger von Eigenschaften. Aristoteles hat damals schon von der Subjekt-Prädikat-Struktur der Sprache (»Peter ist 1,80 Meter groß«) darauf geschlossen, dass die Natur entsprechend in Träger und Eigenschaft aufgeteilt sei. Dieses falsche Verständnis wird bei meiner Theoriebildung gerade nicht vorausgesetzt. Ich nehme lediglich an, dass es Menschen als biologische Wesen gibt und dass sie die Fähigkeit haben, sich selbst zu erfassen (zu repräsentieren), zunächst auf der Gefühlsebene und dann auf der begrifflichen Ebene.

Ein Mensch, der eine solche Fähigkeit der Selbstrepräsentation besitzt, ist ein Ich. Ein Ich setzt somit nur ein biologisches System (den Menschen) und die Prozesse des Gehirns voraus. Wir müssen keine zusätzliche Sache, kein Ich als nichtbiologische Sache, annehmen. Ein Mensch mit der durch Hirnprozesse ermöglichten Fähigkeit der Selbstrepräsentation einerseits und ein Ich (eine Person) andererseits sind schlicht dasselbe. Trotzdem gibt es noch interessante Fälle, wenn die Selbstrepräsentationen von den biolo-

gischen Grenzen eines Menschen abweichen, zum Beispiel wenn ich eine Gummihand zu meinem Ich hinzuzähle. Dann müssen wir eine Differenz zwischen dem biologischen Ich (dem Menschen) und dem Inhalt des Ich-Gefühls beziehungsweise eines begrifflichen Selbstbilds machen. Für Letzteres benötigen wir die Rede von einem Selbstmodell, die Metzinger eingeführt hat. Aber das Ich erschöpft sich nicht in vom Gehirn konstruierten Inhalten. Um diesen Phänomenen Rechnung zu tragen, benötigen wir die genannte Unterscheidung von einem biologischen Ich (der Mensch mit bestimmten Fähigkeiten der Selbstrepräsentation) sowie von Ich-Inhalten, die ein Gefühls-Ich (als Einheit meiner Ich-Gefühle) oder ein begriffliches Ich (als Einheit meiner begrifflichen Ich-Vorstellungen) ausmachen. An keiner Stelle meiner Theorie wird mehr vorausgesetzt, als dass es Lebewesen in der Welt gibt, die Empfindungen haben und Inhalte erfassen können, die sich unmittelbar auf das Lebewesen selbst beziehen.

Ekkehard Domning, Hildesheim: Um einen unangreifbaren Ausgangspunkt der Philosophie zu finden, ist »Cogito, ergo sum« die richtige Wahl für den Einstieg in eine Serie über Philosophie. Descartes versucht Klarheit zu erlangen, in dem er alles, was Täuschungen verursachen könnte, aber auch alles, was interpretativ ist, aus seiner Argumentation entfernt. Sogar dass die Gedanken selbst gefälscht sein könnten, zieht er in Betracht.

Descartes reduziert daher seine Beobachtung auf das Hervorbringen von Gedanken. Nicht der Inhalt der Gedanken selbst, sondern nur die Tätigkeit des Denkens wird beobachtet. Descartes stellt fest: Ich erzeuge einen Gedanken (Objekt), den ich beobachte (Subjekt); da ich das Objekt selbst erschaffen habe, existiere ich. Für den Existenzbeweis ist es unerheblich, welcher Natur die Gedanken sind oder welches Wesen der sie Beobachtende hat. Die Bedeutung dieses Existenzbeweises kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden, ermöglicht sie mir doch abseits jeder wei-

teren Annahme, mich meiner Existenz zu vergewissern. Welch ein Sieg des Geistes über Gott oder Materie! Philosophisch kann nämlich dieser Standpunkt nur durch das Hinzufügen von mindestens einem Axiom verlassen werden. Beispielsweise durch »Ich existiere, weil Gott mich schuf« oder »Die von mir wahrgenommenen Objekte existieren auf materieller Basis«. Vor dem Zeitalter der Aufklärung war ersteres Axiom das Bestimmende, heute ist es das zweite.

Der Autor behauptet, Descartes setze den Dualismus von Geist und Welt voraus und bleibe den Beweis dafür schuldig. Eigentlich ist das Gegenteil der Fall: Der Autor verwendet ein Axiom und bleibt uns Lesern dessen Definition schuldig. Möglich, das dem Autor dies nicht einmal bewusst ist und er sich deshalb in der fruchtlosen Diskussion über die Verhältnisse von Geist und Materie verheddert. Hätte er zum Beispiel das Axiom »Die von mir wahrgenommenen Objekte existieren ausschließlich auf materieller und rationaler Basis« eingeführt, bräuchten wir uns über den »Geist« als immaterielle Realität nicht zu streiten. Eine wissenschaftliche Philosophie sollte bemüht sein (ähnlich der Geometrie), glaubhafte Axiome zu sammeln und deren Widerspruchsfreiheit aufzuzeigen. Schade, Teil 1 der Philosophiereihe hätte einen klareren Anfang verdient.

Antwort von Prof. Dr. Albert Newen:

In der Stellungnahme von Herrn Domning fehlt leider eine wichtige Unterscheidung, die bei Descartes selbst zu finden ist und die auch in meinem Artikel gemacht wird, nämlich die Unterscheidung von einem ersten Argument dafür, dass es ein Ich gibt, und einem zweiten Argument zu der Frage, welche Art von Realität das Ich hat, ob es eine geistige oder eine physische Entität ist.

Ich möchte kurz zu beiden Punkten Stellung nehmen: Das Cogito-Argument (welches man auch noch unabhängig kritisieren kann, was ich hier unterlasse) vermag nur zu zeigen, dass es ein Ich gibt, sobald und solange man Gedanken oder Empfindungen bemerkt. Aber es bleibt offen, welchen Status das Ich hat.

Das hält Descartes klar fest, wenn er nach Abschluss der Cogito-Überlegung schreibt: »Noch verstehe ich aber nicht zur Genüge, wer ich denn bin, der ich jetzt notwendig bin.« (Zweite Meditation, Phil. Bibliothek, Meiner, Bd. 271, S. 22). Dann erst beginnt das zweite Argument, mit dem Descartes zeigen möchte, dass das Ich eine geistige (und nicht eine körperliche) Substanz ist. Und dieses zweite Argument ist schlicht fehlerhaft. Es besagt: Das Ich ist eine geistige Substanz, weil ich mir vorstellen kann, ohne jede körperliche Eigenschaft zu existieren. Der Fehler ist, dass aus einer Vorstellungsmöglichkeit nicht folgt, dass diese eine echte, ernst zu nehmende Möglichkeit ist. Zur Untermauerung habe ich auf das Perpetuum mobile verwiesen, das naturgesetzlich nicht möglich, das heißt prinzipiell nicht realisierbar ist, aber problemlos vorstellbar ist – zumindest solange man nicht versteht, dass die Vorstellung mit den Naturgesetzen nicht vereinbar ist.

Descartes liefert also kein tragfähiges Argument dafür, dass das Ich eine geistige Substanz ist. Dagegen gibt es gute Argumente dafür, dass das Ich eine physische, vom Gehirn konstruierte Einheit ist, die im Normalfall mit der biologischen Einheit Mensch zusammenfällt. Manchmal gibt es Sonderbedingungen (wie im Fall der Gummihand-Illusion), die zudem unterstreichen, dass das Gehirn das Ich konstruiert.

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

Biologische Erdbebenwarnung

Kenneth Catania beschrieb, wie Boden-vibrationen bestimmte Regenwürmer an die Oberfläche treiben. (»Maulwurf-Alarm à la Darwin«, Februar 2011, S. 30)

Raimund Luksch, Klagenfurt/Wörthersee (Österreich): Wurmgrunzen kennt man nicht nur von Maulwürfen und regenwurmsuchenden Fischern, sondern auch vom Planeten Erde. So sagte einmal ein erfahrener alter Bauer: »Wenn bei schönem Wetter so viele Regenwürmer herumkriechen, dann kommt ein Erdbeben.« Diese Behauptung ist vollkommen richtig, wie sich bei den bei-

den Erdbeben in Friaul vom 5. Mai und 15. September 1976 zeigte.

Meiner Meinung nach reagieren die Regenwürmer auch auf unhörbaren Infrasschall unter 20 Hertz. Das ist sicher der Grund, warum bei den Beben im Jahr 1976 kein menschliches Wesen das Wurmgrunzen der Erde schon Stunden vor dem Beben wahrgenommen hat, sehr wohl aber verschiedene Tierarten darauf reagierten, darunter auch die Regenwürmer.

Erratum

»Maulwurf-Alarm à la Darwin«
Februar 2011, S. 30

Das englische Wort *herring gull* wurde fälschlich mit Heringsmöwe übersetzt. Korrekt ist Silbermöwe.

Kleine Eiswunder

H. Joachims Schlichtings Erklärung eines ungewöhnlichen physikalischen Phänomens regte gleich mehrere Leser an, eigene Fotos davon einzusenden. (»Eiszapfen, die gen Himmel wachsen«, März 2011, S. 38)

Vielen Dank an: Heinz-Richard Stang, Elbtal-Hangenmeilingen; Hugo Bender, Edegem (Belgien); Dr. Helen Wider, Wettlingen (Schweiz) (von oben nach unten)



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

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 (Spektrogramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Entwicklungsredaktion: Dr. Reinhard Breuer (Ltg.)
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. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Christian Hammer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Gerhard Samulat, Dr. Sven Titz
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (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. 0211 887-2483; Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 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. 0211 887-2053; Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenteams@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2987; Fax 0211 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 Eldern

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 Inchcoombe, 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.



UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



CD-ROM Spektrum 2010

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10.000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows.

Die Jahrgangs-CD-ROM von Spektrum der Wissenschaft kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-941205-69-7



EPOC 3/2011

epoc ist das moderne Magazin für Archäologie und Geschichte. Bleiben Sie bei der wissenschaftlichen Erforschung unserer Vergangenheit auf dem Laufenden! Themen in **epoc** 3/2011 sind u. a.:

- >> Als das Denken erwachte – Forscher ergründen die Geschichte der Menschwerdung
- >> Geschichte im Internet: Wie das Word Wide Web die Arbeit von Historikern verändert
- >> Heinrich V.: Mit dem Tod des skrupellosen Kaisers endete 1125 die Herrschaft der Salier
- >> Archäologie unter Wasser: Wie Forscher vom Bau der Gaspipeline durch die Ostsee profitieren

epoc kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (6 Ausgaben pro Jahr)

für € 40,50 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 34,50) zu beziehen.



GEHIRN&GEIST 5/2011

Zehnmal pro Jahr erwarten Sie in **G&G** spannende Berichte aus folgenden Themengebieten: Psychologie, Hirnforschung, Medizin, Psychiatrie, Psychotherapie, Philosophie, Pädagogik, Religion, Neurotheorie und künstliche Intelligenz. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

- >> Die Kraft der Natur: Stressabbau, Konzentration, Gesundheit – wie unsere Psyche im Grünen aufblüht
- >> Emotionen: Warum man Angst riechen kann
- >> Bildgebung: Forscher rekonstruieren Hirnzellen in 3-D
- >> Fehlerkultur: Irren ist nützlich
- >> Neurochemie: Giftige Gase als Botenstoffe im Nervensystem

Gehirn&Geist kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (10 Ausgaben pro Jahr)

für € 68,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 55,-) zu beziehen.



SDW-HIGHLIGHTS 1/2011

»IST MATHEMATIK DIE SPRACHE DER NATUR?«

Die Themenauswahl dieses Highlights regt zur Entdeckung der Mathematik in der alltäglichen Welt an. Unter anderem werden Fragen behandelt wie: Welchen Beitrag liefert die Zahlentheorie zur Verschlüsselung von Nachrichten? Wie viel Mathematik steckt in der Tonleiter? Gibt es eine unüberwindliche Grenze mathematischer Erkenntnis? Aus dem Inhalt:

- >> Womit rechnen wir?
- >> Aus welchen Formen besteht die Welt?
- >> Der Dämon und der Schmetterlingseffekt

Das Highlight (unveränderter Nachdruck) »Ist Mathematik die Sprache der Natur?« kostet € 8,90.

Dieses und weitere ausgesuchte Sonderhefte finden Abonnenten zum Sonderpreis von je € 7,40 (inkl. Inlandsversand) unter www.spektrum.de/aboplus

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

MEDIZIN

Pilze bekämpfen Malaria

Forscher haben einen originellen Weg gefunden, gegen den tödlichen Malariaerreger *Plasmodium falciparum* vorzugehen: Mit einem genetisch modifizierten Pilz schleusen sie Wirk-

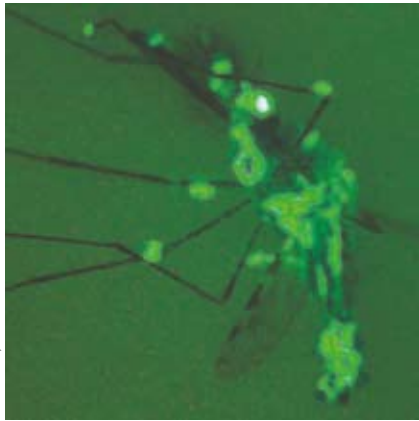
stoffe gegen den Übeltäter in die Stechmücke, die den Parasiten auf Menschen überträgt. Das reduziert die Zahl der Plasmodien im Insekt erheblich – und somit gleichzeitig auch das Ansteckungsrisiko für den Menschen.

Raymond St. Leger von der University of Maryland in College Park manipulierte mit seinem Team den Pilz *Metarhizium anisopliae*, der Stechmücken befällt. Die Wissenschaftler pflanzten ihm Gene für menschliche Antikörper gegen den Malariaerreger sowie für einen Giftstoff ein, der für Plasmodien toxisch ist. Auf die Mü-

cken gesprüht, vermehrte sich der genetisch modifizierte Pilz und stellte die Abwehrstoffe in den Insekten her. Folge: Rund drei Viertel der Malariaerreger in diesen gingen zu Grunde.

Der Pilz dürfte nach Ansicht der Forscher wesentlich umweltverträglicher und spezifischer wirken als gängige Insektenvernichtungsmittel, weil *M. anisopliae* nur bestimmte Arten befällt. Es genügt, den Pilz an Fenstern und Betten zu versprühen; seine Sporen bleiben monatelang infektiös für die Moskitos. Er bekämpft die Malariaerreger sogar dann noch erfolgreich, wenn sie sich in der Mücke schon stark vermehrt haben. St. Legers nächstes Ziel ist nun ein Praxistest in den afrikanischen Tropen.

Science 331, S. 1074–1077, 2011



WEIGLO FANG, UNIVERSITY OF MARYLAND

Eine mit *M.-anisopliae*-Pilzen (hellgrün) infizierte *Anopheles*-Stechmücke

ASTRONOMIE

Warum die Sonnenflecken so lange ausblieben

Die Anzahl der Sonnenflecken variiert in einem etwa elfjährigen Zyklus. Manchmal dauert es aber auch deutlich länger, bis nach einem Aktivitätsminimum wieder mehr Flecken auftauchen, so etwa gerade zurzeit. Eine mögliche Ursache für solche Verzögerungen diskutieren nun Forscher um Dibyendu Nandy vom Indian Institute of Science Education and Research in Kalkutta: Gemäß ihren Computersimulationen bleiben Flecken länger aus, wenn sich die Geschwindigkeit der solaren Plasmazirkulation nach einem bestimmten Muster verändert. Das Plasma steigt dabei am Äquator auf und strömt in Richtung der Pole, wo es absinkt und wieder zurück zum Äquator fließt.

Sonnenflecken entstehen, wenn starke Magnetfelder die Hitze aus dem Inneren daran hindern, an die Oberfläche der Sonne zu gelangen. Dadurch kühlt sich diese dort ab und erscheint dunkler. Das Zusammenspiel von Sonnenflecken und globaler Plasmazirkulation

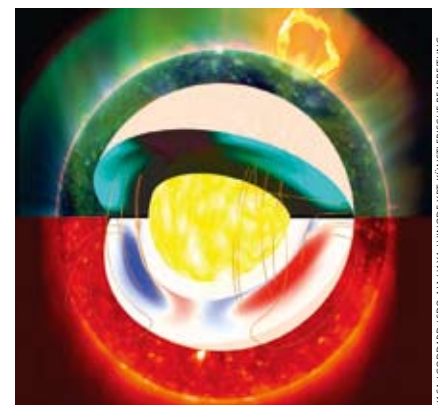
stellten Nandy und sein Team nun für 210 Sonnenfleckenzyklen nach.

Die Forscher variierten dabei die Geschwindigkeit der Zirkulation nach einem Zufallsmuster zwischen 15 und 30 Meter pro Sekunde. Ihre Berechnungen ergaben, dass eine schnelle Strömung in der ersten Hälfte eines Zyklus, gefolgt von einer langsameren Strömung in der zweiten Hälfte, zu einem besonders ausgeprägten Sonnenfleckenminimum führt.

Mit seinem Computermodell konnte das Team auch den letzten Zyklus nachbilden, der im Jahr 1996 begann. Dessen Aktivitätsmaximum im Jahr 2000 wurde durch ein außergewöhn-

lich ausgedehntes Aktivitätsminimum abgelöst, charakterisiert durch ein sehr schwaches Magnetfeld an den Polen und eine überdurchschnittlich lange Periode ohne Sonnenflecken. Statt wie gewöhnlich um die 300 Tage dauerte das Minimum im vergangenen Zyklus 780 Tage und war damit das längste seit 1913. Ob das nun vorgestellte Modell tatsächlich die Bedingungen auf der Sonne genau wiedergibt, müssen allerdings Beobachtungen noch bestätigen.

Nature 470, S. 366–368, 2011



NASA/CORBIS/ISRO/AMJ/ANSA/INNOVEX/RT/KÜNSTLICHE BEARBETUNG; CYGNUS/SOLKATA UND WILLIAMS/BRIDGMAN/KONZEPTION UND SIMULATIONS-DATEN; DIBYENDU NANDY, ANDRES MUNOZ-ARABILLO UND PETRUS CH. MARTENS

PALÄONTOLOGIE

Schon Ammoniten litten unter Schmarotzern

Parasiten gibt es so lange wie das Leben selbst: Auch längst ausgestorbene Arten wie die Ammoniten wurden vor 400 Millionen Jahren schon von Saugwürmern (Trematoden) gepiesackt. Das verriet ein Fossilfund aus Marokko einem Team um Dieter Korn von der Humboldt-Universität Berlin. Nebenbei lösten die Forscher damit auch das alte Rätsel um die houseschen Gruben – charakteristische Dellen in den Abdrücken der Innenseiten von Ammonitenschalen.

Diese Spuren kommen in verschiedenen Gestalten vor: oval, in Linien angeordnet, in radialen Reihen oder paarweise. Klar war bereits, dass die seltsamen Gruben keine normalen Gehäusestrukturen darstellen. Dazu sind sie zu unregelmäßig verteilt, zudem tauchen sie auch keineswegs in allen Individuen einer Art auf.

An den neuen Fossilien entdeckten die Forscher nun, wie die Vertiefungen einst entstanden: Es handelt sich

um die Negativabdrücke von Erhebungen an der Schaleninnenseite – Kalkkonkretionen, die sich um Fremdkörper in der Schale der Weichtiere bildeten, dann aber mit hauchdünnen Röhren auch an der Wand festwuchsen. Nur Schmarotzer hätten dort solche Strukturen hervorbringen können, meinen die Wissenschaftler: Um an diese Orte tief im Inneren der Schale vorzudringen, mussten sie sich durch das Fleisch des Ammoniten hindurchbohren. Die Überbleibsel ähneln dann auch jenen, die moderne Saugwürmer in Muscheln und Schnecken hinterlassen.

Für die betroffenen Tiere war das zwar sicherlich störend, aber kaum tödlich, denn alle untersuchten Ammoniten hatten trotz des Befalls ihr Erwachsenenalter erreicht. Möglicherweise waren sie auch nur Zwischenwirte für die Parasiten: Die Forscher verweisen darauf, dass die ältesten Spuren solcher Schmarotzer zeitlich etwa mit dem Entstehen der



KENNETH DE BAETS, CHRISTIAN KLUG UND DIETER KORN

Die Schale des fossilen Ammoniten *Sellanarcestes wenkenbachi* zeigt charakteristische ovale Kerben, die auf Saugwürmer zurückgehen.

Kieferfische zusammenfallen, in denen ebenfalls fossile Spuren von Trematoden gefunden wurden. Heute noch dienen Wirbeltiere oft als Endwirte für Saugwürmer – sie nehmen die im Weichtier-Zwischenwirt vermehrten Parasiten häufig über ihre Nahrung auf.

Acta Palae. Pol. 56, S. 159–180, 2011

BOTANIK

Stoffwechsellenzym zur Verteidigung

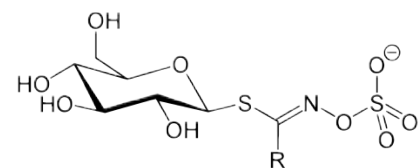
Chemische Kriegsführung ist im Pflanzenreich gang und gäbe – auch bei Kreuzblütlern wie der Acker-schmalwand *Arabidopsis*. Gegen Fraßfeinde setzen sie so genannte Senfölglykoside ein, welche giftige Isothiozyanate freisetzen, wenn die Pflanze beschädigt wird. Ungewöhnlich ist dabei der Ursprung der Chemiewaffe: Sie entstand offenbar, als einem harmlosen Stoffwechsellenzym ein Molekülteil verloren ging, berichten Jan-Willem de Kraker und Jonathan Gershenzon vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena. Ein entscheidendes Enzym der Senfölglykosid-Produktion, die Methylthioalkylmalat-Syntha-

se (MAM), ähnelt sehr einem zweiten Enzym mit ganz anderen Aufgaben, der Isopropylmalat-Synthase (IPMS). Diese ist an der Herstellung der Aminosäure Leucin beteiligt.

Wie kommt es, dass zwei strukturell eng verwandte Moleküle so unterschiedliche Funktionen erfüllen? Vermutlich hat sich zuerst das ursprüngliche IPMS-Gen verdoppelt, ein keineswegs seltener Vorgang. Danach ging dem Gen jedoch ein entscheidender Abschnitt von 120 Aminosäuren verloren, der die Gesamtstruktur des Moleküls mitbestimmt und auch einen Leucinsensor enthält. Dieser stoppt die IPMS, sobald genug Leucin

vorhanden ist. Das veränderte Enzym arbeitet hingegen ungebremst und produziert dank seiner veränderten Struktur nun Senfölglykoside. Eine unvorhergesehene Mutation verschaffte dem Urahn der Kreuzblütler also offenbar seine potente Waffe gegen Feinde.

The Plant Cell 23, S. 38–53, 2011



Senfölglykoside (Glukosinolate) setzen giftige Isothiozyanate frei und schützen so Pflanzen vor Fraßfeinden.

PUBLIC DOMAIN

ZOOLOGIE

Kraken schauen, wohin sie greifen

Dass Kraken ihre Fangarme mit den Augen kontrollieren, hielten Zoologen auf Grund zahlreicher Fehlschläge bei entsprechenden Experimenten bislang für ausgeschlossen: Das Gehirn der Kopffüßer wäre wohl hoffnungslos damit überfordert, die

vielfältigen Informationen aus verschiedenen Sinneskanälen zu filtern und zu verarbeiten. Nun wurden die Zweifler eines Besseren belehrt.

Tamar Gutnick von der Hebrew University in Jerusalem und ihre Mitarbeiter entwickelten einen Versuchsaufbau, bei dem Gemeine Kraken (*Octopus vulgaris*) mit Hilfe nur eines ihrer Arme einen Leckerbissen ergattern sollten. Die Nahrung war lediglich durch eine enge durchsichtige Röhre zugänglich, die sich in drei Endkammern aufspaltete. Eine der drei trug

Nutzt ein Krake die Augen, um seine Arm-bewegungen zu steuern? Lange dachten Forscher, diese Aufgabe sei zu komplex. Doch bei neuen Experimenten legten die Tiere erstaunliche Intelligenz an den Tag.

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie auf spektrumdirekt.de

eine schwarze Markierung und enthielt das Futter. Die Tiere hatten jeweils nur einen Versuch, um an den schmackhaften Happen heranzukommen.

Bei ihren Bemühungen nahmen die Kopffüßer in ihren Becken Positionen ein, die ihnen ungehinderte Sicht auf ihren tastenden Arm ermöglichten. Mit Erfolg – sobald sie gelernt hatten, dass die schwarze Markierung Nahrung bedeutete, erreichten die Tiere ihr Ziel wesentlich häufiger als bei einem Vergleichsexperiment mit undurchsichtigen Röhren, die keine visuelle Kontrolle erlaubten. Für Gutnick und ihre Kollegen ist damit klar: Kraken sind in der Lage, Umgebungsinformationen unterschiedlicher Sinne miteinander zu verrechnen und so komplexe Aufgaben zu lösen.

Curr. Biol. 21, S. 460–462, 2011



RICHARD ZINKEN

OPTIK

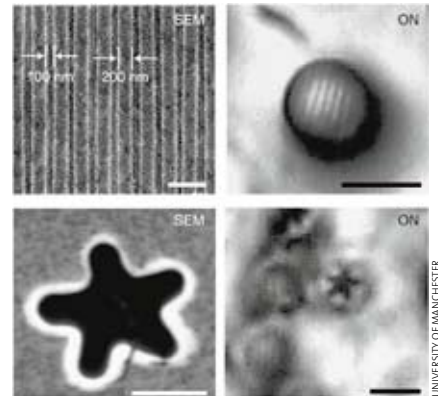
Glaskügelchen machen Mikroskop so richtig scharf

Mit winzigen Glaskügelchen haben britische Wissenschaftler das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops so weit erhöht, dass es prinzipiell sogar Objekte von der Größe einzelner Viren aufnehmen kann. Die Forscher knackten damit die »abbesche Auflösungsgrenze«, die bei etwa der Hälfte der verwendeten Lichtwellenlänge liegt. Wegen ihr können herkömmliche Lichtmikroskope keine Details kleiner als rund 200 Nanometer auflösen. Viele Bestandteile von Zellen waren daher bislang nur im Elektronenmikroskop deutlich zu erkennen.

Ihr neues Mikroskop löse Einzelheiten bis zu einer Größe von 50 Nanometern auf, schreiben die Wissenschaftler um Zengbo Wang von der University of Manchester. Hierfür nutze es so genannte evaneszente Wellen (von lateinisch *evanescere*: sich verflüchtigen). Diese enthalten Informationen über Details des Objekts, die kleiner als 200 Nanometer sind, ver-

schwinden aber normalerweise noch sehr nah am Objekt und gelangen daher nicht bis zum Objektiv eines Mikroskops. Bei Wangs Entwicklung fangen hingegen wenige tausendstel Millimeter messende Glaskügelchen, die auf dem beleuchteten Objekt liegen, die evaneszenten Wellen auf und erzeugen ein vergrößertes virtuelles Bild für das Mikroskop. Eine ähnlich gute lichtmikroskopische Auflösung hatten zuvor zwar schon so genannte Superlinsen erreicht, die allerdings Laserlicht verwenden müssen, was die Probe erhitzen und beschädigen kann.

Die neue Technik demonstrierte Wangs Team zunächst an 50 Nanometer großen Poren in einer netzartigen Probe aus Aluminiumoxid sowie an Oberflächendetails einer Blu-Ray-Disk. Liegen viele Kügelchen nebeneinander, lassen sich auch größere Bereiche der Proben abbilden. Weitere Verbesserungen könnten eine Auflösung von unter 20 Nanometern erlauben – also die

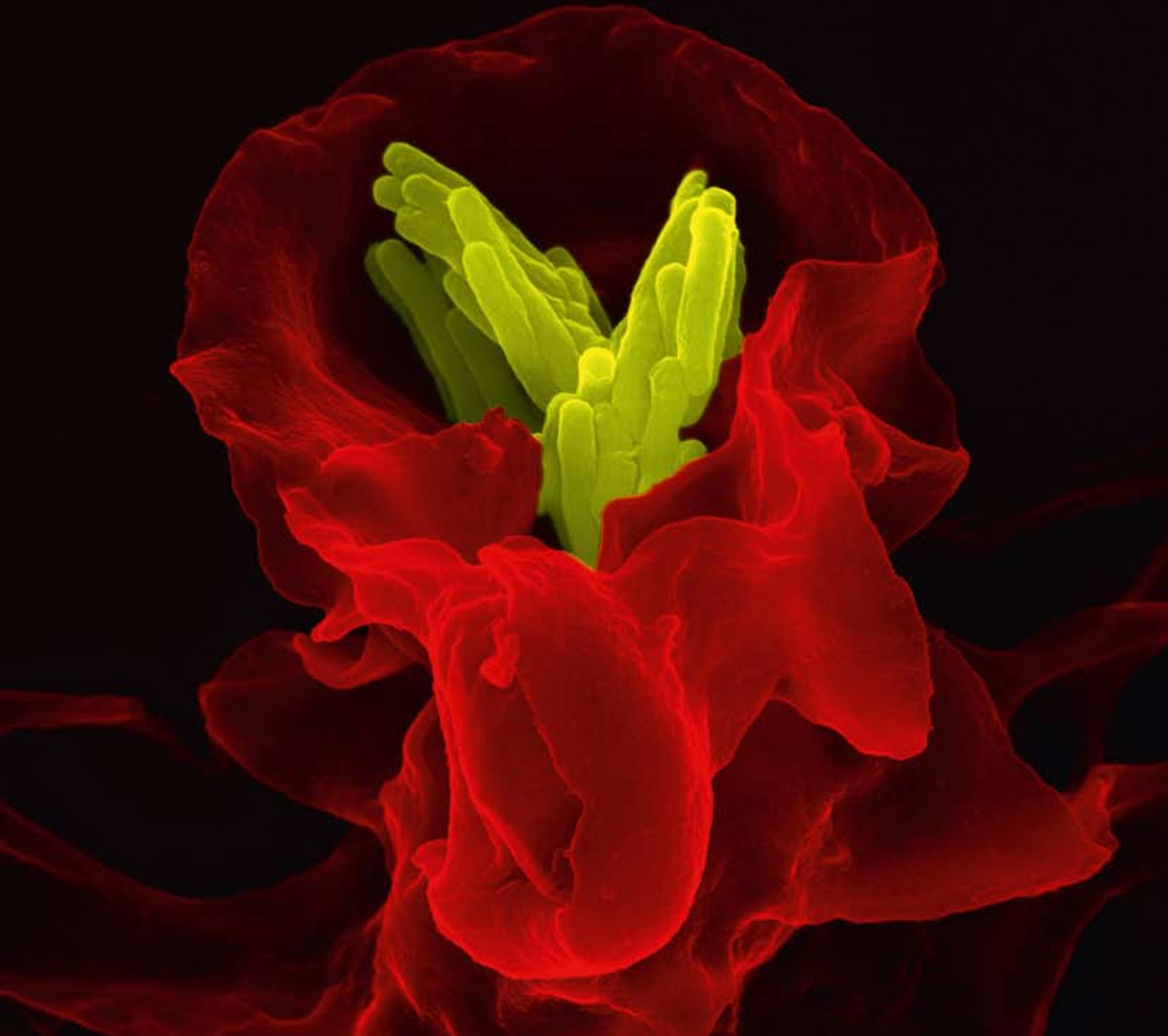


UNIVERSITY OF MANCHESTER

Die Bilder zeigen Aufnahmen eines Elektronenmikroskops (links) und des neuen Verfahrens, das eine bessere Auflösung als herkömmliche Lichtmikroskope ermöglicht (rechts): oben Blu-Ray-Disk, unten Stern auf einer DVD.

direkte Beobachtung von Viren oder des Innenlebens einer Zelle.

Nature Comm. 10.1038/ncomms1211, 2011



SCHWER VERDAULICHER HAPPEN

VOLKER BRINKMANN, MPI FÜR INFECTIOUSBIOLOGIE

Die Erreger der Tuberkulose (*Mycobacterium tuberculosis*) dringen meist über Tröpfcheninfektion in den Körper ein. Dabei wird ihr Vormarsch in der Regel schon in den Atemwegen gestoppt: Makrophagen (rot) nehmen dort die Bakterien (grün) auf und machen sie so zunächst unschädlich, ohne sie jedoch zuverlässig zu zerstören. Damit können die Keime jahrelang im Körper überdauern und werden bei einer Schwächung des Immunsystems wieder aktiv.

Eine neue Methode herauszufinden, ob ein Mensch akut an Tuberkulose erkrankt ist oder die Erreger nur ruhend in sich trägt, entdeckten nun Stefan Kaufmann vom Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin und seine Mitarbeiter. Anhand der Aktivität von nur fünf Genen konnten sie mit über 90-prozentiger Sicherheit bestimmen, ob es sich um einen Patienten oder einen latent infizierten handelte.

Genes Immun. 12, S. 15–22, 2011

SEISMOLOGIE

Das eiserne Herz des Mondes

Eine neue Analyse jahrzehntealter Bebenmessungen zeigt: Wie die Erde besitzt auch der Mond einen eisenreichen Metallkern. Und offenbar ist er ebenfalls zum Teil geschmolzen.

THORSTEN DAMBECK

Seit die ersten Menschen den Mond betrat, erforschen Wissenschaftler den inneren Aufbau des Erdtrabanten. Die wichtigsten Daten hierzu stammen von Seismometern, welche die Astronauten der Apollo-Missionen zwischen 1969 und 1972 auf dessen Oberfläche installierten. Diese Messungen sind einzigartig in der Weltraumforschung, denn bis heute liegen nur vom Erdmond verwertbare seismische Messungen vor. Aus deren Analyse sowie aus Messdaten des lunaren Schwerfelds folgerten Forscher unter anderem, dass die Mondkruste auf der erd zugewandten Seite nur halb so dick ist wie auf der Rückseite (siehe »Die zwei Gesichter des Mondes«, *SdW* 11/2009, S. 42).

Jahrzehnte später haben sich die Beben­daten nun erneut als Fundgrube erwiesen. Wie das Wissenschaftsmagazin »Science« im Januar meldete, konnte ein internationales Team um die US-Forscherin Renee Weber vom Marshall Space Flight Center der NASA mit ihrer Hilfe zwei fundamentale Fragen beantworten: Besitzt der Mond einen metallischen Kern? Und wenn ja: Äh­nelt er dem teilweise flüssigen Eisen-Nickel-Kern der Erde oder ist er völlig erstarrt?

Informationen über die Schichtenfolge in einem Himmelskörper lassen sich nach einem einfachen Prinzip erheben: »Wenn seismische Wellen den Mond durchdringen und in einer bestimmten Tiefe auf Schichtgrenzen stoßen, wo sie reflektiert werden«, erklärt Koautorin Peiying Lin von der Arizona State University, »dann sollten solche Signale auch in den Seismogrammen auftauchen.« Sie tatsächlich zu entdecken, erwies sich im Fall der Apollo-

Daten aber als schwierig. Denn die Reflexionen von der Kern-Mantel-Grenze sind so schwach, dass sie im Hintergrundrauschen untergehen. Auch aus einem weiteren Grund widersetzte sich das Rätsel um den Mondkern lange seiner Aufklärung. Das Netzwerk der Seismometer war nicht optimal: Es deckte nur ein kleines Gebiet der Mondoberfläche ab, das noch dazu ausschließlich auf der Vorderseite des Mondes lag. Außerdem waren nur vier der fünf Bebenmesser tatsächlich längere Zeit im Einsatz.

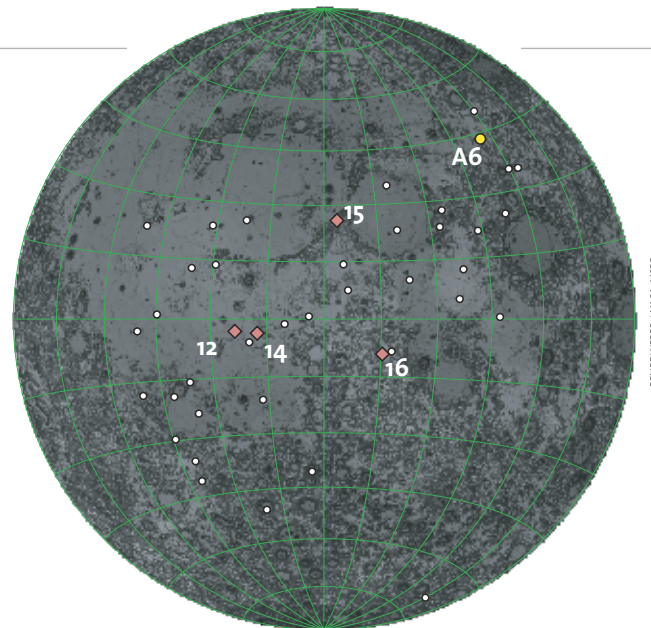
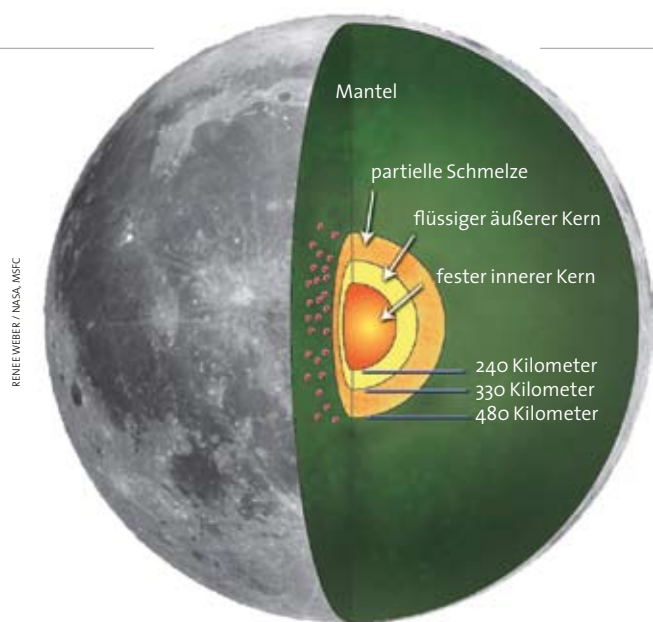
100 Bebenester lokalisiert

Immerhin zeichneten die Instrumente rund 13 000 Mondbeben auf, bis man sie 1977 aus Kostengründen abschaltete. Verglichen mit irdischen Erschütterungen sind die Beben schwach und erreichen zumeist kaum die Stufe 2 der Richterskala. Die meisten stammen aus dem Mondmantel, aus Tiefen zwischen 800 und 1200 Kilometern. Etwa 100 aktive Zonen, so genannte Bebenester, haben die Forscher dort lokalisiert. Seit mehreren Jahren sind nun Bemühungen in Gang, die Daten mit zeitgemäßen Methoden neu zu untersuchen. Dabei erzielten die Forscher schon wichtige Teilergebnisse. Rund 7000 Mondbeben haben sie mittlerweile Nestern zugeordnet und außerdem die Modelle verfeinert, mit denen sie die – von irdischen Gezeitenkräften ausgelöste – Ausbreitung von seismischen Wellen im Mond und insbesondere ihre Geschwindigkeit beschreiben. Weiterhin identifizierten die Planetologen einander überlagernde zeitliche Muster, in denen die Erschütterungen auftreten.

Das größte ungelöste Rätsel blieb allerdings der Mondkern. Forscher hatten zum Beispiel geglaubt, Meteoriteneinschläge auf der Mondrückseite zu seiner Vermessung heranziehen zu können, denn auch ein solcher Aufprall hinterlässt Spuren in den Seismometerdaten. Doch ihre Studien erbrachten kein eindeutiges Ergebnis. Nur mit neuen Messungen, so lautete ein unter Experten verbreitetes Mantra, lasse sich der vermutete Kern nachweisen.

Mit großem Rechenaufwand hat Renee Webers Team nun gezeigt, dass die alten Daten eben doch die nötigen Informationen beinhalten. Zunächst überlagerten die Forscher die Seismogramme vieler Beben aus jeweils demselben Bebenest. Auf diese Weise konnten sie das statistische Rauschen dämpfen und die Datenqualität verbessern. Dieser »Stapelung« folgt das »Array Processing«: Dabei werden Erdbebendaten mehrerer Seismometer addiert und gemeinsam analysiert. Durch numerische Methoden lassen sich dabei Signale, die aus bestimmten Richtungen stammen, im Vergleich zu den anderen Richtungen verstärken. Diese Art der Kontrastverstärkung hebt auch die so genannten P-Wellen hervor, die fast senkrecht aus dem Mondboden kommen. P-Wellen schwingen wie Schallwellen in Ausbreitungsrichtung und durchqueren auch geschmolzenes Material. So durchlaufen sie den gesamten Mondkörper und enthalten damit Informationen über seinen Kern.

In einem weiteren Schritt werden die Seismogramme derart synchronisiert, dass sich die bei einer bestimmten Größe des Kerns erwarteten Refle-



Das Innere des Mondes ist vermutlich teilweise flüssig (Bild links). Forscher fanden dies heraus, als sie die Daten der von Apollo-Missionen hinterlassenen seismischen Instrumente (Bild rechts, rote Diamanten) jetzt neu auswerten. Die roten Punkte im Bild links markieren tief gelegene Epizentren von Mondbeben, im rechten Bild sind Epizentren durch weiße Punkte gekennzeichnet. Daten zum Epizentrum A6 (gelber Punkt rechts) illustrierten in der »Science«-Veröffentlichung die Verfahren der Autoren.

xionen addieren und aus dem Rauschen hervortreten. Durch systematisches Ausprobieren ermitteln die Forscher den richtigen Wert. Beide Methoden zusammen führten schließlich zum Erfolg: Im tiefsten Inneren des Mondes kam allmählich ein kleiner Metallkern zum Vorschein.

Weitere Informationen lieferten die S-Wellen. Anders als P-Wellen schwingen sie senkrecht zur Richtung ihrer Ausbreitung und können keine Flüssigkeiten durchdringen. Ihre Analyse ergab, dass der Mondkern ähnlich dem Erdkern aus einer flüssigen und einer festen Zone besteht. Der innere Kern des Mondes ist fest, sein Radius beträgt 240 Kilometer. Es folgt eine flüssige metallische Schicht, die 90 Kilometer mächtig ist und bis zu sechs Prozent Schwefel enthalten soll. Insgesamt dürfte der Mondkern zu etwa 40 Prozent erstarrt sein. Den gesamten Kernradius beziffern die Autoren mit 330 plus/minus 20 Kilometern, bei einem Mondradius von knapp 1740 Kilometern. Oberhalb des Kerns folgt dann eine teilweise geschmolzene Schicht aus Gestein, die sich bis zu einer Distanz von 480 Kilometern vom Mondzentrum erstreckt.

Ähnliche Zonen existieren auch im oberen Erdmantel, erklärt Weber: »Die irdische Asthenosphäre in rund 100 bis 150 Kilometer Tiefe ist ebenfalls teilweise geschmolzen.« Auf dieser plastisch verformbaren Gesteinsschicht bewegen sich die Platten der starren Lithosphäre.

Wie muss man sich nun ihr Pendant tief im Mondinneren vorstellen? Die Wissenschaftlerin greift für einen Vergleich ins Bäckereiregal: »Wie Rosinen im Teig liegen, so ist die Schmelze in die feste Gesteinmatrix eingebettet.« Eine alternative Möglichkeit sei, dass die Schmelze homogener verteilt ist und sich filmartig über Materialgrenzen im Gestein gelegt hat.

Mittlerweile konnten auch weitere Wissenschaftler die Existenz des Mondkerns bestätigen. So stellte das Team um Raphael F. Garcia von der Universität de Toulouse seine Resultate im vergangenen Dezember auf einer Konferenz der American Geophysical Union in San Francisco vor. Die Forscher hatten die Daten der Apollo-Seismometer mit einer anderen Methode untersucht. Sie konzentrierten sich auf eine kleine Auswahl von Beben, deren Nester hin-

reichend genau lokalisiert sind. Für den Radius des Kerns erhalten sie mit 350 plus/minus 20 Kilometern einen weitgehend mit Webers Ergebnissen übereinstimmenden Wert.

Ob die ermittelten Zahlen durch zukünftige Arbeiten bestätigt werden, muss sich laut Martin Knapmeyer vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) noch zeigen. Als gesichert sieht er hingegen die Existenz des Kerns und die Erkenntnisse über seine Schichtung an. Der Berliner DLR-Forscher, der an der Publikation nicht beteiligt war, vergleicht den Durchbruch in der Mondphysik mit der ersten Vermessung des Erdkerns durch den deutsch-amerikanischen Seismologen Beno Gutenberg vor rund einem Jahrhundert. Bessere Modelle des lunaren Mantelgesteins könnten Knapmeyer zufolge auch bei der weiteren Vermessung des Kerns helfen. Erst wer dessen genaue Ausmaße kennt, kann die Entstehungsgeschichte des Mondes und seine weitere Entwicklung verstehen.

Dafür interessieren sich auch Geophysiker, denn wahrscheinlich entstand der Mond infolge der Kollision der jungen Erde mit einem marsgroßen Proto-Planeten. Letzterer wurde dabei zwar zerstört. Teile seines Kernmaterials existieren jedoch bis heute als metallisches Zentrum des Mondes.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und arbeitet als Wissenschaftsautor in Heidelberg.

Wie Wasser Vulkane befeuert

Wo ozeanische unter kontinentale Kruste abtaucht, gelangt Wasser ins Erdinnere. Bei seinem Wiederaufstieg verursacht es Vulkanismus. Nun haben Forscher den Weg des Wassers durch eine Subduktionszone im Detail verfolgt.

VON SABRINA HÜTTERMANN

Wasser bedeckt über 70 Prozent der Erde und macht sie so zum Blauen Planeten. Doch auch tief im Erdinneren steuert es zahlreiche Vorgänge. Viele davon liegen für Wissenschaftler bis heute im Dunkeln, weil sie in unzugänglichen Tiefen stattfinden.

Der Zusammenhang zwischen Wasser und geologischen Phänomenen zeigt sich am deutlichsten an den Rändern kollidierender Erdplatten, wo sich die ozeanische Kruste unter die leichtere kontinentale schiebt. An diesen so genannten Subduktionszonen bebht häufig die Erde, und Vulkane reihen sich perlschnurartig aneinander. Eine wichtige Rolle für beide Naturerscheinungen spielt Wasser, das bei den hohen Temperaturen in über 100 Kilometer Tiefe aus der abgetauchten ozeanischen Platte ausgetrieben wird.

Woher stammt dieses Wasser? Wenn die ozeanische Kruste unter den Kontinent abtaucht, transportiert sie erhebliche Mengen davon mit in die Tiefe. Die Platte verbiegt sich bei der Subduktion, wodurch Risse und Spalten entstehen. Durch diese dringt Meerwasser ein, das mit der ozeanischen Kruste und sogar noch dem oberen Mantel reagieren kann.

Zusätzlich ist Wasser im Porenraum der Sedimente am Meeresgrund eingelagert oder dort in Mineralen gebunden. Je weiter das Gestein ins Erdinnere gelangt, desto höher steigen Druck und Temperatur: Schon in fünf Kilometer Tiefe herrscht eine Backofenhitze von 150 Grad Celsius.

Unter diesen Bedingungen wird das Wasser aus den Poren und Spalten herausgepresst. Da es ein viel geringeres spezifisches Gewicht als das umgeben-

de Gestein hat und leicht beweglich ist, zwängt es sich durch Klüfte nach oben. Wenn die ozeanische Platte weiter absinkt, wird – bis hinab zu etwa 100 Kilometer Tiefe, wo Temperaturen zwischen 1200 und 1500 Grad Celsius herrschen – auch das chemisch gebundene Wasser ausgetrieben, das unter diesen Umständen im überkritischen Zustand vorliegt, in dem kein Unterschied zwischen Flüssigkeit und Gas besteht. Bei seinem Aufstieg setzt es die Schmelztemperatur umgebender Gesteine herab, die sich dadurch verflüssigen. Das entstehende Magma steigt ebenfalls auf und sammelt sich in Kammern unter der Erdoberfläche, die sich bei gelegentlichen Eruptionen gewaltsam entleeren.

Ursache von Erdbeben

Wasser ist also der eigentliche Auslöser des Vulkanismus an Subduktionszonen. Es spielt aber auch eine Rolle bei Erdbeben. Je weniger Wasser die abtauchende Platte enthält, desto spröder reagiert sie nämlich – sie verhakt und verkantet leichter. Die dadurch aufgebauten Spannungen entladen sich schließlich in Form von Erdbeben.

Eine gut untersuchte Subduktionszone liegt an der Westküste Costa Ricas. Hier schiebt sich die Cocosplatte mit einer Geschwindigkeit von 8,8 Zentimetern pro Jahr unter die Karibische Platte. Tamara Worzewski und Marion Jegen vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) an der Universität Kiel haben nun in dieser Subduktionszone den Weg des Wassers bis in 120 Kilometer Tiefe und wieder zurück an die Erdoberfläche verfolgt. Dabei konnten sie nicht nur dokumentieren, dass selbst so tief im Erdinneren noch Was-

ser existiert, sondern auch detailliert zeigen, wie und wo es überall an die Oberfläche gelangt.

Für die Untersuchungen entwickelte Jegen Instrumente, mit denen sie auf dem Meeresboden natürliche elektromagnetische Felder aufzeichnen konnte. Heinrich Brasse von der Freien Universität Berlin führte entsprechende Messungen an Land durch. So ließ sich längs einer knapp 400 Kilometer langen Profillinie, die vom Bergland Mittelamerikas bis zum Tiefseebereich im Pazifik verlief, die Wasserverteilung im Untergrund bestimmen.

Als Untersuchungsmethode verwendeten die Forscher die Magnetotellurik. Dabei schließt man aus Messungen der elektromagnetischen Felder am Boden auf die elektrische Leitfähigkeit des Untergrunds, was Hinweise auf dessen Beschaffenheit und insbesondere das Vorkommen von Wasser liefert. Die Methode ist an Land schon lange etabliert, wird aber erst neuerdings auch auf dem Meeresboden eingesetzt.

Für die marine Messreihe ließen die Forscherinnen vom Schiff aus mit Hilfe eines Ankers aus Beton an verschiedenen Stellen längs der Profillinie ihre Instrumente samt den Elektroden auf den bis zu dreieinhalb Kilometer tiefen Ozeanboden hinab. Anhand der über vier Monate hinweg aufgezeichneten magnetotellurischen Signale vom Meeresgrund sowie der Messungen an Land erstellten sie schließlich ein Modell des Untersuchungsgebiets mit den variierenden elektrischen Leitfähigkeiten. Da Wasser der hauptsächliche Leiter im Erdboden ist, zeigen Leitfähigkeitsanomalien in der Subduktionszone, wo sich wie viel davon befindet. Die Messungen



Vor der Küste Costa Ricas wassern Forscher das Instrument für magnetotellurische Messungen am Ozeanboden (OBMT). Das Magnetometer und die batteriebetriebene Messeinheit befinden sich in einem druckbeständigen Titanzylinder. Ebenso wie der Auftriebskörper und die vier Elektroden ist er über einen akustischen Transponder mit einem Betonblock verbunden, der als Anker dient. Von ihm werden sie zum Meeresgrund gezogen und dort fixiert. Nach Ablauf der Messzeit lässt sich die Verbindung zum Anker per Funksignal lösen, worauf der Auftriebskörper mit den Messdaten an die Meeresoberfläche steigt.

lieferten so ein genaues Bild von seiner Rundreise durch das Erdinnere.

Im Bereich der Subduktionszone vor Costa Rica tritt das zirkulierende Wasser unter anderem an kalten Sickerstellen wieder aus. Sie liegen am Kontinentalhang, der Übergangsregion zwischen Schelf und Tiefsee. »Frühere geochemische Untersuchungen ergaben erstaunlicherweise, dass hier Süßwasser aus dem Boden quillt, das aus zwölf Kilometer Tiefe stammt«, berichtet Jegen.

In genau dieser Tiefe aber hat die Geophysikerin zusammen mit ihrem

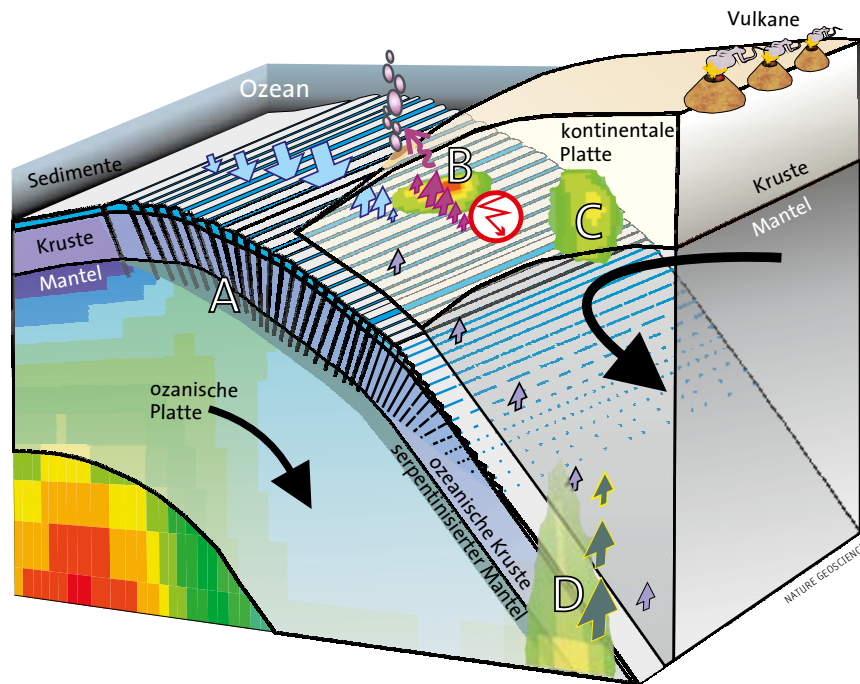
Team eine Leitfähigkeitsanomalie nachgewiesen. Deren Ursprung erklärt sie so: »Bei dem dort herrschenden Druck wird durch Umwandlung von Sedimentmineralen – zum Beispiel von Smektit zu Illit – Süßwasser freigesetzt.«

Eine andere Leitfähigkeitsanomalie im Untergrund gab der Kieler Forschungsgruppe hingegen Rätsel auf. Wasserhaltige Magmen, die an Subduktionszonen aus großen Tiefen aufsteigen, sollten sich nach gängiger Ansicht nur direkt unter den Vulkanbögen finden. Worzewski und Jegen entdeckten

jedoch 30 Kilometer seewärts von der Vulkankette eine wasserreiche Zone, die sie Anomalie G nannten. Sie befand sich 20 bis 30 Kilometer unter dem Meeresgrund. In dieser Tiefe aber ist die Temperatur noch nicht hoch genug, dass Wasser Gestein zum Schmelzen bringen könnte. Eine Frage ist nun, warum es sich dort angesammelt hat.

Tatsächlich ist das Phänomen keineswegs auf Costa Rica beschränkt. Worzewski und Jegen durchforsteten einschlägige Untersuchungen an Subduktionszonen auf der ganzen Welt.

Wasserkreislauf in einer Subduktionszone



- eintretendes Meerwasser
- Freisetzung von ungebundenem Wasser aus Poren und Spalten
- Freisetzung von Kristallwasser in Sedimenten
- aus kalten Sickerstellen austretendes Süßwasser
- Freisetzung von Kristallwasser aus ozeanischer Kruste
- Entwässerung von Serpentin aus dem oberen Mantel
- seismogene Zone

Taucht eine ozeanische Platte unter eine kontinentale ab, so verbiegt sie sich. Dadurch entstehen Spalten und Risse, in die Meerwasser eindringt (A). Dieses bleibt teils mechanisch eingeschlossen, teils reagiert es mit Gesteinen der ozeanischen Kruste und des oberen Mantels, wobei es als Kristallwasser oder mineralisch gebunden wird. Beim weiteren Abtauchen der Platte setzen immer höhere Drücke und Temperaturen das Wasser je nach Stärke seiner Bindung im Gestein nach und nach wieder frei, so dass es nach oben steigt. Als Erstes entweicht freies Wasser aus Poren und Ritzen. Dann geben Sedimente das gebundene Kristallwasser frei, das an kalten Sickerstellen am Kontinentalhang austritt (B). Als Nächstes folgt Kristallwasser aus ozeanischer Kruste. Es scheint sich auf bislang noch nicht ganz geklärte Weise in Reservoiren 20 bis 30 Kilometer unter dem Meeresboden zu sammeln (C). In Tiefen von etwa 100 Kilometern wird schließlich das Mineral Serpentin aus dem oberen Erdmantel entwässert (D). Das dabei freigesetzte Wasser bringt beim Aufsteigen Umgebungsgestein zum Schmelzen und erzeugt so Magma, das Vulkane speist.

Auch dort fanden sie durchweg Hinweise darauf, dass sich im selben Abstand zum Vulkanbogen und in derselben Tiefe eine Leitfähigkeitsanomalie befindet. Das erstaunt umso mehr, als sich die jeweiligen Subduktionszonen in Alter und Art stark unterscheiden.

Letztendlich scheint Anomalie G demnach ein globales Phänomen zu sein. Als mögliche Erklärung zeichnet sich ab, dass die ungewöhnliche Anreicherung vor dem Vulkanbogen hilft, den Wasserhaushalt auszugleichen. Nach bisherigen Messungen gelangt nämlich weniger als die Hälfte der in das Subduktionssystem eingespeisten Wassermenge über Vulkane oder kalte Sickerstellen wieder an die Oberfläche. Simulationen mit Computermodellen zufolge sollten aber nur 20 bis 40 Pro-

zent mit der ozeanischen Platte in den tiefen Mantel wandern. Daraus ergibt sich ein Wasserüberschuss, dessen Verbleib bislang ein Rätsel war.

Für Worzewski liegt die Lösung dieses Rätsels womöglich am anderen Ende der Welt. An Neuseelands Südküste bildet sich gerade eine neue Subduktionszone. Vulkane sind hier noch nicht entstanden. Trotzdem gibt es bereits Wasseranreicherungen ähnlich der ominösen Anomalie G. Ihre Leitfähigkeit ist allerdings geringer als bei älteren Subduktionszonen. Demnach hat sich bislang weniger Wasser angesammelt. Das deutet auf einen Zusammenhang mit der Vulkanentstehung hin. »Welche tektonischen Prozesse das Wasser aus welchen Gründen gerade dort festhalten, steht nun zur Diskussion«, meint Jegen.

Die neuen Untersuchungen beweisen jedenfalls eines: Die abtauchende Platte setzt auf ihrem Weg ins Erdinnere durch zahlreiche Prozesse an vielen Stellen Wasser frei. Das löst eine Reihe von teils dramatischen Vorgängen aus, die vom Austritt kalten Süßwassers am Kontinentalhang bis zu Erdbeben und Vulkaneruptionen reichen. Eine genauere Kenntnis dieser Zusammenhänge sollte somit auch besser zu verstehen helfen, wie Naturkatastrophen an Subduktionszonen zu Stande kommen und wie sich die Menschen davor schützen können.

Sabrina Hüttermann studiert Georessourcenmanagement an der RWTH Aachen und arbeitet nebenher als freie Wissenschaftsjournalistin.

Marker für Krebs

Bestimmte RNA-Moleküle kommen in Tumorzellen weit häufiger vor als in gesundem Gewebe. Möglicherweise stellen sie einen zuverlässigen Hinweis auf die Erkrankung dar.

VON GABI WARNKE

Krebs ist die zweithäufigste Todesursache in Deutschland, jährlich sterben rund 200 000 Bundesbürger daran. Mit einem eindeutigen Marker, der die Erkrankung schon im Frühstadium offenbart, ließe sich diese Zahl dramatisch senken. Doch bisher erschwert die verwirrende Vielfalt der Erscheinungsbilder eine sichere Diagnose. Denn Krebs ist nur ein Sammelbegriff für etwa 100 verschiedene Arten bösartiger Wucherungen im Körpergewebe. Ein wesentlicher Aspekt solcher Tumoren sind Veränderungen im Erbmateriale, etwa Schäden an der DNA

oder eine gestörte Regulation der Aktivität von Genen. Solche Hinweise nutzen Mediziner oft schon jetzt als »Marker«, um Krebs zu diagnostizieren.

Als die Mitglieder des Humangenomprojekts 2003 die vollständige Sequenz des menschlichen Erbguts präsentierten, stellte sich heraus: Lediglich zwei bis drei Prozent der DNA sind Gene, die Proteine kodieren. Einige weitere Abschnitte regulieren die Aktivität von Genen – sie steuern also, wann, wo und wie oft diese in RNA übersetzt werden. Trotzdem schienen immer noch mindestens 60 Prozent der Erbsubstanz

nutzlose »Schrott-DNA« zu sein. Doch vor einigen Jahren entdeckten Wissenschaftler die *pervasive transcription*, die allgegenwärtige Transkription. Demnach werden nicht nur die Gene, sondern fast alle Teile des menschlichen Genoms in RNA übersetzt, auch die vermeintlich nutzlosen Areale. Anscheinend erzeugt eine Zelle im Lauf ihres Lebens von praktisch jedem Abschnitt der DNA mindestens ein paar RNA-Kopien. Oft liest sie ihr Erbgut sogar in beide Richtungen ab. Die Funktion dieser zahllosen RNA-Schnipsel ist bislang jedoch noch unbekannt.

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



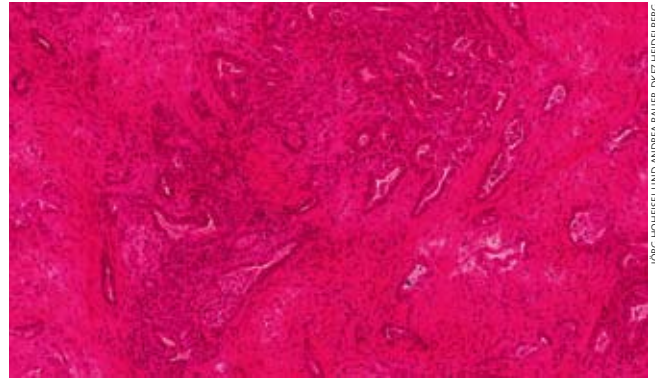
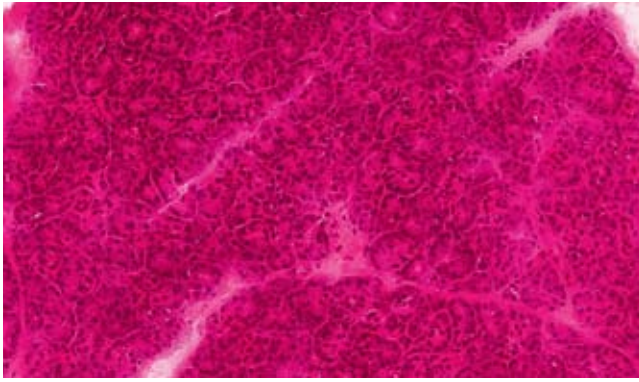
Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- 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





JÖRG HOHSEIL UND ANDREA BAUER, UNIZ HIEDELBERG

Einige Forscher stellten nun einen Zusammenhang mit der Entwicklung von Krebs her, darunter David T. Ting vom Massachusetts General Cancer Center und Doron Lipson von der Helicos BioSciences Corporation in Cambridge (US-Bundesstaat Massachusetts). Ting und Lipson untersuchten die Transkription von so genannter Satelliten-DNA. Dies sind ebenfalls nicht kodierende Erbgutsequenzen, die aus 100- bis 1000-fachen Wiederholungen einer kurzen Abfolge der Bausteine des Erbguts bestehen. Obwohl sie durchschnittlich zehn Prozent eines Säugetiergenoms ausmachen, betrachteten Forscher auch die Satelliten ursprünglich als inaktive Schrott-DNA. Erst nachdem die allgegenwärtige Transkription bekannt wurde, stellte sich heraus, dass auch verschiedene Satelliten zumindest gelegentlich abgelesen werden.

Die beiden Wissenschaftler analysierten die gesamte RNA bösartiger Tumorzellen und entdeckten dabei

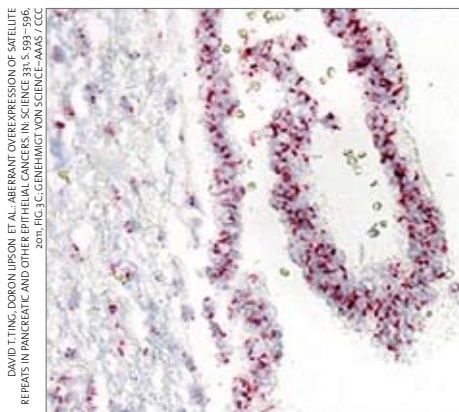
Die Mikroskopaufnahmen zeigen den Unterschied zwischen klar geordnetem, gesundem Gewebe (links) und einem Tumor der Bauchspeicheldrüse (rechts).

eine extrem verstärkte Transkription jener Wiederholungssequenzen. Der Vergleich von Tumoren menschlicher Bauchspeicheldrüsen mit gesundem Gewebe zeigte: Erstere enthielten im Mittel 21-mal so viel Satelliten-RNA. Das markanteste Beispiel war der Satellit HSATII – seine Transkription war in den Krebszellen 131-mal stärker als normal. Auch in aggressiven Tumoren aus Lunge, Niere, Gebärmutter und Prostata war die Konzentration der HSATII-RNA deutlich erhöht. Weil dieser Satellit in gesundem Gewebe kaum transkribiert wird, betrachten ihn die Forscher nun als potenziellen Krebsbiomarker. Ihre Vermutung fanden sie bestätigt, als sie den umgekehrten Versuch durchführten: Alle Zellen der Bauchspeicheldrüse, in denen die Forscher HSATII-RNA fanden, waren Krebszellen. Die Methode funktionierte selbst bei Tumoren, die mit einer üblichen Form der Biopsie nicht nachgewiesen worden waren.

Daraufhin wollten es die Wissenschaftler noch genauer wissen: Beeinflusst die Aktivierung der Satelliten möglicherweise weitere Gene? In bösartigen Tumoren suchten sie darum nach DNA-Sequenzen, deren Transkriptionsraten mit denjenigen der Satelliten korrelieren. Hierbei fanden sie vor allem so genannte Retrotransposonen. Diese »springenden Gene« können ihre Position in der DNA ändern, wofür die Zelle sie in eine RNA-Zwischenform transkribiert. Und tatsächlich: Die Forscher entdeckten in bösartigen Tumoren RNA-

Abschriften des Retrotransposons LINE-1 (langes verstreutes Kernelement 1, *Long Interspersed Nuclear Element 1*), und zwar vergleichbar häufig wie die Satelliten. Übersetzte eine Zelle mehr Satelliten-DNA in RNA, stieg also auch die Konzentration der LINE-1-RNA im selben Maß. Darüber hinaus wiesen Ting und Lipson nach, dass Krebszellen Gene häufiger ablesen, die sich auf der DNA direkt neben einer LINE-1-Sequenz befinden – und zwar umso mehr, je näher sie am Retrotransposon liegen.

Ergeben all diese Befunde ein einheitliches Bild? Dass die Ableseraten von Satelliten- und Retrotransposonen-DNA in Krebszellen gleichzeitig steigen, spricht für eine gemeinsame Regulation. Dafür könnten so genannte epigenetische Mechanismen verantwortlich sein, welche die Aktivität größerer Bereiche des Erbguts zugleich beeinflussen. So werden Teile der DNA stillgelegt, indem diese fest an Proteine binden. Auch Satelliten-DNA liegt meist auf dieselbe Weise verpackt vor, weshalb sie in gesundem Gewebe kaum abgelesen wird. Die Daten von Ting und Lipson sprechen dafür, dass epigenetische Effekte in Tumorzellen größere Bereiche der DNA frei legen. Zahlreiche vorher inaktive Abschnitte werden dadurch ausgewickelt und können dann transkribiert werden; möglicherweise enthalten sie sowohl Satelliten als auch LINE-1.



DAVID T. TING, DORON LIPSON ET AL. / ABERRANT OVEREXPRESSION OF SATELLITE REPEATS IN PANCREATIC AND OTHER EPITHELIAL CANCERS. IN: SCIENCE 313, S. 599–596, 2011, FIG. 3C, GENEHÄUFIGKEIT VON SCIENCE-AAAS / CCC

Ein menschlicher Bauchspeicheldrüsentumor produziert viel mehr HSATII-RNA (rot) als gesunde Zellen (links im Bild).

Gabi Warnke ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Schieblehre inspiriert Aufbau von Nanoringen

Eine 380 Jahre alte Idee aus dem Vermessungswesen eröffnet neue Wege zur gezielten chemischen Synthese von Strukturen für die Nanotechnik.

VON MICHAEL GROSS

Mit einer Schieblehre lassen sich Längen genauer bestimmen als mit einem üblichen Lineal. Das liegt an ihrer Nonius-Skala, die aus zwei Maßstäben besteht: einer normalen Millimeter-skala und einer anderen, bei der ein Zentimeter in neun statt zehn Teile untergliedert ist. Da die beiden Zahlen keine gemeinsamen Teiler haben, kann jeweils nur ein Strich der Neuner- mit einem der Zehnerskala zusammentreffen.

Dadurch lassen sich Größenunterschiede auf Zehntelmillimeter genau bestimmen. Liegt zum Beispiel der erste Strich der Neunerskala zwischen sieben und acht Millimeter und der vierte genau auf einem Millimeterstrich, so beträgt die gemessene Länge 7,4 Millimeter. Diese geniale Idee stammt übrigens nicht, wie der deutsche Name unterstellt, von dem portugiesischen Astronomen Petrus Nonius (1502–1578). Vielmehr hat sie der französische Ma-

thematiker Pierre Vernier (1580–1637) im Jahr 1631 veröffentlicht.

Anstatt mit zwei großen, teilerfremden Skalen in kleinere Welten hineinzu-zoomen, kann man das Nonius-Prinzip aber auch umgekehrt benutzen, um mit kleinen Skalen etwas Größeres aufzubauen. Ein Beispiel aus der musikalischen Akustik mag das verdeutlichen. Wenn zwei Töne sehr ähnlicher Frequenz zur gleichen Zeit erklingen, hört man eine so genannte Schwebung mit periodisch wechselnder Lautstärke. Diese Lautstärkeschwingung hat eine viel kleinere Frequenz – also größere Wellenlänge – als die Töne selbst. Klavierstimmer machen sich das zu Nutze.

Auch in der Chemie lassen sich mit teilerfremden Skalen aus kleinen Strukturen größere aufbauen. Hat zum Beispiel ein starres, lineares Molekül A fünf Haken, doch jedes B-Molekül nur drei dazu passende Ösen, dann müssen

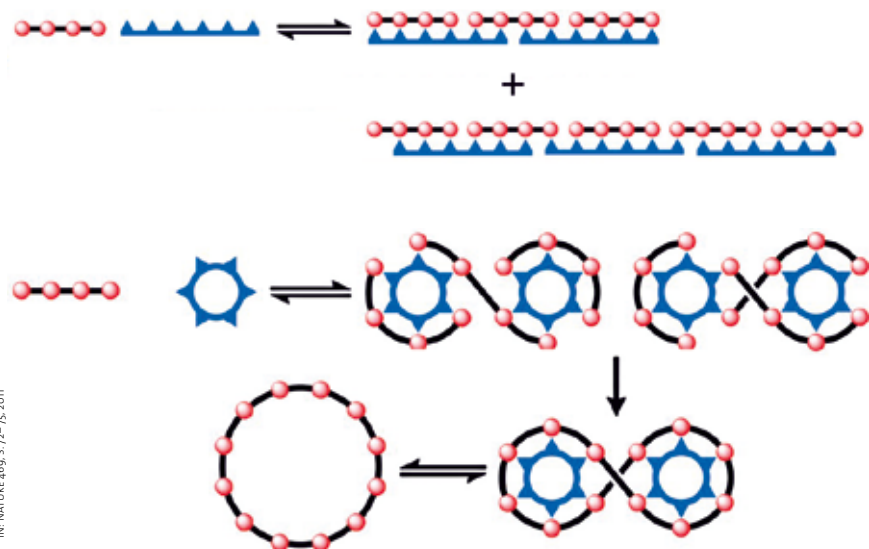


Dank ihrer Nonius-Skala erlaubt eine Schieblehre, Abstände auf zehntel Millimeter genau zu messen.

sich mindestens drei A- mit fünf B-Molekülen verbinden, damit alle Haken und Ösen einen Partner abbekommen. Auf diese mögliche Route zu größeren Molekülen wies Jonathan F. Lindsey von der North Carolina State University in Raleigh schon 1991 hin. Freilich hat sie einen Nachteil: Sie liefert kein eindeutiges Produkt. Bei der Reaktion zwischen A und B kann es nämlich passieren, dass ein B am Anfang statt der drei äußeren die drei mittleren Haken von A besetzt. Dann bleibt an jedem Ende ein Haken frei, und es entsteht eine Kette, die sich unendlich verlängern kann, ohne dass jemals alle Haken und Ösen versorgt würden. Das Ergebnis ist eine Mischung von verschiedenen langen Mo-

Mindestens zwei lineare Moleküle mit je sechs Haken (blau) sowie drei mit vier Ösen (rot) müssen sich verbinden, damit alle Haken und Ösen einen Partner finden. Möglich ist auch eine potenziell unendliche Kette, in der nie alle Haken und Ösen versorgt sind.

Drei Bauelemente mit jeweils vier Ösen können sich auf zwei Arten um zwei Sterngerüste mit je sechs Haken in Form einer »8« anordnen. Verbindet man sie anschließend chemisch miteinander, entsteht ein Ring mit zwölf Ösen.



Wenn Dinge verschwinden

Oder: Der Naturalismus und die Waschmaschine

Als Kind war ich abergläubisch. Auf dem Weg zur Schule vermied ich es, auf Gehsteigfugen zu treten, weil ich – aus Gründen, die ich heute nicht mehr weiß – glaubte, das würde mich vor Unheil bewahren. So trippelte ich mit eigenwilligen Tanzschritten über das Pflaster, damit mich böse Mitschüler nicht boxten, strenge Lehrer mich nicht in die Ecke stellten und mir überhaupt alles Schlimme erspart bliebe.

Heute bin ich natürlich über so etwas hinaus. Weder die Macht der Gestirne nehme ich ernst noch Freitag, den 13., weder das schlechte Omen einer schwarzen Katze noch das Gesetz der Serie. Ich lasse nur natürliche Zusammenhänge gelten, alles andere – das Übersinnlich-Übernatürliche – ist für mich bloß Produkt von Irr- und Aberglauben. Ich bin überzeugter Naturalist.

Besser gesagt, mehr oder weniger. Hin und wieder ertappe ich mich bei Verhaltensweisen, die gewissermaßen einem umgekehrten Aberglauben gleichkommen, einem übertriebenen Zweifel an der natürlichen Lage der Dinge. Mit »natürlich« meine ich die einfache Tatsache, dass ein Bleistift, den ich gestern auf dem Schreibtisch habe liegen lassen, auch heute dort auf mich wartet. Aber das ist nicht immer der Fall. Ich könnte schwören, der Griffel muss da sein, aber er ist weg.

Bei vielen Mitmenschen beobachte ich, dass sie darauf mit bewundernswertem Gleichmut reagieren und sich einfach ein anderes Schreibgerät besorgen. Weil der verlegte Bleistift meist bald »von selbst« wieder auftaucht, sammelt sich bei ihnen auf diese Weise mit der Zeit ein stattliches Sortiment von Kugelschreibern, Filzstiften und Füllfedern. Ich hingegen pflege eine sehr persönliche Beziehung zu vertrauten Dingen und gehe darum unruhig auf die Suche. Erst wenn ich das Verschwundene wiederfinde – oft unterdessen in fremdem Besitz –, ist mein Vertrauen in den naturalistischen Grundsatz wiederhergestellt, dass in der Welt alles mit rechten Dingen zugeht.

Ein eng mit dem verschwundenen Bleistift verwandtes Problem wird sogar im Internet breit diskutiert: Wie kommt es, dass einzelne Socken auf Nimmerwiedersehen im Schlund der Waschmaschine verschwinden? Einige Blogger sehen in diesem Phänomen ein Indiz für die Existenz von Paralleluniversen, in welchen sich die aus unserer Welt entwichenen Einzelstücke aus dem Nichts materialisieren.

Diese Erklärung halte ich für plausibler, wenn ich hin und wieder auch mal einen wildfremden, nassen Socken aus der Trommel zöge. Lieber beruhige ich meinen Diesseitsglauben mit der Erfahrung, dass sich das vermisste Wäschestück meist bloß in einen Deckenüberzug verkrochen hat. Den üblichen, bislang unerklärten Sockenschwund verbuche ich unter den Problemen, die weiterer Forschung harren und irgendwann eine natürliche Erklärung finden werden.

Allerdings wird diese Haltung einem Freund esoterischer Theorien borniert vorkommen. Warum sträubt sich der Naturalist so hartnäckig gegen kühne Hypothesen, die völlig neue Kräfte, Felder und Entitäten ins Treffen führen, um das Verschwinden zu erklären? Könnte nicht eine unbekannte Macht, deren Physik erst noch zu ergründen wäre, hier und da Bleistifte und Socken für immer entwenden?

Denkbar ist das schon, freilich um den Preis, dass unsere Physik in ein Sammelsurium von Ad-hoc-Theorien für Sonderfälle zerbröckelt. Irgendwie kann ich diesen Gedanken nicht leiden – und vielleicht gehe ich darum so gründlich auf die Suche nach verschwundenen Dingen.



Michael Springer

lekülen – für Polymerforscher ganz normal, aber für organische Chemiker, die spezifische Verbindungen synthetisieren möchten, höchst unbefriedigend.

Was lässt sich dagegen tun? Nun, man kann zum Beispiel darauf hinwirken, dass sich die wachsenden Molekülketten zu einem Kreis mit einem festgelegten Umfang schließen. Genau das ist Harry Anderson mit seiner Arbeitsgruppe an der University of Oxford (England) jetzt gelungen (*Nature* 469, S. 72–75, 2011). Der Chemiker hatte schon länger den Ehrgeiz, aus Porphyrinmolekülen, wie sie im Blattgrün und im roten Blutfarbstoff vorkommen, möglichst große Ringe für nanotechnologische Zwecke aufzubauen. Einen ersten Erfolg errang er mit einer Synthese, bei der ein sternförmiges Gerüst zum Aufbau eines umhüllenden Rings aus acht Porphyrinmolekülen diente. Allerdings stellte ihn das nicht wirklich zufrieden, weil die Gerüststruktur fast ebenso groß und kompliziert war wie der aufzubauende Nanoring.

Lösung mit Haken und Ösen

Da kam Anderson die Idee, das für lineare Molekülketten bereits bekannte Nornius-Prinzip auf Ringe auszuweiten. Auf diese Weise konzipierte er eine Syntheseroute, bei der ein kleines, einfach herzustellendes Gerüstmolekül einen sehr viel größeren Ring aufbauen hilft.

Als solches Gerüst könnte beispielsweise ein Stern mit sechs Haken dienen, während die molekularen Bausteine über je vier dazu passende Ösen verfügen würden. Das kleinste gemeinsame Vielfache der beiden Zahlen beträgt zwölf. Demnach sollten sich, so Andersons Idee, drei Bauelemente um zwei Sterngerüste herum in Form einer 8 anordnen. Sie ließen sich dann mit einer geeigneten Reaktion – etwa der palladiumkatalysierten Kupplung, für die 2010 der Chemienobelpreis vergeben wurde (*Spektrum der Wissenschaft* 12/2010, S. 18) – zu einem Ring mit zwölf Ösen verketten. Zum Schluss müsste man dem Gemisch nur noch einzelne frei umherschwimmende Ösen zusetzen, die mit denen des Rings um die Haken des Gerüsts konkurrieren. Dieses

SCIENCE SLAM

Berlin	02. Mai	SO 36
Dortmund	03. Mai	Domicil
Mainz	04. Mai	Capitol
Bochum	05. Mai	Katholikentagsbahnhof
Heidelberg	09. Mai	CAREER EXPO im EMBL, 17:00 Uhr
Duisburg	10. Mai	Hundertmeister
Aachen	11. Mai	Jakobshof

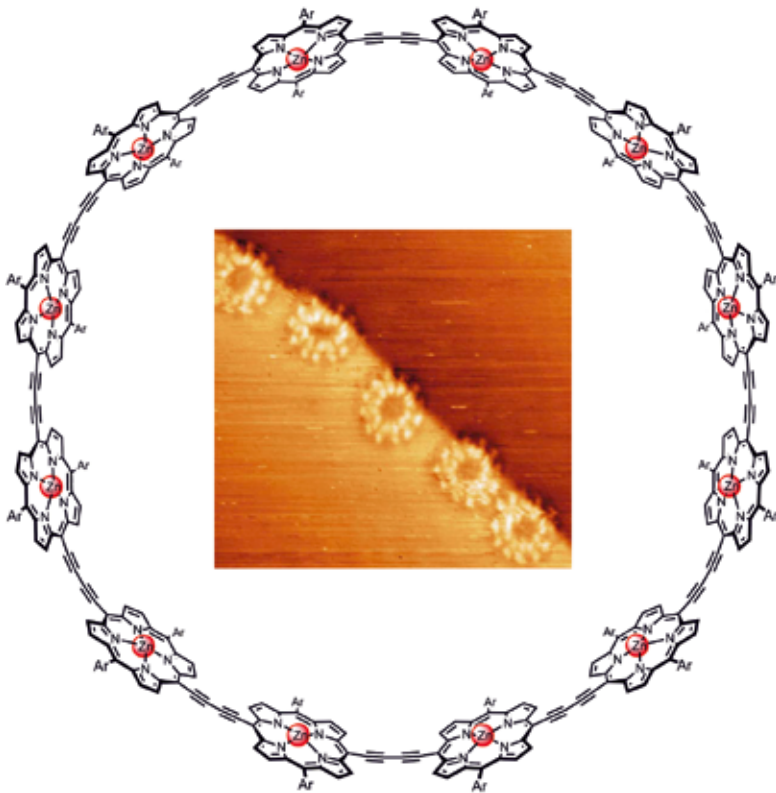
Einlass: 19:00 Uhr | Beginn: 20:15 Uhr



Die Science Slams werden
unterstützt von

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

www.scienceslam.net



Der von Harry Anderson und seiner Arbeitsgruppe an der University of Oxford erzeugte Nanoring enthält zwölf Porphyringruppen. Er ist hier als Formelbild sowie in einer rastertunnelmikroskopischen Aufnahme (innen) gezeigt.

würde sich dadurch aus der Umarmung des Nanorings lösen, der daraufhin die entspanntere, also energetisch günstigere kreisrunde Gestalt mit zwölfacher Drehsymmetrie annähme (S. 21 unten).

Aber würde auch alles genau so funktionieren, wie Anderson sich das vorstellte? Um das herauszufinden, realisierten die Oxforder Forscher eine Reaktionsfolge mit einem sechszackigen Sterngerüst und Ketten aus jeweils vier Porphyrinmolekülen als Bausteinen nach dem geschilderten Rezept. Dann prüften sie das erhaltene Produkt mit einer ganzen Reihe von analytischen Methoden – in Zusammenarbeit mit den jeweils zuständigen Spezialisten aus anderen Instituten. Tatsächlich war der gewünschte Ring aus zwölf Porphyrinmolekülen entstanden; sein Durchmesser betrug 4,7 Nanometer. Den wohl eindrucksvollsten Beleg für den Erfolg lieferte das Magnetresonanzspektrum, das wegen der hohen Symmetrie des Produkts bestechend einfach ausfiel. Ein solches Spektrum zeigt normaler-

weise einen Zacken pro Wasserstoffatom – von denen Andersons Molekül 348 enthält. Liegen zwei oder mehr solche Atome aber an Stellen, die sich durch eine Symmetrieoperation ineinander überführen lassen, fallen die betreffenden Absorptionslinien zusammen. Aus diesem Grund zeigte das Magnetresonanzspektrum des Rings nur fünf Zacken statt 348.

Variiert man die Zahl der Haken und Ösen, sollten auf demselben Wege noch größere Nanoringe erhältlich sein. Derselbe sechsstrahlige Stern, kombiniert mit einem Baustein aus fünf Porphyrinmolekülen, ergäbe zum Beispiel einen 30er-Ring, dessen Durchmesser mehr als zehn Nanometer betrüge. So liefert eine alte Methode zur Messung kleiner Abstände womöglich ein Standardverfahren zum Aufbau von immer größeren (aber genau definierten) Molekülen für die Nanomaschinen der Zukunft.

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

Gestörte Schaltkreise

In den letzten Jahren haben Neurowissenschaftler immer häufiger fehlerhafte Verbindungen im Gehirn als Ursache psychischer Störungen identifiziert. Dies weist den Weg zu besserer Früherkennung und Therapie.

Von Thomas R. Insel

Bei einem neuen Patienten versuchen Ärzte normalerweise, zunächst die körperlichen Ursachen der Beschwerden auszumachen. Erst mit diesem Wissen können sie dann eine Erfolg versprechende Therapie ermitteln, die das Problem an der Wurzel packt. Bei psychischen Störungen hingegen ließen sich bis vor Kurzem keine biologischen Ursachen nachweisen. Folglich galten solche Erkrankungen als rein seelisch bedingt und wurden ausschließlich psychotherapeutisch behandelt.

Heute beginnen jedoch Neurowissenschaft und Genetik die rein psychologischen Vorgehensweisen des letzten Jahrhunderts zu verdrängen. Denn inzwischen sind von vielen psychischen Störungen die biologischen Ursachen bekannt. Dem Autismus zum Beispiel liegen – häufig genetisch beding-

te – Veränderungen von Verbindungen zwischen Nervenzellen zu Grunde. Schizophrenie gilt heutzutage als Entwicklungsstörung des Gehirns und wird entsprechend behandelt. Dass aber auch Zwangsstörungen, Depressionen oder Posttraumatische Belastungsstörungen (PTBS) auf Erkrankungen des Gehirns beruhen könnten, konnten Öffentlichkeit und sogar Mediziner zunächst nur schwer akzeptieren.

Warum entwickelte sich das Verständnis psychischer Störungen nur so schleppend im Vergleich mit anderen medizinischen Gebieten? Im Gegensatz zu klassischen neurologischen Leiden wie Morbus Parkinson oder den Folgen eines Schlaganfalls waren hier zunächst keine offensichtlichen Schädigungen oder Veränderungen des Gehirns nachweisbar. Moderne bildgebende Verfahren eröffnen heute aber viel feinere Möglichkeiten, die Gehirnfunktionen zu kartieren. Sie spüren beispielsweise von der Norm abweichende Aktivitäten einzelner Hirnteile oder neuronale Kommunikationsprobleme auf.

Dieses so genannte Neuroimaging hat Forschern die »Black Box« des Gehirns geöffnet. Erstmals lassen sich damit Verbindungsanomalien und Koordinationsstörungen von weit entfernten Arealen bei psychischen Erkrankungen studieren. Das Zusammenspiel der Hirnregionen, auf dem unsere geistigen Aktivitäten basieren, kann man mit den Abläufen in elektrischen Schaltkreisen vergleichen. Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass Störungen innerhalb solcher Schaltkreise viele psychische Probleme verursachen könnten. Zwar sind die »Schaltbilder« geistiger Erkrankungen im

AUF EINEN BLICK

UMBRUCH IN DER PSYCHIATRIE

1 Da **psychische Erkrankungen** nicht mit auffälligen Veränderungen des Gehirns einhergehen, glaubten Ärzte lange Zeit, sie würden auf rein **seelischen Vorgängen** beruhen.

2 Bildgebende Verfahren enthüllen nun jedoch, dass Störungen wie **Depression** oder **Posttraumatische Belastungsstörung** auf **fehlerhafter Aktivität in neuronalen Schaltkreisen** basieren.

3 Die neuen Erkenntnisse über die biologischen Ursachen psychiatrischer Erkrankungen werden bessere **Diagnosemöglichkeiten** sowie **zielgerichtete Therapien** ermöglichen.



DWIGHT ESCHIMAN

Detail noch nicht bekannt. Aber diese Sichtweise bewirkt bereits heute Umwälzungen in der Psychiatrie und verspricht für die Zukunft effektivere Behandlungsmöglichkeiten.

Das vielleicht beste Beispiel für den rasanten Fortschritt beim Verständnis der biologischen Grundlagen seelischer Erkrankungen stellt die Depression dar. In den Industriestaaten ist sie eines der häufigsten Leiden und eine Hauptursache für krankheitsbedingte Arbeitsunfähigkeit bei Personen unter 45 Jahren. Die Betroffenen fühlen sich zutiefst verzweifelt, hilf- und hoffnungslos. Hinzu kommen körperliche Symptome wie Appetitmangel, Schlafstörungen und allgemeine Erschöpfung, manchmal aber auch Ruhelosigkeit. Depressionen ziehen sowohl das Immunsystem als auch den Hormonhaushalt in Mitleidenschaft und erhöhen das Risiko für Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems.

Zentrale Schaltstation für Depressionen

Letztlich sitzt die Ursache jedoch im Gehirn. Eine Reihe von Forschungsergebnissen deutet auf ein kleines, tief im so genannten präfrontalen Kortex hinter der Stirn gelegenes Areal als Knotenpunkt des für Depressionen verantwortlichen Schaltkreises. Diese Hirnregion bezeichnete der deutsche Neurologe Korbinian Brodmann (1868–1918) in seinem 1909 erschienenen »Atlas of the Human Brain« als Area 25.

Helen Mayberg und ihre Kollegen von der Emory University in Atlanta wiesen nach, dass die Neurone in Area 25 bei Depressionen übermäßig feuern. Nicht nur das: Deren Aktivität verringert sich immer dann, wenn eine Therapie die

Das Zusammenspiel der Hirnregionen, das unseren geistigen Aktivitäten zu Grunde liegt, lässt sich mit den Abläufen in elektrischen Schaltkreisen vergleichen.

Symptome reduzierte – und zwar unabhängig von der Art der Behandlung, ob Pharmaka oder Psychotherapie.

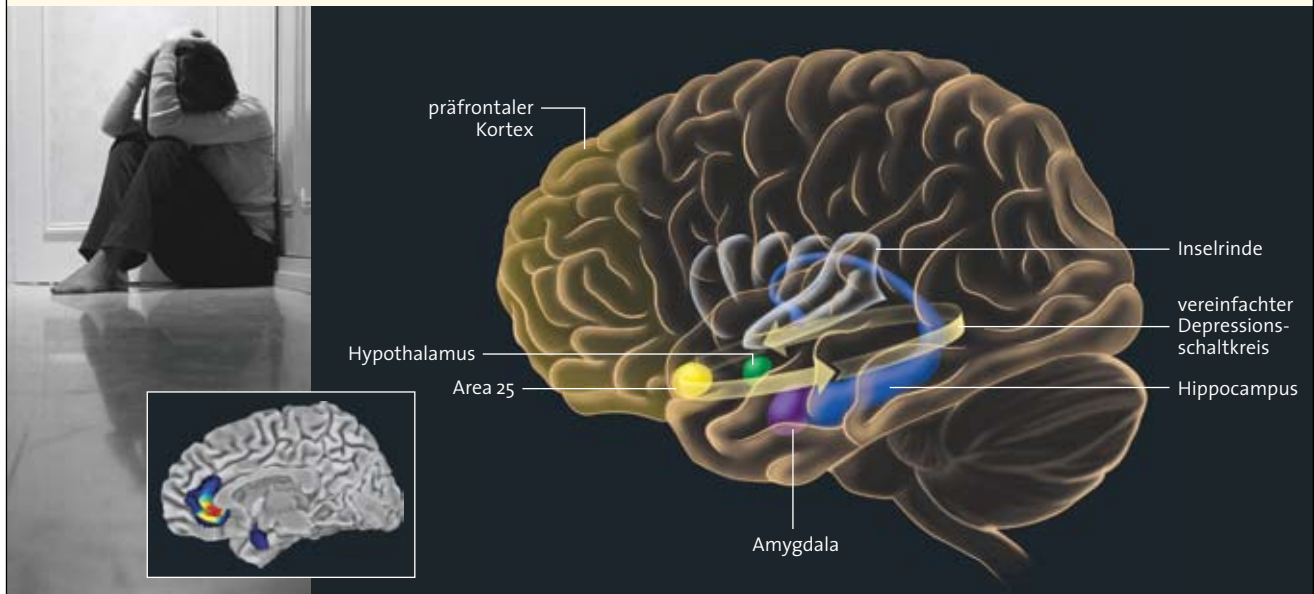
Weitere Entdeckungen untermauern die entscheidende Rolle der Hirnregion für Depressionen. So enthält Area 25 außergewöhnlich viele Serotonintransporter-Moleküle. Diese Membranproteine bringen den Botenstoff Serotonin nach Freisetzung durch ein Neuron wieder in die Zelle und beenden damit seine Signalwirkung. Viele Antidepressiva setzen an diesen Transportern an: Sie hemmen die Serotoninaufnahme und steigern so die neuronale Signalübertragung.

Das den Serotonintransporter kodierende Gen tritt in zwei Varianten mit jeweils unterschiedlichen Produktionsraten des Transporters auf. Lukas Pezawas und Andreas Meyer-Lindenberg verglichen zusammen mit ihren Kollegen am National Institute of Mental Health die Hirnscans von mehr als 100 nicht depressiven Personen mit dem Auftreten der »kurzen« und der »langen« Variante des Serotonintransporter-

Depression

Patienten, die unter Depression leiden, sind antriebslos und negativ gestimmt. Sie können sich Dinge schlecht merken und reagieren langsamer. Dies erweckt den Eindruck, als wäre ihre Hirnaktivität gegenüber dem Normalzustand reduziert. Andere häufige Symptome wie Angstzustände und Schlafstörungen weisen dagegen eher auf überaktive Hirnfunktionen hin. Als Ausgangspunkt dieses Ungleichgewichts identifizierten Forscher mittels bildgebender Verfahren eine kleine Hirnstruktur

namens Area 25. Sie gilt als Zentrum eines Depressionsschaltkreises und ist direkt mit der Angst vermittelnden Amygdala und dem an Stressreaktionen beteiligten Hypothalamus verbunden. Diese Regionen stehen wiederum in regem Austausch mit dem Zentrum der Gedächtnisbildung, dem Hippocampus, und der Sinneswahrnehmungen sowie Emotionen verarbeitenden Inselrinde. Patienten mit Neigung zu Depressionen zeigen eine verkleinerte, aber überaktive Area 25 (im kleinen Bild rot).



ter-Gens. Dabei fanden sie einen eindeutigen Zusammenhang: Personen mit der kurzen Genvariante – die eine geringere Produktion des Transporters und vermutlich ein erhöhtes Depressionsrisiko mit sich bringt – wiesen eine kleinere Area 25 auf. Außerdem war die Aktivität der Hirnregion bei diesen Probanden funktionell entkoppelt von jener unterhalb des Kortex liegender Gebiete, etwa der Amygdala.

Auf Grund dieser und weiterer Ergebnisse betrachten Neurowissenschaftler die Depression heute als eine neuronale Verschaltungsstörung, die sich in einer fehlerhaften Aktivität der Area 25 zeigt. Diese stört wiederum eine ganze Reihe damit eng verbundener Hirnregionen:

- den Hypothalamus und das Stammhirn, die Appetit, Schlaf und Energiehaushalt regulieren;
- die Amygdala und die Inselrinde, die Ängstlichkeit und mentale Stimmung beeinflussen;
- den Hippocampus, der für Gedächtnisbildung und Aufmerksamkeit wichtig ist; sowie
- Teile des Stirnhirns, die Einsicht und Selbstwertgefühl regulieren.

Area 25 gilt heute als Regulator eines weit reichenden Netzwerks von Hirnzentren, etwa für Angst, Gedächtnis und Selbstwertgefühl. Funktioniert diese Kontrollregion nicht richtig, ist die Informationsverarbeitung in dem Netzwerk

gestört – mit der Folge einer verzerrten Einschätzung der inneren und äußeren Welt. Gemäß diesem Modell sollte ein Normalisieren der neuronalen Aktivität in Area 25 die untergeordneten Regionen wieder ins Gleichgewicht bringen und damit die Depressionssymptome mildern. Tatsächlich wies Mayberg nach, dass direktes elektrisches Reizen in der Umgebung von Area 25 deren Aktivität verringert und auch solchen Patienten helfen kann, bei denen die üblichen Therapien versagt hatten.

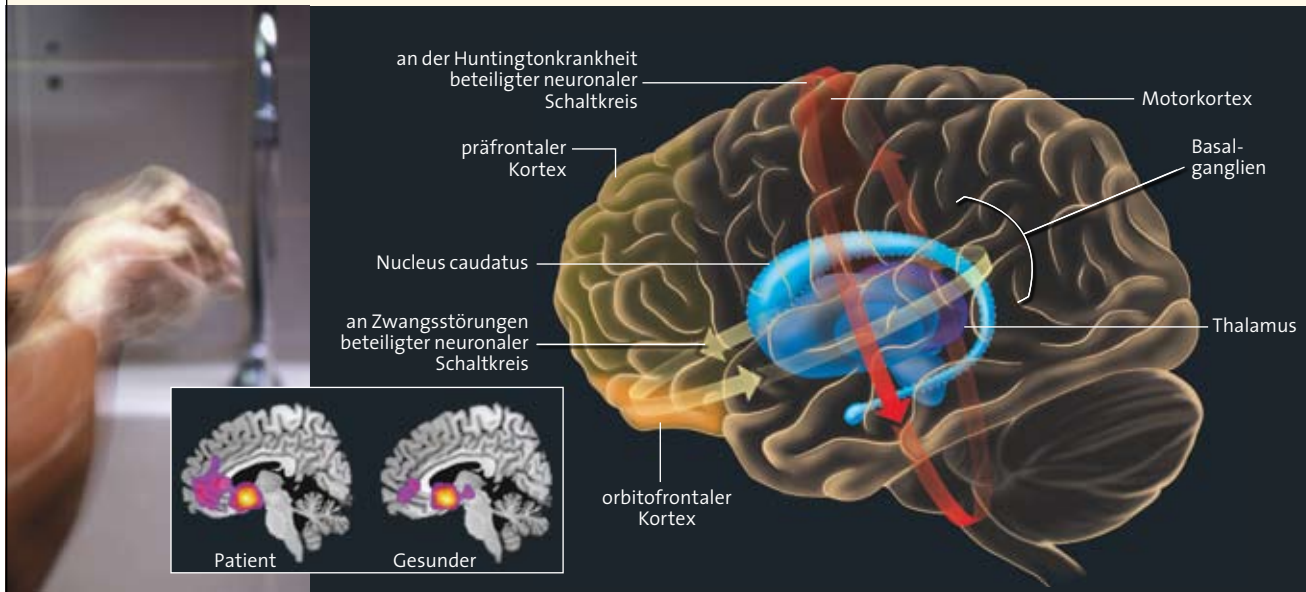
Eine gestörte Area 25 scheint das Gehirn dazu zu bringen, sich in einer Rückkopplungsschleife abnormaler Aktivität zu verfangen – vergleichbar einem Computer, der sich »aufgehängt« hat. Dann wäre das Ziel einer Therapie gewissermaßen ein Neustart. Dieses Prinzip dürfte sich auch auf andere psychische Erkrankungen anwenden lassen, insbesondere auf Zwangsstörungen. Denn die davon Betroffenen erscheinen Beobachtern wie gefangen in einem Kreislauf negativer Gedanken und Verhaltensweisen.

Zwangsstörungen galten lange Zeit als Vorzeigeneurosen, die durch psychische Konflikte ausgelöst werden. Somit waren sie geradezu prädestiniert für eine psychoanalytische Behandlung. Die Betroffenen leiden an sich immer wieder aufdrängenden, endlos wiederkehrenden Gedanken (Zwangsvorstellungen) und unter dem starken Drang, stereotype

Zwangsstörungen

Menschen mit Zwangsstörungen vergleichen ihre wiederkehrenden Gedanken und den starken Drang, fortwährend die gleichen Handlungen auszuführen, mit unkontrollierbaren motorischen Tics. Tatsächlich besteht eine Gemeinsamkeit: Unfreiwillige Bewegungen gehen von den Basalganglien aus, die eine wichtige Rolle bei der Koordination der Körpermotorik spielen. Dies gilt auch etwa für die unheilbare Huntingtonkrankheit, bei der zudem der Motorkortex beteiligt ist (siehe roter

Schaltkreis in der Grafik). Zwangsstörungen liegt hingegen ein Schaltkreis zu Grunde, der aus einem der Basalganglien – dem Nucleus caudatus – besteht sowie dem für Entscheidungen und Gewissensfragen zuständigen orbitofrontalen Kortex und dem Thalamus, der Sinnesinformationen verarbeitet und weiterleitet (gelb). Bei Betroffenen feuern Teile des präfrontalen Kortex und der Basalganglien stärker als bei Gesunden (siehe Hirnscans im kleinen Bild).



FOTOLINKS: GETTY IMAGES / KEITHROFSKY, GROSSES HIRN: PRECISION GRAPHICS, KLEINE HIRNE: MIT FRIEDRICH VON HENLE, HARRISON, MELBOURNE NEUROPSYCHIATRY CENTER, UNIVERSITY OF MELBOURNE UND INSTITUT DALLA TECNOLOGIA-PRBB, CIC COOPERACIO SANTAGAR, BARCELONA

Handlungen ständig zu wiederholen. Sie fühlen sich zum Beispiel verunreinigt und waschen sich unentwegt – manchmal, bis die Haut fast in Fetzen ist. Andere werden von dem quälenden Gefühl geplagt, sie hätten etwas Wichtiges vergessen, und kontrollieren den Herd oder den Wasserhahn immer wieder, bevor sie das Haus verlassen. Obwohl die Patienten in der Regel erkennen, dass ihr Verhalten sinnlos ist, können sie weder ihre zwanghaften Vorstellungen noch ihre Handlungen kontrollieren und sind dadurch in ihrer Lebensführung oft stark beeinträchtigt.

Motorische und mentale Tics

Betroffene bezeichnen ihre Symptome häufig als »mentale Tics«, als handle es sich dabei um Körperbewegungen, die sich der willentlichen Kontrolle entziehen. Tatsächlich zeigen viele Patienten neben ihren Zwangsgedanken auch echte Tics wie Räuspern oder Augenzwinkern. Komplexe motorische Tics sind sogar manchmal nicht leicht von Zwangshandlungen zu unterscheiden.

Für die Regulation von Körperbewegungen zuständig sind Verschaltungen zwischen dem Kortex und anderen Hirnarealen wie den Basalganglien, die Bewegungen auslösen und koordinieren. Abnormes Feuern in solchen Schaltkreisen führt zu unfreiwilligen Bewegungen wie bei motorischen

Tics oder auch – dann wesentlich dramatischer – bei Chorea Huntington, einer unheilbaren Erbkrankheit des Gehirns. Bildgebungsstudien an Patienten mit Zwangsstörungen wiesen eine ungewöhnlich hohe neuronale Aktivität in einer derartigen Schleife nach. Diese umfasst den orbitofrontalen Kortex (der für komplexe Aufgaben wie etwa die Entscheidungsfindung wichtig ist), einen Teil der Basalganglien (den ventralen Nucleus caudatus) und den Thalamus, der sensorische Informationen verarbeitet und weiterleitet.

Weitere Befunde stützen dieses Ergebnis: Eine Verhaltenstherapie oder Medikamentengabe verbessert bei den meisten Betroffenen die Symptome drastisch, was durchweg mit einem weniger aktiven orbitofrontalen Kortex Hand in Hand geht. Bei jenen Patienten, die auf diese Therapien nicht ansprechen, lassen sich die Krankheitsanzeichen durch Abkoppeln des orbitofrontalen Kortex vom Nucleus caudatus deutlich reduzieren. Dabei durchtrennen die Ärzte entweder die Nervenfasern, die diese Hirnareale miteinander verbinden, oder sie hemmen die elektrischen Impulse entlang dieser Fasern. Ein derart klarer Effekt spricht sehr dafür, dass die Symptome psychiatrischer Erkrankungen durch fehlerhaft funktionierende neuronale Schaltkreise entstehen können.

Eine ganz andere Frage ist die, wie es zu solchen Schaltkreisstörungen kommt. So könnten vererbte Anfälligkeiten

die Entwicklung und Arbeitsweise des Gehirns beeinträchtigen – analog etwa zu einer angeborenen Prädisposition für Zuckerkrankheit. Wie bei anderen komplexen Gesundheitsstörungen reicht dies für sich allein jedoch nicht aus, um die Erkrankung auszulösen. Hinzu kommen Umweltbedingungen und individuelle Erfahrungen, die einige Menschen mit solchen genetischen Belastungen erkranken lassen, während andere verschont bleiben. Diese Erkenntnis hilft besonders, die Nachwirkungen psychischer Traumata zu verstehen.

Die Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS) ist eines der häufigsten Leiden von aus dem Krieg heimgekehrten Soldaten und wurde früher als »Kriegsneurose« bezeichnet. Heute rechnen Psychiater sie zu den Angststörungen. Die Betroffenen leiden unter sich aufdrängenden, verstörenden Erinnerungen (Flashbacks) an das erlittene traumatische Ereignis, Alpträumen, überhöhter Wachsamkeit und Schlafstörungen. PTBS tritt aber auch im Zivilleben auf, etwa nach Vergewaltigung, terroristischen Gewalttaten oder sogar in der Folge von Verkehrsunfällen.

Auf den ersten Blick erscheint es eher unwahrscheinlich, dass PTBS eine durch abnorme Verschaltungen im Gehirn verursachte Störung sein könnte. Schon die Bezeichnung nennt ja ausdrücklich äußere Ereignisse – traumatische Erlebnisse – als Ursache. Unmittelbar nach einer solchen Erfahrung

sind Symptome wie Schlafstörungen und erhöhte Wachsamkeit zunächst zu erwarten, lassen in den meisten Fällen allerdings mit der Zeit von allein nach. Bei etwa 20 Prozent der Opfer entwickelt sich hingegen – Wochen oder Monate später – eine PTBS. Erinnerungen oder andere Auslöser rufen dann das ursprüngliche Trauma ins Gedächtnis und lösen heftige Angstreaktionen aus.

Entkoppelte Angstreaktion

Psychotherapeuten versuchen, diese Ängste durch die so genannte Extinktion (Auslöschung) abzubauen. Dabei setzen sie den Patienten immer wieder den mit dem Trauma verknüpften Auslösern oder Erinnerungen aus, jedoch ohne dass er tatsächlich negative Konsequenzen erlebt. So lassen sich die Auslösereize von der automatisierten Angstreaktion entkoppeln, und der Patient lernt, neutral auf die Reize zu reagieren.

Um ein Trauma zu überwinden – gleichgültig, ob von allein oder durch eine Therapie –, muss der Betroffene in jedem Fall neue Verknüpfungen erlernen. PTBS lässt sich entsprechend als Versagen des natürlichen Extinktionsprozesses interpretieren. Laut verschiedener Studien an Tieren und Menschen können Funktionsstörungen in einem bestimmten neuronalen Schaltkreis die Extinktion erschweren – und somit anfällig für PTBS machen.

Posttraumatische Belastungsstörung

Bei der Posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) beschwören noch lange Zeit nach einem traumatisierenden Ereignis bestimmte Reize Erinnerungen an das Erlebte herauf (so genannte Flashbacks) und lösen heftige Angstreaktionen aus. Störungen des ventromedialen Präfrontalkortex (vmPFC) scheinen die Anfälligkeit für die Erkrankung zu erhöhen, da diese Region die Aktivität der Amygdala beeinflusst – und die wiederum Angstgefühle bewirkt. Nach einem traumatischen Erlebnis ersetzen

im Lauf der Zeit normalerweise neutrale Reaktionen die Ängste. An diesem als Extinktion bezeichneten Lernprozess beteiligen sich der Hippocampus und der dorsolaterale Präfrontalkortex. Der vmPFC gilt als entscheidendes Bindeglied zwischen dem dorsolateralen Präfrontalkortex und der Amygdala. Die Hirnstruktur soll die Aktivität der Amygdala herunterregeln und somit den Abbau von Angstreaktionen durch Extinktionslernen fördern.

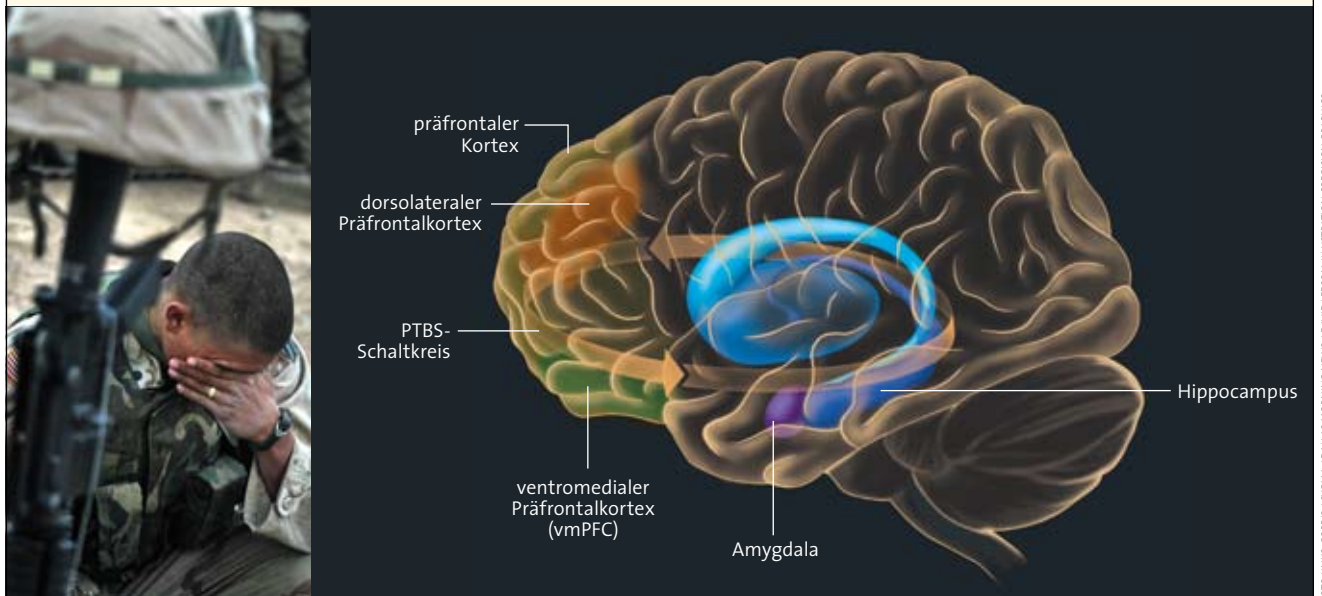
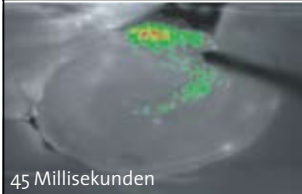
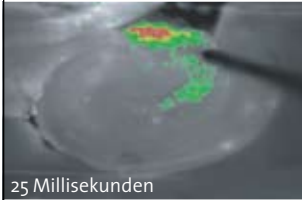
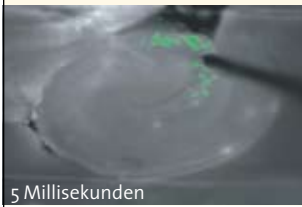


FOTO: JAMES CORBIS / SIGMA / DALLAS MORNING NEWS / DAVID LEESON; ILLUSTRATION: PRECISION GRAPHICS

Neuroimaging – neue Einblicke ins Gehirn

Mit bildgebenden Techniken lassen sich die Strukturen und Aktivitäten des Gehirns detailliert untersuchen. Entsprechend können Psychiater Verschaltungsstörungen als Ursache von Erkrankungen festmachen.

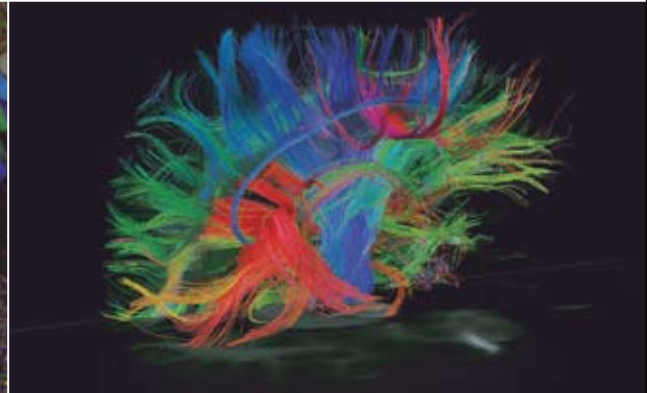
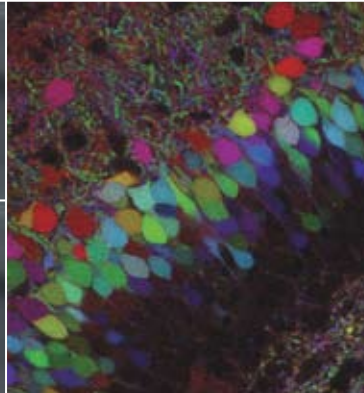


BILDFOLGE LINKS: Fluoreszierende Farbstoffe reagieren auf elektrische Nervenimpulse im Hippocampus einer Ratte. Rot zeigt die höchste Intensität im Zeitverlauf an.

UNTEN MITTE: Die Neurone einer gentechnisch veränderten Maus fluoreszieren in einer Vielfalt von Farben. Das gewährt Forschern Einblicke

in die sich entwickelnden Strukturen des Mäusehirns.

UNTEN RECHTS: Die Diffusionstensorbildung, eine Variante der Magnetresonanztomografie (MRT), markiert Nervenfasern, die Hirnteile verbinden. So lassen sich im menschlichen Gehirn gestörte Schaltkreise untersuchen.



AUS: KARL DE SESSERTH ET AL.: HIGH-SPEED IMAGING REVEALS NEUROPHYSIOLOGICAL LINKS TO BEHAVIOR IN AN ANIMAL MODEL OF DEPRESSION. IN: SCIENCE 371(6502):2607, GENUEHNIGT VON NARS

FOTO MITTE: GETTY IMAGES / AP / JEAN LUT ET AL.; RECHTS: MIT FRIEDRICH GEN VON J. WEDEN, MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL

An Angstgefühlen sind vor allem die Amygdala sowie eine benachbarte Zellgruppe beteiligt, die man als Nucleus striae terminalis oder auch als »Bettkern« (englisch *bed nucleus*) der Stria terminalis bezeichnet. Diese beiden Regionen steuern praktisch alle Angstsymptome: Herzrasen, Schweißausbrüche, Erstarren und übertriebene Schreckhaftigkeit. Nervenzellen der Amygdala senden über ihre langen Fortsätze Signale zum einen in jene Teile des Stammhirns, die diese Reaktionen kontrollieren, zum anderen in Bereiche des Frontalhirns, die Motivation, Entscheidungsfindung und die Bewertung bestimmter Reize steuern. Wenn damit also die Amygdala als »Angstmotor« dient, sollte jedoch auch eine Instanz im Gehirn dafür zuständig sein, sie wieder zu bremsen, sobald die Umstände es erlauben.

Eine solche Angstbremse entdeckten Greg Quirk und seine Kollegen an der University of Puerto Rico bei Nagetieren: einen kleinen Abschnitt des präfrontalen Kortex, die infralimbische Region. Die Forscher brachten den Tieren zunächst bei, sich vor einem Reiz zu fürchten, und anschließend durch Extinktionstraining, über ihre Angst wieder hinwegzukommen. Während der Extinktion war die infralimbische Region sehr aktiv und dämpfte die Amygdala. Tatsächlich scheint die elektrische Reizung von Zellen dieses Hirnareals Extinktion auszulösen – sogar bei Tieren, die gar nicht darauf trainiert worden waren, ihre Angst zu bekämpfen.

Eine Blockade der infralimbischen Region beeinträchtigt wiederum die Extinktion bei trainierten Tieren. Diese Hirnregion scheint demnach für die Angstbewältigung sowohl notwendig als auch ausreichend zu sein. Und wie sieht es bei menschlichen PTBS-Patienten aus? Bildgebungsstudien deu-

ten auf eine vom Normalen abweichende Aktivität im ventromedialen Präfrontalkortex (vmPFC) hin, welcher der infralimbischen Region bei Nagetieren entspricht.

Mehrere Untersuchungen belegen, dass der vmPFC von Betroffenen weniger aktiv ist, wenn mit dem Trauma verknüpfte Auslösereize auf sie einwirken. Außerdem besitzen Patienten im Schnitt einen kleineren vmPFC als Personen, die zwar ein Trauma erlebten, jedoch nicht unter PTBS leiden. Mohammed Milad und seine Kollegen vom Massachusetts General Hospital entdeckten zudem, dass bei gesunden Probanden die Fähigkeit, angstbesetzte Erinnerungen zu eliminieren, mit dem Volumen des vmPFC korreliert. Und laut Forschungen von Elizabeth Phelps und ihren Kollegen von der New York University bringt das Extinktionslernen auch bei Menschen mehr Aktivität im vmPFC mit sich – und weniger in der Amygdala.

Mit Hilfe bildgebender Verfahren erkunden Forscher heute auch die biologischen Vorgänge bei der kognitiven Verhaltenstherapie. Diese hat zum Ziel, unerwünschte Reaktionen von Patienten in schwierigen Situationen zu verändern. Solchen Untersuchungen zufolge spielt der Hippocampus eine wichtige Rolle für das Beurteilen von Zusammenhängen und der dorsolaterale Präfrontalkortex für die Toleranz und das Überwinden von Ängsten (siehe Kasten links). Letzterer ist jedoch nicht direkt mit der Amygdala verbunden. Vermutlich dient der vmPFC als Brücke zwischen diesen beiden Regionen und damit als biologischer Angriffspunkt für kognitive Behandlungsstrategien.

Laut der vorgestellten Studien hängen die charakteristischen Verhaltensweisen und Gefühle bei Depressionen, Zwangsstörungen oder PTBS mit der Aktivität miteinander



verbundener Hirnregionen zusammen. In allen Fällen ist der präfrontale Kortex beteiligt. Das überrascht auch nicht allzu sehr, da diese Hirnstruktur vermutlich einen wichtigen Anteil an jenen komplexen Fähigkeiten hat, die uns von Tieren unterscheiden. Forscher halten sie für einen übergeordneten Regulator unseres Gehirns, der es uns etwa ermöglicht, Entscheidungen zu fällen und für die Zukunft zu planen.

Biomarker für die Psychiatrie

An jeder der hier betrachteten Störungen scheinen jedoch ein anderer Teil dieses Hirnareals sowie unterschiedliche damit verbundene Regionen beteiligt zu sein. Zudem wurden Fehlfunktionen des dorsolateralen Präfrontalkortex auch bei anderen psychiatrischen Erkrankungen nachgewiesen, etwa der Schizophrenie. Und bei sieben bis zwölf Jahre alten Kindern mit Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) ist die Reifung des gesamten präfrontalen Kortex verzögert.

Dass Wissenschaftler zunehmend Fehlfunktionen in Schaltkreisen des Gehirns für psychische Krankheiten verantwortlich machen, könnte deren Diagnose und Behandlung revolutionieren. Zurzeit werden solche Störungen lediglich nach ihren Symptomen klassifiziert. Diese ähneln sich jedoch häufig auch bei ganz verschiedenen Erkrankungen und haben keinen Bezug zu biologischen Befunden. In anderen Bereichen der Medizin sind dagegen heute etwa die Bestimmung von Cholesterin oder prostataspezifischem Antigen im Blut sowie elektrophysiologische und bildgebende Verfahren längst Routine. Ähnlich könnte ein zukünftiges Diagnosesystem Biomarker – neuronale Aktivitätsmuster oder chemische und strukturelle Veränderungen des Gehirns – nutzen, um Hirnfunktionsstörungen neu zu klassifizieren sowie präziser und früher zu diagnostizieren.

Beispiel Schizophrenie: Ein entscheidendes Diagnosekriterium ist gegenwärtig das Auftreten einer psychotischen Episode – so wie einst der Herzinfarkt das wesentliche Kriterium für eine Herzerkrankung darstellte. Symptome, die Verhalten oder Kognition betreffen, dürften eher späte Anzeichen für Hirnerkrankungen sein und womöglich erst zu Tage treten, nachdem etwaige kompensatorische Mechanismen nicht mehr funktionieren. So treten bei Morbus Parkinson

sichtbare Symptome dann auf, wenn bereits 80 Prozent der Dopamin produzierenden Zellen der Substantia nigra abgestorben sind. Bei Chorea Huntington werden motorische Probleme offensichtlich, nachdem die Hälfte der Neurone in den Basalganglien zu Grunde gegangen sind.

Die jeweilige Behandlung wiederum wird von der genauen Art der Erkrankung abhängen. An der Funktion der neuronalen Schaltkreise lässt sich heute nicht nur zeigen, dass bestimmte Behandlungsmethoden wie die kognitive Verhaltenstherapie anschlagen, sondern auch, wie sie wirken könnten, indem sie die Hirnaktivität verändern. Solche Erkenntnisse sollten es ermöglichen, die vorhandenen Therapiemethoden zu verbessern. Auch viele der derzeit verwendeten antidepressiven und antipsychotischen Medikamente wirken recht effektiv – allerdings nicht besser als bereits vor 40 Jahren. Hier verspricht ein tieferes Verständnis der biologischen Ursachen der Depression gezieltere und durchschlagendere Behandlungen.

Psychische Erkrankungen als Schaltkreisstörungen des Gehirns aufzufassen, könnte auch die öffentliche Einstellung zu diesem Thema ändern. Bisher wurden sie je nach Zeitalter etwa als Folge von Besessenheit, Willensschwäche oder Missbrauch durch die Eltern betrachtet. Heute wissen wir: zu Unrecht. Eine streng wissenschaftliche Herangehensweise an solche Störungen könnte die gesellschaftliche Akzeptanz der Betroffenen ebenso wie ihre medizinische Versorgung verbessern. Damit zeichnet sich eine dramatische Umwälzung in der Psychiatrie ab: Aus einem auf subjektiven, seelischen Phänomenen beruhenden Fachgebiet wird ein zunehmend neurowissenschaftlich orientiertes. Von diesem neuen Verständnis psychischer Erkrankungen könnte die Lebensqualität von Millionen Menschen weltweit profitieren. ~

DER AUTOR



Thomas R. Insel ist Psychiater, Neurowissenschaftler und Direktor des US-amerikanischen National Institute of Mental Health. Er versucht die Gräben zwischen Biologie und Psychologie zu überbrücken, indem er die Wechselwirkungen zwischen neuronaler Aktivität und Verhalten erforscht.

QUELLEN

- Delgado, M.R. et al.:** Neural Circuitry Underlying the Regulation of Conditioned Fear and its Relation to Extinction. In: *Neuron* 59, S. 829–838, 11. September 2008
- Insel, T.R.:** Disruptive Insights in Psychiatry: Transforming a Clinical Discipline. In: *Journal of Clinical Investigation* 119, S. 700–705, 1. April 2009
- Ressler, K.J., Mayberg, H.S.:** Targeting Abnormal Neural Circuits in Mood and Anxiety Disorders: From the Laboratory to the Clinic. In: *Nature Neuroscience* 10, S. 1116–1124, September 2007

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067440

Tierische Trinker

Warum neigen Menschen dazu, zu viel Alkohol zu trinken? Zwei Suchtmediziner betrachten die evolutionären Grundlagen dieses Problems.

Von **Andreas Gerloff** und **Manfred V. Singer**

Seit Jahrhunderten spielen Alkohol und Tabak im Alltag der Menschen als Genussmittel eine große Rolle. Sie sind »besondere« Substanzen: Zum einen wirken diese Drogen psychoaktiv und machen abhängig – zum anderen sind sie legal und können bis auf einige Einschränkungen ohne juristische Sanktionen konsumiert werden. Wie andere psychoaktive Substanzen mit Abhängigkeitspotenzial auch wirken sie über das »dopaminerge System« im Gehirn. Dabei handelt es sich um ein Belohnungssystem, in dem Dopamin als Neurotransmitter fungiert.

Der Konsum von Tabak ist seit 40 000 Jahren belegt, der von Kokain seit immerhin 7000. Unsere Vorfahren haben bereits vor Millionen von Jahren die unterschiedlichsten pflanzlichen Drogen zu sich genommen. Gewächse bilden Substanzen wie Ethanol, Kokain oder Nikotin zur Abwehr von Eindringlingen und Schädlingen. Säugetiere schärfen ihre Sinne, etwa den Geruchs- oder Geschmackssinn, um zu erkennen, ob Pflanzen genießbar oder schädlich sind. Sie schützten sich, indem sie Gifte ausschieden oder erbrachen. Heute glauben Biologen, in dieser Koevolution von Fauna und Flora entstand auch die Fähigkeit von Säugetieren, auf psychotrope Substanzen wie Kokain und Morphin zu reagieren. Dabei ist erwähnenswert, dass die natürlich vorkommenden Drogen bei Weitem nicht so stark wirken wie die reinen Formen, die sich heute chemisch herstellen lassen.

AUF EINEN BLICK

EVOLUTION DES ALKOHOLISMUS

- 1** Wie sich der **Alkoholkonsum bei unseren Vorfahren** entwickelte, versuchen Forscher anhand von Tierbeobachtungen zu erschließen.
- 2** Enge Verwandte der Primaten, die **Federschwanzspitzhörnchen**, ernähren sich hauptsächlich von vergorenem Nektar. Offenbar vertragen sie den Alkohol weit besser als Menschen.
- 3** Evolutionär betrachtet lässt sich Alkoholismus, ähnlich wie Fettleibigkeit oder Diabetes, als durch **Nahrungsüberfluss** verursachte Krankheit werten.

Die Evolution des Alkoholkonsums wurde bislang nur wenig erforscht. Doch fiel diese Suchtform keineswegs vom Himmel. Für eine stammesgeschichtliche Grundlage des Alkoholismus sprechen sowohl seine Vererbbarkeit als auch das unterschiedliche geografische Vorkommen der Alkoholdehydrogenase, des wichtigsten Enzyms für den Alkoholabbau beim Menschen. Zudem haben auch andere Tiergattungen Kontakt zu Ethanol, dem häufigsten und vorwiegend konsumierten Typ von Alkohol, der natürlicherweise in Pflanzen vorkommt.

Wenn wir verstünden, warum mäßiger wie übermäßiger Alkoholkonsum im Rahmen der Evolution auftrat, ließen sich daraus neue theoretische Ansätze und therapeutische Möglichkeiten zur Behandlung von Alkoholismus gewinnen. Die entscheidenden Fragen lauten:

- Warum trinken Menschen Alkohol beziehungsweise alkoholische Getränke?
- Wie kommt es, dass der menschliche Organismus Alkohol überhaupt verarbeiten kann?
- Warum trinken nur einige und nicht alle Menschen Alkohol im Übermaß?

In einer 2008 publizierten Studie präsentierte ein internationales Wissenschaftlerteam unter der Leitung der Bayreuther Biologen Frank Wiens und Annette Zitzmann erstaunliche Erkenntnisse über Entstehung und Art des Alkoholkonsums unserer Vorfahren – anhand von Tierbeobachtungen. In früheren Analysen wurde der Ursprung des Alkoholismus häufiger der »Entdeckung« des Alkohols durch die Mesopotamier vor rund 9000 Jahren zugeordnet. Diese hätten Alkohol durch Fermentation erzeugt und für die Konservierung von Lebensmitteln eingesetzt. Die neue Studie zeigt allerdings, dass der evolutionäre Grundstein dafür bereits viel früher gelegt wurde: Alkohol konsumierende Federschwanzspitzhörnchen, die in Westmalaysia beheimatet sind, zählen zu den engsten Verwandten der Primaten und ähneln in Ökologie und Verhalten sehr unseren gemeinsamen Ahnen, die vor mehr als 55 Millionen Jahren gelebt haben.

Das Team um Frank Wiens hatte zwischen 1995 und 2006 über einen Zeitraum von 38 Monaten Felddaten gesammelt,

denen zufolge das Federschwanzspitzhörnchen und sechs weitere Säugetierarten im Regenwald ihre Tage und Nächte damit verbringen, vergorenen Nektar der Bertampalme zu konsumieren. Hefen produzieren durch alkoholische Fermentation des Nektars dieser Palme einen Alkoholgehalt von bis zu 3,8 Volumenprozent. Das entspricht beinahe dem von Bier und stellt eine der höchsten Konzentrationen dar, die je in natürlicher Nahrung nachgewiesen wurden. Die Palmen speichern ihren stark riechenden, vergorenen Nektar in Blütenknospen bis zur Reife der Pollen, um die Federschwanzspitzhörnchen zur Bestäubung anzulocken.

Meister im Alkoholabbau

Diese Tiere ernähren sich tatsächlich vorwiegend vom alkoholhaltigen Nektar. Damit leben die Federschwanzspitzhörnchen als Bestäuber und die Bäume als Nektarproduzenten in einer symbiotischen Beziehung. Da Bertampalmen das ganze Jahr über blühen, nehmen die Spitzhörnchen pausenlos Alkohol zu sich. Verglichen mit Menschen müssten die Tiere bei ihrem Nektarkonsum eigentlich jeden Tag betrunken sein – in einem Lebensraum mit Fressfeinden ein tödliches Risiko. Trotzdem überleben die Spitzhörnchen in diesem eng umschriebenen Ökosystem schon seit Jahrmillionen. Vermutlich besitzen die Tiere eine erhöhte metabolische Toleranz – das heißt, sie können Alkohol besser abbauen als der Mensch.

Bei unseren nächsten phylogenetischen Verwandten, den nichtmenschlichen Primaten, wird Alkohol wie bei uns Menschen zum Großteil durch das Enzym Alkoholdehydrogenase in der Leber abgebaut. Zusätzlich ähneln diese Tiere uns Menschen in Verhalten, Neuroanatomie und Neurophysiologie. Ähnlich wie wir zeigen zum Beispiel auch Rhesusaffen

Federschwanzspitzhörnchen (*Ptilocercus lowii*) sind enge Verwandte der Primaten. Im Regenwald Malaysias ernähren sie sich vorwiegend vom alkoholischen Nektar der Bertampalme. Trotz heftiger »Trinkgelage« zeigen sie kaum Anzeichen echten Betrunkenseins – was vermutlich evolutionäre Ursachen hat.



ANNETTE ZITZMANN

Temperament und individuelle Persönlichkeit. Die Makaken leben in großen sozialen Gruppen und entwickeln komplexe, lebenslange soziale Bindungen zu nicht verwandten wie zu verwandten Artgenossen. Während frei lebende Primaten in ihrer natürlichen Umgebung keinen Zugang zu hochprozentigem Alkohol haben, konsumieren die meisten Rhesusaffen – bei Verfügbarkeit – Alkoholmengen, die sich deutlich auswirken.

Unter experimentellen Bedingungen, in denen Rhesusaffen frei zwischen gesüßtem Wasser oder einer gesüßten Alkohollösung wählen können, trinken die Primaten etwa so viel Alkohol wie »normale« Menschen (ein bis drei Drinks verteilt über eine Stunde). Das verursacht einen Blutalkoholspiegel von 0,5 bis 0,8 Promille. 15 bis 20 Prozent der Affen nehmen Alkohol in Mengen zu sich, mit denen sie sich bereits vergiften, während wie beim Menschen weniger als ein Zehntel abstinent bleiben. Die Tiere zeigen dabei Anzeichen von Benommenheit und Ungeschicklichkeit. Dürfen Rhesusaffen täglich nur eine Stunde Alkohol trinken, verhalten sie sich wie Jugendliche beim beliebten Komasaufen.

Der amerikanische Biologe Robert Dudley von der University of California in Berkeley nahm im Jahr 2000 an, dass das symbiotische Verhältnis zwischen unseren Früchte fressenden Primatenvorfahren (so genannten Frugivoren) und Pflanzen die evolutionäre Grundlage für den heutigen exzessiven Alkoholkonsum darstellt. Demnach waren reife Früchte, die einen Zuckergehalt von bis zu 61 Prozent enthalten können, für Frugivoren eine attraktive Nahrungsquelle. Beim Reifen verändern Früchte ihre Farbe, werden weicher und setzen flüchtige Substanzen frei – darunter auch Ethanol. Diese Stoffe konnten unsere Vorfahren laut Dudley über große Distanzen riechen.

Die Lokalisierung der Früchte über den Geruchssinn führte notgedrungen schon vor Millionen von Jahren zur Aufnahme des Alkohols. Damit sei jedoch der Duft und Geschmack von Alkohol positiv mit dem Auffinden von Nahrung verknüpft. Dies habe, so Robert Dudley, das Verhalten der Primaten bis zum heutigen Menschen geprägt. Dass un-



FOTOLIA / INES PEREZ NAVARRO

Vor die Wahl gestellt, neigen Rhesusaffen zu ähnlichem Trinkverhalten wie Menschen. Beschränkt man den Zugang zu Hochprozentigem, werden die Tiere zu Komasaüfern.

sere Vorfahren ab einem bestimmten Zeitpunkt auch Getränke mit einem künstlich erhöhten Ethanolgehalt produzieren und sich damit betrinken konnten, hob zwar den evolutionären Vorteil auf, den sich die Frugivoren einst verschafft hatten. Doch der anschließende Zeitraum war zu kurz, um evolutionär ins Gewicht zu fallen. Daher betrachtet der Biologe den heutigen Alkoholismus als ein Überbleibsel der Evolution und nennt ihn einen *evolutionary hangover*.

Evolutionäres Trio des Alkoholismus: Mikroben, Pflanzen, Fruchtfresser

Dem widerspricht der Zoologe Douglas J. Levey. Nach der Meinung des Forschers von der University of Florida in Gainesville würde die von Dudley postulierte genetisch bedingte Attraktivität des Alkohols dazu führen, dass Frugivoren Früchte mit höherem Ethanolgehalt bevorzugen. Da dieser im Lauf des Reifungs- und Fäulnisprozesses zunimmt, würde das bedeuten, dass Fruchtfresser letztlich verfaulte und überreife Früchten weniger reifen Früchten vorziehen sollten. Dies sei allerdings nicht der Fall.

Stattdessen misst Levey den Mikroorganismen, die wie die Frugivoren von den Früchten profitieren, in dem Zusammenspiel eine zentrale Rolle zu. Unter Sauerstoffausschluss produzieren Mikroben, insbesondere Hefen, Ethanol, den sie zur Gewinnung von Energie sowie zur Abwehr mikrobieller Konkurrenten nutzen. Gleichzeitig rufen andere Mikroorganismen Fäulnis hervor und vermindern damit den Reiz der Früchte für die Frugivoren. Für das Fortbestehen der Pflanze ist der Konkurrenzkampf ausschlaggebend: Die Frugivoren verbreiten mit ihren Ausscheidungen die Samen, während die Mikroorganismen diesen Beitrag nicht leisten. Würden also die Mikroorganismen das »Wettrennen« gewinnen, dann wäre das zum Nachteil sowohl der Frugivoren als auch der Pflanzen. Die Pflanze bewegt sich daher in der



von Levey postulierten evolutionären Triade zwischen Frugivoren, Mikroorganismen und Pflanzen ständig auf einem schmalen Grat. Zum einen werden die Früchte für Frugivoren durch den Reifungsprozess attraktiver, zum anderen fördern die geschwächten physikalischen und chemischen Abwehrmechanismen den Fäulnisprozess durch Mikroorganismen.

Ein weiterer Ansatz zum Ursprung des Alkoholismus ist, dass sich in der Evolution des Menschen vor allem diejenigen genetischen Anlagen bewahrt haben, die exzessiven Alkoholkonsum und Abhängigkeit fördern. Denn dieselben Merkmale hätten früher zur evolutionären Fitness beigetragen. Wie lässt sich das belegen? Die These geht von der Beobachtung aus, dass Menschen mit zu wenig Serotonin im Gehirn bereits in jungem Alter unter Alkoholproblemen leiden und eine geringe soziale Kompetenz besitzen. Serotonin ist ein Neurotransmitter und wesentlicher Bestandteil des menschlichen Hormonsystems. Es steuert den Sexualtrieb, beeinflusst Schlaf, Appetit und Stimmung.

Auch bei unseren Verwandten ist dieser Effekt bekannt. Primaten mit einer verringerten Konzentration des Serotoninmetaboliten 5-Hydroxyindolessigsäure (5-HIAA) neigen zu Alkoholmissbrauch. Studien haben gezeigt, dass Rhesusaffen mit verringertem 5-HIAA-Spiegel aggressiver und impulsiver auftreten als ihre Artgenossen. Auf der Suche nach sexuellen Partnern verlassen sie ihre Gruppe früher und gehen beim Werben um potenzielle Partner mit höherem sozialem Rang mehr Risiken ein. Obwohl diese Tiere auf Grund ihrer stärkeren Impulsivität eine geringere Lebenserwartung als ihre Artgenossen besitzen, kompensiert sich das durch mehr Nachkommen in jungen Lebensjahren. Sie verfolgen damit eine Strategie nach dem Motto »Lebe schnell, stirb jung«.

In Zeiten von Ressourcenknappheit und Konkurrenzkampf boten solche genetisch bedingten Persönlichkeitsmerkmale einen selektiven Vorteil, während sie in der heutigen Zeit des Nahrungsüberflusses stattdessen zu überhöhtem Alkoholkonsum führen. Doch gilt es zu bemerken, dass nicht alle Individuen mit verringerter Serotoninproduktion zwangsläufig Alkoholprobleme entwickeln. Vielmehr entsteht Alkoholismus aus der Kombination dieses Effekts, der Gier nach positiver Verstärkung (*reinforcement*) sowie der subjektiv empfundenen Erhöhung der Fitness, die Alkohol fälschlicherweise vermittelt. Zudem spielen beim Alkoholismus neben Serotonin eine Reihe weiterer Neurotransmitter (wie Gamma-Aminobuttersäure oder Dopamin) und anderer Botenstoffe (das Corticotropin-releasing-Hormon, Opioide und Cannabinoide) eine wichtige Rolle. Die Studien zum Verhalten der Federschwanzspitzhörnchen sprechen also dafür, dass Alkoholkonsum in der Humanevolution bereits vor Millionen von Jahren eine Rolle spielte.

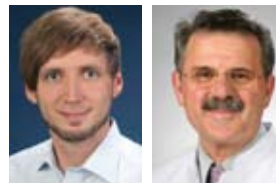
Unsere Vorfahren haben demnach durch den Konsum geringfügiger Alkoholmengen mit den Früchten einen se-

lektiven Vorteil erfahren. Dieser hat sich einst genetisch manifestiert und wirkt sich in heutigen Zeiten des freien Zugangs zum Alkohol nachteilig aus. Damit kann Alkoholismus, ähnlich wie Fettleibigkeit (Adipositas) oder Diabetes, in der heutigen Zeit als Krankheit durch Nahrungsüberfluss betrachtet werden. Ob auch Mikroorganismen eine besondere Funktion in dieser Symbiose und für die evolutionäre Entwicklung spielten, wie der Zoologe Douglas J. Levey vorschlägt, klingt aus unserer Sicht wahrscheinlich, ist jedoch noch nicht experimentell belegt.

Möglich ist außerdem, dass sich Persönlichkeitsmerkmale, die Alkoholismus fördern, in der Evolutionsgeschichte durchgesetzt haben, weil sie sich in einem früheren Umfeld als Vorteil erwiesen haben. Verhalten und Persönlichkeitsmerkmale von Primaten, unseren nächsten Verwandten, sollten also weiter erforscht werden. Denn dies könnte uns helfen, die ursächlichen Mechanismen des exzessiven Alkoholkonsums aufzuklären und neue Therapien zu entwickeln. ~

Selektiver Vorteil des Mottos »Lebe schnell, stirb jung«

DIE AUTOREN



Dr. Andreas Gerloff (links) arbeitete als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der II. Medizinischen Universitätsklinik in Mannheim und ist mittlerweile an der University of California in Los Angeles tätig. **Manfred V. Singer**, inzwischen emeritierter

Professor, hat sich viele Jahre mit der Erforschung der Alkoholsucht befasst. Er war bis vor Kurzem Direktor der II. Medizinischen Universitätsklinik in Mannheim.

QUELLEN

- Dudley, R.:** Evolutionary Origins of Human Alcoholism in Primate Frugivory. In: Quarterly Reviews in Biology 75, S. 3–15, 2000
- Gerald, M. S., Higley, J. D.:** Evolutionary Underpinnings of Excessive Alcohol Consumption. In: Addiction 97, S. 415–425, 2002
- Levey, J. L.:** The Evolutionary Ecology of Ethanol Production and Alcoholism. In: Integrative and Comparative Biology 44, S. 284–289, 2004
- Saah, T.:** The Evolutionary Origins and Significance of Drug Addiction. In: Harm Reduction Journal 2, S. 1–7, 2005
- Singer, M. V., Teyssen, S.:** Alkoholismus und Alkoholfolgekrankheiten. Springer, Heidelberg, 2. Auflage 2005
- Spanagel, R.:** Alkohol – Belohnungseffekte, Enthemmung und Sucht. In: Schweizer Zeitschrift für Ernährungsmedizin 01/2009, S. 13–17
- Sullivan, R. J.:** Psychotropic Substance-Seeking: Evolutionary Pathology or Adaptation? In: Addiction 97, S. 389–400, 2002
- Wiens, F. et al.:** Chronic Intake of Fermented Floral Nectar by Wild Tree Shrews. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 105, S. 10426–10431, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067441

Kann die Zeit enden?

Ein Ende der Zeit erscheint einerseits unmöglich, andererseits geradezu unvermeidlich. Jüngste physikalische Forschungsansätze deuten auf eine Lösung für dieses Paradoxon.

Von George Musser

Es gibt immer ein Danach, sagt uns eine tief verwurzelte Überzeugung. Wir werden zwar sterben, aber die Materie unseres Körpers existiert – in zersetzter Form – weiter. Selbst wenn in ferner Zukunft die Sonne explodiert, wird höchstwahrscheinlich kein Mensch mehr beobachten können, was danach geschieht; aber wir sind sicher, dass danach irgendetwas geschehen wird.

Wird das für immer so sein? Oder könnte es in der fernen Zukunft einen Zeitpunkt geben, nach dem einfach gar nichts mehr kommt? Die moderne Physik liefert gute Gründe dafür, dass die Antwort »Ja« lautet. Die Zeit selbst könnte enden. Und damit wäre nicht nur jegliches Geschehen zu Ende, sondern auch die Möglichkeit jeglichen Geschehens. Das Ende der Zeit wäre das Ende schlechthin.

Dieses tiefschwarze Bild von der Zukunft ist eine unerwartete Konsequenz aus der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins, auf der unser modernes Verständnis der Gravitation basiert. In der klassischen, vorrelativistischen Physik ist die Zeit so etwas wie ein Trommelschlag, nach dem das ganze Universum marschiert, oder der alles beherrschende Rhythmus, zu dem die Mitglieder einer Jazzband improvisieren: Er ist immer gleich, lässt sich durch nichts beeinflussen und hört vor allem nie auf. Einstein zeigte, dass der Kosmos eher einer großen, polyrhythmischen Jamsession gleicht. Hier läuft die Zeit langsamer, dort schneller, und manche Rhythmen sind so fetzig, dass der Zusammenhang des Universums zerreißt.

AUF EINEN BLICK

WELTUNTERGANG AUF RATEN

1 Die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins sagt voraus, dass die Zeit in so genannten **Singularitäten** enden kann, beispielsweise im Zentrum eines Schwarzen Lochs oder beim Kollaps des ganzen Universums in einem **»Big Crunch«**. Doch zugleich besagt die Theorie, dass solche Singularitäten unmöglich sind.

2 Einen Ausweg aus diesem Paradoxon bietet die Vorstellung, dass die Zeit nicht abrupt aufhört zu existieren, sondern ihre Eigenschaften **Richtung, Dauer und Kausalität** nach und nach verliert.

3 Eine Physik, die das Ende der Zeit beschreibt, muss ihrerseits auf **Begriffen ohne Zeitbezug** aufbauen.

Die rhythmische Variabilität der Zeit macht sich bereits bei der alltäglichsten aller Kräfte bemerkbar, der Gravitation. Alle materiellen Körper fallen in Richtung auf einen Ort, an dem die Zeit langsamer vergeht. Und die Zeit beeinflusst nicht nur das Verhalten der Materie, sondern reagiert auch auf sie, gleich Schlagzeugern und Tänzern, die sich gegenseitig in rhythmische Ekstase treiben. Das kann bis zu dem Punkt gehen, in dem die Zeit sich auflöst – wie wenn ein Schlagzeuger vor lauter Erregung Feuer fangen und sich in Rauch auflösen würde.

Solche dramatischen Augenblicke nennen die Physiker Singularitäten. Die Bezeichnung bezieht sich genau genommen nicht nur auf das Ende der Zeit, sondern auf jede Begrenzung, insbesondere ihren Anfang. Die bekannteste Singularität ist der Urknall, jener Moment vor ungefähr 13,7 Milliarden Jahren, an dem unser Universum seinen Anfang nahm – und damit auch die Zeit. Falls das Universum jemals aufhört zu expandieren und sich wieder zusammenzieht, wird es sich schließlich in einer Umkehrung des Urknalls auf einen Punkt verdichten. Bei dieser »großen Zermalmung« (»Big Crunch« in Analogie zu »Big Bang«, der englischen Bezeichnung für den Urknall) kommt auch die Zeit zum Stillstand.

Was ist paradoxer: Ein Ende der Zeit – oder eine Zeit ohne Ende?

Doch die Zeit muss nicht zwangsläufig überall enden. Gemäß der Relativitätstheorie erlischt sie im Inneren eines Schwarzen Lochs, während sie im Rest des Universums weiterläuft. Schwarze Löcher haben zu Recht einen üblen Ruf als Zerstörer – und übertreffen ihn noch. Wer in ein Schwarzes Loch hineinfällt, wird nicht nur zerfetzt; seine Überreste geraten in eine Singularität im Zentrum des Lochs, und dort endet ihre Existenz. Da steigt nicht nur kein neues Leben aus der Asche, es gibt keine Asche mehr, nicht einmal deren Elementarteilchen, geschweige denn Atome.

Es dauerte mehrere Jahrzehnte, bis die Physiker bereit waren zu akzeptieren, dass aus der Relativitätstheorie ein solch unwiderrufliches Ende folgt. Und bis heute sind sie sich nicht sicher, was sie damit anfangen sollen. Nicht umsonst streben sie so intensiv nach einer großen vereinheitlichten Theorie, die Einsteins Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik



HOLLY LINDEN

zu einer Quantentheorie der Gravitation verschmilzt. Denn in einer solchen Theorie würden sich möglicherweise die Singularitäten erübrigen.

Aber Vorsicht: Vielleicht ist das gar kein so erstrebenswertes Ziel. Ein Ende der Zeit ist zwar schwer vorstellbar; aber eine Zeit ohne Ende könnte noch paradoxer sein.

Schon lange vor Einstein hatten Philosophen darüber debattiert, ob die Zeit sterblich sein könnte. Immanuel Kant (1724–1804) befand, dass es sich hierbei um eine »Antinomie« handle: Es gebe gute Gründe für die eine wie für die andere Antwort, so dass das Nachdenken in einem unauf löslichen Widerspruch endet.

Der antike Denker Aristoteles (384–322 v. Chr.) argumentierte, dass die Zeit weder Anfang noch Ende haben könne. Jeder Augenblick ist zugleich das Ende einer Ära und der Beginn einer neuen; jedes Ereignis ist sowohl Folge von etwas als auch Ursache von etwas anderem. Wie also könnte die Zeit jemals enden? Was sollte das letzte Ereignis der Geschichte daran hindern, ein weiteres Ereignis zu verursachen? Wie soll-

»Zeit ist, was die Uhr misst«: Sie ist nicht denkbar ohne einen materiellen Gegenstand, der sie in gleiche Abschnitte einteilt. Ihr Ende muss also mit dem Ende jeder Materie einhergehen, die in einem sehr abstrakten Sinn als Uhr dienen könnte – und sei es nur ein einziges Atom.

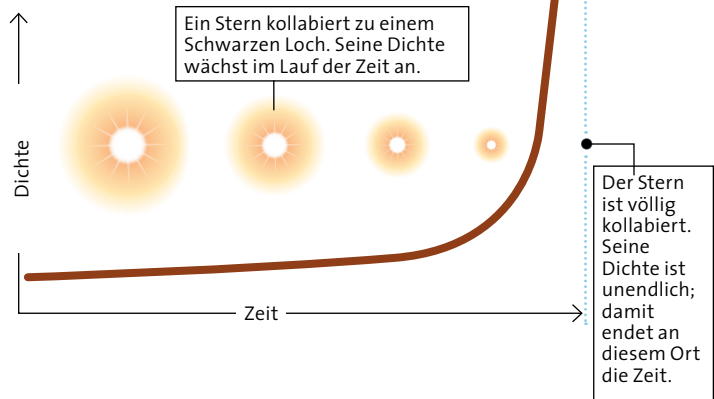
ten wir überhaupt ein Ende der Zeit definieren, wenn schon unser Begriff von »Ende« die Existenz von Zeit voraussetzt?

»Es ist logisch nicht möglich, dass die Zeit ein Ende hat«, behauptet auch der Philosoph Richard Swinburne von der University of Oxford. Wenn aber die Zeit nicht enden kann, dann muss das Universum ewig fortbestehen – und damit tritt der Begriff des Unendlichen mit all seinen Schwierigkeiten und Paradoxa auf den Plan. Nicht umsonst haben die Wissenschaftler bis in die frühe Neuzeit hinein dem Unendlichen jede reale Existenz abgesprochen.

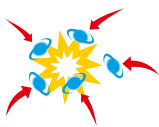
Mit dem Triumph der Urknalltheorie und der Entdeckung Schwarzer Löcher schien die Frage nach dem Ende der Zeit

Der endgültig jüngste Tag

Laut der allgemeinen Relativitätstheorie kann die Zeit auf beunruhigend viele verschiedene Weisen enden. Das einfachste Beispiel: Wenn ein Schwarzes Loch entsteht, steigt in seiner Umgebung die Dichte der Materie an. Damit nimmt die Schwerkraft zu, was die Dichte weiter ansteigen lässt, was wiederum zu einer Verstärkung der Schwerkraft führt und so weiter, bis schließlich Dichte und Schwerkraft unendlich groß werden – ein Zustand, der als Singularität bezeichnet wird (rechts). Dann hört die Materie auf zu existieren, und die Zeit ist für diese Region des Raums abgelaufen. Ein ähnliches Schicksal könnte das ganze Universum erleiden (unten).



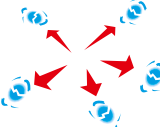
UNTERGANGSSZENARIEN FÜR DIE ZEIT



BIG CRUNCH: Das große Zermalmen
Die Gravitation verlangsamt die Expansion des Weltalls, bis sie ganz zum Stillstand kommt und sich dann sogar umkehrt. Das Universum zieht sich zusammen und endet schließlich in einer Singularität, in der auch die Zeit endet. Diese frühere Lieblingsprognose der Kosmologen hat an Plausibilität verloren: Die Materie ist zu dünn verteilt, um als ausreichende Expansionsbremse zu wirken; und eine unbekannte Energieform, die Dunkle Energie, scheint die Expansion sogar noch zu beschleunigen.



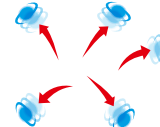
BIG WHIMPER: Das große Zerbröseln
Das Universum expandiert ewig weiter und wird dabei immer leerer und dunkler. Dieses Schicksal halten die Kosmologen derzeit für das wahrscheinlichste. In diesem Szenario endet die Zeit niemals, wird aber zunehmend bedeutungslos. Das Universum erleidet den »Wärmehoden«, einen Gleichgewichtszustand, in dem jeder Vorgang und seine zeitliche Umkehrung gleich wahrscheinlich sind. Die Zeit hat damit keine Richtung und möglicherweise auch keine wohldefinierte Maßeinheit mehr.



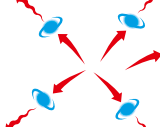
BIG RIP: Das große Zerreißen
Das Universum reißt sich selbst in Stücke. Dazu kann es kommen, wenn die Dunkle Energie nicht konstant ist, wie es die meisten Modelle annehmen, sondern zunimmt. Diese »Phantomenergie« ist erstmals 1999 vermutet worden. Das Universum expandiert unendlich stark, wobei sogar Atome in Stücke gerissen werden, und die Zeit kommt zu einem Ende. Nach einigen Modellen findet diese Katastrophe in einem geradezu überschaubaren Zeitraum statt: in 20 Milliarden Jahren.



BIG FREEZE: Das große Erstarren
Das Universum füllt sich mit Phantomenergie und erreicht eine unendliche Dichte, expandiert dabei aber nur um einen endlichen Betrag. Alle überlebenden Materieüberreste sind dann an Ort und Stelle eingefroren und können sich nicht mehr bewegen. Damit endet effektiv auch die Zeit. Zu einem Big Freeze kann es auch kommen, wenn unser Universum entsprechend der Stringtheorie eine Membran in einem höherdimensionalen Raum ist, die heftig zu schwingen beginnt.



BIG BRAKE: Die große Vollbremsung
Die Dunkle Energie verändert ihre Wirkung: Sie beschleunigt nicht mehr wie bisher die Expansion des Universums, sondern bringt sie schlagartig zum Stillstand – so gewaltsam, dass die negative Beschleunigung unendlich groß ist. Nach diesem 2004 erstmals veröffentlichten Modell würden die kosmischen Strukturen unendlich großen Gezeitenkräften ausgesetzt. Obwohl andere Größen endlich bleiben, würde diese Katastrophe ein Ende der Zeit herbeiführen.



BIG LURCH: Der große Ruck
Im Gegensatz zu den anderen Szenarien benötigt die ebenfalls 2004 erdachte »plötzliche Singularität« keine Dunkle Energie. Es ist lediglich nötig, dass sich gewöhnliche Materie selbst in eine Art Ekstase treibt. Der Druck steigt dabei ins Unendliche, Dichte und kosmische Expansion bleiben in sicheren Bereichen. Die Zeit kann weiterlaufen oder auch nicht. Auf Basis astronomischer Beobachtungen ist nicht auszuschließen, dass es bereits in neun Millionen Jahren zu einer solchen Katastrophe kommt.

JACKSON LEE

zunächst erledigt. Das Universum ist mit Singularitäten durchsetzt, und die Zeit in ihm wird früher oder später zusammenbrechen – irgendwie. Wenn nicht der früher favorisierte »Big Crunch« stattfindet, darf es auch ein »Big Rip«, »Big Freeze« oder »Big Brake« sein; die Kosmologen verfügen da über eine beträchtliche Fantasie (Kasten oben). Wenn wir aber genauer nachfragen, was Singularitäten wirklich sind, ist die Antwort plötzlich weniger klar. »Die Physik der Singularitäten steht zur Disposition«, gesteht Lawrence Sklar von der University of Michigan in Ann Arbor, ein führender Philosoph der Physik.

Ebendie Theorie, die diese Monster hervorgebracht hat, liefert auch gute Gründe für ihre Nichtexistenz. So sagt die

Relativitätstheorie aus, dass in der Urknall-Singularität die Materie des ganzen Universums, die Vorläufer aller heute sichtbaren Galaxien eingeschlossen, in einem einzigen Punkt konzentriert war – nicht in einem kleinen Raum von der Ausdehnung eines Stecknadelkopfs, sondern in einem echten mathematischen Punkt mit der Ausdehnung null. Auf einen ebensolchen infinitesimalen Punkt wird ein unglücklicher Astronaut zusammengedrückt, der in ein Schwarzes Loch fällt. In beiden Fällen ist die Massendichte in einem solchen Punkt, zu berechnen als Masse geteilt durch Volumen, unendlich, denn das Volumen ist null. Andere Arten von Singularitäten führen nicht unbedingt auf unendlich große Dichten, aber dafür auf andere Unendlichkeiten.

Die modernen Physiker hegen zwar nicht mehr die gleiche Aversion gegen das Unendliche wie Aristoteles und Kant, aber sie nehmen es doch als ein Indiz dafür, dass sie eine Theorie über ihre Grenzen hinausgetrieben haben. Nehmen wir beispielsweise die in der Schulphysik so beliebte Strahlenoptik. Sie erklärt sehr schön, wie Brillen und Zerrspiegel funktionieren. Aber sie behauptet auch, dass eine ideale Linse das Licht einer fernen Quelle in einem einzigen mathematischen Punkt versammelt; dort müsste dessen Intensität unendlich werden. Tatsächlich sammelt sich das Licht nicht in einem Brennpunkt, sondern in einem Brennfleck endlicher Größe. Deswegen ist die Lichtintensität dort zwar hoch, aber niemals unendlich. Die Strahlenoptik liefert ein falsches Ergebnis, weil sie die Wellennatur des Lichts außer Acht lässt.

Nach einem gleichartigen Argumentationsmuster vermuten fast alle Physiker, dass die Massendichte in einer kosmischen Singularität zwar hoch, aber endlich ist. Die Relativitätstheorie liefert ein falsches Ergebnis, weil sie eine wichtige Eigenschaft der Materie oder der Gravitation nicht richtig erfasst, die in der Nähe von Singularitäten zum Tragen kommt und die Dichte endlich hält. »Die meisten Leute würden Singularitäten für ein Zeichen halten, dass die Theorie hier zusammenbricht«, so der Physiker James B. Hartle von der University of California in Santa Barbara.

Das perfekt glatte Baby-Universum

Die Singularitäten der Strahlenoptik wurden durch eine umfassendere Theorie des Lichts erledigt, nämlich die Quantenmechanik. Nach der Theorie, die Entsprechendes für die Singularitäten der Relativitätstheorie leistet, wird noch gesucht. Die Physiker gehen davon aus, dass es eine Quantentheorie der Gravitation sein wird. Insbesondere wird sie der Materie – wie die gewöhnliche Quantentheorie dem Licht – wellenartige Eigenschaften zuschreiben. Auf diese Weise würde die Singularität zu einem endlichen Maximum »verschmiert«, wodurch sich eine Division durch null erübrigt. Dann muss auch die Zeit nicht enden.

Damit ist die Frage nach dem Schicksal der Zeit wieder offen, und beide denkbaren Antworten finden ihre Verfechter unter den Physikern. Einige glauben in der Tat, dass die Zeit enden wird. Allerdings sind sie dann genötigt, gleich eine neue Physik zu erfinden. Denn die bekannten Gesetze der Physik setzen die Zeit voraus; sie sagen aus, wie die Dinge sich im Lauf der Zeit bewegen und entwickeln. Endpunkte der Zeit liegen außerhalb der Grenzen dieser Beschreibung. Zu ihrer Erfassung wäre also nicht einfach ein neues Bewegungsgesetz erforderlich, sondern ein physikalisches Gesetz ganz neuer Art, das zeitbezogene Begriffe wie Geschwindigkeit und Beschleunigung meidet und zeitlose an deren Stelle setzt.

Ein solcher Begriff ist bemerkenswerterweise die geometrische Eleganz. Vor wenigen Jahren präsentierte Brett McInnes von der National University of Singapore eine Lösung auf Basis der Stringtheorie, eines der führenden Kandidaten für eine Quantentheorie der Gravitation. Demnach hatte unser Universum im Urzustand die Form eines Torus

DER TOD DER ZEIT: EIN PROZESS IN VIER SCHRITTEN

In ferner Zukunft geht möglicherweise das Universum in einen einfacheren Zustand über, in dem die Zeit keine Bedeutung mehr hat – und zwar nicht plötzlich, sondern allmählich. Die auf dieser und den folgenden Seiten gezeigte Abfolge ist nicht zwingend; die einzelnen Phasen können sich überlappen oder in anderer Reihenfolge eintreten.

1 Der Zeitpfeil zerbricht

Wenn das Universum seine nutzbare Energie verbraucht und einen globalen Gleichgewichtszustand erreicht hat, geht die Zeit nicht weiter. Das Szenario unten zeigt ein ewig expandierendes Universum, aber auch bei anderen Zusammenbrüchen des Universums kann die Zeit ihre Richtung verlieren. Von da an besteht alle Dynamik aus zufälligen Fluktuationen von Dichte und Energie.



Das Universum beginnt als nahezu gleichförmig verteiltes Gas.

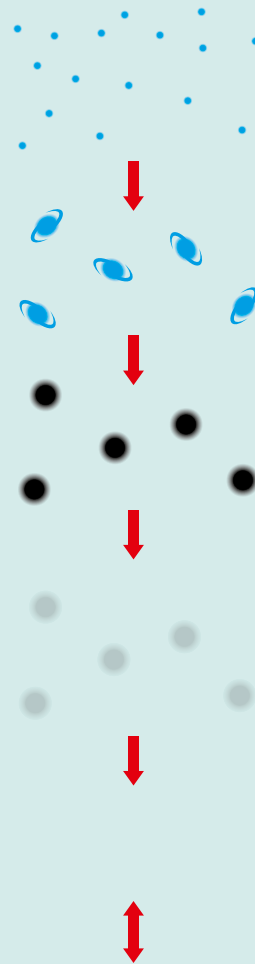
Unter der Wirkung der Schwerkraft bildet die Materie Verdichtungen.

Die Materie kollabiert zu Schwarzen Löchern.

Die Schwarzen Löcher geben Strahlung ab und verschwinden.

Die Strahlung breitet sich aus, es bleibt nur leerer Raum zurück.

Nun kann sich praktisch nichts mehr verändern.

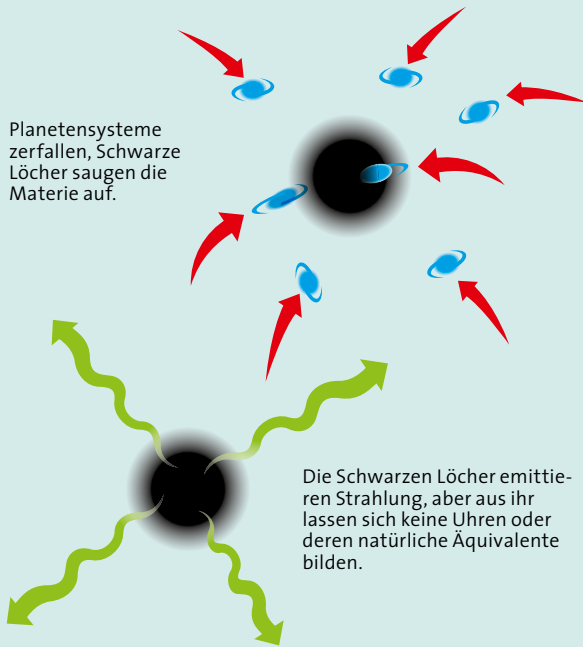


2 Ohne Uhren keine Zeit



Das Konzept der Dauer wird bedeutungslos, wenn alle Systeme, welche die Zeit in gleiche Abschnitte einteilen könnten, zerfallen oder von Schwarzen Löchern verschluckt werden. Zwar kann Energie aus Schwarzen Löchern entkommen, aber nur in Form von Strahlung, also als Photonen oder andere masselose Teilchen. Da solche Teilchen keine räumliche Ausdehnung haben und sich nicht mit der Zeit verändern, können sie nicht als Bauteile für Uhren dienen.

Planetensysteme zerfallen, Schwarze Löcher saugen die Materie auf.



Die Schwarzen Löcher emittieren Strahlung, aber aus ihr lassen sich keine Uhren oder deren natürliche Äquivalente bilden.

JASON LEE: UHR: HOLLY LINDEAN

(eines Fahrradschlauchs oder Donuts). Dieser Torus musste vollkommen gleichförmig und glatt sein; nur unter dieser Bedingung konnte das Universum im Wortsinn aus dem Nichts entstehen. Das gilt jedenfalls, wenn man über die Geometrie der Raumzeit einige gewöhnungsbedürftige, aber begründbare Annahmen macht.

Beim Untergang des Universums oder in einem Schwarzen Loch gilt diese geometrische Forderung nicht: Geboren werden muss das Universum in perfekter Glätte, sterben darf es beliebig runzlig. Diese Eigenschaft kommt den Theoretikern sehr zupass, erklärt sie doch die Asymmetrie des Zeitpfeils. Die klassischen physikalischen Gesetze sind symmetrisch in der Zeit, das heißt, sie gelten gleichermaßen vorwärts wie rückwärts, wir aber beobachten gewisse Prozesse wesentlich häufiger als ihre zeitliche Umkehrung: Wer hat schon einmal ein zerbrochenes Ei sich von allein wieder zusammenfügen gesehen? Die Zunahme der Entropie (»Unordnung«)

unterscheidet für uns die Zukunft von der Vergangenheit. Wenn man plausibel begründen kann, warum der Zustand des Universums in der fernen Vergangenheit extrem geordnet (entropiearm) war, hat man einen guten Grund für eine wesentliche Eigenschaft der Zeit gefunden – dass die Zukunft etwas ganz anderes ist als die Vergangenheit.

Andere Quantengravitationsforscher glauben dagegen, dass sich die Zeit in alle Ewigkeit erstreckt, also weder Anfang noch Ende hat. Ihrer Ansicht nach war der Urknall lediglich ein dramatischer Übergang im ewigen Leben des Universums. Vielleicht ist das Vor-Urknall-Universum in einem Big Crunch kollabiert und begann dann wieder zu expandieren, als die Dichte zu hoch wurde, wie ein Flummiball, der vom harten Boden kurzzeitig komprimiert wird und dann wieder hochspringt. Die Kosmologen sprechen hier vom Big Bounce, dem großen Rückprall. Spuren der kosmischen Vorgeschichte könnten sogar heute noch bemerkbar sein (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 26). Ganz ähnlich lässt sich argumentieren, dass der singuläre Fleck im Herzen eines Schwarzen Lochs kocht und blubbert wie ein miniaturisierter Stern. Wer in ein Schwarzes Loch fällt, erleidet zwar nach wie vor einen schmerzhaften Tod, aber für die Überreste seines Körpers endet die Zeit nicht. Vielmehr plumpsen diese in den singulären Fleck hinein und hinterlassen eine Spur, die künftige Generationen in dem schwachen Glimmen des Schwarzen Lochs ausmachen können.

Wer annimmt, dass die Zeit ewig weitergeht, muss zwar keine neue Physik erfinden, hat dafür aber andere Probleme. So nimmt die Ordnung im Universum im Verlauf der Zeit immer weiter ab. Wenn es also seit ewiger Zeit besteht, wieso ist im heutigen Kosmos die Entropie nicht schon längst unendlich? Und wie kann das Licht, das angeblich von den Dingen kündigt, die in ein Schwarzes Loch gefallen sind, dessen Schwerkraft überwinden?

Tod auf Raten

Insgesamt geht es den Physikern mit ihren Antinomien also nicht besser als den Philosophen. Ein Pionier der Quantengravitation, der 2008 verstorbene John Archibald Wheeler, schrieb dazu: »Einsteins Gleichungen sagen: »Dies ist das Ende«, und die Physik sagt: »Es gibt kein Ende.« Angesichts dieses Dilemmas zucken manche Leute mit den Achseln und ziehen den Schluss, dass die Wissenschaft niemals entscheiden kann, ob die Zeit ein Ende hat oder nicht. Für sie sind die Grenzen der Zeit zugleich die Grenzen der Vernunft und der Empirie. Andere sind davon überzeugt, das Rätsel erfordere lediglich einige neue Ideen. »Das Problem liegt nicht außerhalb der Reichweite der Physik«, erklärt der Physiker Gary Horowitz von der University of California in Santa Barbara. »Die Quantengravitation sollte in der Lage sein, uns eine definitive Antwort zu liefern.«

Die moderne Intensivmedizin hat uns vor Augen geführt, dass der Übergang vom Leben zum Tod nicht unbedingt plötzlich, sondern sehr allmählich stattfinden kann. Viele Physiker und Philosophen versuchen das Ende der Zeit analog zum

Ende des menschlichen Lebens zu begreifen. Leben ist ein emergentes Phänomen, das aus leblosen Molekülen entsteht, die sich selbst organisieren. Entsprechend könnte die Zeit ein emergentes Phänomen sein, das aus elementaren zeitlosen Bestandteilen entsteht, die sich selbst in eine Ordnung bringen (Spektrum der Wissenschaft 10/2010, S. 32). Eine Welt mit Zeit ist hochgradig strukturiert. Die Zeit sagt uns, wann, wie lange und in welcher Reihenfolge Ereignisse stattfinden. Vielleicht wurde diese Struktur dem Universum nicht von außen aufgezwungen, sondern entstand von innen.

Verlust von Richtung und Dauer

Alles, was entstehen kann, kann auch wieder vergehen. Wenn die Struktur zerfällt, endet die von ihr erzeugte Zeit. So gesehen ist ein Ende der Zeit kein größeres Paradoxon als der Zerfall jedes anderen komplexen Systems. Wie der menschliche Tod ist es kein Ereignis, sondern ein Prozess. Stück für Stück verliert die Zeit ihre Eigenschaften und taucht ein in die Dämmerung zwischen Existenz und Nichtexistenz.

Als Erstes könnte die eindeutige Richtung der Zeit verschwinden, der Zeitpfeil, der von der Vergangenheit in die Zukunft weist. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wissen die Physiker, dass diese Gerichtetheit nicht eine Eigenschaft der Zeit selbst ist, sondern der Materie. Dass sich für uns die Zukunft so augenfällig von der Vergangenheit unterscheidet, liegt an der Zunahme der Entropie. Wenn das so weitergeht, strebt das Universum in ferner Zukunft dem »Wärmetod« zu – einem Gleichgewichtszustand, in dem es nicht mehr unordentlicher werden kann. Einzelne Teilchen werden sich zwar noch bewegen, aber das wird sich ausmitteln: Das Universum als Ganzes verändert sich nicht mehr. Was auch immer dann noch die Rolle einer Uhr spielen könnte, wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit vorwärts wie rückwärts laufen, Zukunft und Vergangenheit werden nicht länger voneinander zu unterscheiden sein (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 26).

Einige Physiker spekulieren, dass sich der Pfeil der Zeit irgendwann umkehren könnte, das Universum also langsam wieder ordentlicher würde. Doch für sterbliche Wesen, deren Existenz von einem vorwärts gerichteten Zeitpfeil abhängt, würde eine solche Umkehr ebenso ein Ende der Zeit bedeuten wie der Wärmetod.

Neuere Forschungen deuten darauf hin, dass die Richtung nicht die einzige Eigenschaft ist, die der Zeit bei ihrem langsamen Tod abhandenkommt. Ähnliches könnte der Dauer widerfahren. Die Zeit, wie wir sie kennen, lässt sich in Einheiten messen: Sekunden, Tage, Jahre. Wäre dem nicht so, könnten wir zwar noch sagen, welches von zwei Ereignissen dem anderen vorausgeht, aber nicht mehr, wie lange sie andauern. Ein solches Szenario präsentiert Roger Penrose, Physiker an der University of Oxford, in seinem neuen Buch »Zyklen der Zeit«.

In seinem ganzen wissenschaftlichen Leben hat sich Penrose immer wieder mit dem Thema »Zeit« auseinandergesetzt. Gemeinsam mit Stephen Hawking von der University

of Cambridge zeigte er in den 1960er Jahren, dass Singularitäten nicht nur unter speziellen Bedingungen, sondern nahezu überall auftreten sollten. Außerdem behauptete er, dass Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt, nicht weiterexistiert und dass die Zeit in einer wahrhaft grundlegenden Theorie der Physik keinen Platz hat.

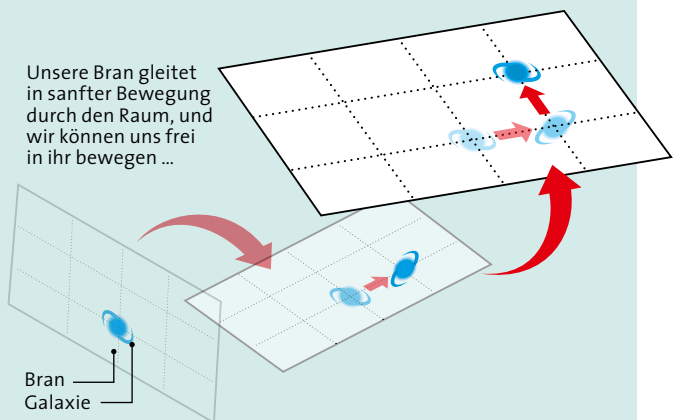
Seinen jüngsten Anschlag auf die Zeit beginnt Penrose mit einer elementaren Beobachtung über das frühe Universum. Er vergleicht die Situation mit einer Kiste voller Legosteine, die auf dem Fußboden ausgeschüttet und noch nicht zu irgendetwas zusammengesetzt wurden – ein Mischmasch aus Quarks, Elektronen und anderen Elementarteilchen. Daraus mussten sich Schritt für Schritt und ganz von selbst Strukturen wie Atome, Moleküle, Sterne und Galaxien bilden. Der erste Schritt war die Entstehung von Protonen und

3 Die Zeit wird zu Raum verbogen

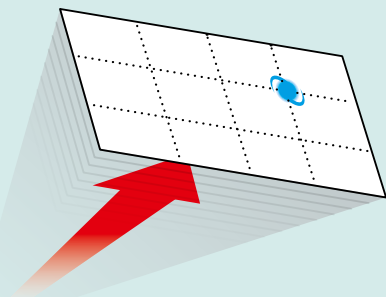
Durch Deformation der Raumzeit wird die Zeit zu einer weiteren Dimension des Raums, wodurch der Zusammenhang von Ursache und Wirkung zusammenbricht. Dazu könnte es beispielsweise kommen, wenn unser Universum eine »Bran« innerhalb einer höherdimensionalen Raumzeit ist, die in heftige Schwingungen gerät. Für die Bewohner des Universum wäre dies ein Big Freeze.



Unsere Bran gleitet in sanfter Bewegung durch den Raum, und wir können uns frei in ihr bewegen ...



... wenn sie sich jedoch beschleunigt oder stark krümmt, wäre jeder Bewegung auf ihr schneller als das Licht. Da das unmöglich ist, wären wir quasi an Ort und Stelle eingefroren.



Neutronen, die jeweils aus drei Quarks bestehen und etwa ein Femtometer (10^{-15} Meter) groß sind. Diese Teilchen bildeten sich etwa zehn Mikrosekunden nach dem großen Knall (oder dem großen Rückprall oder welchem großen Ereignis auch immer).

Vor diesem Zeitpunkt gab es nichts, was aus mehreren Teilchen zusammengesetzt war, und damit insbesondere nichts, was die Funktion einer Uhr hätte haben können. Jede Uhr, das heißt jedes physikalische System, das die Zeit in gleiche Abschnitte teilt, benötigt zum Funktionieren einen räumlichen Abstand: die Länge eines Pendels, den Abstand zwischen zwei Spiegeln oder wenigstens die Größe eines Orbitals in einem Atom. Nichts dergleichen gab es. Teilchen konnten sich vorübergehend zu Klumpen zusammenballen, aber die konnten die Zeit nicht messen, da sie keine feste Größe hatten. Quarks und Elektronen allein sind als Grundlage für Uhren ebenfalls ungeeignet, da sie überhaupt keine Größe haben: Sie erscheinen stets punktförmig, einerlei wie dicht ihnen die Teilchenphysiker auf den Leib rücken. Ihre einzige größenartige Eigenschaft ist ihre so genannte Compton-Wellenlänge. Dieser für Quanteneffekte wesentliche Wert ist umgekehrt proportional zur Masse, und selbst er war bis etwa zehn Pikosekunden nach dem Urknall nicht definiert, denn erst dann setzte der Prozess ein, der die Teilchen mit Masse versehen hat.

»Wenn es keinerlei Uhren gibt«, sagt Penrose, »merken die Dinge auch nicht, wie die Zeit vergeht.« Ohne irgendeine Struktur, die das Vergehen der Zeit im Prinzip bemerkbar machen könnte, konnte es für die Teilchen in der »kosmischen Ursuppe« keinen Unterschied machen, ob eine Attosekunde oder eine Femtosekunde (10^{-18} oder 10^{-15} Sekunden) vergangen war.

Penrose behauptet, diese Situation beschreibe nicht nur den Anfang, sondern auch das Ende der Zeit. Lange nachdem alle Sterne vergangen sind, wird das Universum zu einem düsteren Eintopf aus Schwarzen Löchern und einzelnen Teilchen. Doch selbst die Schwarzen Löcher zerfallen irgendwann, zurück bleiben nur noch Teilchen. Die meisten von ihnen werden masselos sein, zum Beispiel Photonen, und damit wieder ungeeignet zum Bau von Uhren. Auch in den alternativen Untergangsszenarien wie dem Big Crunch sieht es für Uhren schlecht aus.

Man könnte einwenden, ein Begriff wie Dauer bleibe selbst dann sinnvoll, wenn es kein Mittel mehr gibt, diese Größe zu messen. Doch Physiker haben die Angewohnheit, die Existenz einer Größe, die sich nicht einmal im Prinzip messen lässt, grundsätzlich in Frage zu stellen – so geschehen beim absoluten Raum, welcher der Relativitätstheorie mangels Messbarkeit nicht standhielt. Entsprechend wäre die Unmöglichkeit, eine Uhr zu bauen, für die Forscher ein Zeichen dafür, dass die Zeit eine ihrer definierenden Eigenschaften verloren hat. »Wenn Zeit das ist, was eine Uhr misst, und es gibt keine Uhren, dann gibt es auch keine Zeit«, sagt der Phy-

sikphilosoph Henrik Zinkernagel von der Universidad de Granada (Spanien), der sich ebenfalls mit dem Fehlen der Zeit im frühen Kosmos auseinandergesetzt hat.

Trotz seiner Eleganz hat das Szenario von Penrose Schwächen. Nicht alle Teilchen in der fernen Zukunft sind masselos. Zumindest einige Elektronen werden überleben, und das genügt für eine Uhr. Penrose spekuliert, dass die Elektronen irgendwie ihre Masse verlieren werden, aber er gibt selbst zu, dass er sich damit auf unsicherem Boden bewegt: »Das ist eine der unbequemerer Seiten dieser Theorie.« Und außerdem: Wenn das frühe Universum keinen Längenmaßstab hatte, was soll es dann heißen, dass es expandierte, sich ausdünnte und abkühlte?

Wenn Penrose jedoch auf dem richtigen Weg sein sollte, hätte das bemerkenswerte Konsequenzen. Obwohl das dicht gepackte frühe Universum und der immer leerer werdende Kosmos der fernen Zukunft so gegensätzlich wie nur möglich scheinen, leiden sie doch in gleicher Weise unter der Abwesenheit von Uhren und anderen Maßstäben. »Der Urknall ähnelt der fernen Zukunft«, so Penrose. Kühn äußert er die Vermutung, dass beide tatsächlich ein und dieselbe Phase eines großen kosmischen Zyklus sein könnten – daher auch der Titel seines neuen Buchs »Zyklen der Zeit«. Wenn die Zeit endet, läuft sie gewissermaßen zum Anfang zurück, und es gibt einen neuen Urknall. So könnte Penrose, der einen großen Teil seines wissenschaftlichen Lebens mit dem Studium der Singularitäten verbracht hat, die der Zeit ein Ende machen, einen Weg gefunden haben, wie sie dennoch weitergeht. Der Henker der Zeit ist zugleich ihr Retter.

Zeit wird zu Raum

Selbst wenn der Begriff der Dauer bedeutungslos wird und der Unterschied zwischen Femto- und Attosekunden verschwimmt, ist die Zeit noch nicht völlig tot. Sie bestimmt immer noch die Reihenfolge von Ursache und Wirkung. In dieser Hinsicht unterscheidet sie sich vom Raum, welcher der Anordnung der Gegenstände in ihm kaum Beschränkungen auferlegt. Zwei in der Zeit benachbarte Ereignisse – ich tippe auf meine Tastatur, und ein Buchstabe erscheint auf dem Bildschirm – sind unauflöslich miteinander verknüpft. Zwei im Raum benachbarte Gegenstände – die Tastatur und ein Klebezettel darauf – müssen nichts miteinander zu tun haben. Räumliche Beziehungen haben einfach nicht die gleiche Zwangsläufigkeit wie zeitliche.

Doch unter bestimmten Bedingungen könnte die Zeit selbst diese elementare Ordnungseigenschaft verlieren und dadurch zu einer weiteren räumlichen Dimension werden. Diese Idee kam erstmals in den 1980er Jahren auf, als Hawking und sein amerikanischer Fachkollege James B. Hartle versuchten, den Urknall als den Moment zu erklären, in dem Raum und Zeit begannen, sich voneinander zu unterscheiden. Vor drei Jahren haben Marc Mars von der Universidad de Salamanca sowie José M.M. Senovilla und Raúl Vera

Wenn es keine Uhren geben kann, gibt es auch keine Zeit

von der Universität des Baskenlands in Bilbao (beide Spanien) eine ähnliche Idee auf das Ende der Zeit angewandt.

Die drei Forscher ließen sich von der Stringtheorie inspirieren, nach der unsere vierdimensionale Raumzeit nur ein sehr »dünn« Teil eines viel höherdimensionalen Raums ist – eine »Membran«, die in diesem sehr geräumigen Umfeld treibt wie ein Blatt im Wind. Nacheinander hat die Stringtheorie viele Varianten solcher Membranen entwickelt; seit eine von ihnen abgekürzt »M-Brane« genannt wurde, heißen alle derartigen Membranen nur noch »Branen« (*branes*). Wir sind auf unserer Bran gefangen wie eine Raupe, die sich an das Blatt klammert. Gewöhnlich können wir uns frei in unserem vierdimensionalen Gefängnis bewegen. Doch wenn die Bran sich heftig genug windet, dann können wir uns nur noch festklammern, aber nicht mehr bewegen. Genauer gesagt, müssten wir schneller als das Licht sein, um unseren Ort auf der Bran zu verändern, aber das ist unmöglich. Da alle Prozesse irgendeine Art von Bewegung erfordern, kommt alles zum Stillstand.

Die Weltlinie eines Gegenstands auf der Bran, das ist die Menge aller Punkte in der Raumzeit, in denen der Gegenstand sich befindet, endet in diesem Fall nicht – von außen betrachtet. Sie wird lediglich von einer zeitartigen zu einer raumartigen Linie verbogen. Die Bran ist immer noch vierdimensional, aber alle vier Dimensionen sind räumlich. Mars beschreibt es so: »Alle Gegenstände werden von der Bran dazu gezwungen, sich mit Geschwindigkeiten zu bewegen, die sich immer mehr der Lichtgeschwindigkeit annähern. Schließlich werden ihre Trajektorien so stark deformiert, dass sie sich tatsächlich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen und für sie keine Zeit mehr existiert. Ein wichtiger Punkt dabei ist, dass sie selbst nichts von alledem bemerken.«

Da auch alle unsere Uhren langsamer werden und schließlich stehen bleiben, hätten wir keine Möglichkeit festzustellen, dass die Zeit sich in Raum verwandelt. Wir würden lediglich bemerken, dass ferne Objekte wie etwa Galaxien sich immer schneller bewegen. Es ist geradezu unheimlich: Genau das beobachten die Astronomen tatsächlich – und pflegen es einer unbekanntenen Art von Dunkler Energie zuzuschreiben. Könnte es vielmehr der Schwanengesang der Zeit sein?

Modell Hologramm

Doch selbst wenn es weder Dauer noch Kausalität gibt, kann man die Ereignisse noch in eine Reihenfolge bringen. Auf welche Weise wird die Zeit auch diese letzte Eigenschaft verlieren? Mehrere Gruppen von Stringtheoretikern haben unlängst diese Frage einer Antwort nähergebracht. Emil J. Martinec und Savdeep S. Sethi von der University of Chicago, Daniel Robbins von der Texas A&M University, der oben genannte Gary Horowitz, Eva Silverstein von der Stanford University und Albion Lawrence von der Brandeis University in Waltham (Massachusetts) haben mit dem holografischen Prinzip, einer mächtigen Idee der Stringtheorie, untersucht, was mit der Zeit in den Singularitäten Schwarzer Löcher geschieht.

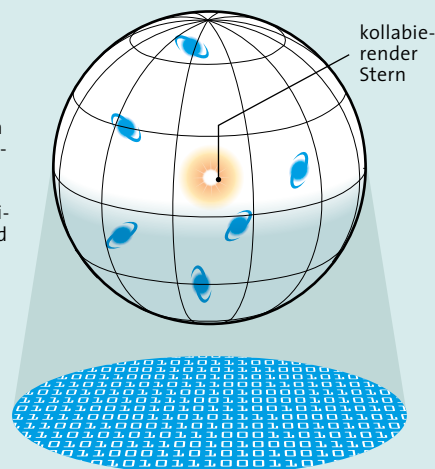
Ein Hologramm ist ein flaches Bild, das seinen Betrachter glauben macht, vor dem Bild selbst schwebte ein dreidimen-

4 Die Geometrie löst sich auf

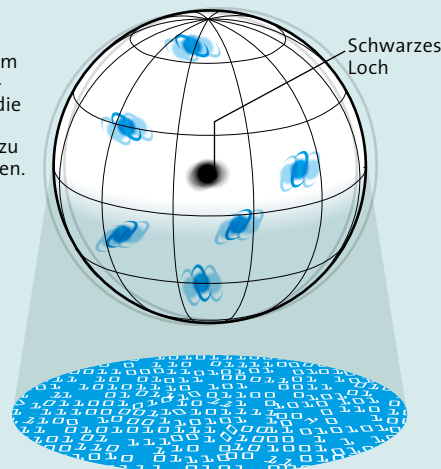
Die Zeit verschwindet vollständig,

während das Universum in Anarchie versinkt. Prozesse werden so komplex, dass sie nicht länger bestimmten Orten und Zeiten zugeordnet werden können. Eine Möglichkeit, sich diese Idee vorzustellen, ist das so genannte holografische Prinzip.

Unser Universum ist eigentlich zweidimensional, aber bestimmte Regelmäßigkeiten dieses zweidimensionalen Systems lassen es dreidimensional erscheinen, entsprechend einem holografischen Bild.



In der Nähe eines Schwarzen Lochs wird das Universum zunehmend chaotisch. Dabei geht die Zuordnung von Orten und Zeiten zu Ereignissen verloren.



Schließlich bricht die dreidimensionale Projektion völlig zusammen, und nur ein hochgradig komplexes zweidimensionales System bleibt zurück.



JASON LEE, GANZ OBEN: HOLLY LINDEN

sionaler Gegenstand im Raum. Das holografische Prinzip besagt, dass unser ganzes Universum einer holografischen Projektion ähnelt (Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 34). Ein komplexes System wechselwirkender Quantenteilchen kann die Wahrnehmung von Tiefe erzeugen, also eine räumliche Dimension, die in diesem System gar nicht vorhanden ist.

Allerdings ist nicht jede zweidimensionale Struktur ein Hologramm; sie muss das richtige Muster tragen. Zerkratzt man ein Hologramm, so geht die räumliche Illusion verloren. Entsprechend erzeugt nicht jedes Teilchensystem ein Universum wie das unsere, vielmehr muss es dafür mit einem bestimmten Muster ausgestattet sein. Nehmen wir nun an, in einem ursprünglich ungeordneten System bilden sich die erforderlichen Regelmäßigkeiten aus. Dann entsteht in diesem Moment die dritte Dimension – und verschwindet wieder, sowie sich die zugehörige Ordnung auflöst.

Das Schmelzen der dritten Dimension

Was passiert nun, wenn ein Stern zu einem Schwarzen Loch kollabiert? Wir nehmen ihn als dreidimensional wahr, aber »in Wirklichkeit« ist er nur ein bestimmtes Muster in einem zweidimensionalen Teilchensystem. Während seine Masse zunimmt, gerät dieses zweidimensionale System in zunehmend heftigere Bewegung. Schließlich bricht seine Ordnung zusammen – das ist der Moment, in dem die Singularität entsteht. So wie die Wassermoleküle eines Eiswürfels beim Schmelzen von einer regelmäßigen kristallinen Anordnung in die chaotischen Verhältnisse einer Flüssigkeit übergehen, schmilzt die dritte Dimension gewissermaßen dahin.

Genauso geht es auch der Zeit. Wenn man in ein Schwarzes Loch hineinfällt, hängt die von einer mitfallenden Uhr angezeigte Zeit vom Abstand zum Zentrum des Schwarzen Lochs ab. Dieser Abstand aber schmilzt mitsamt der dritten Dimension, in der er definiert ist, hinweg, und mit ihm auch die Zeit. Es lässt sich weder festlegen, zu welchem genauen Zeitpunkt ein Ereignis geschieht, noch an welchem genauen Ort ein Objekt sich aufhält. »Der konventionelle geometrische Begriff von der Raumzeit geht verloren«, sagt Martinec.

Damit geben Raum und Zeit der Welt keine Struktur mehr. Versucht man, die Position eines Dings zu messen, findet man es an mehreren Orten gleichzeitig. Räumlicher Abstand hat keine Bedeutung mehr, Dinge bewegen sich von einem Ort zum anderen, ohne den Raum dazwischen zu durchqueren. Genau dadurch kann auch die Spur eines unglücklichen Astronauten, der in das Schwarze Loch gefallen ist, dieses wieder verlassen. »Wenn es nahe einer Singularität weder Raum noch Zeit gibt, ist auch der Ereignishorizont nicht mehr wohldefiniert«, so Horowitz.

Damit stellt sich die Stringtheorie nicht nur als eine Art Reparaturpaste dar, mit der man die hässlichen Singularitäten zuschmiert, ohne dabei den Rest des Universums nennenswert zu verändern. Vielmehr untergräbt sie die Begriffe von Raum und Zeit, mit Auswirkungen, die weit über jede Singularität hinausreichen. Natürlich benötigt die Theorie

immer noch so etwas wie eine Zeit in dem Teilchensystem, dessen holografisches Bild das Universum sein soll. Zwar arbeiten die Wissenschaftler bereits an einer Dynamik, die völlig ohne Zeit auskommt. Aber noch ist die Zeit so tief in der Physik verankert, dass die Wissenschaftler sich bislang ihr totales Verschwinden kaum vorstellen können.

Die Wissenschaft erschließt uns das Unbegreifliche, indem sie es in handliche Stücke zerlegt und damit zeigt, dass auch die größte Reise letztlich aus kleinen Schritten besteht. So ist es auch mit dem Ende der Zeit. Und während wir darüber nachdenken, lernen wir auch unsere eigene Stellung im Kosmos neu einzuschätzen.

Die Eigenschaften, die die Zeit Schritt für Schritt verliert, sind nämlich sämtlich Voraussetzungen für unsere Existenz. Wir brauchen die Richtung der Zeit, um uns selbst zu entwickeln; wir benötigen Dauer und Maßeinheit, um komplexe Strukturen bilden zu können; wir brauchen eine kausale Ordnung, damit Ereignisse mit Ursache und Wirkung stattfinden können, und wir brauchen räumliche Abstände, damit unsere Körper kleine Bereiche der Ordnung in der Welt erschaffen können. Wenn auch nur eine dieser Eigenschaften dahinschmilzt, ist das mit unserem Überleben unvereinbar. Ein Ende der Zeit können wir uns vielleicht vorstellen, aber niemals selbst erleben – ebenso wenig, wie wir im Moment unseres Todes bei vollem Bewusstsein sein können. ~

DER AUTOR



George Musser ist Redakteur bei »Scientific American«.

QUELLEN

- Mars, M. et al.:** Is the Accelerated Expansion Evidence of a Forthcoming Change of Signature on the Brane? In: Physical Review D 77, S. 027501, 2008. Online unter <http://arxiv.org/abs/0710.0820>
- Martinec, E. J. et al.:** Toward the End of Time. In: Journal of High Energy Physics 8/2006, Artikelnummer 025. Online unter <http://arxiv.org/abs/hep-th/0603104>
- Penrose, R.:** Zyklen der Zeit. Eine neue ungewöhnliche Sicht des Universums. Erscheint im Mai 2011 bei Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

WEBLINKS

- www.math.nus.edu.sg/~matmcinn/
Website von Brett McInnes, mit ausführlicher Erläuterung seines Modells vom torusförmigen Uruniversum
- <http://xxx.unizar.es/abs/0805.1947v1>
Svend Erik Rugh, Henrik Zinkernagel:
On the Physical Basis of Cosmic Time.
Studies in History and Philosophy of Modern Physics 40, S. 1–19, 2009

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet unter: www.spektrum.de/artikel/1067443

AcademiaNet

Das Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen bietet:

- :: Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter deutscher Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände,
- :: individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien,
- :: flankierende redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«,

kurz: einen einzigartigen Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen.

www.academia-net.de

»In Deutschland gibt es viele herausragende Wissenschaftlerinnen in allen Fachrichtungen. Sie bei ihrer weiteren Karriere zu unterstützen, ist ein wichtiges Anliegen. AcademiaNet bietet den Wissenschaftlerinnen die große Chance, ihre Kompetenzen noch besser und sichtbarer als bisher in den Wissenschaftsbetrieb einzubringen.«

Dr. Angela Merkel



Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung
in Kooperation mit Spektrum der Wissenschaft

Reise zum Merkur

Seit Kurzem umkreist eine Raumsonde den sonnennächsten Planeten. Mit ihrer Hilfe hoffen die Astronomen, die Geheimnisse des Himmelskörpers enträtseln zu können.

Von Scott L. Murchie, Ronald J. Vervack jr. und Brian J. Anderson

Was ist schlimmer als ein Wurm im angebissenen Apfel? Ein halber Wurm! An diesen Witz mussten am 29. März 1974 vielleicht einige Planetenforscher denken, als Mariner 10 am Merkur vorbeizog und erste Details des kleinen Höllenplaneten offenbarte. Denn unter anderem entdeckte die Raumsonde damals einen der größten Einschlagkrater des Sonnensystems, der den Namen Caloris erhielt. Auf den Bildern erschien aber nur das halbe Kraterbecken; der Rest blieb im Dunkel. Tatsächlich fotografierte Mariner 10 bei insgesamt drei Vorbeiflügen in den Jahren 1974 und 1975 weniger als die Hälfte der Planetenoberfläche.

Erst 34 Jahre später bekamen Forscher den ganzen Krater zu sehen; er ist noch spektakulärer, als die ersten Bilder vermuten ließen. Am 14. Januar 2008 flog die Raumsonde Messenger – für *MERCURY Surface, Space ENVIRONMENT, GEOCHEMISTRY, and RANGING* (englisch für: Merkurs Oberfläche, Umgebung, Geochemie und Vermessung) – in knapp 200 Kilometer Entfernung am Merkur vorbei. Schon das erste Bild, das sie zur Erde funkte, zeigte Caloris fast genau von oben. Im Team brach Jubel aus, doch sofort begann das Rät-

selraten: Die Oberfläche des Merkurkraters gleicht einer Negativaufnahme eines Mondkraters, denn Caloris ist von hellem Material bedeckt, während die Becken auf dem Mond mit dunkler Lava gefüllt sind. Die Ursache für diesen Unterschied müssen wir erst noch verstehen. Überhaupt ist Merkur einer der am wenigsten erforschten Planeten unseres Sonnensystems. Seine Landschaften und Helligkeitsschwankungen sind nur zwei seiner Geheimnisse.

Im März 2011 vollbrachte schließlich die jüngere Raumsonde, was Mariner 10 nicht konnte: Messenger schwenkte in einen Orbit um Merkur ein, um ihn mindestens ein Jahr lang gründlich unter die Lupe zu nehmen. Die 2004 gestartete Sonde soll folgende sechs Hauptfragen beantworten: Woraus besteht die Oberfläche? Welche geologische Geschichte hat Merkur? Wie kann ein so kleiner Himmelskörper ein globales Magnetfeld ausbilden? Ist sein metallischer Kern geschmolzen? Was bedeuten die im Radarbild hellen Flecken an den Polen? Was geht in der dünnen Atmosphäre vor? Messenger soll vollenden, was Mariner 10 nur begann.

AUF EINEN BLICK

ANNÄHERUNG AN EINE HEISSE WELT

1 Merkur gibt Rätsel auf: Er ist kaum anderthalbmal so groß wie der Mond, besitzt aber ein globales **Magnetfeld** wie die Erde. Zudem scheint er **geologisch noch recht aktiv** zu sein, obwohl seine Oberfläche mit Einschlagkratern übersät ist.

2 Die Messenger-Raumsonde der NASA flog 2008 und 2009 am Merkur vorbei. Sie nahm **Detailbilder** der bei früheren Mariner-10-Vorbeiflügen nicht erfassten Hemisphäre auf und stieß auf unerwartet **turbulente Plasmaschichten** um den Planeten.

3 Am 18. März 2011 schwenkte Messenger in einen **Orbit um den Merkur** ein, um ihn ein Jahr lang aus nächster Nähe zu erforschen.

Riskanter Flug im Bann der Sonne

Die Reise zum Merkur wirft enorme technische Probleme auf. Ein Raumschiff, das den innersten Planeten direkt ansteuert, wird durch die Schwerkraft der nahen Sonne auf ein Tempo beschleunigt, das um fast 13 Kilometer pro Sekunde schneller ist als Merkurs Umlaufgeschwindigkeit. Ein herkömmlicher Raketenantrieb vermag das Raumschiff nicht so stark zu bremsen, dass es von der Schwerkraft des Planeten eingefangen wird. Darum ist Merkur schwieriger zu erreichen als der viel weiter entfernte Jupiter.

Messenger musste erst einmal an der Erde vorbeifliegen, danach zweimal an der Venus und dreimal an Merkur selbst. Die Prozedur ähnelt dem Schleudereffekt, der genutzt wird, um Raumsonden zu den äußeren Planeten zu katapultieren – doch diesmal sollte die Bahn nicht beschleunigen, sondern bremsen. Nach sechseinhalb Jahren sank die Geschwindigkeit auf diese Weise um elf Kilometer pro Sekunde.

Das Haupttriebwerk von Messenger erledigte den Rest. Die Sonde gleicht einem fliegenden Gasbehälter; Leichtbaustrukturen umgeben die Treibstofftanks **1**. Beim Start wog das Raumschiff 1100 Kilogramm, wovon mehr als die Hälfte – 600 Kilogramm – auf den Treibstoff entfielen.

Am Zielort lauerten neue Probleme. Die Sonneneinstrahlung ist dort bis zu elfmal intensiver als bei uns; auf der Merkureroberfläche würde Zink schmelzen. Die Raumsonde selbst versteckt sich deshalb hinter einer Sonnenblende aus Keramikfasern **2**. Die ausgeklappten Sonnensegel halten zwar hohen Temperaturen stand, müssen aber schräg gestellt werden, damit sie nur einen Bruchteil der Sonnenstrahlung erhalten und sich nicht überhitzen **3**.

Die wissenschaftlichen Instrumente müssen zur Oberfläche des Planeten gerichtet sein. Damit die Kamera **4** die reflektierte Wärme aushält, sitzt sie auf etwa 400 Gramm Paraffin. Es schmilzt, wenn die Bahn der Sonde sich der Oberfläche nähert.

DIE AUTOREN

Scott L. Murchie arbeitet als Geologe am Applied Physics Laboratory (APL) der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland). Er analysiert das Spektrum des von Planeten reflektierten Sonnenlichts, um deren Struktur und Geschichte zu erforschen. **Ronald J. Vervack jr.** ist ebenfalls am APL tätig. Er untersucht planetare Atmosphären, Kometen und Asteroiden bei verschiedenen Wellenlängen. **Brian J. Anderson** dient beim APL als Spezialist für planetare Magnetfelder, Magnetosphären und Plasmen.

QUELLEN

Anderson, B. J. et al.: The Magnetic Field of Mercury. In: *Space Science Reviews* 152, S. 307–339, 2010
Denevi, B. W. et al.: The Evolution of Mercury's Crust: A Global Perspective from Messenger. In: *Science* 324, S. 613–618, 2009
Vervack, R. J. jr et al.: Mercury's Complex Exosphere: Results from Messenger's Third Flyby. In: *Science* 329, S. 672–675, 2010

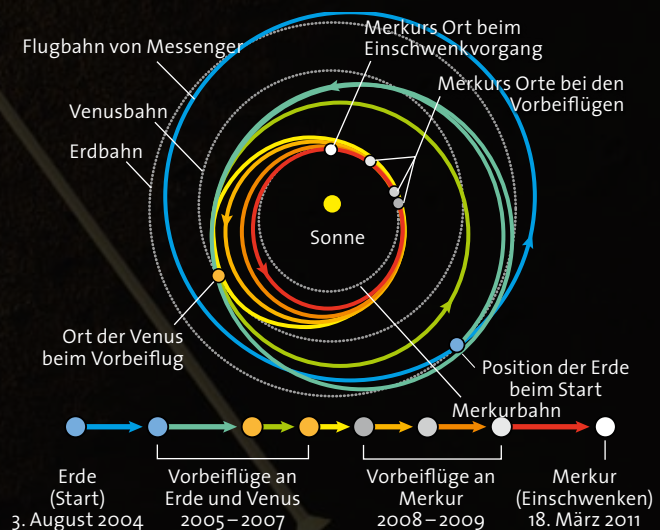
WEBLINKS

<http://messenger.jhuapl.edu/>
 Englischsprachige Website der Messenger-Mission, ständig aktualisiert

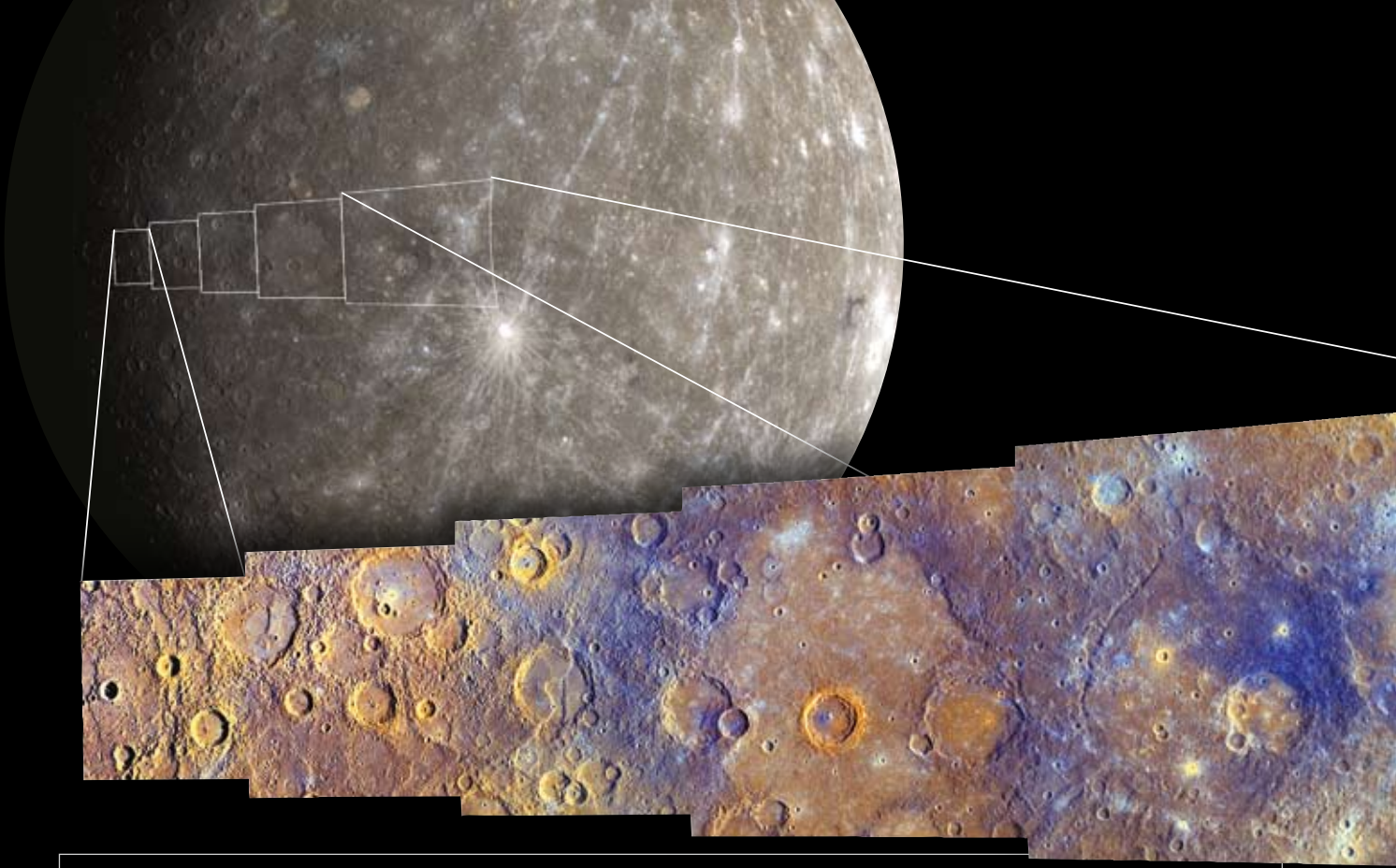
www.scientificamerican.com/mar2011/mercury
 Video über die Messenger-Mission

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>
 Zahlen, Daten und Fakten zum Planeten Merkur

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067444



GROSSE ILLUSTRATION: DON FOLEY/BAHNSCHNITTEN; IFC; CHRISTIANSEN, NACH NASA; JHU/APL / CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON



Anzeichen für geologische Aktivität

Bevor Mariner 10 die ersten Aufnahmen sandte, glaubten viele, Merkur sei geologisch ebenso tot wie der nur wenig kleinere Erdmond. Denn normalerweise erlahmt die geologische Aktivität eines Himmelskörpers, wenn sein Inneres abkühlt. Wie schnell das eintritt, hängt von seiner Größe ab: Kleine Objekte haben relativ zum Volumen mehr Oberfläche und werden deshalb schneller kalt. Die Annahme geriet ins Wanken, als die Mariner-Sonde Bilder von riesigen Ebenen sandte, die vulkanischen Ursprungs zu sein schienen. Doch der erste Eindruck kann täuschen: Auch der Mondkrater Cayley sieht von Weitem wie eine ungewöhnliche vulkanische Ebene aus – aber als Apollo 16 dort landete, fanden die Astronauten nur den Schutt eines Einschlagbeckens.

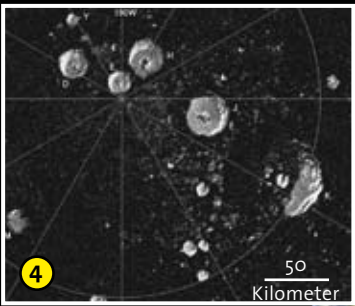
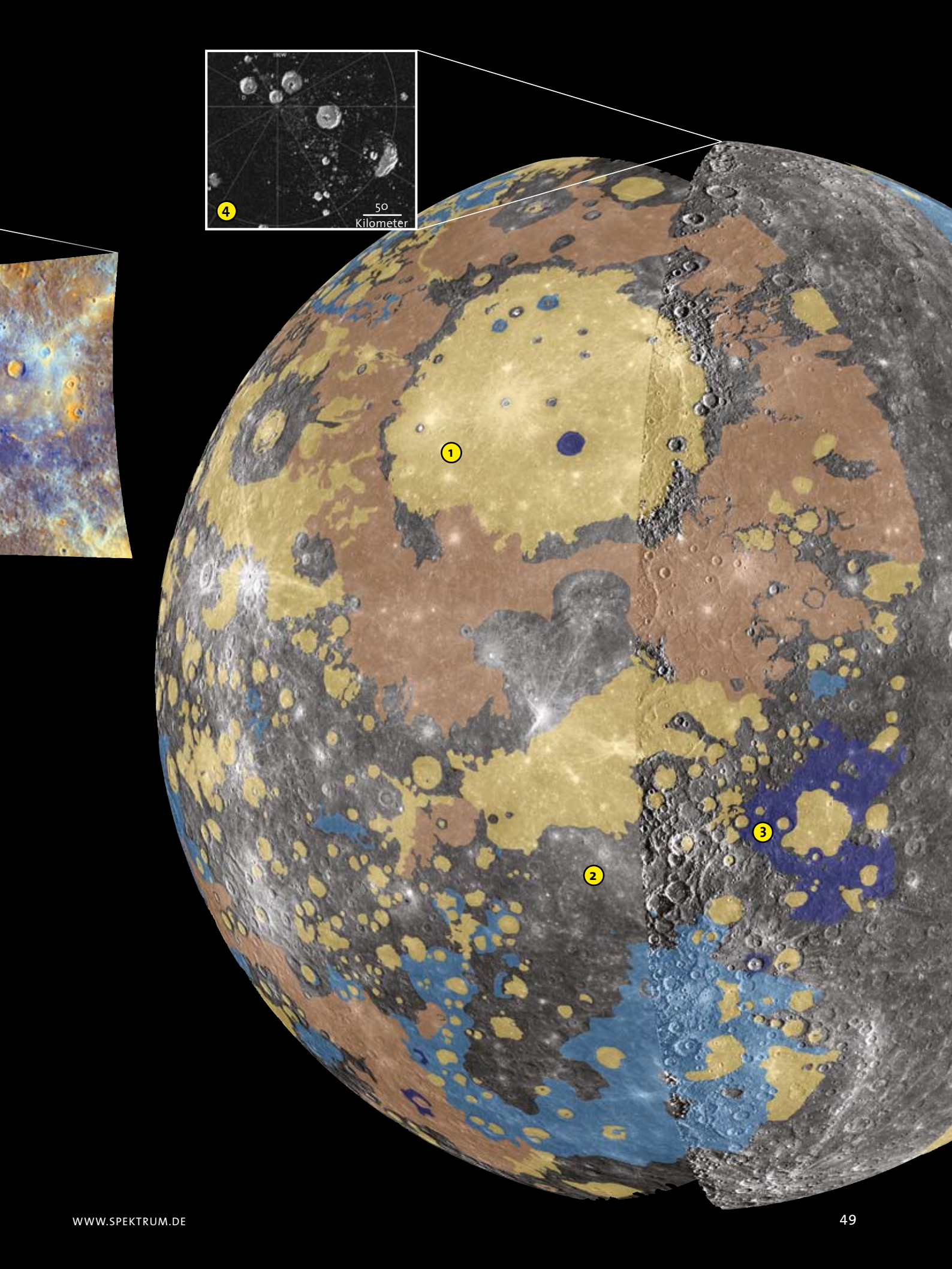
Messenger konnte die Frage überraschend schnell entscheiden: Die Raumsonde fand deutliche Hinweise auf Lava verschiedener Farbe und Zusammensetzung sowie Ablagerungen von früheren Vulkanausbrüchen. Computergestützte Farbkontrastverstärkung macht das deutlich (oben). Einfarbiges, glattes Gestein füllt die Kratersenken. Kleinere, jüngere Einschlagkrater haben vielfarbige Materialien aus unterschiedlichen Tiefen der Kruste frei gelegt. Demnach bestehen die oberen Kilometer der Kruste aus mehreren Schichten vulkanischen Ursprungs.

Die neue geologische Karte des Merkurs verzeichnet Gebiete mit jeweils ähnlichen Geländeformationen und Farben (rechts). Rund 40 Prozent der Oberfläche – einschließlich des Caloris-Einschlagbeckens **1** – ist recht glatt und besteht aus Ebenen, die wahrscheinlich größtenteils vulkanisch sind (Brauntöne auf der Karte). Die grauen Regionen dazwischen weisen mehr Krater

auf und sind vermutlich älter **2**. Ein bemerkenswerter Unterschied zu Mond und Mars ist die gleichmäßige Verteilung großer Ebenen. Auf dem Mond liegen sie zumeist auf der zur Erde gekehrten Seite; die Marsebenen befinden sich überwiegend auf der Nordhalbkugel und auf einem vulkanischen Plateau. Bei Merkur hingegen verteilen sich die Ebenen über den ganzen Planeten. Die jüngste Großfläche dürfte nur etwa eine Milliarde Jahre alt sein – relativ jung im Vergleich zu Mond oder Mars.

Die bläulichen Regionen, die 15 Prozent der Oberfläche ausmachen, beispielsweise das Tolstoi-Becken **3**, stellen die Forscher noch vor Rätsel. Sie könnten Eisen- oder Titanoxide enthalten, die durch Einschläge aus großen Tiefen emporgeschleudert wurden – oder sie bestehen aus dem ältesten vulkanischen Material, das aus jüngeren, helleren Lavaschichten hervorragt.

Die Auflösung der unzähligen Bilder, die Messenger aus dem Orbit senden wird, ist mindestens dreimal höher als bei den hier gezeigten Aufnahmen, die im Vorbeiflug entstanden. Auch die übrigen Instrumente, die während eines Vorbeiflugs immer nur kurz arbeiten konnten, beginnen nun hochwertige Daten zu liefern. Das Gamma- und Neutronenspektrometer wird etwa einer Entdeckung auf den Grund gehen, die in den 1990er Jahren mit irdischen Radarteleskopen gemacht wurde: Die Polregionen enthalten Material, das Radarwellen stark reflektiert – möglicherweise gefrorenes Wasser **4**. Eis ist so ziemlich das Letzte, was man auf einem sengend heißen Planeten erwarten würde; aber dauerhaft beschattete Regionen in Polnähe könnten kalt genug sein, um Wasserdampf einzufangen, der von Kometeneinschlägen oder wasserreichen Meteoriten stammt.



Mysteriöser Magnetismus

Anhand der Bahn von Mariner 10 vermaßen die Wissenschaftler Merkurs Gravitationsfeld und verfeinerten die Schätzungen seiner Dichte. Sie ist mit rund 5,3 Gramm pro Kubikzentimeter erstaunlich hoch. Zum Vergleich: Die Erde kommt auf 4,4, der Mond auf 3,3 und ein gewöhnlicher Felsen auf 3 Gramm pro Kubikzentimeter. Diese Werte sind bereits um die gravitationsbedingte Eigenverdichtung korrigiert, damit tatsächlich die Materialeigenschaften verglichen werden. Unter der felsigen Schale muss Merkur also einen dichten Kern besitzen, der vorwiegend aus Eisen besteht. Auch die Erde hat einen eisenreichen Kern, doch der des Merkurs ist relativ zur Planetenmasse doppelt so groß. Vielleicht besaß Merkur einst eine dickere Gesteinsschicht, die durch Einschläge abgetragen wurde, oder sein Ursprungsmaterial war auf Grund der Nähe zur Sonne eisenreicher.

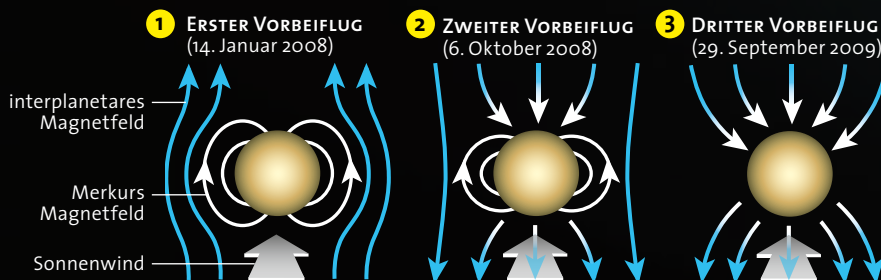
Jedenfalls hängt der große Kern mit einer überraschenden Entdeckung von Mariner 10 zusammen: Merkur hat ein globales Magnetfeld. Es ist im Wesentlichen dipolförmig wie bei einem Stabmagneten. Obgleich die Feldstärke auf der Oberfläche nur etwa ein Prozent des Erdmagnetfelds beträgt, ist die Tatsache bemerkenswert, dass Merkur überhaupt ein Dipolfeld besitzt. Außer der Erde und dem Jupitermond Ganymed hat im ganzen Sonnensystem kein anderer Himmelskörper mit fester Oberfläche diese Eigenschaft.

Das Erdfeld wird durch rotierendes geschmolzenes Eisen im äußeren Kern erzeugt, das als »planetarer Dynamo« wirkt. Das Merkurfeld sowie die variable Rotation des Planeten beim Umlauf um die Sonne zeigen an, dass der äußere Kern sich nicht vollständig verfestigt hat, obwohl Merkurs geringe Größe

dies eigentlich vermuten ließe. Wie entging Merkur dem Schicksal des Mars, der einst ein globales Magnetfeld besaß und es später verlor? Diese Frage soll Messenger nun klären.

Das Magnetfeld offenbart nicht nur, was im Inneren des Planeten vorgeht, sondern sorgt auch für heftige Plasmaphänomene in Merkurs Umgebung. Es lenkt den Sonnenwind ab – von der Sonne ausgehende geladene Teilchen – und erzeugt um den Planeten ein Gebiet, in dem an Stelle des interplanetaren Magnetfelds das merkureigene Feld dominiert. Schon Mariner 10 entdeckte Ausbrüche energiereicher Teilchen – ähnlich jenen, die bei uns Polarlichter verursachen.

Wie Messenger nachwies, verändert sich die Magnetosphäre fortwährend. Beim ersten Vorbeiflug zeigte das interplanetare Feld nach Norden, in die gleiche Richtung wie das Merkurfeld am Äquator **1**. Die Magnetosphäre war ruhig. Beim zweiten Mal war das interplanetare Feld südwärts gerichtet, entgegengesetzt zum äquatorialen Magnetfeld. Entgegengesetzte Magnetfelder können sich durch so genannte Rekonnexion umorganisieren **2**. Dabei werden große Energiemengen frei, und Plasma schießt aus dem Solarwind in die Magnetosphäre. Die von Messenger gemessene magnetische Rekonnexion war zehnmal stärker als das entsprechende Phänomen in Erdnähe. Beim dritten Vorbeiflug waren die planetaren Feldlinien offenbar völlig verzerrt: Für einen Moment bildeten sie bloße Anhängsel des Sonnenwinds **3**, aber schon fünf Minuten später verliefen sie scheinbar unbehelligt zwischen Nord- und Südhalbkugel. Bei dieser Dynamik wäre jede Kompassnadel unbrauchbar, denn sie würde alle paar Minuten die Richtung wechseln.



Nordstrang der Exosphäre

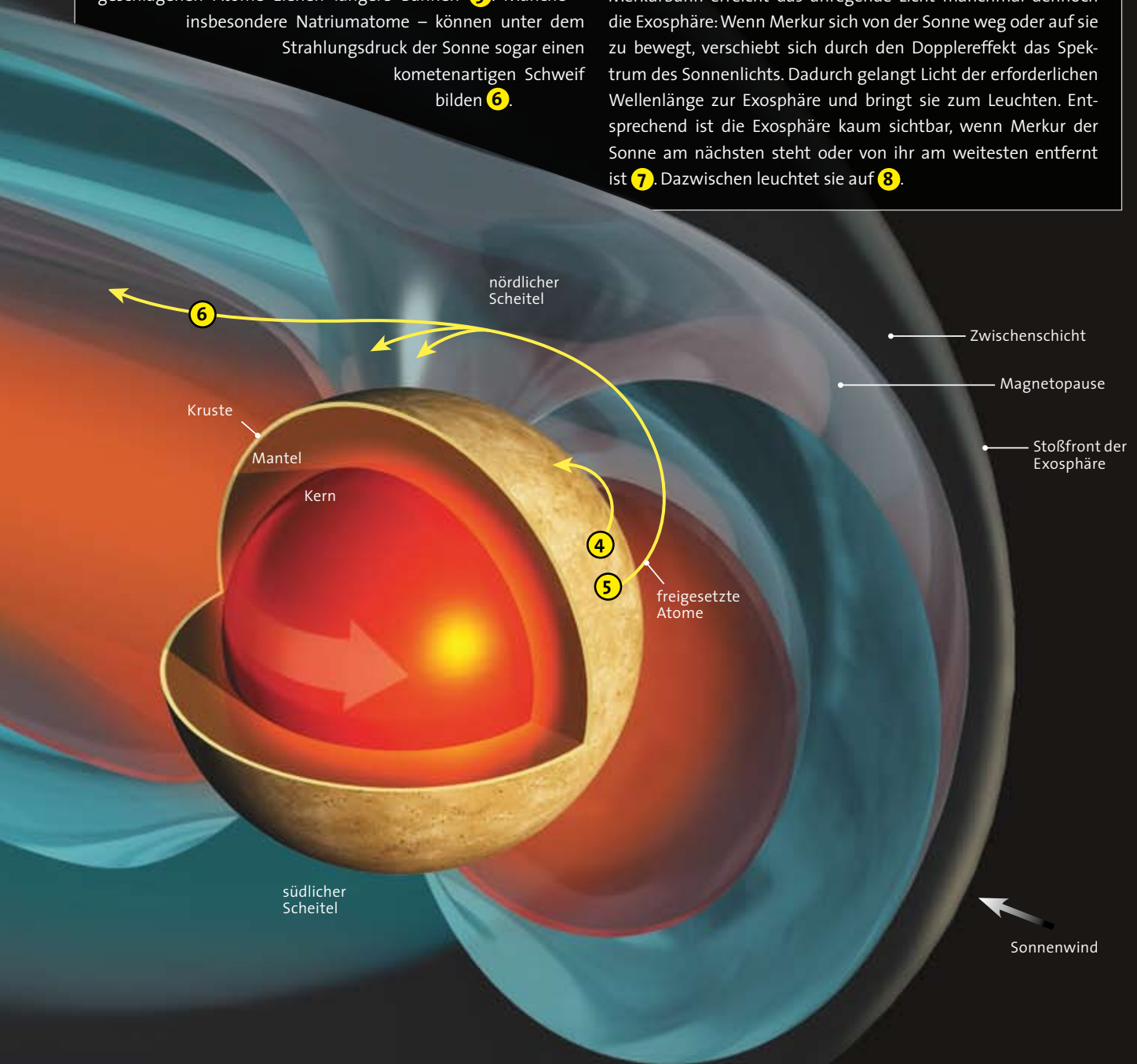
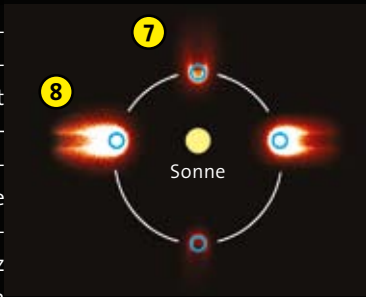
Plasma

Südstrang der Exosphäre

Die Exosphäre: Dünn, weiträumig, spektakulär

Merkur besitzt keine Atmosphäre im üblichen Sinn, aber dafür eine Exosphäre. Diese ausgedehnte Gashölle ist dünner als ein Labortechnisch erzeugtes Vakuum. Atome können auf dem Merkur wie Billardkugeln umherhüpfen, ohne zu kollidieren. Sie werden durch verschiedene Prozesse aus der Oberfläche freigesetzt: Die intensive Sonnenstrahlung schlägt einzelne Atome aus mineralischen Kristallen und verdampft flüchtige Elemente wie Natrium; Ionen des Sonnenwinds bombardieren die Mineralien und katalysieren Atome heraus; der kontinuierliche Hagel von Mikrometeoriten verdampft Oberflächenmaterial. Die durch Sonnenlicht freigesetzten Atome haben wenig Energie und fallen größtenteils zur Oberfläche zurück **4**. Das Bombardement durch Sonnenwind und Mikrometeoriten ist heftiger, und die herausgeschlagenen Atome ziehen längere Bahnen **5**. Manche – insbesondere Natriumatome – können unter dem Strahlungsdruck der Sonne sogar einen kometenartigen Schweif bilden **6**.

Durch eine faszinierende Kombination von Effekten pulsiert die Helligkeit der Exosphäre langsam – zweimal pro Merkurumlauf. Der Grund ist, dass die in der Exosphäre vorhandenen Elemente nur ganz bestimmte Wellenlängen absorbieren und emittieren. Diese Elemente gibt es aber auch in den äußeren Schichten der Sonne. Dort absorbieren sie normalerweise schon vorweg just die Wellenlängen, welche die Exosphäre zum Leuchten anregen. Doch wegen der stark elliptischen Merkurbahn erreicht das anregende Licht manchmal dennoch die Exosphäre: Wenn Merkur sich von der Sonne weg oder auf sie zu bewegt, verschiebt sich durch den Dopplereffekt das Spektrum des Sonnenlichts. Dadurch gelangt Licht der erforderlichen Wellenlänge zur Exosphäre und bringt sie zum Leuchten. Entsprechend ist die Exosphäre kaum sichtbar, wenn Merkur der Sonne am nächsten steht oder von ihr am weitesten entfernt ist **7**. Dazwischen leuchtet sie auf **8**.



»Das war ein schöner Schreck«

Der Planetenforscher **Jürgen Oberst** ist sowohl an der amerikanischen Messenger-Mission als auch am europäisch-japanischen Nachfolgeprojekt BepiColombo beteiligt. Mit dem Wissenschaftler vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sprach »Spektrum der Wissenschaft« kurz nach dem Einschwenken der Messenger-Sonde um Merkur.

Spektrum der Wissenschaft: Offenbar ist bei Messenger alles nach Plan verlaufen. Was sind die nächsten Schritte?

OBERST: Zunächst beobachten wir, wie die Raumsonde dort mit den wechselnden Temperaturen zurechtkommt. Dann aktivieren wir nach und nach die Instrumente. Alle Kommandos dazu kommen von der Erde. In den nächsten Tagen, also Anfang April, erwarten wir die ersten Daten aus dem Orbit. Allerdings sind wir noch dabei, die Ergebnisse der ersten Vorbeiflüge auszuwerten.

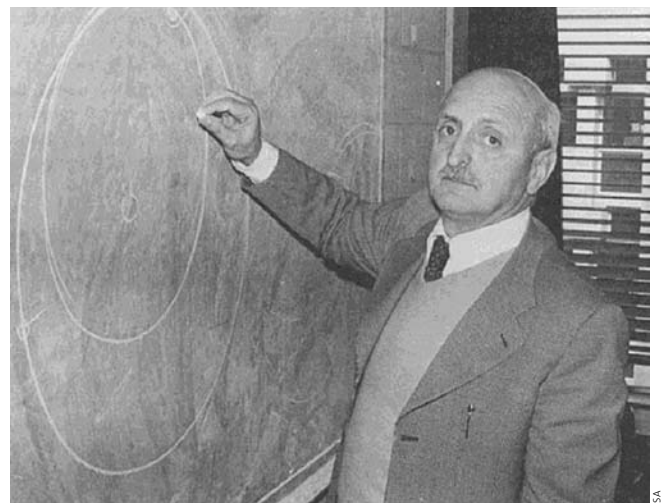
Was war eigentlich im September 2009 bei Messengers letztem Swing-by um den Merkur los? Offenbar schaltete sich die Sonde unerwartet in den Safe Mode und konnte mehrere Stunden lang keine Daten liefern.

Normalerweise gibt es für jeden Vorbeiflug ein festgelegtes Programm, das die Sonde automatisch abarbeitet. Wegen eines falsch gesetzten Schalters in diesem Programm hat die Sonde jedoch mittendrin alle Aktivitäten abgebrochen und ging in den so genannten Sicherheitsmodus, um auf neue Anweisungen der Bodenstation zu warten. Deswegen konnten nicht alle Daten wie geplant aufgenommen werden. Das war ein schöner Schreck. Jetzt dürfte es aber richtig losgehen. Wir erwarten nun alle paar Tage so viele Informationen wie bei jedem einzelnen Vorbeiflug vorher.

Sie sind auch am europäisch-japanischen Projekt BepiColombo beteiligt. Welchen wissenschaftlichen Nutzen hat es, Messenger eine sehr ähnliche Sonde hinterherzuschicken?



Derzeit wird der Mercury Magnetospheric Orbiter in einem Simulator (Foto) thermischen Belastungsproben unterzogen. Neben dem Mercury Planetary Orbiter ist er Teil der für 2014 geplanten europäisch-japanischen Mission BepiColombo.



Namensgeber der nächsten Merkur-Mission ist der italienische Mathematiker und Ingenieur Giuseppe »Bepi« Colombo (1920–1984). Dank seiner Überlegungen flog Mariner 10 1974/75 dreimal an Merkur vorbei und machte die ersten Aufnahmen des Planeten.



Jürgen Oberst ist Abteilungsleiter am Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Berlin-Adlershof sowie Professor am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der TU Berlin. Das Foto zeigt ihn neben einer Landkarte vom Mars.

BepiColombo wird viel mehr Daten aufnehmen und übertragen können als Messenger. Die Bordinstrumente liefern außerdem deutlich höhere räumliche und spektrale Auflösungen. Ferner wird BepiColombo aus zwei Orbitern bestehen. Für den einen haben wir eine relativ hohe Umlaufbahn gewählt. Er soll präzise das magnetische Feld des Planeten vermessen. Der andere ist für Oberflächenuntersuchungen optimiert und fliegt meist niedriger. Diese Sonde deckt zudem sowohl den Nord- als auch den Südpol gut ab und kann den Planeten vollständig kartieren. Messenger dagegen bewegt sich auf einer lang gestreckten, elliptischen Bahn. Über der Südhalbkugel kann die Raumsonde ihre Beobachtungen daher nur in relativ geringer räumlicher Auflösung durchführen. Trotzdem sind diese Daten für uns eine sehr wichtige Planungsgrundlage. Denn wir wissen dann genau, wo viel versprechende Ziele sind, auf die wir später unsere eigenen Kameras und Geräte richten können.

Jüngere Beobachtungen lassen ja auf Wassereis an den Polen schließen. Ist dann vielleicht sogar Leben auf dem Merkur vorstellbar?

Das kann man wohl ausschließen. Und ob das wirklich Wassereis ist, weiß man auch noch nicht. Fest steht, dass in einigen Kratern am Nord- und Südpol Ablagerungen existieren, die Radarstrahlen stark reflektieren. Das können ebenso Schwefelverbindungen sein. Zur Prüfung soll Messenger die Temperaturen tief unten in diesen Kratern messen. Mit BepiColombo können wir dann wahrscheinlich sogar die Materialzusammensetzungen auf der Nord- und Südhalbkugel analysieren.

Erwartet man denn irgendwelche grundsätzlichen Unterschiede zwischen dem Nord- und dem Südpol?

Eigentlich nicht. Dank der Vorbeiflüge besitzen wir schon einen groben Überblick. Der Merkur sieht demnach recht ho-

»Leben auf dem Merkur kann man wohl ausschließen«

mogen aus, im Gegensatz zum Mars, dessen nördliche Tiefebene in starkem Kontrast zu der zerkraterten südlichen Hemisphäre steht. Der Merkur hat auch keine »Vorderseite« oder »Rückseite« wie der Mond. Allerdings ergibt sich durch die starke Gezeitenwechselwirkung mit der Sonne ein merk-

würdiger Kopplungseffekt ähnlich dem zwischen Mond und Erde: Merkur dreht sich während zweier Umläufe um die Sonne exakt dreimal um seine eigene Achse. Wegen seiner stark elliptischen Bahn ist eine Hemisphäre daher im jährlichen Mittel immer ein wenig heißer als die andere.

Kann man aus der Erforschung des Merkurs mehr über die Entstehung der Planeten im Sonnensystem lernen oder darüber, wie sich andere Sternsysteme bildeten?

Das ist ein ganz wichtiger Aspekt beider Missionen. Der Merkur besitzt ja eine Sonderstellung in unserem Sonnensystem: Er ist der kleinste und sonnennächste Planet. Zudem lässt seine hohe spezifische Dichte auf einen eisenhaltigen Kern schließen. Darüber hinaus besitzt Merkur ein Magnetfeld. Das ist erstaunlich bei seiner geringen Größe. Wenn wir die entsprechenden Zusammenhänge verstehen, können wir Rückschlüsse auf andere Planeten ziehen. Dann haben wir ein besseres Bild davon, wie deren Inneres, deren Mantel oder Krusten entstanden sein könnten. Ebenso spannend sind die Spuren von Vulkanismus auf Merkur. Vor Messenger war überhaupt nicht klar, ob der Planet überhaupt irgendwann vulkanisch war. Jetzt mehren sich die Hinweise darauf. Aktive Vulkane hat man zwar noch nicht gesehen, aber Becken, in denen vermutlich Lavagestein liegt. Und man meint auch vulkanische Schlotte zu erkennen. ~

Die Fragen stellte **Gerhard Samulat**, freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

Verwirrende Beugung

Dank altbekannter Interferenzeffekte lassen sich mit einer simplen CD rätselhafte Lichtmuster erzeugen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Nicht nur dem berühmten theoretischen Physiker Arnold Sommerfeld hatten es die Interferenzfarben angetan. Auch Thomas Mann thematisiert sie: Gleich zu Beginn seines »Doktor Faustus« lässt sich einer seiner Protagonisten überschwänglich über die »Herrlichkeiten und Exzentrizitäten« aus, die manche »in allen Farben der Palette, nächtigen und strahlenden, sich dahinschaukelnden« Insekten aufweisen. Die Tiere fristen »ihr ephemeres Leben« in »phantastisch übertriebener Schönheit«. Besonders beeindruckt ihn, dass »die herrlichste Farbe, die sie zur Schau tragen ... gar keine echte und wirkliche Farbe« ist. Stattdessen werde sie »durch feine Rillen und andere Oberflächengestaltungen der Schüppchen auf ihren Flügeln hervorgerufen«.

Dieses Phänomen kennen wir zwar im Prinzip aus der Schule. Doch schon

eine simple CD zeigt uns, was wir dabei alles noch nicht verstanden haben. Der bloße Hinweis, an ihrem kreisförmigen Reflexionsgitter werde weißes Licht gebeugt, reicht keineswegs aus, um zu erklären, dass scheinbar unterschiedliche Beugungsordnungen dieselbe Intensität aufweisen (Bild rechts, a). Noch hätten wir erwartet, dass eine nur zur Hälfte beleuchtete CD ein 360 Grad umschließendes, allerdings recht spezielles farbiges Ringsystem entstehen lässt (d).

Schauen wir uns die CD und den Beugungsvorgang also genauer an. Die Compact Disc dient uns als Ringgitter. Dass in sie kein System aus konzentrischen Rillen eingraviert ist, sondern eine extrem schmale Spiralspur, ist hier nicht von Belang. Zusammen mit der auf der Rückseite aufgedampften spiegelnden Metallschicht entsteht aus dem Rillensystem rein optisch gesehen

Den schönsten Farbenschmuck erzielt die Natur durch Interferenzfarben ...;

man denke an die Flügel der Schmetterlinge, das Gefieder der Kolibris, an Opal oder Perlmutter. Welche Aussichten würden sich der Malerei eröffnen, wenn es gelänge, eine handliche Interferenzfarbentechnik auszubilden!

Arnold Sommerfeld (1868–1951)

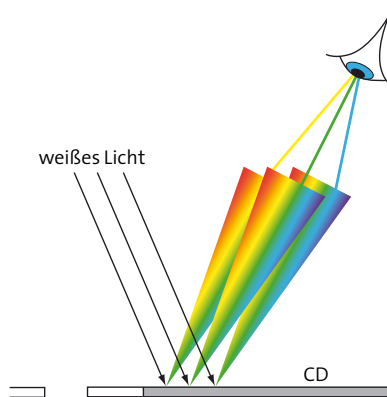
eine Art Reflexionsgitter. Darauf fallendes weißes Licht wird an den typischerweise 1,6 millionstel Meter voneinander entfernten Spurrillen reflektiert und ins Auge des Betrachters oder an die Wand zurückgeworfen, wo sich die Lichtwellen überlagern.

Werden zwei identische (genauer: kohärente) Wellen an verschiedenen Orten reflektiert, legen sie unterschiedliche Wege zur Projektionsfläche zurück. Bei der Ankunft sind ihre Wellenberge und -täler daher gegeneinander verschoben. Durch diese so genannten Gangunterschiede kann es zu Verstärkung, Abschwächung oder vollständiger Auslöschung der Intensität einzelner Wellenlängen kommen. Bei einer Verschiebung um beispielsweise genau eine Wellenlänge fallen Wellenberge auf Wellenberge und verstärken sich so. Eine Verschiebung um null Wellenlängen entspricht dabei der 0. Beugungsordnung, eine Verschiebung um eine Wellenlänge der 1. Beugungsordnung und so weiter. Infolge all dieser Überlagerungen erscheint das ursprüngliche weiße Licht an unterschiedlichen Orten in bunten Spektralfarben.

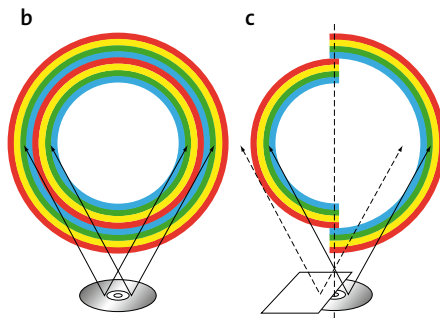
Legt man eine CD bei Tageslicht vor sich auf den Tisch, sieht man je nach Lichtquelle radiale Streifen unterschiedlicher Lage und Farbe (Foto links). Die Breite der Streifen ist dabei unter anderem durch die Breite des mit Rillen versehenen Kreisrings der CD bestimmt. Weil das Licht aus verschiedenen Richtungen ins Auge fällt, sieht



FOTO LINKS: H. JOACHIM SCHLICHTING; GRAFIK: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK



Welche Farben der Betrachter einer CD (links) sieht, hängt von dem Winkel ab, unter dem das Licht gebeugt wird, bevor es in sein Auge fällt (rechts).



FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING;
Grafik: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSSE-GRAFIK

Projiziert man Sonnenlicht mit einer CD auf eine Wand (a), zeigt sich Unerwartetes: Dem inneren System von Interferenzringen 1. Ordnung, deren Farben von Blauviolett bis Rot reichen, folgt ein äußeres Ringsystem fast gleicher Intensität. Gehörte es zur 2. Beugungsordnung, besäße es viel geringere Intensität; es muss also ebenfalls zur Ordnung 1 gehören. Tatsächlich zeichnet jede

CD ein doppeltes System aus Interferenzringen (b). Deckt man die halbe CD ab (c, d), wird klar, wie es dazu kommt. Dann zeigen sich Beugungskreise verschiedener Radien, aber derselben Beugungsordnung 1. Der rechte Halbkreis ist hier schwächer, weil sich das Licht auf eine größere Fläche verteilt. Die Beugungskreise 2. Ordnung (d, linke Bildhälfte) sind wie erwartet kaum zu erkennen.

der Betrachter den unterschiedlichen Weglängen entsprechend verschiedene Spektralfarben. Wir können den Farbwechsel aber auch provozieren: Ändern wir den Blickwinkel auf die CD, ändern sich ebenso die Farben, wie sich etwa durch Schließen wechselweise des einen und dann des anderen Auges überprüfen lässt.

Übrigens können wir eine CD genau genommen kaum anders als in den Farben wahrnehmen, die sie durch ihre mikroskopische Struktur erzeugt, denn diese Strukturfarben dominieren ihre Pigmentfarbe.

Doppeltes Ringsystem

Beim direkten Blick auf die CD sehen wir nur einen Teil des Beugungsmusters, weil der Sehwinkel der Augen- oder der Kameralinse zu klein ist, um es in Gänze zu erfassen. Halten wir die Polycarbonatscheibe hingegen in das Licht einer intensiven Lichtquelle, am besten das der Sonne, und sorgen dafür, dass das reflektierte und gebeugte Licht auf einer weißen Wand landet, können wir das voll entwickelte Beugungsmuster betrachten (Bild a).

In der Mitte des farbigen Ringsystems sehen wir die Spiegelung der CD. Dieser weiße Reflex fällt in den Bereich der 0. Beugungsordnung der CD. Nach außen hin folgen die Farbringe der 1. Beugungsordnung. Offenbar wächst der Beugungswinkel mit der Wellenlänge, denn das kurzwellige blauviolette Licht wird am wenigsten abgelenkt

und bildet deshalb den inneren Ring. An diesen schließen sich die Farben des zunehmend langwelligeren Lichts bis hin zum Rot an. Dann aber wiederholt sich die Farbabfolge und beginnt wieder bei Blauviolett. Man könnte meinen, dass es sich hier um das Ringsystem der 2. Beugungsordnung handelt. Doch andererseits wissen wir, dass mit steigender Ordnung die Intensität stark sinken müsste, was hier aber so gut wie nicht der Fall ist. Es muss sich also um ein weiteres Ringsystem 1. Ordnung handeln!

Was das Foto a wirklich zeigt, erkennen wir, wenn wir eine Hälfte der CD abdecken (c) oder nur die halbe CD ins Sonnenlicht halten (d). Dabei entstehen nämlich zwei halbe Ringsysteme von unterschiedlichem Radius, aber identischer Beugungsordnung. Lassen wir ein aus den beiden Lichtbündeln 1. Ordnung gebildetes »V« gedanklich auf einem Kreis auf der CD umlaufen, wird klar, was geschieht: Das (zunächst) nach innen gebeugte Bündel zeichnet auf der Projektionswand einen Kreis, der um den Umlaufdurchmesser verkleinert ist im Vergleich zu dem Kreis, der von dem nach außen gebeugten Bündel beschrieben wird.

Da die Sonne nicht punktförmig ist und die Beugung über die ganze Gitterbreite erfolgt, verschmieren die in dieselbe Richtung gebeugten Lichtbündel über einen bestimmten Bereich. Darum sind es nicht Linien einer bestimmten Farbe, sondern etwas breitere Farbbän-

der, die wir sehen. Zudem reichen sie ein wenig über die Symmetrieachse der »halbierten« CD hinaus (c).

Arnold Sommerfeld und Thomas Mann bezogen sich noch auf seltene Käfer und Insekten, um ihre Begeisterung und ihr Erstaunen zum Ausdruck zu bringen. Heute aber sind Interferenzfarben mindestens so alltäglich wie die CD selbst, und wir haben vielleicht schon verlernt, uns über dieses Phänomen zu wundern. Mit diesem Schicksal steht es aber nicht allein. In den Worten des Kunsthistorikers Ernst Gombrich: »Wie schnell doch das Wunder von gestern in den Alltag von heute verschwindet!« ~

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.

QUELLEN

- Gombrich, E.H.:** Das forschende Auge. Kunstbetrachtung und Naturwahrnehmung. Campus, Frankfurt a. M. 1994, S. 11–12
Mann, T.: Doktor Faustus. Fischer, Frankfurt a. M. 1967, S. 17
Sommerfeld, A.: Optik. Band 4. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964, S. 33

Zwischen Wunsch und Wirklichkeit – die Kultur der Familiengründung

Junge Paare bekommen heute deutlich weniger Kinder, als sie sich ursprünglich vorgestellt haben. Die Gründe dafür sind nur schwer fassbar: Gibt es eine allgemeine Unlust am Kinderkriegen? Oder haben die Anforderungen des Arbeitsmarkts einen wesentlichen Einfluss? Der Psychologe **Holger von der Lippe** und der Soziologe **Andreas Klärner** erklären im Interview auch die Unterschiede zwischen Ost- und Westdeutschland.

Das Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock ist den Gründen für die Diskrepanz zwischen Wunsch und Wirklichkeit in der Familienplanung nachgegangen – getrennt für Ost- und Westdeutschland. Im Mittelpunkt stand die Frage, in welchem Ausmaß das eigene soziale Beziehungsnetz unsere Entscheidungen beeinflusst.

Im Rahmen des Forschungsprojekts »Kultur der Reproduktion« unter Leitung der Sozialwissenschaftlerin Laura Bernardi befragten im Zeitraum von Mai 2004 bis Februar 2006 vier Wissenschaftler des Instituts 67 Angehörige desselben Abschlussjahrgangs eines Gymnasiums und einer Realschule zehn Jahre nach dem Ende der Schulzeit über ihre Familienwünsche und -planungen. In einem zweiten Schritt interviewten die Forscher auch »Netzwerkpartner« – Lebenspartner, Freunde und Eltern – der inzwischen 26 bis 31 Jahre alten Erwachsenen.

Insgesamt wurden in diesem Rahmen 117 zweistündige Interviews geführt.

Für ihre Studie wählten die Forscher die beiden Hansestädte Rostock und Lübeck, die – mit Ausnahme ihrer Vergangenheit in unterschiedlichen politischen Systemen – einander sehr ähnlich sind, abzulesen unter anderem an der Einwohnerzahl (um die 200 000), der Lage am Meer, der protestantischen Tradition und der Arbeitslosenquote (18,2 beziehungsweise 13,8 Prozent).

Den Wissenschaftlern bot sich in Deutschland nach seiner 40 Jahre dauernden Teilung die einmalige Gelegenheit, die Einflüsse unterschiedlicher politischer Systeme auf die höchst private Entscheidung für oder gegen eigene Kinder zu studieren. Das Ergebnis: Die Unterschiede zwischen Ost- und Westdeutschland sind nach wie vor groß, und kulturelle Leitbilder wirken auch lange nach der Wende fort.

Herr Dr. von der Lippe, die Studie »Kultur der Reproduktion«, an der Sie beteiligt waren, nutzt die historisch einmalige Gelegenheit, den Einfluss verschiedener politischer Systeme auf höchst private Entscheidungen zu untersuchen. Was hat diese Forschungsarbeit motiviert?

DR. HOLGER VON DER LIPPE: In vorangegangenen Untersuchungen zeigte sich bereits ein großer Unterschied zwischen der Wunschvorstellung junger Menschen über die Anzahl ihrer Kinder und deren späterer Verwirklichung. In Westdeutschland wünschen sich, nach einer früheren Studie aus dem MPI für demografische Forschung, die 15- bis 17-Jährigen im Durchschnitt etwas mehr als zwei Kinder – doch nur 1,37 kommen tatsächlich auf die Welt. Norwegische Kollegen haben einer Studie mit demselben Ergebnis den treffenden Titel »Free to choose – but unable to stick to it« gegeben. Das

war ein Grund für uns, genauer nachzuforschen, welche Einflüsse diese Abweichung zwischen Wunsch und Wirklichkeit mit verursachen.

Welchen Forschungsansatz haben Sie zu Grunde gelegt, Herr Dr. Klärner?

DR. ANDREAS KLÄRNER: Wir Menschen sind in ein Netzwerk aus sozialen Beziehungen eingebettet. Und in diesem Netzwerk werden neben Informationen und materiellen Gütern auch Einstellungen und Denkweisen übertragen, die einen großen Einfluss auf ein Individuum haben.

VON DER LIPPE: Wir suchen nach dem Einfluss der Kultur – zu verstehen als eine sinnhafte Ordnung des eigenen Lebens. Der Mensch verbindet mit seinem Tun einen bestimmten subjektiven Sinn; das ist es, was wir als Kultur bezeichnen. Wir haben festgestellt, dass die Realisierung der Familien-

MIT FOT. GEN. VON HOLGER VON DER LIPPE



Holger von der Lippe, geboren 1971 in Hadamar (Hessen), promovierte 2004 in Magdeburg in Psychologie. Von 2004 bis 2007 war er an dem Forschungsprojekt »Kultur der Reproduktion« des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung in Rostock als wissenschaftlicher Mitarbeiter beteiligt. Inzwischen arbeitet er am Institut für Psychologie der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg. Er beschäftigt sich vor allem mit biografischen Übergängen im Erwachsenenalter sowie der Bedeutung von Freundschaften und sozialen Netzwerken in der individuellen Entwicklung über das gesamte Leben.



MIT FOT. GEN. VON ANDREAS KLÄRNER

Andreas Klärner, geboren 1970 in Wiesbaden, promovierte 2007 an der TU Darmstadt in Soziologie mit einer lokalen Fallstudie zum Rechtsextremismus. Von 2006 bis 2009 wirkte er am genannten Projekt als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit. Heute arbeitet er am Lehrstuhl für Allgemeine Soziologie – Makrosoziologie der Universität Rostock. Seine Arbeitsschwerpunkte sind soziale und räumliche Dimensionen sozialer Ungleichheit; aktuell forscht er mit Hilfe der qualitativen Netzwerkanalyse über die Bedeutung intergenerationaler Beziehungen für die Reproduktion ungleicher Geschlechterrollen.

gründung in Ost- und Westdeutschland tatsächlich in einen unterschiedlichen Sinnzusammenhang gesetzt wird.

Wie haben Sie diese Unterschiede empirisch erfasst?

KLÄRNER: Wir haben Angehörige desselben Abschlussjahrgangs zehn Jahre nach der Schulzeit befragt, damit wir unter Personen in vergleichbarer Lebenssituation und mit ähnlicher Sozialisierung die Unterschiede herausarbeiten konnten. Im Bewusstsein der jungen Leute war in dieser Phase ihres Lebens das Thema der Familienplanung sehr präsent. Etwa die Hälfte ihrer Altersklasse hatte zu diesem Zeitpunkt bereits ein Kind.

VON DER LIPPE: Darüber hinaus haben wir eine Netzwerkanalyse betrieben, das heißt die Leute auch nach deren Familien und Freunden befragt und diese zum Teil ebenfalls interviewt. Ein solches persönliches Interview dauerte unge-

fähr zwei Stunden und bestand aus zwei Teilen: einem quantitativen, in dem der Befragte auf einer »Netzwerkkarte« seine persönlichen Beziehungen und deren Bedeutsamkeit darstellen sollte, und einem qualitativen, in dem er gebeten wurde, nur durch einige offene Fragen angeregt frei über das Thema zu sprechen. Beispielsweise: Wer würde Sie unterstützen, wenn Sie ein Kind hätten? Wie wichtig wären Leute, die Sie kennen, hinsichtlich einer solchen Unterstützung?

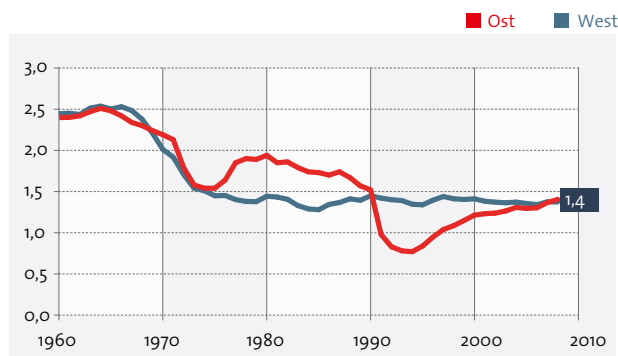
Was zeichnet diese qualitative Herangehensweise im Gegensatz zu einer quantitativen Erfassung aus?

VON DER LIPPE: Mit Fragebögen kann man viel aufdecken. Wenn es jedoch um die inneren Entscheidungsprozesse geht, sind sie oft zu grob. Die konkreten Handlungsmotive von Menschen, ihre Rationalitäten oder deren subjektive Bedeutungszuschreibung liegen jenseits jeder Statistik und kön-

Glossar

Eine **Geburtenkohorte** nennen Bevölkerungswissenschaftler eine Menge von Personen, die im gleichen Kalenderjahr geboren sind.

Die **zusammengefasste Geburtenziffer** ist die durchschnittliche Zahl an Kindern, die eine Frau im Lauf ihres Lebens zur Welt bringt. Für Frauen, die noch im gebärfähigen Alter sind, kann



Zusammengefasste Geburtenziffer für Deutschland

diese Zahl nur geschätzt werden. Dafür pflegt man vorzusetzen, dass die altersspezifischen Geburtenraten sich nicht verändern. Beispiel: Für Frauen, die heute 38 Jahre alt sind, setzt man die Anzahl der Kinder, die sie noch gebären werden, gleich der Anzahl, die ältere Frauen bereits geboren haben, als sie zwischen 38 und 49 Jahre alt waren. Diese Schätzung ist jedoch problematisch, weil sie kurzfristige Veränderungen nicht erfasst. Wenn beispielsweise Frauen die Geburt eines zweiten Kindes um zwei Jahre aufschieben, sinkt die so berechnete zusammengefasste Geburtenziffer, obwohl der tatsächliche Wert unverändert bleibt. Der gegenwärtige Wert für Gesamtdeutschland liegt bei ungefähr 1,4 Kindern pro Frau und damit weit unter dem Bestandserhaltungsniveau von 2,1 Kindern.

Reziprozität ist in den Sozialwissenschaften ein grundlegendes, kulturübergreifendes Prinzip, nach dem jeder Empfänger einer Gefälligkeit unter dem Druck steht, diese zu erwidern. Dabei muss die ursprüngliche Gefälligkeit in ihrem Wert weder erben noch willkommen sein. Tendenziell fällt die Gegenleistung sogar höher aus als die Vorleistung.

nen hier oftmals nicht angemessen wiedergegeben werden. Mit der qualitativen Methode sind wir näher am individuellen Erleben, anstatt quantitativ nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten zu forschen.

KLÄRNER: Quantitative Befunde sind darüber hinaus oft schwer zu interpretieren, wenn sie nicht mit qualitativen Methoden ergänzt werden.

VON DER LIPPE: Ein Beispiel wäre hier die Forsa-Umfrage im vergangenen Dezember, welche ergab, dass sich mehr Männer als Frauen überhaupt Kinder wünschen. Eine Studie des Bundesinstituts für Bevölkerungsforschung in Wiesbaden von 2009 zeichnet hingegen das entgegengesetzte Bild, und das sieht auch in anderen europäischen Ländern so aus. Manchmal hängt das Ergebnis eben von einzelnen Nuancen in den Fragebogenformulierungen ab. Letztlich kommt es aber auf die sinnvolle Kombination beider Methoden an, der qualitativen und der quantitativen.

Wie schätzen Ihre Fachkollegen das ein?

VON DER LIPPE: Viele der ausschließlich quantitativ ausgebildeten Kollegen halten mehr von ihren Verfahren, vor allem weil sich dadurch repräsentative Aussagen besser gewinnen lassen. Es gab in den 1960er und 1970er Jahren sogar einen regelrechten Methodenkrieg; in neuerer Zeit legt man jedoch zunehmend die Waffen beiseite und besinnt sich verstärkt auf integrative Vorgehensweisen, welche die Vorteile beider Methoden verbinden. Hier werden auch qualitative Daten geschätzt.

Sie haben also mit Ihrer Methodik gravierende Unterschiede zwischen Ost- und Westdeutschland gefunden?

KLÄRNER: Nicht, was den Kinderwunsch selbst angeht. Aber auf der Ebene des Verhaltens stellten wir beispielsweise fest: Ostdeutsche Frauen sind wesentlich jünger als westdeutsche, wenn sie ihr erstes Kind bekommen; außerdem bleiben sie seltener kinderlos. Die Statistik zeigt außerdem: In Westdeutschland werden mehr Kinder innerhalb einer Ehe geboren, nämlich 74 Prozent im Gegensatz zum Osten, wo der Anteil 39 Prozent beträgt. Auch wenn man sich die Entwicklung der Geburtenzahlen ansieht, finden sich deutliche Unterschiede.

VON DER LIPPE: Unmittelbar nach der Wende stürzte die zusammengefasste Geburtenziffer (siehe Kasten oben) auf dem Gebiet der ehemaligen DDR von 1,52 zuvor bis auf ungefähr die Hälfte.

KLÄRNER: Ich vermute, dass viele junge Paare in den unsicheren Zeiten die Geburten aufgeschoben haben. Die werden jetzt teilweise nachgeholt, und seit 2008 liegt die zusammengefasste Geburtenziffer in Ostdeutschland wieder jedes Jahr über der Westdeutschlands.

Wie erklären Sie sich diese Unterschiede, die noch 20 Jahre nach der Wiedervereinigung bestehen?

KLÄRNER: Mentalitäten, Denk- und Verhaltensmuster sind viel langlebiger als soziale und politische Institutionen. In diesem Fall sind es die Vorstellungen über Geschlechterrollen und über die Arbeitsteilung in Partnerschaften, die sich als sehr dauerhaft herausgestellt haben. Diese werden über die sozialen Beziehungen weitergegeben.

VON DER LIPPE: In Westdeutschland ist die Gründung einer Familie stark in den Zusammenhang der beruflichen Etablie-

rung eingebettet – und dort vor allem der des Mannes: Das traditionelle Modell des »männlichen Ernährers« erweist sich hier als recht stabil. Ein gewisses Ausmaß an Geld und Sicherheit wurde in den Lübecker Interviews als eine Grundbedingung für die Geburt eines Kindes angesehen. Wir nennen es das sequenzielle Modell: Erst auf eine ökonomische oder berufliche Festigung folgt ein Kind. Diese Haltung fanden wir interessanterweise bei den ostdeutschen Paaren so überhaupt nicht: Sie finden es auch vertretbar, wenn man eine Familie beispielsweise in die Phase der beruflichen Orientierung hinein gründet; das bezeichnen wir als paralleles Modell. Die ostdeutsche Elterngeneration gibt ihre Mentalität des flexiblen Sicharrangierens mit widrigen Umständen, die sie selbst in der DDR praktizierte, an die jetzt Ende 20-Jährigen weiter.

KLÄRNER: Verstärkend wirken institutionelle Maßnahmen, wie die gut organisierte und breit ausgebaute Kinderbetreuung in der Tradition der DDR, die zwar teilweise nach der Wende reduziert wurde, aber heute immer noch flächendeckend im Osten zur Verfügung steht. Die DDR verstand Frauen als Kräfte, die auf dem Arbeitsmarkt gebraucht wurden. Das Doppelverdienerehepaar war die Norm. 1989 arbeiteten 82 Prozent der ostdeutschen Frauen, zumeist in Vollzeit – im Gegensatz zum Westen, wo nur 56 Prozent der Frauen erwerbstätig waren, und das meist nur in Teilzeitarbeit. Dieses Bild besteht in etwas veränderter Form bis heute.

Weil die Fremdbetreuung von Kleinkindern im Westen oftmals als Abschieben empfunden wird?

VON DER LIPPE: Durchaus. Familien in Ostdeutschland akzeptieren traditionell die Fremdbetreuung der unter dreijährigen Kinder und nehmen sie viel selbstverständlicher in Anspruch als im Westen. Im vergangenen Jahr war im Osten mit 48,1 Prozent fast die Hälfte der unter Dreijährigen in einer Kinderbetreuungseinrichtung untergebracht, im Gegensatz zu 17,4 Prozent bei den westdeutschen Kleinkindern.

Was beeinflusst diese Einstellung?

KLÄRNER: Das soziale Netzwerk, und darin der starke Faktor Eltern; denn die Eltern schaffen als Erste die Umgebung, in der sich die jungen Leute sozialisieren. Die hohen Ansprüche der westdeutschen Paare nach materieller Sicherheit lassen sich meist nur mit der Unterstützung der Eltern realisieren. Das kann eine praktische Hilfeleistung sein, wie bei der Kinderbetreuung durch die Großeltern, oder auch finanzieller und materieller Beistand.

Aber das Einsteigen füreinander ist doch etwas Positives, oder nicht?

KLÄRNER: Ja. Dadurch ergibt sich aber auch eine Abhängigkeit mit asymmetrischer Machtbeziehung. In der Soziologie spricht man von Reziprozität: Jede Gabe verlangt nach einer Gegengabe. Der 2002 verstorbene US-amerikanische Soziologe Peter M. Blau stellte fest, dass diese Tauschbeziehungen darüber hinaus Macht und Unterordnung aufbauen. In unserem Fall bedeutet das eine höhere Sanktionsmacht der helfenden Großeltern. Und dadurch können auch soziale Normen viel eher tradiert und durchgesetzt werden.

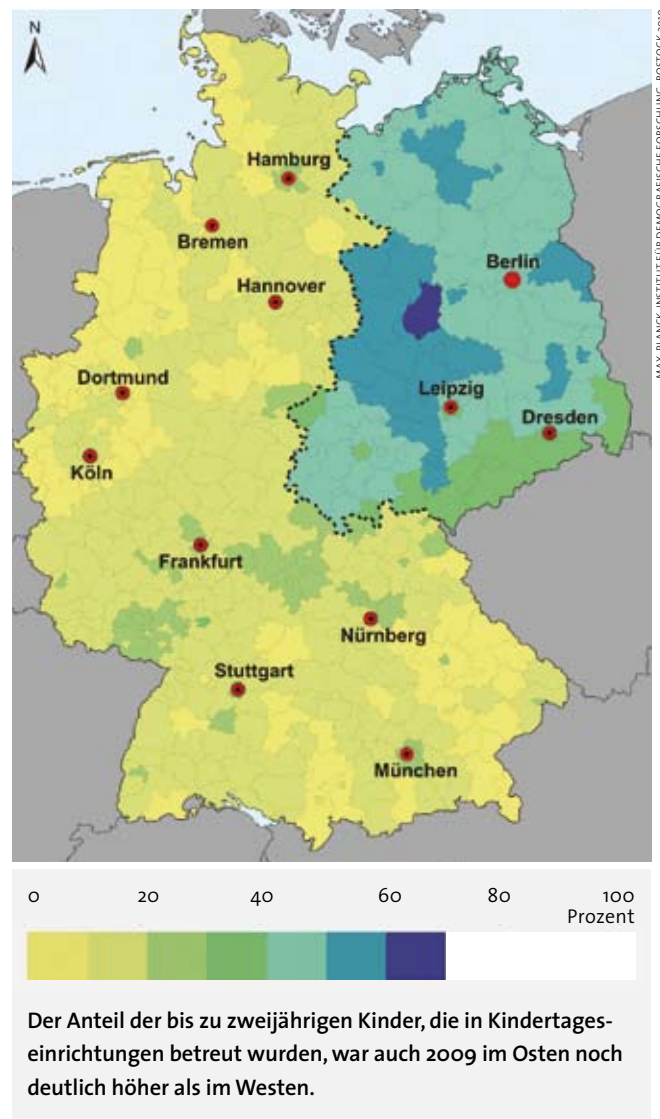
So wird mit der Unterstützungsleistung auch eine Weitergabe von Einstellungen und Werten verknüpft – eine Art Reproduktion von Normen in die nächste Generation?

KLÄRNER: Im Prinzip schon. Väter und Mütter unserer westdeutschen Probanden äußerten in den Interviews zum Beispiel die Ansicht, dass die Verantwortung bei der Kindererziehung in erster Linie bei der Frau liegt, tragen also den »Mythos der deutschen Mutter« in die nächste Generation.

VON DER LIPPE: Während im Osten eher das flexible Familienarrangement propagiert wird.

Welche anderen sozialen Beziehungen beeinflussen uns im Hinblick auf das Elternwerden?

KLÄRNER: Geschwister, Freunde, Arbeitskollegen, bis hin zur Beobachtung der Nachbarschaft – all diese Faktoren der sozialen Nachahmung spielen im individuellen Entscheidungsprozess eine Rolle. Junge Erwachsene verfolgen sehr genau, was in ihrem sozialen Netzwerk passiert, wie ihre Freunde und Geschwister entscheiden und wie zufrieden oder unzufrieden diese dann mit ihren Entschlüssen sind. Wir nennen das den Einflussfaktor des sozialen Lernens.



Während in Westdeutschland die Kleinfamilie mit dem Vater (hier Willy Brandt um 1954) als Alleinernährer und der Mutter als Nurhausfrau nach dem Zweiten Weltkrieg die dominierende Lebensform war, ...



AKG BERLIN / GERT SCHÜTZ

VON DER LIPPE: Vor allem Freunde bestärkten unsere Interviewten in ihren Zielen und Vorstellungen. Freundschaften haben also eine wichtige motivationale Funktion. Aber abgesehen von sehr engen Freundschaften läuft die Auseinandersetzung mit dem Kinderthema eher indirekt ab. Über Familienplanung tauscht man sich eben nicht mit jedem aus.

KLÄRNER: Wichtig ist auch der soziale Druck, den man von den Freunden erfährt. Viele der jungen westdeutschen Paare geben an, den Verlust der Freiheit zu fürchten, aber auch den Verlust von Freundschaften und Bindungen, wenn sie die Erwartungen der Freunde nicht erfüllen – seien es die von Freunden mit Kindern oder jene der überzeugt Kinderlosen.

VON DER LIPPE: Diese Verlustangst ist erstaunlicherweise ein fast rein westdeutsches Phänomen. Dass Kinder große ökonomische oder Freundschafts- und Freiheitsverluste darstellen, spielte für die ostdeutschen Befragten kaum eine Rolle.

Sie haben in Ihrem Forschungsprojekt neben dem Vergleich der west- und ostdeutschen Fertilität auch die sozialen Einflüsse in anderen Ländern untersucht. Zu welchen Ergebnissen kamen Sie hier?

VON DER LIPPE: Unser Ausgangspunkt für die von Laura Bernardi geleiteten Studien in Italien und anderen europäischen Ländern war folgendes Rätsel: Laut internationalen Statistiken wünschen sich beispielsweise die Italiener deutlich mehr Kinder, haben jedoch eine Geburtenrate noch unter der Deutschlands.

Worauf führen Sie das zurück?

VON DER LIPPE: Hier spielt die subjektive Verpflichtung, vor allem gegenüber den Eltern, eine Rolle: An eine Eheschließung sind in Italien direkte Erwartungen an eine darauf folgende Elternschaft gebunden. Diese werden meist dadurch erfüllt, dass junge Ehepaare in Italien nach der Hochzeit rasch ein Kind bekommen – und zwar sagenhafte 90 Prozent –, dem aber keine weiteren Kinder folgen. Dem sozialen Druck wird also durch die Geburt des ersten Kindes die Spitze genommen.

Darüber hinaus gilt die Regel, dass wirtschaftliche Sicherheit der Familiengründung vorauszugehen hat, dort noch strikter als in Westdeutschland. Das ist aber wegen der ungünstigeren wirtschaftlichen Bedingungen schwerer zu erfüllen. Daher ist die Diskrepanz zwischen Wunsch und Wirklichkeit dort umso größer.

Welche Entwicklung erwarten Sie für Deutschland?

KLÄRNER: Ich erwarte nicht, dass sich die Abweichungen zwischen Ost- und Westdeutschland in naher Zukunft nivellieren – dafür sind die Mentalitätsunterschiede zu groß. Allerdings spricht die Entwicklung auf dem Arbeitsmarkt dafür, also die geforderte höhere Flexibilität und Mobilität, dass der pragmatische Umgang mit dem Thema Familienplanung die bessere Strategie ist. Das starre Sicherheitsdenken, das den von uns interviewten Westdeutschen eigen ist, wird unter dem Druck der ökonomischen Veränderungen auf Dauer nicht aufrechtzuerhalten sein.

Es gibt schon vielfältige Anstrengungen, jungen Paaren die Entscheidung für ein Kind zu erleichtern, beispielsweise durch den Ausbau von Tagesstätten. Doch es kommen erschwerende Entwicklungen hinzu.

Welche sehen Sie da?

KLÄRNER: In den intergenerationalen Beziehungen. Die heutige Großelterngeneration hat augenblicklich die finanziellen und materiellen Möglichkeiten, ihre Kinder und Enkel zu unterstützen. Außerdem geben die erhöhte Lebenserwartung und die steigende Anzahl behinderungsfreier Jahre Gelegenheit zum »aktiven Altern«: Die Älteren engagieren sich in der Familienarbeit und greifen den jungen Familien auch praktisch, wie bei der Kinderbetreuung, unter die Arme.

Die Umstrukturierungen auf dem Arbeitsmarkt haben aber auch zur Folge, dass in Zukunft die Altersarmut wieder ein Thema sein wird. Dadurch schwinden die Ressourcen, die durch das aktive Altern entstehen. Die Frage, was passiert, wenn die Unterstützungsleistungen abnehmen, ist offen und liefert ein völlig neues Forschungsgebiet.



... wurden im Sozialismus die Kinder von einem frühen Alter an durch professionelle Kräfte betreut, und die Mütter arbeiteten in Vollzeit. Der Unterschied zwischen dem ost- und dem westdeutschen Familienmodell besteht auch 20 Jahre nach der Wiedervereinigung noch fort.

Das heißt, eine Möglichkeit, Paare zum Kinderkriegen zu motivieren, wäre, eine stabile Versorgungssituation zu schaffen. Welche anderen Impulse können Sie aus Ihren Studien ableiten?

VON DER LIPPE: Alles, was eine individuelle und flexible Lebensplanung unterstützt, also beispielsweise die Förderung der Wiedereingliederung von Frauen in den Beruf, spielt eine wichtige Rolle in der Familienplanung. Was immer sich vom westdeutschen Hausfrauenmodell wegentwickelt, hilft – denn viele junge Mütter wollen arbeiten, sehen aber gerade in Westdeutschland wenig Möglichkeiten, ihre Kleinkinder betreuen zu lassen.

KLÄRNER: Flexiblere Arbeitsverhältnisse sollen hier aber nicht unsichere meinen. Unsichere Arbeitsverhältnisse sind ja nicht grundsätzlich wünschenswert.

Das kulturelle Muster des männlichen Hauptverdieners und des starren Sicherheitsdenkens, das sich in Westdeutschland herausgebildet hat, ist auch politisch durch administrative Maßnahmen und gesetzliche Regelungen, wie etwa das Ehegattensplitting im Steuersystem, unterstützt worden. Da gibt es Spielraum für Änderungen.

VON DER LIPPE: Wenn Sie nach ganz praktischen Entscheidungshilfen für junge Leute fragen: In den USA etwa besuchen junge Paare Workshops über das Für und Wider der Familiengründung und Elternschaft.

Und, ja, unsere und ähnliche Studien über Einflussfaktoren wie sozialer Druck, soziales Lernen, subjektive Verpflichtung oder soziale Nachahmung können jeden dazu ermuntern, in der Tat genauer auf das eigene Beziehungsnetzwerk zu schauen, wann man im Entscheidungsdilemma stecken sollte. Denn dort kommen Kinder und Familien meist in so verschiedenen Konstellationen vor, dass man für sich das Passende lernen kann – jenseits der fixen kulturellen Muster und Normen. Noch fehlt uns allerdings der quantitative Beleg dafür, welcher dieser Faktoren den stärksten Einfluss ausübt. Daran arbeiten wir momentan.

Das bloße Reden über Familienplanung soll ja auch schon helfen. Das zeigt sich sogar in Ihrer eigenen Forschungsgruppe am MPI: In der Zeit Ihres Forschungsprojekts in Rostock haben fünf Ihrer Kolleginnen ein Kind bekommen.

VON DER LIPPE: (lacht) Das stimmt! Aber hier sollte man keinen Kausalzusammenhang vermuten. Ich zähle das eher zum Bereich der Anekdoten. ~

Die Fragen stellte **Sabrina Hüttermann**, freie Wissenschaftsjournalistin in Aachen.

QUELLEN

Bernardi, L. et al.: Social Influences on Fertility: A Comparative Mixed Methods Study in Eastern and Western Germany. In: Journal of Mixed Methods Research 1, S. 23–47, 2007

Bernardi, L. et al.: Freunde, Familie und das eigene Leben. Eine methodenintegrative Studie zum Einfluss sozialer Netzwerke auf die Lebens- und Familienplanung junger Erwachsener in Lübeck und Rostock. In: Hollstein, B., Straus, F. (Hg.): Qualitative Netzwerkanalyse. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2006, 2. überarbeitete Auflage im Druck

Keim, S. et al.: Who is Relevant? Exploring Fertility Relevant Social Networks. MPIDR Working Paper WP-2009-001, Rostock 2009. Online unter www.demogr.mpg.de/papers/working/wp-2009-001.pdf

MPI für demografische Forschung Rostock (Hg.): Familie und Partnerschaft in Ost- und Westdeutschland. Ergebnisse im Rahmen des Projektes »Demographic Differences in Life Course Dynamics in Eastern and Western Germany«, 2010. Online unter www.demogr.mpg.de/publications/files/3988_1287680847_1_familie_und_partnerschaft_ost_west.pdf

Noack, T., Østby, L.: Free to Choose – But Unable to Stick to it. In: Klijzing, E., Corin, M. (Hg.): Dynamics of Fertility and Partnership in Europe. Insights and Lessons from Comparative Research. United Nations, New York und Genf 2002, S. 103–116

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067448

Gefühl und Vernunft

Wozu dienen Gefühle? Bestehen Regungen wie Furcht und Trauer bloß aus unserem Erleben bestimmter körperlicher Prozesse? Oder handelt es sich um unwillkürliche Bewertungen von Dingen, Personen oder Situationen? Manchmal offenbaren uns Emotionen sogar besser als die kühle Vernunft, was gut und richtig ist.

Von Sabine A. Döring

Gefühle feiern seit Längerem eine wissenschaftliche Renaissance – in der Philosophie wie in anderen Disziplinen, von der Neurowissenschaft über die Psychologie bis hin zu den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Als ein zentrales Motiv hierfür identifiziert der Philosoph Ronald de Sousa »Spezies-Narzissmus, eine Art kindische Suche nach einer speziellen Würde der menschlichen Existenz«. In einer Zeit, so de Sousa, in der uns die Konkurrenz der Maschinen zu bedrohen scheint, besinnen wir uns darauf, dass wir keine rein intellektuellen Wesen sind. Uns zeichnet aus, dass wir Emotionen haben – während fraglich ist, ob es emotionale Maschinen jemals geben kann.

Wie bereits im Titel von de Sousas Buch »Die Rationalität des Gefühls« anklingt, soll dabei allerdings unser klassisches Selbstverständnis als *animal rationale* keineswegs preisgegeben werden. Auch als emotionales Wesen soll sich der Mensch immer noch durch seine Vernunft auszeichnen. Dementsprechend werden Gefühle heute für rational erklärt. Doch welche neue Erkenntnis ist damit gewonnen? Werden damit die Gefühle nicht einfach der Vernunft einverleibt?

Für die Frühphase der Gefühlsrenaissance in den 1960er und 1970er Jahren ist dieser Einwand durchaus berechtigt. Damals konkurrierten mutmaßlich neue kognitive Gefühlstheorien mit so genannten »Feeling«-Theorien. So hatte der amerikanische Philosoph William James (1842–1910) dafür plädiert, Gefühle als reine »Feelings« aufzufassen – als bloß subjektive Erlebnisse einer bestimmten Qualität und Intensität. Angenommen, Sie werden angesichts einer Kreuzotter, die sich bei einem Waldspaziergang plötzlich zu Ihren Füßen windet, von Furcht ergriffen. James reduzierte dieses Gefühl auf das Bewusstwerden bestimmter körperlicher Veränderungen – erhöhter Pulsschlag oder zitternde Knie –, die das Wahrnehmen von gegenwärtigen oder vorausgeahnten Gefahren automatisch hervorriefe. Dabei ist diese Wahrnehmung nicht Teil der Furcht selbst; vielmehr tritt das Gefühl als Folge der Wahrnehmung und der durch sie verursachten Reaktionen auf. So erklärt sich die provokative Formel, die James wählte, um seine Lehre auf den Punkt zu bringen: »Wir weinen nicht, weil wir traurig sind, sondern wir sind traurig, weil wir weinen.« Normalerweise gehen wir davon aus, dass es die Gefühle sind, die bestimmte körperliche Veränderungen erst hervorrufen. James stellte diese Auffassung gleichsam auf den Kopf: Er postulierte, dass die körperlichen Veränderungen den Gefühlen vorangehen und dass Gefühle *nichts anderes* sind als die Empfindungen dieser Veränderungen (siehe Schema S. 66 unten).

Eine entscheidende Prämisse dieser Theorie ist, dass die Bewertung der Gesamtsituation als gefährlich oder traurig, welche die körperlichen Veränderungen auslöst, selbst kein integraler Bestandteil des Gefühls ist. Genau hier setzt die Kritik moderner Gefühlstheoretiker an. Nach ihrer Meinung umfasst ein Gefühl stets eine bestimmte Repräsentation, eine Bezugnahme auf die Welt – etwa im Fall der Furcht die Bewertung einer Gefahr und im Fall der Trauer die Einschätzung eines Verlustes. Diese Repräsentation kann entweder fehlgehen oder korrekt sein; somit werden Gefühle zu kognitiven Inhalten, die ihrem Träger Wissen über die Welt vermitteln. Das ist der Grundgedanke des so genannten Kognitivis-

SPEKTRUM-SERIE

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

Teil 1	Interview mit Julian Nida-Rümelin	März 2011
Teil 2	Albert Newen: Wer bin ich?	
Teil 3	Michael Pauen: Willensfreiheit	
Teil 4	Tobias Schlicht: Bewusstsein	April 2011
Teil 5	Albert Newen: Das Verhältnis von Mensch und Tier	
Teil 6	Sabine Döring: Gefühl und Vernunft	Mai 2011
Teil 7	Elke Brendel: Skepsis und Wissen	
Teil 8	Michael Esfeld: Philosophie der Physik	Juni 2011
Teil 9	Marcel Weber: Philosophie der Biologie	
Teil 10	Wilfried Hinsch: Menschenrechte	Juli 2011
Teil 11	Julian Nida-Rümelin: Gerechtigkeit	
Teil 12	Gottfried Vosgerau: Sprache und Denken	August 2011
Teil 13	Albert Newen und Kai Vogetley: Den anderen verstehen	

FOTOLIA / DAVISALES



Gefühle haben viele Gesichter: Ärger über den ständig zu spät kommenden Kollegen, Furcht vor einer Schlange, aber auch – scheinbar grundlos – pure Daseinsfreude.

mus, der die Renaissance des Gefühls ausgelöst hat und die Gefühlstheorie seit den 1970er Jahren beherrscht. Im Zuge der ausdrücklichen Gegnerschaft zu Theoretikern wie James dominierte dieser Gedanke zunächst derart, dass andere wichtige Aspekte von Gefühlen – insbesondere das Feeling – marginalisiert oder sogar vollständig ausgeblendet wurden.

Ärgerlich oder eher empört?

Charakteristisch für die Frühphase des Kognitivismus ist die Gleichsetzung von Gefühlen mit Werturteilen. Sich vor der Kreuzotter zu fürchten bedeutet demnach – in klarem Gegensatz zur Feeling-Theorie – *nichts anderes* als zu urteilen, dass die Kreuzotter gefährlich ist. Wer sich über die Unpünktlichkeit des Kollegen ärgert, urteilt, dass dessen Verhalten ärgerlich ist. Wer sich hingegen über die Unpünktlichkeit empört, fällt das Werturteil: Dieses Verhalten ist empörend. Nur auf diese Weise – so der Haupteinwand der Kognitivisten gegen die Feeling-Theorie – lassen sich Ärger und Empörung überhaupt voneinander unterscheiden. Tatsächlich zeigten Experimente, dass sich unterschiedliche Typen von Gefühlen nicht über damit einhergehende körperliche Empfindungen differenzieren lassen. Der Unterschied rührt demnach von den jeweiligen Eigenschaften des Ärgerlichen oder Empörenden her, die ein entsprechendes Gefühl seinem Gegenstand notwendigerweise zuschreiben muss, um sich als Ärger oder Empörung zu qualifizieren.

Auf den ersten Blick erscheint die Identifikation von Gefühlen mit Werturteilen kaum plausibel. Schließlich vermag man völlig gefühlsfrei zu urteilen: Die Kreuzotter ist gefährlich. Auf diesen naheliegenden Einwand haben manche Urteilstheoretiker reagiert, indem sie Gefühle zu einer beson-

deren Art von Urteilen erklärten und ihnen Eigenschaften zuschrieben, die gewöhnlichen Urteilen fehlen.

Damit begann Mitte der 1980er Jahre die zweite Phase der neueren Gefühlstheorie. Seither versuchen Philosophen, Kognitivismus und Feeling-Theorie miteinander zu versöhnen. Hierbei werden Gefühle weder auf Feelings noch auf Urteile reduziert.

Zunächst gilt es jedoch, auf eine terminologische Unterscheidung hinzuweisen, welche die deutsche Alltagssprache – anders als die englische – streng genommen nicht hergibt: Gefühle versus Emotionen. Es ist sinnvoll, Gefühle im engeren Sinn – wie Furcht, Ärger, Empörung, Neid oder Scham – als Emotionen zu bezeichnen und von Gefühlen im weiteren Sinn abzugrenzen. Eine Emotion, so die Grundannahme aller Kognitivisten, erschöpft sich nicht in einem subjektiven Erlebnis einer bestimmten Qualität und Intensität wie etwa bei einem jameschen Feeling. Eine Emotion enthält vielmehr

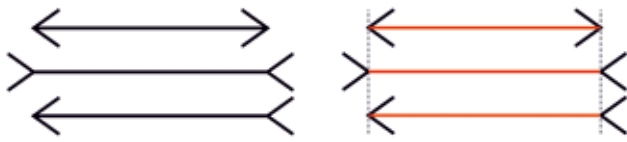
AUF EINEN BLICK

DAS WESEN DER GEFÜHLE

1 Für den Philosophen William James waren Gefühle reine »Feelings«, die gewisse körperliche Veränderungen begleiten: »Wir weinen nicht, weil wir traurig sind, sondern wir sind traurig, weil wir weinen.«

2 Dagegen wendet der **Kognitivismus** ein: Gefühle beziehen sich stets auf etwas: Furcht bewertet eine Gefahr, Trauer schätzt einen Verlust ein.

3 Die **neuere Gefühlstheorie** sucht den Gegensatz zwischen Feeling-Theorie und Kognitivismus zu versöhnen: Gefühle werden weder auf Feelings noch auf Urteile reduziert.



Bei der so genannten Müller-Lyer-Illusion erscheinen uns die Strecken als verschieden lang (links) – selbst dann, wenn wir nachgemessen haben, dass sie gleich lang sind (rechts).

eine bestimmte Bewertung und ist folglich kein reines Körpergefühl wie vielleicht Zahnschmerzen. Das deutsche Wort »Gefühl« ist hier irreführend, weil es bloße Feelings mit einschließt. Gemeint sind im Kognitivismus eher *emotions*. Daher werden in der wissenschaftlichen Debatte auch im Deutschen Emotionen von Gefühlen unterschieden, obwohl die deutsche Alltagssprache hier nicht differenziert.

Quer zur philosophischen Terminologie steht die Rede von Emotionen in neojameschen Theorien wie der des Neurowissenschaftlers Antonio Damasio. Er bezeichnet mit diesem Ausdruck die körperlichen Prozesse selbst, die mit den Feelings als dem Bewusstsein dieser Prozesse korreliert sind. In philosophischen Gefühlstheorien gibt es dazu kein Pendant. Selbst moderne Jamesianer unter den Philosophen fassen Emotionen als repräsentierend-bewertende Zustände auf und nicht als reine Körpergefühle, geschweige denn als die zu Grunde liegenden körperlichen Prozesse.

Letztlich beruhen solche Differenzen auf unterschiedlichen Erkenntnisinteressen. In der Naturwissenschaft geht es um experimentell erforschbare Emotionen, vorzugsweise um so genannte Basisemotionen wie Ekel oder Überraschung, denen spezifische körperliche Veränderungen und Gesichtsausdrücke entsprechen. Dagegen verfolgen Philosophen oft ethische Fragen und konzentrieren sich deshalb eher auf komplexe Emotionen wie Reue, Scham, Ehrfurcht, Empörung oder Bewunderung. Die Frage ist, ob es überhaupt eine disziplinübergreifende Theorie der Emotionen geben kann.

Neben dem Feeling vernachlässigen die Urteilstheoretiker einen weiteren Aspekt der Emotionen, den der niederländische Psychologe Nico Frijda in den Vordergrund gerückt hat: deren motivierende Kraft. Eine wichtige Funktion der Emotionen scheint darin zu bestehen, dass sie uns in die Lage versetzen, schneller und besser auf unsere komplexe und risikoreiche Lebenswelt zu reagieren. Wenn wir etwa eine Gesamtsituation als Gefahr für Leib und Leben bewerten, lässt uns Furcht ohne langes Überlegen Handlungen zu

unserem Schutz durchführen. Um allen drei bislang erwähnten Aspekten Rechnung zu tragen, zerlegen einige Theoretiker die Emotionen in verschiedene Komponenten: in ein Urteil plus ein Handlungsmotiv plus eine jamesche Körperempfindung. Die Furcht vor der Kreuzotter bestünde dann etwa aus dem Urteil, dass sie gefährlich ist, *plus* dem Wunsch, dieser Gefahr zu entinnen, *plus* beispielsweise dem Gefühl, weiche Knie zu haben.

Diese »Komponententheorie« stellt den ersten Theorietyp der zweiten Phase der Gefühlsphilosophie dar. Gegen sie richtet sich ein zweiter Ansatz, dessen Vorreiter der Brite Peter Goldie und der Amerikaner Bennett Helm sind. Beide Philosophen betonen einerseits, dass es einen Unterschied macht, ob man etwas erlebnisfrei für gefährlich hält oder es wirklich als gefährlich erlebt. Gegen James argumentieren Goldie und Helm andererseits, dass sich im zweiten Fall das Erleben auf die Welt richtet und nur in Ausnahmefällen wie Herzangst auf bestimmte körperliche Veränderungen. Schließlich fürchten wir uns normalerweise nicht vor erhöhtem Pulsschlag oder zitternden Knien, sondern vor einem gefährlichen Tier oder einem drohenden Autounfall. Damit werden Emotionen zu »weltgerichteten Gefühlen« (Goldie) oder »gefühlten Bewertungen« (Helm).

Grundlose Furcht

Ein dritter Theorietyp der zweiten Phase, wie ihn die Verfasserin dieses Artikels vertritt, betont die Analogie zwischen Emotionen und Wahrnehmungen – oder setzt sie sogar gleich. Theorien dieses Typs bringen einen weiteren Einwand gegen Urteils- und Komponententheorie vor. Im Gegensatz zu Urteilen können Emotionen auch im Licht besseren Wissens bestehen bleiben. Furcht vor einer vermeintlichen Kreuzotter kann das Tier selbst dann noch als gefährlich erscheinen lassen, wenn man herausgefunden hat, dass es nur eine harmlose Blindschleiche ist. Analog dazu sehen die Linien der Müller-Lyer-Täuschung für den Betrachter auch dann noch verschieden lang aus, wenn er sich davon überzeugt hat, dass sie in Wahrheit gleich lang sind (Grafik oben). Und den Stab, der aus dem Wasser ragt, nehmen wir weiterhin als geknickt wahr, obwohl wir wissen, dass er in Wahrheit gerade ist und die täuschende Sinneswahrnehmung auf den unterschiedlichen Brechzahlen von Luft und Wasser beruht.

Die beiden letztgenannten Theorietypen beantworten die Frage unterschiedlich, ob es zur Natur von Emotionen gehört, uns zum Handeln zu motivieren; außerdem bewerten sie die Rationalität der Emotionen verschieden. Ein Skeptiker in beiden Punkten ist Peter Goldie, während Bennett Helm

ALLTAGSVERSTÄNDNIS:

Wahrnehmung => Bewertung => Gefühl => körperliche Veränderungen

JAMES' FEELING-THEORIE:

Wahrnehmung => Bewertung => körperliche Veränderungen => Gefühl (Bewusstsein der körperlichen Veränderungen)

Die Feeling-Theorie stellt unser Alltagsverständnis – Gefühle lösen Körperreaktionen aus – auf den Kopf. Nach William James sind Gefühle *die Folge* körperlicher Veränderungen.

Die Feeling-Theorie wurde in den 1970er Jahren durch den Kognitivismus abgelöst, der Gefühle als Werturteile interpretiert. Seit Mitte der 1980er Jahre kombinieren Gefühlstheoretiker beide Ansätze und diskutieren unterschiedliche Kombinationen von Feeling-Theorie und Kognitivismus.

JAMES' FEELING-THEORIE		Ein Gefühl ist nichts anderes als das Bewusstsein bestimmter körperlicher Veränderungen.	
KOGNITIVISMUS	1. Phase	Urteilstheorie	Eine Emotion ist nichts anderes als ein Werturteil.
	2. Phase	Komponententheorie	Eine Emotion ist ein Urteil plus ein Handlungsmotiv plus eine jamesische Körperempfindung.
		Goldies und Helms Theorie	Eine Emotion ist ein weltgerichtetes Feeling.
		Wahrnehmungstheorie	Eine Emotion ist eine Wahrnehmung oder ähnelt einer Wahrnehmung.

und die meisten Wahrnehmungstheoretiker die Bedeutung der Emotionen sowohl für das Handeln als auch für die Vernunft positiv herausstellen (siehe Schema oben).

Zweifellos gibt es ein ganzes Spektrum emotionaler Einflussnahme auf unsere Vernunfturteile und Handlungen. Interessant wird es dann, wenn eine Emotion uns dazu bewegt, ein Werturteil zu fällen, das wir andernfalls nicht gefällt hätten, oder eine Handlung auszuführen, die unserem überlegten Vernunfturteil widerspricht.

Das meistdiskutierte Beispiel liefert Mark Twains Roman »Huckleberry Finn«. Nachdem Huck dem Sklaven Jim zur Flucht verholfen hat, überkommen ihn Gewissensbisse, und er entschließt sich, Jim den Sklavenjägern auszuliefern. Doch als sich die Gelegenheit dazu bietet, sieht er sich genau das Gegenteil tun: Statt Jim zu verraten, lügt Huck, um ihn zu beschützen. Hucks wachsende Freundschaft und sein Mitgefühl mit Jim bewegen ihn, etwas zu tun, das nach allen ihm vertrauten Moralprinzipien falsch ist. Während er sich zunächst noch für seine vermeintliche Schwäche geißelt, bekennt er sich am Ende des Romans zu seinen Emotionen, als er nochmals vor die Wahl gestellt wird, Jim in die Sklaverei zu schicken. Interessant daran ist, dass Hucks Einschätzung von Jim als einem Menschen, der Mitgefühl verdient und ein Recht auf Freiheit hat, nicht aus den von Huck akzeptierten moralischen Prinzipien folgt. Vielmehr sind es Emotionen, die Huck am Ende dazu bewegen, neue und bessere Moralprinzipien zu formulieren.

Wie das Beispiel vorführt, könnte die rationale Rolle der Emotionen darin bestehen, dass sie uns manchmal – nicht immer! – besser und zuverlässiger als unsere Vernunfturteile zeigen, was gut und richtig ist. Auf diese Weise vermag im Prinzip jede Emotion das System unserer Werte und Normen zu erweitern, und wir können damit einem Gegenstand eine neue Werteigenschaft zuschreiben. So vermag uns die Trauer über den Verlust einer Person erstmals vor Augen zu führen, wie wichtig diese Person für uns war. Reue oder Scham können uns veranlassen, eine bestimmte Handlungsweise ab diesem Zeitpunkt als falsch einzuschätzen. Eine unerwartete Hoffnung auf etwas öffnet uns die Augen dafür, dass wir diesem Etwas einen Wert beimessen. Möglicherweise lassen

sich solche Bewertungen auf keinem anderen Weg als über unsere Emotionen gewinnen.

Dazu müssen Emotionen einen Aspekt aufweisen, den vor allem Wahrnehmungstheoretiker betonen: Sie müssen angesichts gegensätzlicher Urteile bestehen bleiben können. Wie bei Huckleberry Finn sind solche Konflikte manchmal produktiv, und wir gehen daraus mit einem verbesserten Werte- und Moralsystem hervor. Wir sollten darum nicht nur unseren Verstand, sondern auch unsere Emotionen kultivieren, denn erst im Zusammenspiel beider entdecken wir, was gut und richtig ist. Die Emotionen erweitern unsere Vernunft und damit unser Selbstverständnis als *animal rationale*, das nun nicht mehr als in Vernunft und »Neigung« gespalten erscheint. ~

DIE AUTORIN



Sabine A. Döring hat an der Universität Tübingen den Lehrstuhl für Philosophie mit dem Schwerpunkt Praktische Philosophie (Ethik) inne. Sie studierte Philosophie, Germanistik, Linguistik und Psychologie an der Universität Göttingen. Heute ist sie Vorstandsmitglied des Tübinger Exzellenzclusters »Center for Integrative Neuroscience« (CIN).

QUELLEN

- Damasio, A. R.:** Descartes' Irrtum: Fühlen, Denken und das menschliche Gehirn. List, München 1994
- Döring, S. A.:** Seeing What to Do: Affective Perception and Rational Motivation. In: *Dialectica* 61, S. 363–394, 2007
- Döring, S. A.:** Philosophie der Gefühle. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 2009
- Frijda, N.:** The Emotions. Cambridge University Press, Cambridge 1986
- Goldie, P.:** The Emotions: A Philosophical Explanation. Oxford University Press, Oxford 2000
- Helm, B.:** Emotional Reason: Deliberation, Motivation, and the Nature of Value. Cambridge University Press, Cambridge 2001
- James, W.:** What is an Emotion? In: *Mind* 9, S. 188–205, 1884
- de Sousa, R.:** Die Rationalität des Gefühls. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 1997

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067447

Was können wir von der Welt wissen?

Leben wir in einer simulierten Scheinrealität statt in einer Welt tatsächlich existierender Dinge? Diese These der so genannten Skeptiker lässt sich zwar nicht grundsätzlich widerlegen, erscheint aber ziemlich unwahrscheinlich.

Von Elke Brendel

Im Kultfilm »Matrix« der Wachowski-Brüder von 1999 arbeitet Thomas A. Anderson tagsüber als Programmierer in einer Softwarefirma. Nachts schlüpft er in die Rolle eines berühmten Computerhackers, der unter dem Pseudonym Neo sein Gehalt aufbessert. In Wirklichkeit ist jedoch sein ganzes Leben, wie Neo im Lauf der Geschichte schmerzlich erfahren muss, bloß Teil einer gigantischen computergenerierten Scheinwelt, der »Matrix«. Wohnung, Arbeitsplatz, Freunde, Stadt, Restaurants – sie alle existieren nicht, sondern sind nur Konstrukte einer Softwaresimulation. Man schreibt nicht mehr das Jahr 1999, sondern 2199. Bereits Anfang des 21. Jahrhunderts übernahmen, so der Filmplot, intelligente Maschinen die Macht auf der Erde. Sie halten Menschen in riesigen Anlagen zwecks Energiegewinnung. Deren Körper schwimmen in Kapseln, die mit Nährflüssigkeit gefüllt sind. Über Schläuche und Drähte sind die Menschen an

Computer angeschlossen, die ihnen eine perfekte Scheinrealität vorgaukeln.

Auch in der Philosophie spielen derartige Täuschungssituationen eine zentrale Rolle. Dabei geht es um eines der größten Probleme der Erkenntnistheorie, nämlich um die Frage: Was können wir von der Außenwelt wissen? Die Lehre, die solches Wissen grundsätzlich in Frage stellt, ist unter dem Begriff *Skeptizismus* oder *Wissensskeptizismus* bekannt. Sie hat ihren Ursprung bei den Vorsokratikern, aber auch bei Sokrates (zirka 469–399 v. Chr.) selbst und den Sophisten. Wobei nicht jeder, der an allem methodisch zweifelt, bereits ein Skeptiker ist. Auch für Sokrates war sein »Ich weiß, dass ich nichts weiß« vor allem ein Mittel auf der Suche nach Wahrheit und gesichertem Wissen. Erst wer die Chance, je zu gesichertem Wissen zu gelangen, grundsätzlich negativ beurteilt, lässt sich als Skeptiker einstufen.

Als weitere antike Quelle kann auch Pyrrhon von Elis (360–etwa 270 v. Chr.) gelten. Von dem griechischen Philosophen ist die Aussage überliefert, dass die Welt völlig unerkennbar sei und man daher über sie gar nicht urteilen könne. Pyrrhon meinte, der Mensch solle gar nicht erst versuchen, einen eigenen Standpunkt der Welt gegenüber einzunehmen. Nur wer sich völlig gleichgültig gegenüber allem verhalte, gelange zur wahren Seelenruhe. Während im antiken Pyrrhonismus die skeptische Einstellung der Urteilsenthaltung somit als ideale praktische Lebensform angesehen wurde, diente der Skeptizismus seit der Neuzeit hingegen ausschließlich als Methode der philosophischen Erkenntnistheorie. Als Begründer eines solchen modernen Wissensskeptizismus tritt schließlich René Descartes (1596–1650)

AUF EINEN BLICK

SCHEIN UND WIRKLICHKEIT

- 1** **Globale Täuschungssituationen** bilden eines der größten Probleme der **Erkenntnistheorie**. Es geht um die Frage: Was können wir wirklich von der Außenwelt wissen?
- 2** Die These, dass wir alle einer generellen Täuschung über unsere Welt unterliegen, lässt sich nicht grundsätzlich widerlegen.
- 3** Ein möglicher Ausweg besteht in der Überlegung, es sei nicht nötig, alle erdenklichen Irrtumsmöglichkeiten auszuschließen. Wenn objektiv nichts für eine globale Täuschung spricht, ist demnach **Wissen über die Außenwelt** durchaus möglich.



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

auf den Plan. Im 17. Jahrhundert entwarf der französische Philosoph und Mathematiker das Gedankenexperiment eines bösen Dämons, der uns permanent und systematisch bei allen unseren Wahrnehmungen hinters Licht führt. Der Ungeist gleicht einem Verschwörungstheoretiker, dessen These zwar verwegen erscheint, aber nicht prinzipiell ausgeschlossen werden kann. Diesen Dämon konnten die Philosophen bis heute nicht wieder austreiben.

Das vielleicht berühmteste Täuschungsszenario in der Philosophie des 20. Jahrhunderts, von dem sich übrigens auch die Wachowski-Brüder für ihren »Matrix«-Film inspirieren ließen, liefert ein Gedankenexperiment von Hilary Putnam (* 1926). Der amerikanische Philosoph von der Harvard University nannte es »Gehirn im Tank«: Man stelle sich vor, das Gehirn einer Person sei von einem bösartigen, aber sehr fähigen Gehirnschirurgen vom Körper abgetrennt und in einen Tank mit Nährflüssigkeit gegeben worden. Die Nervenenden sind mit einem Hochleistungscomputer verbunden, der dem Gehirn durch gezielte Signale eine Scheinrealität vorspiegelt. So erlebt sich das Gehirn im Tank als ein Mensch mit einem Körper aus Fleisch und Blut, der mit seiner Umwelt interagiert. In Wirklichkeit aber sind alle seine Erlebnisse bloß das Resultat neuronaler Aktivitäten und elektronischer Impulse, die vom Computer erzeugt und an die Nervenenden übertragen werden.

Möglicherweise gaukelt uns ein Computer oder auch ein böser Geist die reale Welt nur vor, argumentieren die Vertreter des Skeptizismus.

Globale Täuschungsszenarien wie das von Hilary Putnam scheinen einen radikalen Skeptizismus bezüglich all unseres Wissens über die Außenwelt nahezulegen. Da wir alle einer generellen Täuschung unterliegen könnten, so lautet das Argument der Skeptiker, verfügen wir auch über kein positives, also direktes und belastbares Wissen über unsere Außenwelt.

Was ist hiermit gemeint? Dazu ein Beispiel: Vor mir auf dem Schreibtisch steht eine Vase mit drei Rosen. Die Sonne scheint ins Zimmer, und meine Augen funktionieren tadellos. Die Blüten der Rosen haben eine gelbe und blassrosa Farbe und verströmen ihren typischen Duft. Wenn ich meine Hand ausstrecke, kann ich sie auch anfassen. Außerdem erinnere ich mich ganz deutlich, wie ich die Rosen gestern im Garten geschnitten und sie in einer Vase auf meinen Schreibtisch gestellt habe.

Nichts scheint also offensichtlicher zu sein, als mir selbst das Wissen zuzuschreiben, dass vor mir eine Vase mit Rosen steht. Die Skeptiker bestreiten dies nun aber. Sie argumentieren folgendermaßen: »Du weißt nicht, dass du nicht in der Matrix lebst. Dann kannst du auch nicht wissen, dass vor dir

eine reale Vase mit realen Rosen steht – und eben nicht bloß vom Computer simulierte Objekte.«

Das gilt natürlich nicht nur für Rosen, sondern für alles, was wir von der Welt zu wissen glauben. Das zentrale skeptische Argument lässt sich leicht verallgemeinern und auf alle möglichen Aussagen über die Außenwelt übertragen. Nun leuchtet es einerseits intuitiv sofort ein, da es auf plausiblen Annahmen zu beruhen scheint. Skeptiker behaupten ja keineswegs, dass wir tatsächlich in einer simulierten Scheinrealität leben oder dies auch nur wahrscheinlich wäre. Sie weisen lediglich darauf hin, dass die Möglichkeit einer Täuschung besteht und dass diese unser Wissen über die Außenwelt zunichtemacht. Zum anderen ist jedoch die Folgerung aus dem skeptischen Argument unannehmbar – würde sie doch bedeuten, wir irren uns permanent, wenn wir behaupten, etwas zu wissen.

Schon Immanuel Kant bezeichnete es als »Skandal der Philosophie und allgemeinen Menschenvernunft, das Dasein außer uns ... bloß auf Glauben annehmen zu müssen und, wenn es jemandem einfällt, es zu bezweifeln, ihm keinen genuttuenden Beweis entgegenstellen zu können.« Erkenntnistheoretiker betrachten es daher als eine ihrer zentralen Aufgaben, den Skeptizismus zu Fall zu bringen.

Dazu verfolgen Philosophen sehr unterschiedliche Strategien. Die einfachste und zugleich schlagkräftigste wäre natürlich, wenn sich die Grundthese der Skeptiker direkt widerlegen ließe. Dafür wäre nur zu zeigen, dass es gar nicht möglich ist, uns global zu täuschen. Als tiefgläubiger Mensch hatte René Descartes dafür seine eigene Lösung parat. Für den Franzosen war eine globale Täuschungssituation einfach deshalb ausgeschlossen, da sie der Allmacht und Güte Gottes widersprechen würde. Gott könne es niemals zulassen, dass ein böser Dämon uns permanent in allen unseren Wahrnehmungen täuscht. Dieses Argument trägt heute nicht mehr, denn auch die Philosophie hat sich mittlerweile von der Theologie weitestgehend emanzipiert. Aus philosophischen Gründen wäre es heute mehr als unbefriedigend, wenn sich

eines der zentralen philosophischen Probleme nur unter Annahme der Existenz Gottes lösen ließe. In der modernen Erkenntnistheorie sucht man daher nach anderen Lösungen.

Unser Gehirn ist im Prinzip vollständig manipulierbar

Leider lässt sich auf rein empirischen Weg, also etwa mittels Wahrnehmung und Beobachtung, offenbar nicht ausschließen, dass wir nur in einer Scheinwelt leben. Descartes' Dämon hält uns hier fest im Griff. Selbst wenn ich meine, die Rosen ganz deutlich vor mir zu sehen und zu riechen, könnte dieser Seh- und Geruchseindruck auf einer vollständigen Manipulation meines Gehirns beruhen, die von einem Computer gesteuert wird. Zwar scheint der aus der Matrix befreite Neo eindeutige empirische Hinweise dafür zu haben, er sei nun endlich in der Realität angekommen – im Unterschied zu seinem früheren Leben befindet er sich jetzt in einem fliegenden Schiff namens Nebukadnezar, ernährt sich von einem glibberigen Brei und hat einen Anschluss am Hinterkopf, mit dem er mit der Matrix und verschiedenen Trainingsprogrammen verbunden werden kann.

Was wäre aber, wenn der Film ein anderes Ende hätte und es sich stattdessen herausstellen würde, dass Neos Befreiung aus der Matrix sowie die Nebukadnezar samt der Besatzung und ihrem Kommandeur Morpheus wiederum nur Teil einer weiteren perfiden Computersimulation wären? Während Neo also glaubt, er könne die Welt retten und die Menschen aus den Fängen der Maschinen befreien, läge er in Wirklichkeit immer noch ruhiggestellt in seinem Bottich. So lässt sich immer eine Situation der globalen Täuschung ausmalen, die sich nicht von einer empfundenen Realität unterscheiden lässt. Auf empirischem Weg scheint eine direkte Widerlegung des Skeptizismus nicht möglich zu sein.

Manche Philosophen gehen daher einen anderen Weg. Sie vertreten die so genannte erkenntnistheoretisch idealistische Position, der zufolge die Wirklichkeit ohnehin nur das ist, wodurch sie uns erscheint. Unsere Urteile über die Welt beziehen sich, so die Idealisten, daher gar nicht auf eine von

Wirklichkeit ist nur das, wodurch sie uns erscheint



Vordenker des Skeptizismus: René Descartes (links) entwarf einen bösen Dämon, der uns ständig täuscht. Nach George Berkeley (Mitte) gibt es keine Dinge außerhalb unseres Geistes. Und Hilary Putnam entwarf ein »Gehirn im Tank«, dem die Welt nur vorgespiegelt wird.

uns unabhängige Außenwelt, sondern auf unsere subjektiven Sinneseindrücke. In diesem Sinn sagt auch Morpheus zu Neo: »Was ist die Wirklichkeit? ... Wenn du darunter verstehst, was du fühlst, was du riechen, schmecken oder sehen kannst, ist die Wirklichkeit nichts weiter als elektrische Signale, interpretiert von deinem Verstand.« Sind aber nicht gerade Urteile über unsere Sinneserlebnisse gewiss und täuschungsresistent? Neos Überzeugung, dass er gerade ein Glas Rotwein trinkt, kann sich zwar als falsch herausstellen. Jedoch scheint er sich nicht darin täuschen zu können, ob er gerade ein Geruchs- und Geschmackserlebnis von Rotwein hat – auch dann nicht, wenn dieses Erlebnis bloß durch eine Computersimulation in der Matrix ausgelöst wurde. Wenn also unsere subjektiven Sinnesempfindungen zweifelsfrei gewiss sind, so können wir nach Ansicht der Idealisten durchaus Wissen erlangen, nämlich Wissen über die Welt, wie sie uns erscheint.

Sind damit aber die Wissensskeptiker, die die Möglichkeit von Wissen generell in Frage stellen, tatsächlich widerlegt? Zum einen ist die Annahme der Idealisten, dass wir uns bezüglich unserer gegenwärtigen Sinneseindrücke niemals täuschen können, psychologisch unrealistisch. Doch selbst wenn man diese Annahme zugesteht, entfaltet das idealistische Argument nur dann seine antiskeptische Schlagkraft, wenn man zusätzlich behauptet, es gebe gar keine Dinge unabhängig von unserem Geist. Dies ist aber eine extrem radikale und höchst umstrittene erkenntnistheoretische Position, die nur ganz wenige Denker, wie etwa der irische Philosoph und Theologe George Berkeley (1685–1753), überhaupt vertreten. Für Berkeley erschöpft sich nämlich die Existenz der Dinge in ihrem Wahrgenommenwerden (»esse est percipi«). Sobald man jedoch neben der »Welt der Erscheinungen« auch noch von der Existenz einer bewusstseinsunabhängigen Außenwelt ausgeht, die zum Beispiel auf Grund einer globalen Täuschung prinzipiell unerkennbar sein kann, kann auch der Idealist dem Skeptizismus nichts entgegensetzen. Selbst wenn der Idealist seine Wissensansprüche auf die Welt, wie sie uns erscheint, einschränkt, bleibt das skeptische Argument weiterhin in Kraft, wonach gesichertes Wissen über die bewusstseinsunabhängige Außenwelt unmöglich ist.

Die Möglichkeit einer globalen Täuschungssituation ist somit philosophisch nicht aufzulösen. Aber vielleicht gibt es ja andere Strategien, auf die skeptische Herausforderung zu reagieren? Zwei Richtungen bieten sich an:

- Könnte man diesen Philosophen den Wind aus den Segeln nehmen, indem man nachweist, dass ihr eigenes Argument – entgegen dem ersten Anschein – auf versteckten Annahmen beruht, die wenig plausibel sind?
- Alternativ würde man an das erwünschte Ziel kommen, wenn eine detaillierte Analyse des Wissensbegriffs zeigte, dass das skeptische Argument einen inadäquaten Begriff des Wissens unterstellt.



FOTOLIA / MICHAEL WOLFF

Gedankenexperiment mit Rose: Grundsätzlich kann ein Betrachter nicht ausschließen, dass der Busch vor ihm in Wahrheit aus Plastik ist.

Auf Platon geht die klassische Auffassung zurück, dass Wissen eine wahre und gerechtfertigte Meinung ist. Wissen sei schon deshalb wertvoller als eine bloß wahre Behauptung, da diesem durch die Rechtfertigung zusätzlich Stabilität verliehen würde. Wenn ich über Gründe verfüge, die meine – an sich schon wahre – Behauptung belegen, dann lasse ich mich auch nicht so schnell von dieser abbringen.

Die klassische Wissenskonzeption hat sich in der Geschichte der Philosophie sehr lange gehalten. Auch René Descartes schloss sich Platons Sicht an: Jemand verfüge nur dann über Wissen, sagte der Franzose, wenn seine Meinung objektiv wie subjektiv gewiss sei, also auf unzweifelhaften Gründen beruhe. Diese Wissensdeutung führt nun aber leider wieder zwanglos zum Skeptizismus: Meine Meinung, dass vor mir eine Vase mit Rosen steht, ist durch die skeptische Hypothese anfechtbar, wonach ich in einer computersimulierten Scheinwelt leben könnte, in der es gar keine Rosen gibt. Selbst wenn

ich nicht in einer Scheinwelt lebe und meine Ansichten wahr sind, kann ich gemäß dieser Wissenskonzeption nicht wissen, ob nun vor mir eine Vase mit Rosen steht. Denn angesichts der Möglichkeit einer globalen Täuschung, die ich nicht ausräumen kann, ist diese Meinung für mich nicht subjektiv gewiss.

Das skeptische Argument beruht also auf der Annahme, dass es sich bei Wissen um eine wahre Meinung handelt, die durch keinerlei Argumente angezweifelt werden kann. Aber ist diese Wissensauffassung überhaupt plausibel? Erkenntnisphilosophen neigen dazu, mit dem Erbe Platons und Descartes' zu brechen und sowohl die Bedingung für die Rechtfertigung von Wissen als auch die von der Unwiderlegbarkeit der Gründe aufzugeben.

Der Wissensbegriff dahinter, so die moderne Sicht, ist viel zu hoch gegriffen und nahezu unanwendbar, wenn eine be-

**Wissen ist etwas,
was nicht ohne
Weiteres falsch
sein kann**

stimmte Äußerung durch überhaupt keine Gründe in Zweifel gezogen werden darf. Intuitiv plausibler scheint daher die Auffassung, eine wahre Behauptung könne genau dann als Wissen angesehen werden, wenn sie nicht ohne Weiteres auch hätte falsch sein kann. Damit ist gemeint: Der Prozess der Meinungsbildung hätte auch bei leichten Veränderungen der gegebenen Welt ebenso zu wahren Meinungen geführt. Wenn dieser Vorgang hingegen nur in einer völlig anderen, rein hypothetischen Welt zu falschen Meinungen führt, dann tangiert die Konstruktion des Wissen in seiner Qualität nicht.

Ein weiteres Gedankenexperiment soll das verdeutlichen: Auf einer Bundesgartenschau betrachtet Rosi einen herrlich blühenden Busch mit roten Rosen. Die Sichtverhältnisse und ihr Sehvermögen sind optimal. Des Weiteren sei angenommen, dass es sich auch tatsächlich um einen echten Rosenbusch handelt, den Rosi betrachtet. Weiß nun Rosi wirklich, dass sie vor einem Rosenbusch steht? Nehmen wir weiter an, kurz vor der Eröffnung der Bundesgartenschau seien von den 50 neu gepflanzten Büschen alle bis auf einen gleich wieder eingegangen sind und man habe in der Not die abgestorbenen Pflanzen durch völlig echt aussehende Plastikattrappen ersetzt. Rosi weiß nichts von den Plastikrosen.

Wann Wissen über die Außenwelt möglich ist

Wie es der Zufall will, steht sie jetzt aber genau vor dem einzigen echten Rosenbusch. Ihre Meinung, dass sie einen (echten) Rosenbusch ansieht, ist zwar objektiv zutreffend, ihre Meinung hätte jedoch leicht falsch sein können. Hätte sie nämlich stattdessen auf einen der zahlreichen Plastikrosenbüsche daneben geblickt, wäre sie immer noch davon überzeugt, es handle sich um einen echten Rosenbusch. Ihrer nur zufällig wahren Ansicht fehlt also eine gewisse Sicherheit, um als Wissen durchgehen zu können. Was aber wäre, wenn die gepflanzten Rosenbüsche nicht eingegangen wären und es tatsächlich nur echte Rosenbüsche auf der Gartenschau gäbe? Für Rosi wäre diese Situation vom ersten Fall nicht unterscheidbar. Doch ihre Wahrnehmung wäre in diesem Fall viel zuverlässiger, da nun keine Rosenattrappen aufgestellt sind. Es scheint somit höchst plausibel, Rosi in diesem Fall auch das Wissen zuzusprechen, dass vor ihr ein echter Rosenbusch steht.

Fachleute sprechen hier von der externalistischen Deutung von Wissen. Ob jemand wirklich etwas weiß, hängt demnach nicht davon ab, ob das Subjekt alle Gründe, die gegen seine Ansicht sprechen, ausschließen kann. Entscheidend ist vielmehr, wie die objektiven Umstände sind. Hat Rosi zum Beispiel »Glück« und es befinden sich keine Rosenattrappen in der näheren Umgebung, dann »besitzt« sie Wissen. Sind hingegen Rosenattrappen in der Nähe, dann verfügt sie trotz wahrer Meinung über kein Wissen. Unter der Voraussetzung des externalistischen Wissensbegriffs lässt sich nun auch das skeptische Argument zurückweisen: Um etwas wissen zu können, müssen wir nicht in der Lage sein, alle erdenklichen Irrtumsmöglichkeiten auszuschließen. Wenn in einer gegebenen Situation objektiv nichts für eine

globale Täuschung spricht, ist Wissen über die Außenwelt durchaus möglich. In einer solchen Situation wäre dann meine Meinung, dass vor mir eine Vase mit Rosen steht, nicht nur wahr, sondern auch ziemlich zuverlässig. Für Externalisten reicht dies aus, um mir das Wissen, dass vor mir eine Vase mit Rosen steht, zuzusprechen – auch dann, wenn ich subjektiv nicht ausschließen kann, dass ich in einer computersimulierten Scheinwelt lebe.

Die Auseinandersetzung mit dem Skeptizismus hat in der Philosophie wichtige erkenntnistheoretische Einsichten über das Wesen des Wissens zu Tage gefördert. Philosophen haben immerhin zeigen können, wie mit einer externalistischen Konzeption das skeptische Argument blockiert werden kann: Falls wir in einer Welt leben, in der eine globale Täuschung weder real noch wahrscheinlich ist, dann ist auch Wissen über die Außenwelt möglich.

Das löst freilich noch nicht den Grundsatzkonflikt mit Descartes' bösem Dämon: Dass wir aber in einer solchen täuschungsfreien Welt leben, können wir letztlich nur hoffen. denn diese Möglichkeit kann durch kein philosophisches Argument ausgeräumt werden. Wir müssen offenbar damit leben, den Skeptizismus nicht direkt widerlegen zu können.

Vielleicht ergeht es uns ja eines Tages so wie dem Computerhacker Neo, und wir müssen erfahren, dass wir bisher alle nur in einer Scheinrealität gelebt haben. Die Möglichkeit einer Täuschung können uns Philosophen leider nicht völlig nehmen. ☹

DIE AUTORIN



Elke Brendel ist Professorin für Philosophie und Inhaberin des Lehrstuhls für Logik und Grundlagenforschung an der Universität Bonn. Sie studierte Philosophie an der Universität in Frankfurt am Main. 1991 promovierte sie mit einer logisch-sprachphilosophischen Arbeit über semantische Paradoxien und habilitierte sich 1998 an der FU Berlin über den Wahrheits- und

Wissensbegriff in der modernen analytischen Sprach- und Erkenntnistheorie. Ihre Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen der philosophischen Logik und Argumentationstheorie sowie der modernen Erkenntnis- und Sprachphilosophie.

QUELLEN

Baggott, J.: Matrix oder wie wirklich ist die Wirklichkeit. Rowohlt, Reinbek 2007

Brendel, E.: Wahrheit und Wissen. Mentis, Paderborn 1999

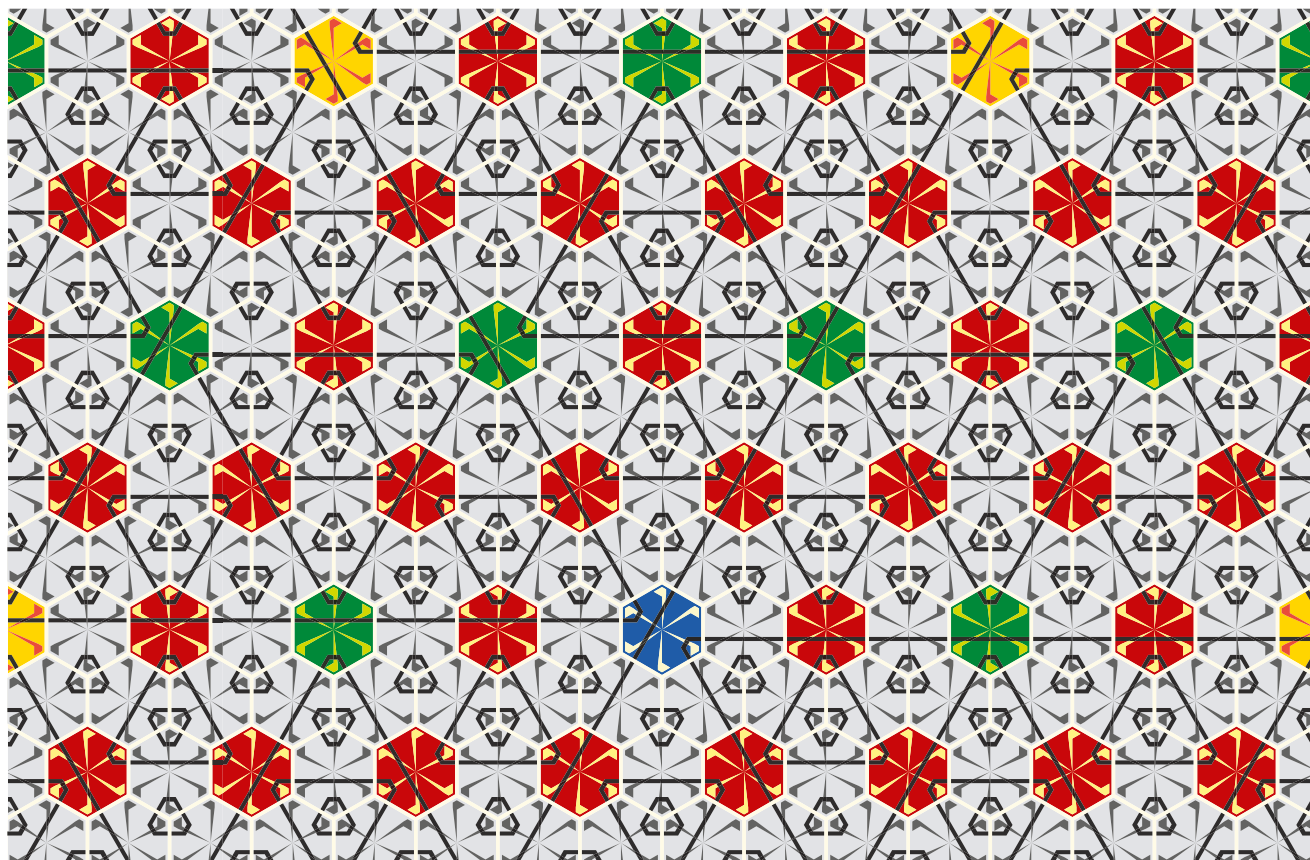
Gabriel, M.: Antike und moderne Skepsis zur Einführung. Junius, Hamburg 2008

Grundmann, T., Stüber, K. (Hg.): Philosophie der Skepsis. Schöningh, Paderborn 1996

Klein, P.: Beitrag »Skepticism« in der Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/entries/skepticism>

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067446



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: JOSHUA SOCCAR

Die sechseckigen, mit einem Muster versehenen Steine, die hier die Ebene bedecken, sind alle kongruent, allerdings unterschiedlich orientiert. Die – im Prinzip entbehrliche – Einfärbung ganzer Sechsecke kennzeichnet nur, in welcher Reihenfolge sie verlegt worden sind: zuerst die grauen, dann die roten, die grünen, die gelben und zum Schluss der blaue Stein. Die Regeln für das Anlegen von Steinen erzwingen die schwarzen Dreiecke in unbegrenzter Größe.

GEOMETRIE

Der sechseckige Einstein

Welche Kräfte müssen zwischen lauter gleichen elementaren Bausteinen wirken, damit sie sich zu einem Quasikristall zusammenfinden? Mit einem neuen Modell sind die Mathematiker einer Antwort ein Stück nähergekommen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Die Physiker entdecken etwas Neues – und flugs ziehen die Mathematiker die zugehörige Theorie aus der Schublade. Das kommt immer wieder vor; nicht etwa, weil die Mathematiker vorausahnen könnten, was die Physiker entdecken werden, sondern weil sie quasi auf Vorrat, durchaus auch spielerisch, neue Strukturen produzieren. Die

müssen sie auf die physikalische Entdeckung dann nur noch anpassen.

Ein besonders ansehnliches Beispiel für ein solches glückliches Zusammentreffen – bei dem der Vorsprung der Mathematiker sogar ziemlich knapp war – bieten die Quasikristalle. Atome lagern sich aus einer Schmelze oder einem Dampf an einen kleinen, festen

Kristallisationskeim an. Aber statt, wie bei gewöhnlichen Kristallen, einem periodischen, das heißt sich in gewissen Abständen exakt wiederholenden Schema, zu folgen, tun sie das auf eine so merkwürdige Weise, dass ihre Anordnung im fertigen Festkörper fünfzählig symmetrisch ist. Als die Physiker das im Röntgenbeugungsbild sahen, staun-

ten sie, denn eine fünfzählige Symmetrie ist unvereinbar mit jeder periodischen Struktur. Deswegen mussten sie diesen Festkörpern auch den neuen Namen »Quasikristalle« geben.

Genau so etwas hatten die Mathematiker aber schon vorrätig – fast. Am schönsten wäre es gewesen, wenn sie eine Anordnung aus lauter gleichen Einzelteilen gehabt hätten, die so gebaut sind, dass sie sich zwar zu einem fünfzählig symmetrischen, niemals aber zu einem periodischen Muster zusammensetzen lassen. Diesem Idealziel kamen sie ziemlich nahe: Es gelang ihnen, zwangsläufig nichtperiodische Muster zu finden, die aus nur zweierlei Bausteinen bestehen. Berühmt geworden sind die nichtperiodischen Parkettierungen der Ebene von Roger Penrose, deren Bausteine zwei Rauten mit einem Öffnungswinkel von 72 beziehungsweise 36 Grad sind (Bild unten). Es war übrigens Martin Gardner, der die Penrose-Parkette, damals noch in etwas komplizierterer Form, im »Scientific American« der Öffentlichkeit vorstellte und damit ein beträchtliches Echo auslöste (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/1979, S. 22).

Man könnte einfach lauter gleiche Penrose-Rauten – dicke oder dünne – parallel nebeneinandersetzen. Das ergibt eine periodische Struktur, entspre-

chend einem ganz gewöhnlichen Kristall. Um diesen langweiligen Fall auszuschließen, deformiert man die Kanten der Rauten so, dass nur gewisse Paare von Kanten zusammenpassen. Das geht am einfachsten mit Ausstülpungen und zugehörigen Einbuchtungen, wie sie auch die Teile der üblichen Puzzles zusammenhalten. Wer das nicht mag (das Gesamtbild wird nicht unbedingt schöner davon), bemalt die Oberfläche der Parkettsteine mit einem Muster (einer »Dekoration«) aus Linien und fordert, dass alle Linien über eine Kante hinweg eine Fortsetzung finden müssen.

Deformationen und Dekorationen – die nicht unbedingt aus Linien bestehen müssen – sind verschiedene Ausdrucksformen für so genannte *matching rules*, »Anlegeregeln«: Man darf einen Parkettstein nicht einfach irgendwie an ein entstehendes Parkett anlegen, sondern nur so, dass diese Regeln eingehalten werden.

Dekorieren mit Atomen

Anlegeregeln sind notwendigerweise lokal, das heißt, sie betreffen nur einen Stein und seine unmittelbaren Nachbarn. Eine Vorschrift, die das Anlegen eines Steins von den Eigenschaften weiter entfernter Steine abhängig machen würde, wäre unphysikalisch: Wenn ein nichtperiodisches Parkett als mathe-

matisches Modell für einen Quasikristall dienen soll, dann entsprechen die Anlegeregeln den Anziehungs- und Abstoßungskräften zwischen einzelnen Atomen; und die sind im Allgemeinen von sehr kurzer Reichweite.

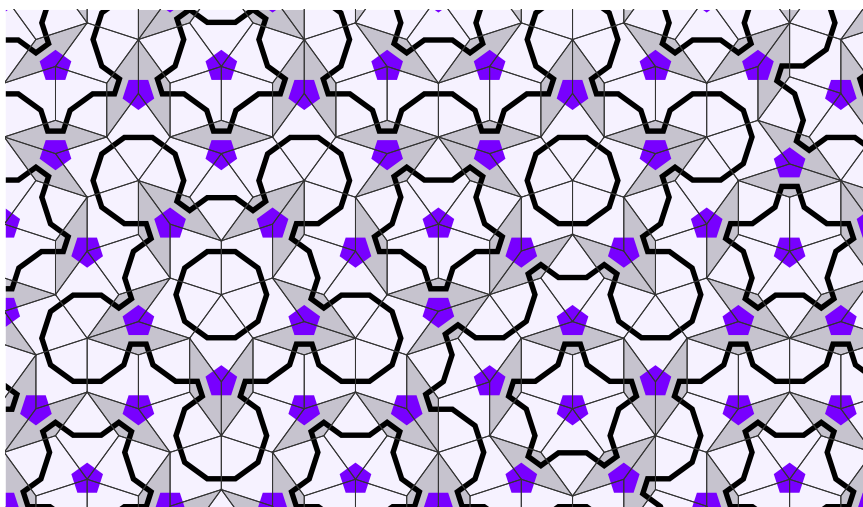
Ein Quasikristall entsteht ungefähr so, wie ein von Hand gelegtes Parkett wächst: Ein Atom nach dem anderen lagert sich den Anlegeregeln entsprechend an das dadurch wachsende Gebilde an. Erstaunlicherweise entsteht aus lauter lokalen Wechselwirkungen eine Struktur mit globaler Symmetrie – wenn es funktioniert. Gerade die Penrose-Muster sind hier heimtückisch, denn trotz streng regelgetreuen Anlegens können Konflikte auftreten, das sind Stellen, an denen kein Stein mehr passt. Dann muss man Teile des bereits gelegten Parketts wieder herausreißen und anders anlegen, damit der Kristall überhaupt weiterwachsen kann.

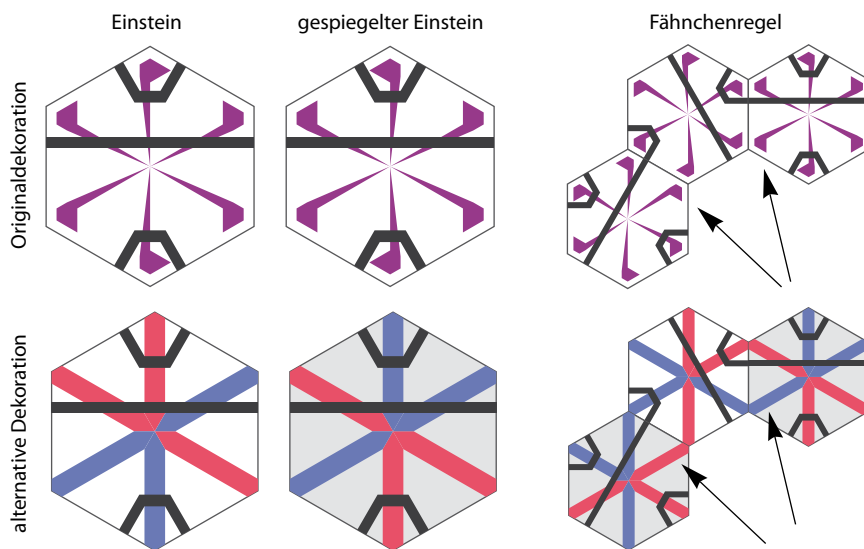
Übrigens kommt niemand auf die abwegige Idee, einzelne Atome seien in irgendeinem Sinn rautenförmig. Damit aus einer nichtperiodischen Parkettierung ein brauchbares Modell eines Quasikristalls wird, muss man jeden Stein in physikalisch sinnvoller Weise durch eine Anordnung aus mehreren Atomen ersetzen – »mit Atomen dekorieren«, sagen die Fachleute.

Die Physiker hätten nicht unbedingt ein Problem damit, wenn ein Modell eines echten Quasikristalls aus zwei verschiedenen Bausteinen bestünde. Aber die Mathematiker suchen ja immer nach Möglichkeiten, eine bestimmte Wirkung mit möglichst einfachen Mitteln zu erreichen. Zwei Steine sind schon gut, ein einziger wäre besser. Deswegen ist es für sie eine natürliche Frage, ob es einen einzelnen Baustein gibt mit der Eigenschaft, dass unendlich viele Exemplare von ihm lückenlos die Ebene bedecken, eine solche Bedeckung aber nie periodisch ist, das heißt, sich auch in beliebig großen Abständen nie exakt wiederholt. Die deutschen Quasikristallforscher nennen einen solchen Baustein – das Wortspiel drängt sich auf – einen »Einstein«.

Mit diesem Problem haben sich die Freunde der nichtperiodischen Parket-

Durch Dekoration der dünnen (grauen) und der dicken (hellgrauen) Penrose-Raute sowie die Forderung, dass die Musterung sich über Steingrenzen hinweg fortsetzen muss, wird eine nichtperiodische Parkettierung erzwungen.





Der Einstein von Socolar und Taylor trägt schwarze Streifen (einen Bandwurm und zwei Eckwürmer), die sich über Steingrenzen hinweg fortsetzen müssen. Die beiden Fähnchen, die in der Verlängerung einer Kante liegen, müssen in die gleiche Richtung weisen (Pfeile). In der alternativen Dekoration (unten) müssen die Farbbalken in der Verlängerung einer Kante verschiedenfarbig sein.

te jahrelang erfolglos herumgeschlagen, jedenfalls was die Ebene angeht; in den drei Dimensionen des Raums sieht die Sache etwas anders aus (siehe unten). Vor Kurzem haben nun zwei ungleiche Partner zusammen eine Lösung ausgearbeitet: der Physiker Joshua E. S. Socolar von der Duke University in Durham (North Carolina) und Joan M. Taylor, die in Burnie auf der australischen Insel Tasmanien lebt und Mathematik als Hobby betreibt.

Der Einstein hat sechs Ecken

Die äußere Form des Einsteins von Socolar und Taylor ist alles andere als sensationell: Es handelt sich um ein reguläres Sechseck, wie es auch die Bienen zum Wabenbau verwenden. Und genau wie die Bienenwaben bedecken auch diese Einsteine in kristalliner Regelmäßigkeit die Ebene. Aber diese Symmetrie wird alsbald durch die Dekoration gestört (Bild oben). Durch sie werden die verschiedenen Orientierungen des Steins unterscheidbar: sechs gegeneinander verdrehte Positionen plus deren Spiegelbilder.

Zur Dekoration gehören zwei Anlegeregeln. Die erste, die ich die »Streifenregel« nennen möchte, hält sich im

Rahmen des Üblichen: Die schwarzen Streifen – auf jedem Stein ein langer gerader »Bandwurm« und zwei kurze geknickte »Eckwürmer« – müssen über Steingrenzen hinweg aneinander anschließen. Die zweite, die »Fähnchenregel«, ist spezieller. Vom Zentrum jedes Sechsecks laufen sechs »Fähnchen« auf die Ecken des Sechsecks zu. Am oberen Ende jeder Stange weist ein Fähnchen in eine der beiden möglichen Richtungen. Schauen Sie sich im Bienenwabenmuster eine Kante zwischen zwei Sechsecken an. In ihrer Verlängerung liegt auf jeder Seite eine Fähnchenstange in einem weiteren Sechseck. Die Fähnchenregel fordert nun, dass die beiden zugehörigen Fähnchen in die gleiche Richtung weisen müssen.

Die Fähnchenregel verknüpft also zwei Steine, die keinen direkten Kontakt haben, sondern eine ganze Kantenlänge voneinander entfernt liegen, und ist damit nicht mehr ganz so lokal wie die bisher betrachteten Anlegeregeln. Es ist auch unmöglich, die Einhaltung dieser Vorschrift durch Deformation von Kanten zu erzwingen – es sei denn, man lässt zu, dass ein Stein aus mehreren unzusammenhängenden Teilstücken besteht.

Socolar und Taylor haben nun bewiesen, dass es erstens möglich ist, die ganze unendliche Ebene unter Einhaltung beider Anlegeregeln zu pflastern, und zweitens, dass jede derartige Pflasterung nichtperiodisch sein muss. Streng mathematisch formuliert: Die Annahme, es gebe eine (durch einen Verschiebungsvektor definierte) Parallelverschiebung, welche die gesamte Pflasterung auf sich selbst abbildet, führt auf einen Widerspruch.

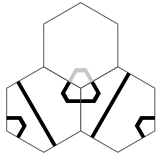
Wer ein solches Parkett konstruiert, kann den ersten Stein völlig nach Belieben hinlegen, denn es kommt ja nur darauf an, wie die Folgesteine relativ zum ersten Stein – und zueinander – liegen und orientiert sind. Socolar und Taylor legen nun nicht einfach den Anlegeregeln entsprechend weitere Steine irgendwie an den ersten an – was mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Konflikten führen würde. Vielmehr konstruieren sie ein Parkett auf sehr unkonventionelle Weise.

Sie füllen zunächst die Ebene mit leeren Sechsecken, was unproblematisch ist, denn der erste Stein bestimmt ohnehin eindeutig die Position aller anderen. Dann tragen sie deren Dekoration Schritt für Schritt nach. Dabei gibt es zwischendurch unvollständig dekorierte Steine, denen zum Beispiel der Bandwurm fehlt. Erst zum Schluss sind alle Sechsecke mit vollständigen Einsteinen gefüllt. Das ist zwar genau genommen erst nach unendlich vielen Schritten der Fall, aber »es konvergiert«, wie die Mathematiker sagen: Gegeben sei ein beliebig großes, aber endliches Teilstück der Ebene, dann lässt sich bestimmen, nach wie vielen – und zwar endlich vielen – Schritten dieses Teilstück vollständig gefüllt ist.

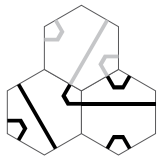
Für das Folgende ist es zweckmäßig, die Fähnchen in der Dekoration durch übersichtlichere Gebilde zu ersetzen. Aus einem Fähnchen, das – vom Mittelpunkt des Sechsecks aus gesehen – nach rechts weist, wird ein roter Balken, aus einem nach links weisenden ein blauer (Bild oben, untere Reihe). Die Fähnchenregel lautet nun: Die beiden Balken in der Verlängerung einer Kante müssen verschiedenfarbig sein. Beide Dekora-

Die Epidemie der schwarzen Kleinringe

Legt man die Einsteine von Socolar und Taylor regelgerecht aneinander, so entstehen zwangsläufig lauter Kleinringe aus drei Eckwürmern. Warum?



Entweder man legt Eckwurm an Eckwurm. Dann bleibt dem dritten Stein nichts anderes übrig, als die beiden durch einen dritten Eckwurm zum schwarzen Kleinring zu ergänzen. Denn ein Bandwurm am einem Ende eines Eckwurms würde dem anderen Ende jede Möglichkeit zur Fortsetzung nehmen.



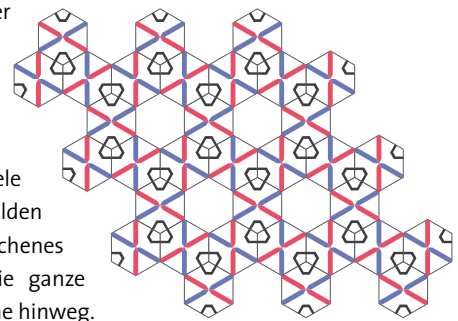
Oder man legt an das eine Ende eines Eckwurms einen Bandwurm. Dann muss man am anderen Ende ein Gleiches tun, weil ein dort angelegter Eckwurm keine Fortsetzung finden könnte. Die beiden Bandwürmer lassen zwischen sich nur noch Platz für zwei Eckwürmer und erzwingen damit einen Kleinring.

Ist ein Eckwurm an einem Kleinring beteiligt, so gilt das auch für den anderen Eckwurm auf demselben Stein. Der Kleinring im Bild rechts oben erzwingt einen roten vertikalen Balken



im linken unteren Stein. Wegen der Fähnchenregel muss der vertikale Balken im linken oberen Stein blau sein – zumindest in der unteren Hälfte. Gemischtfarbig könnte er nur sein, wenn ein Eckwurm am unteren Ende dieses Steins säße; der aber würde im zentralen Stein keine Fortsetzung finden. Also ist der Balken durchgehend blau. Folglich muss im linken oberen Stein ein Eckwurm dort sitzen, wo er an den oberen Eckwurm des zentralen Steins anschließt. Das erzwingt den nächsten Kleinring.

Ein einziger Kleinring erzwingt damit eine teilweise Dekoration für unendlich viele Steine. Diese bilden ein durchbrochenes Muster über die ganze unendliche Ebene hinweg.



tionen sind im Prinzip gleichwertig; nur muss man bei der neuen beim Spiegeln eines Steins die roten Balken durch blaue ersetzen und umgekehrt.

Jeder Stein wird nun von drei Durchmessern durchzogen, einem roten, einem blauen und einem gemischtfarbigen; letzterer trifft die beiden Eckwürmer. Unterstellen wir – entgegen allen zoologischen Fakten –, ein Eckwurm habe die Augen stets zum Mittelpunkt des Sechsecks gerichtet. Dann sieht er unter sich entweder einen roten oder einen blauen Balken. Aber das ist auch schon die einzige Abwechslung seines Lebens: Der Balken zu seiner Linken ist stets blau, der zu seiner Rechten stets rot, einerlei, ob der Einstein gespiegelt ist oder nicht.

Der erste Schritt zur Füllung der unendlichen Ebene folgt aus der Erkenntnis, dass schwarze Kleinringe aus drei Eckwürmern unvermeidlich sind. Einerlei ob man einen Eckwurm auf einem Stein mit einem Eckwurm oder einem Bandwurm auf dem Nachbarstein zusammenbringt, man ist früher oder später gezwungen, drei Eckwürmer zu einem Ring zusammenzulegen (Kasten oben). Mehr noch: Kleinringe sind wie

eine ansteckende Krankheit. Ist ein Stein von ihr befallen, das heißt, ist einer seiner Eckwürmer an einem Kleinring beteiligt, so erwischt es auch den anderen Eckwurm. Der steckt die beiden ihm benachbarten Steine an, und so weiter. Am Ende ist die ganze Ebene mit einem Muster aus Kleinringen überzogen. Die beteiligten Steine sind schon teilweise dekoriert; zwischen ihnen bleibt ein regelmäßiges Muster aus noch gänzlich leeren Sechsecken.

Was macht man mit diesen Löchern? Die überraschende Antwort: dasselbe wie zuvor mit der ganzen Ebene. Man nehme die bereits teildekorierten Steine vorübergehend weg und schiebe die verbleibenden leeren Steine zu einem geschlossenen Bienenwabenmuster zusammen. Dann dekoriere man irgendeinen dieser Steine mit einem Paar Eckwürmer plus dem dadurch erzwungenen Paar aus einfarbig blauem und einfarbig rotem Balken. Nach demselben Verfahren wie oben setze man diese teilweise Dekoration auf die Nachbarsteine fort. Dabei hat man gewisse Freiheiten, aber sehr bald erscheinen wieder Kleinringe und breiten sich epidemieartig über die ganze Ebene fort.

Nun schiebe man die derart teildekorierten Steine an ihre ursprünglichen Stellen (die »Löcher«) in der ersten Teildekoration zurück – und siehe da, es passt alles zusammen! Durch das Zurückschieben werden zwar die bis dahin aneinander anschließenden Würmer voneinander getrennt. Aber eine solche Lücke ist mit Leichtigkeit zu schließen, indem man über den dazwischenliegenden Stein einen Bandwurm legt. Ein Kleinring wird durch drei eingeschobene Bandwürmer zu einem Dreieck aufgeweitet.

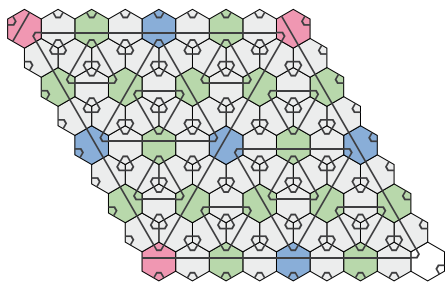
Wie beim ersten Mal bleiben auch beim zweiten Dekorationsschritt noch Löcher. Die werden im dritten Schritt aufgefüllt. Man setzt das Ergebnis des dritten Schritts in das des zweiten ein und dieses in das Ergebnis des ersten. Dabei entstehen Dreiecke, die zwischen je zwei Eckwürmern nicht nur einen, sondern drei Bandwürmer enthalten.

So geht es weiter, *ad infinitum*. Jeder Schritt füllt drei Viertel der jeweils noch verbleibenden Löcher – sozusagen: Wie viel drei Viertel von unendlich vielen Löchern sein sollen, ist nicht von vornherein klar, lässt sich aber in vernünftiger Weise definieren. Außerdem wer-

den in jedem Schritt unendlich viele teildekorierte Sechsecke durch Bandwürmer zu kompletten Einsteinen ergänzt. Im n -ten Schritt entstehen dadurch Dreiecke, deren Seiten $2^{n-1}-1$ Bandwürmer enthalten. Jedes Dreieck hat also ziemlich genau die doppelte Seitenlänge der Vorgängergeneration, und zwei derartige Dreiecke, gleich welcher Größe, überschneiden sich nie (Bild unten und Bild S. 73).

Das so entstehende Parkett kann unmöglich periodisch sein. Warum? Angenommen, es gebe eine Periode, also einen Verschiebungsvektor mit der Eigenschaft, dass das mit ihm verschobene Parkett mit dem ursprünglichen Parkett identisch ist. Da aber Dreiecke beliebig groß werden, gibt es ein Dreieck, dessen Seiten länger sind als dieser Vektor. Der Vektor kann dieses Dreieck nicht auf ein gleichartiges Dreieck abbilden, weil er dafür zu kurz ist (und Dreiecke sich nie überschneiden). Also kann er kein Periodenvektor sein, was zu beweisen war.

Bis jetzt haben Socolar und Taylor nur ein Verfahren angegeben, mit dem man nichtperiodische Parkette konstruieren kann. Dieses Verfahren gibt dem Konstrukteur in jedem Schritt sogar gewisse Freiheiten – den ersten Stein jedes Schritts darf er nach Belieben setzen –, gleichwohl sind alle so konstruierten Parkette nichtperiodisch. Es bleibt zu zeigen, dass dieses Verfahren unausweichlich ist. Das heißt: Gegeben sei ein unendliches Parkett aus



Mit vier Schritten ist dieser Ausschnitt der Ebene vollständig dekoriert – mit Ausnahme des Sechsecks in der rechten unteren Ecke. Der erste Schritt dekoriert – teilweise – die grauen Sechsecke, der zweite die grünen, der dritte die blauen und der vierte die roten.

sechseckigen Einsteinen, das an jeder Stelle die Anlegeregeln einhält, dann ist eine Ausprägung des Verfahrens zu finden, die dieses Parkett reproduziert. Socolar und Taylor haben gezeigt, dass und wie dies stets möglich ist, und damit bewiesen, dass ihr Einstein die Ebene nur nichtperiodisch pflastert.

Dreidimensionale Einsteine

Was haben nun die Quasikristall-Physiker von diesem Ergebnis? Zunächst gar nichts. Es ist noch nicht einmal klar, ob sie ein Socolar-Taylor-Parkett, sollten sie es in der realen Welt antreffen, als solches erkennen würden. Fünffach symmetrisch ist es nicht. Ob die Hierarchie der immer größer werdenden Dreiecke sich in der Röntgenbeugungsanalyse bemerkbar machen würde? Und überhaupt: Wie hat man sich Röntgenbeugungsanalyse in zwei Dimensionen vorzustellen?

Das ist ein grundsätzliches Problem: Parkette sind zweidimensional und daher nur sehr begrenzt geeignet, die Struktur dreidimensionaler Quasikristalle zu erklären. Wie das Prinzip des Socolar-Taylor-Parketts auf drei Dimensionen zu verallgemeinern wäre, ist unklar.

Andererseits ist in drei Dimensionen schon länger ein Einstein bekannt; er trägt die Namen seiner Erfinder Schmitt, Conway und Danzer. Aber von ihm haben die Physiker auch nichts, denn es ist so mühsam, allein durch die Form des Steins die Aperiodizität zu erzwingen, dass seine Konstrukteure auf irgendwelche aus der Physik stammende Bedingungen keine Rücksicht nehmen konnten.

Aus dem Sechseck von Socolar und Taylor lässt sich ebenfalls ein dreidimensionaler Einstein machen, sogar einer mit traditionellen Anlegeregeln. Wie oben angedeutet, kann man in der Ebene zwar die Fähnchenregel auch durch geeignet deformierte Kanten realisieren, aber um den Preis, dass ein Parkettstein aus mehreren nicht zusammenhängenden Stücken besteht – was irgendwie albern wirkt. Dieses Problem lässt sich beim Übergang in die dritte Dimension elegant miterledigen. Was

»an der Oberfläche« aus mehreren Inseln besteht, kann »unter Wasser« durch geeignete Stege verbunden sein. Diese kann man so gestalten, dass die Stege zweier benachbarter Einsteine einander nicht in die Quere kommen. An Stelle eines Parketts erhält man also eine ganze Schicht »angedeckter« Einsteine; und man kann den ganzen Raum füllen, indem man unendlich viele derartige Schichten aufeinanderstapelt. Nur physikalisch ist das auch nicht. Die Vorstellung, ein Socolar-Taylor-Einstein könnte ein Modell für einen echten Cluster aus Atomen sein, ist abwegig.

Nein, dieses Ergebnis kommt zunächst in die Vorratsschublade, aus der sich die Physiker in ungewisser Zukunft vielleicht mit Erfolg bedienen können. Derweil werden die Mathematiker ihre an diesem Problem entwickelten Ideen verfeinern und verallgemeinern – und möglicherweise auf diesem Weg zur Theorie der Quasikristalle etwas physikalisch Relevantes beitragen. ~

DER AUTOR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Senechal, M.: The SCD (Schmitt-Conway-Danzer) Tile. In: Quasicrystals and Geometry, Kapitel 7.2. Cambridge University Press, Cambridge 1995

Socolar, J. E. S., Taylor, J. M.: An Aperiodic Hexagonal Tile. September 2010. Eingereicht bei Journal of Combinatorial Theory Series A. Online unter <http://arxiv.org/abs/1003.4279>

Socolar, J. E. S., Taylor, J. M.: Forcing Nonperiodicity with a Single Tile. Eingereicht bei Mathematical Intelligencer. Online unter <http://arxiv.org/abs/1009.1419>

Socolar, J. E. S.: Hexagonal Parquet Tilings: k -isohedral Monotiles with Arbitrarily Large k . In: The Mathematical Intelligencer 29, S. 33–38, 2007. Online unter <http://arxiv.org/abs/0708.2663>

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067489

Tropisches Regenband auf Nordkurs

Die meisten Niederschläge auf der Erde fallen in einem schmalen Gürtel nahe dem Äquator. Synchron zur Erderwärmung ist diese tropische Starkregenzone in den vergangenen 200 Jahren deutlich nach Norden gewandert. Mit zunehmendem Klimawandel dürfte sie sich noch weiter vom Äquator entfernen – mit dramatischen Folgen für die Landwirtschaft der Entwicklungsländer in den Tropen.

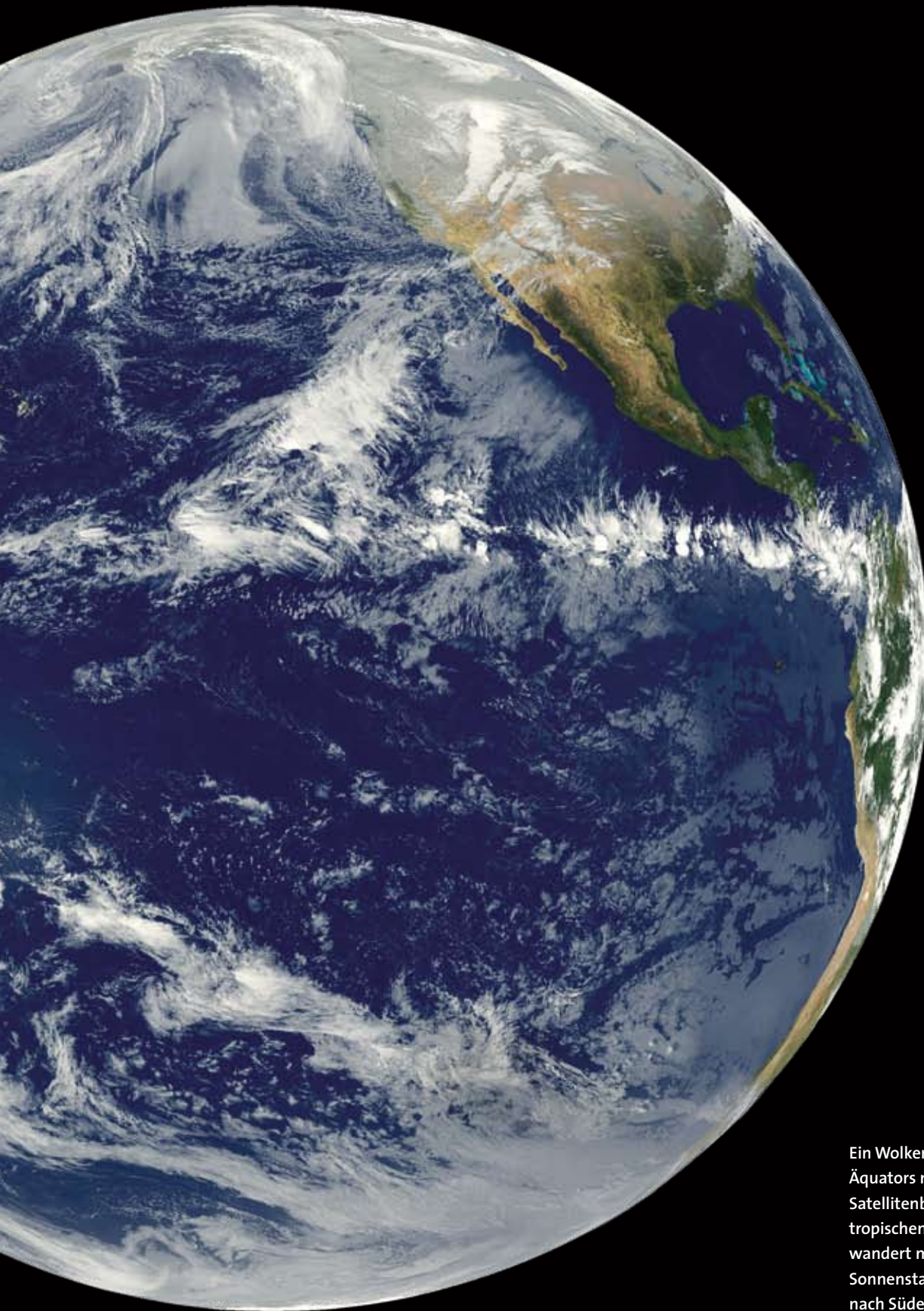
Von Julian P. Sachs und Conor L. Myhrvold

AUF EINEN BLICK

NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG GEFÄHRDET LANDWIRTSCHAFT

- 1** Knapp nördlich des Äquators zieht sich ein Regenband rund um den Erdball, das tropische Regionen mit reichlich Niederschlägen versorgt. Seine genaue Position hängt von der mittleren globalen Lufttemperatur ab.
- 2** Analysen von Sedimenten in den Seen pazifischer Inseln zeigen, dass das Band derzeit so weit nördlich verläuft wie nur einmal zuvor – während der mittelalterlichen Wärmephase – in den letzten 1200 Jahren. Seit dem Ende der kleinen Eiszeit vor knapp 200 Jahren hat es sich um fünf Breitengrade nach Norden verlagert, was rund 550 Kilometern entspricht.
- 3** Setzt sich die Erderwärmung durch den vom Menschen verursachten Ausstoß von Treibhausgasen im heutigen Tempo fort, dürfte sich das Band bis zum Ende des Jahrhunderts um weitere fünf Grad nach Norden verschieben.
- 4** In einigen Ländern Südamerikas und Südostasiens sanken dadurch die Regenfälle, was die Landwirtschaft und damit die Nahrungsmittelproduktion beeinträchtigen würde. Auch die Produktion wirtschaftlich wichtiger Exportgüter wie Kaffee und Bananen wäre betroffen.





NOAA-NASA GOES PROJECT

Ein Wolkenstreifen nördlich des Äquators markiert auf diesem Satellitenbild die Lage des tropischen Regenbands. Es wandert mit dem variierenden Sonnenstand im Jahresverlauf nach Süden und Norden. Den dabei überstrichenen Bereich nennen Meteorologen innertropische Konvergenzzone (ITCZ).

Um zwei Uhr nachts setzte plötzlich der Bordmotor aus. Unser Entschluss, in einem kleinen Fischerboot von den Marshallinseln im Nordpazifik aufs offene Meer hinauszufahren, erschien uns da auf einmal gar nicht mehr so klug. Zum Glück ging das Abenteuer glimpflich aus. Diese Bootsfahrt war nur eine von vielen Exkursionen, die uns helfen sollten, auf den ersten Blick unmöglich Scheinendes zu erreichen: über einen ganzen Ozean hinweg die Geschichte der Regenfälle bis in eine ferne Vergangenheit zurückzuverfolgen. So wollten wir herausfinden, wie sich ansteigende Lufttemperaturen, hervorgerufen durch die stetige Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre, auf die Niederschläge in den Tropen auswirken werden. Für diesen Zweck sind wir kreuz und quer durch den Pazifik zu unzähligen Inseln gereist.

Das Hauptniederschlagsgebiet unseres Planeten liegt in den Tropen, wo es sich wie ein Gürtel um den Erdball zieht. Dieser wandert im Jahresverlauf, dem Stand der Sonne folgend, nach Norden oder Süden. Der Bereich, in dem er sich bewegt, heißt fachsprachlich innertropische Konvergenzzone (ITCZ).

Jede Erwärmung oder Abkühlung der Erde durch Treibhausgasen oder durch eine Änderung der Sonnenintensität kann die Lage dieses Regenbands beeinflussen, das den Niederschlag für die Landwirtschaft in den Tropen liefert. Seine Position spielt auch eine entscheidende Rolle für die Monsune Ostasiens, Afrikas und Indiens. Eine permanente Verlagerung würde die Lebensbedingungen in den Tropen daher

drastisch beeinflussen – mit weltweiten Folgen. Zudem hätte sie Auswirkungen auf die Stärke und Dauer der Wirbelsturm-saison im Atlantischen, Pazifischen und Indischen Ozean.

Bis vor Kurzem wussten Klimaforscher nicht, ob die Spanne, in der sich die Bandmitte derzeit über das Jahr hinweg bewegt – zwischen 3° und 10° N über dem Pazifik –, mit der in früheren Zeiten übereinstimmt. Unsere Untersuchungen lieferten nun jedoch Informationen über die Position der ITCZ seit dem Jahr 800 n. Chr. Demnach hat sie sich in den letzten vier Jahrhunderten um fünf Grad nach Norden verlagert, was immerhin rund 550 Kilometern entspricht. Schon eine relativ geringe Zunahme der Temperatur kann die Regenfälle in den Tropen also erheblich beeinflussen.

Auch Vorhersagen sind nun möglich – etwa über die weitere Verlagerung der ITCZ bei fortgesetzter Erderwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts. Daraus ergeben sich Prognosen für die Regenfälle in den äquatornahen Zonen der Erde und für die Niederschlagsmenge in höheren Breiten Asiens und Mittelamerikas sowie im Südwesten der USA. Einige Gegenden profitieren wahrscheinlich, aber viele andere werden sich wohl auf Dürren einstellen müssen.

Vor unseren Untersuchungen gab es kaum Daten über die Position der ITCZ während der letzten 1000 Jahre. Das Regenband wabert um den Äquator herum und kann dabei je nach den lokalen Bedingungen und dem jahreszeitlichen Sonnenstand einige Dutzend bis mehrere hundert Kilometer breit sein. Über dem Pazifik ist es besonders stark ausgeprägt, weshalb sich anbot, dort seine Bewegung im vergangenen Jahr-

Algen als Regenmesser

Algen beziehen all ihren Wasserstoff aus dem Wasser, in dem sie leben. Nach ihrem Tod lagern sie sich am Gewässergrund ab und werden im Sediment eingebettet. Misst man in den Lipiden ihrer Zellmembranen die Konzentration der beiden stabilen Wasserstoffisotope Deuterium (D) und Protium (H), so kann man berechnen, wie viel Regen zu Lebzeiten der Algen gefallen ist.

Das D/H-Verhältnis vieler Algen hängt direkt mit dem des umgebenden Wassers zusammen, das seinerseits die Relation zwischen Niederschlag und Verdunstung im betreffenden See widerspiegelt. Beim Verdampfen von Wasser gehen Moleküle mit dem leichteren Protium bevorzugt in den gasförmigen Zustand über, weshalb sie im Niederschlag angereichert sind. Innerhalb des tropischen Regenbands regnet es oft und kräftig. Deshalb überwiegt der Niederschlag die Verdunstung, und das D/H-Verhältnis im Seewasser ist niedrig. Außerhalb des Bands, wo weniger Niederschlag fällt, gilt das Umgekehrte. Aus diesem Grund gibt das variierende D/H-Verhältnis in den Lipiden von Algen aus tiefen Sedimentschichten Aufschluss über die früheren Regenfälle.

Hinzu kommt, dass für das D/H-Verhältnis dieser Lipide auch der Salzgehalt des Wassers eine Rolle spielt. Seinen Einfluss

konnten die Autoren berücksichtigen, weil die speziellen Bedingungen auf der Weihnachtsinsel ein natürliches Experiment geschaffen haben, das eine Kalibrierung erlaubte. Dort gibt es eine Reihe von Teichen mit vergleichbaren Temperaturen, Lichtbedingungen, Nährstoffkonzentrationen und D/H-Verhältnissen im Wasser, aber stark unterschiedlicher Salinität.

Die Autoren stellten fest, dass das D/H-Verhältnis der Lipide von Zyanobakterien (»Blualgen«) linear mit dem Salzgehalt zunimmt. Dieser sinkt bei reichlich Niederschlag und steigt bei Trockenheit. Insofern beeinflusst er das D/H-Verhältnis der Lipide in gleicher Richtung wie die Regenmenge, was dieses Verhältnis zu einem noch empfindlicheren Maß für den hydrologischen Wandel macht.

Für sich allein sind die Niederschlagswerte allerdings so gut wie nutzlos. Sie müssen datiert werden. Das Alter eines Sediments bestimmten die Autoren anhand zweier radioaktiver Isotope: Kohlenstoff-14 und Blei-210, deren Halbwertszeiten 5730 beziehungsweise 22,3 Jahren betragen. Aus dem Wasserstoffisotopenverhältnis zu verschiedenen Zeitpunkten ließen sich so Veränderungen des Niederschlags in den vergangenen 1200 Jahre rekonstruieren.

Mit einem Stahlrohr gewinnen Forscher einen Sedimentbohrkern vom Grund eines Sees auf der zu den Marshallinseln zählenden Lib Island (links). Um von einem aufrecht gehaltenen, langen Bohrkern noch am Ort der Probennahme dünne Scheiben abzuschneiden und für die spätere Analyse einzutüteten, ist es praktisch, auf Bäume zu klettern (rechts).



MITFOTOGRAFEN VON CONOR L. MYHRVOLD

tausend zu verfolgen. Trends in diesem Raum sollten, weil das Regenband die ganze Erde umspannt, für die ITCZ insgesamt gelten.

Wissenschaftler können auf vielerlei Weise die Vergangenheit rekonstruieren. So lässt sich ein historisches Profil der weltweiten Treibhausgase aus Luftblasen erstellen, die in Eisproben aus den Polarregionen eingeschlossen sind. Zudem liefert das Isotop Beryllium-10 in Eisbohrkernen – ebenso wie der Anteil von Kohlenstoff-14 in Baumringen – Informationen über die einstige Sonnenintensität. Es ist auch gelungen, den Verlauf der globalen Mitteltemperatur über mehr als ein Jahrtausend zurückzuverfolgen. Demnach herrschten um das Jahr 800 etwa dieselben Klimabedingungen wie im späten 18. Jahrhundert. Während der mittelalterlichen Wärmephase (800–1200 n. Chr.) lagen die Temperaturen ähnlich hoch wie im 20. Jahrhundert. In der kleinen Eiszeit (1400–1850 n. Chr.) sanken sie dagegen stark ab.

In den letzten zwei Jahrzehnten blieb die Strahlungsintensität der Sonne im Wesentlichen konstant. Trotzdem sind sowohl die globale Mitteltemperatur als auch der Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxid (CO₂), dem häufigsten von der Menschheit freigesetzten Treibhausgas, in dieser Zeit auf Werte geklettert, die deutlich über denen in den vergangenen 1200 Jahren liegen.

Als wir unsere Arbeit begannen, war allerdings nur wenig über das frühere tropische Klima bekannt. Sedimente am Meeresboden sind zwar ausgezeichnete Klimaarchive, was Zeiträume von Jahrtausenden betrifft. Sie lagern sich jedoch zu langsam ab, um detaillierte Informationen über kürzere Intervalle zu liefern. Viele Korallenstöcke wiederum erzeugen jährliche Bänder ähnlich Baumringen. Da sie aber selten länger als 300 Jahre leben, geben sie keinerlei Auskunft über die Zeit vor 1700.

Die Kartierung der einstigen Regenfälle sollte uns die ITCZ-Position im vergangenen Millennium verraten. Nieder-

schlag, der im Meer gelandet ist, lässt sich natürlich später nicht mehr bestimmen. Über den Pazifik sind jedoch viele kleine Inseln verstreut. Auf ihnen gibt es Seen und Teiche, die einen Blick in die Vergangenheit erlauben. In den letzten sechs Jahren haben wir Dutzende Sedimentbohrkerne vom Grund solcher Gewässer geborgen. Die aufgesuchten Inseln – darunter einige der entlegensten und exotischsten – liegen im gegenwärtigen Regenband beziehungsweise einige Breitengrade südlich und nördlich davon und sind über den gesamten Pazifik verteilt. Wo sich die ITCZ zu einer bestimmten Zeit befand, ergibt sich aus den Positionen der Orte, an denen es damals stark regnete. Eine synchrone Zu- und Abnahme der Niederschläge in Richtung Norden oder Süden weist auf eine allgemeine ozeanweite Verschiebung des Bands hin.

»Air Maybe« macht ihrem Namen alle Ehre

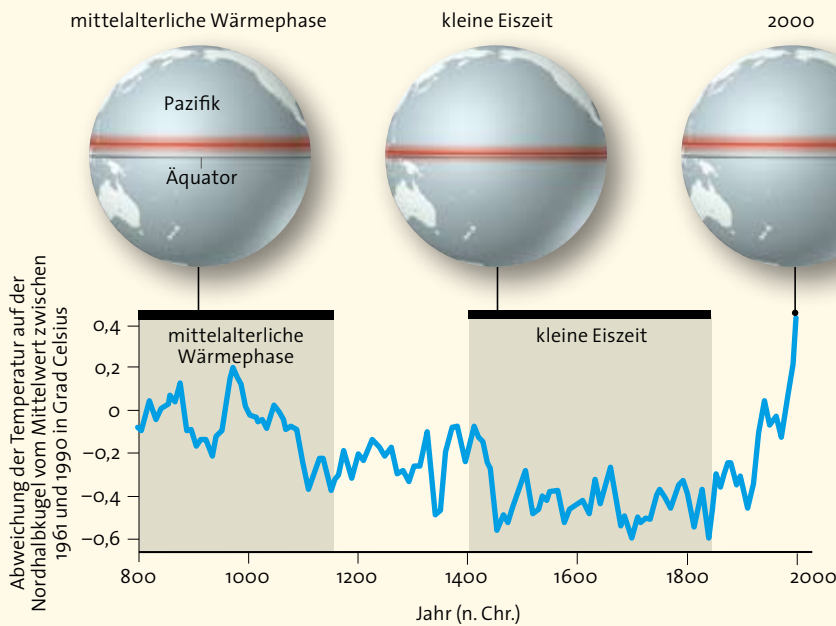
Feldstudien sind ein Abenteuer, und dazu gehören auch Rückschläge, Ausrüstungsprobleme, sprachliche Hürden sowie die Schwierigkeit, zu den Orten für vorgesehene Sedimentbohrungen zu gelangen. So waren bei unserer Ankunft in Majuro, der Hauptstadt der Marshallinseln, die beiden einzigen Flugzeuge der lokalen Luftfahrtgesellschaft Air Marshall Islands (von den Einheimischen scherzhaft »Air Maybe« genannt) gerade defekt. Deshalb entschlossen wir uns zu dem anfangs erwähnten zweitägigen Ausflug mit einem umgerüsteten Fischerboot, das allerdings wenig seetüchtig aussah und nichts Gutes ahnen ließ.

Um einen Sedimentbohrkern zu ziehen, müssen wir in der Regel zunächst zu Fuß durch Morast waten und über flache Gewässer rudern. Dabei stoßen wir einen langen Stab ins Sediment, um die Tiefe festzustellen und herauszufinden, ob dort Hindernisse wie große Gesteinsbrocken, alte Korallen oder Wurzeln lauern. Wenn das nicht der Fall ist, pressen, rammen und drehen wir ein langes Rohr in den Boden und ziehen es samt Inhalt wieder heraus.

Die Wanderung des Regenbands mit der Temperatur

Die **innertropische Konvergenzzone (ITCZ, rot)** zieht sich wie ein Gürtel um die Erde. Sie entsteht, weil die äquatorialen Gewässer von der Sonne stark aufgeheizt werden. Das verdunstende Wasser steigt mit der warmen Luft auf, kondensiert in der Höhe und fällt als Regen wieder zu Boden. Außerdem sorgen die aufsteigenden Luftmassen für niedrigen Luftdruck. Das ruft die zum Äquator gerichteten Passatwinde sowie nördlich und südlich davon riesige Hochdruckgebiete hervor. Über sie hinweg wird die in den Tropen aufsteigende Luft bis in die gemäßigten Breiten geführt, wo sie im Wechselspiel mit kalter Polarluft für

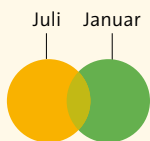
das typische unbeständige Wetter sorgt. Die erhöhten Temperaturen auf der Nordhalbkugel während der mittelalterlichen Warmephase haben das Regenband nach Norden wandern lassen (links); wegen der kühleren Witterung in der nachfolgenden kleinen Eiszeit ist es nach Süden zurückgekehrt. Heute verläuft es wieder mindestens genauso weit nördlich wie im Mittelalter. Die prognostizierte Anreicherung von menschengemachten Treibhausgasen in der Atmosphäre könnte bewirken, dass sich die ITCZ bis Ende des Jahrhunderts um weitere fünf Grad nach Norden verlagert.



Folgen: Bei einer Verschiebung des Regenbands um weitere fünf Grad nach Norden würden hunderte Millionen Menschen nahe dem Äquator in die angrenzende Trockenzone geraten. Die Subsistenzlandwirtschaft sowie die Kaffee- und Bananenplantagen in Ecuador, Kolumbien, dem nördlichen Indonesien und Thailand fielen der Dürre zum Opfer – von der Artenvielfalt ganz zu schweigen. Einige Staaten wie Guam und El Salvador, die sich zum ersten Mal in dem Band befänden, bekämen dafür mehr Regen ab. Schwere Dürren im Südwesten der USA dürften zur Regel werden.

Jahreszeitliche Schwankung: Die Mittellinie des Regenbands, die durchschnittlich bei 7° N liegt, variiert mit dem Sonnenstand zwischen etwa 3° N im nördlichen Winter (grün) und 10° N im Sommer (orange). In manchen Regionen hat das Band größere Ausbuchtungen. Bohrproben von Seesedimenten auf den hier verzeichneten und vielen weiteren Inseln gaben Aufschluss darüber, wo und wann in der Vergangenheit kräftiger Regen fiel. Daraus ließ sich auf frühere Positionen des Regenbands schließen.

tropische Regionen, in denen zwischen 1979 und 2005 im Mittel mehr als 200 Millimeter Regen pro Monat fiel



ILLUSTRATIONEN: GEORGE RETSECK, NACH NODA; TEMPERATUR-DIAGRAMM: JEN CHRISTENSEN, NACH MICHAEL E. MANN ET AL.; PROXY-BASED RECONSTRUCTIONS OF HEMISPHERIC AND GLOBAL SURFACE TEMPERATURE VARIATIONS OVER THE PAST TWO MILLENNIA. IN: PNAS 105 (16), 2008, S. 13152-13157

Da sich Sediment mit sehr unterschiedlicher Geschwindigkeit ablagert, wissen wir nicht, wie tief wir bohren müssen. Im Allgemeinen reicht ein Meter Sediment mindestens einige hundert Jahre zurück. Auf Washington Island (Teraina), die zum südpazifischen Staat Kiribati gehört, zum Beispiel deckten neun Meter 3200 Jahre ab. Wenn möglich versuchen wir das Rohr bis zum Felsgrund vorzutreiben, der aus Vulkangestein oder Ablagerungen von Sand oder Korallen aus der Zeit vor der Entstehung des Sees besteht. Auf diese Weise können wir ein Maximum an Information aus dem lokalen Klimaarchiv gewinnen.

So gut wie jeder unserer Bohrkerne wies eine individuelle Sedimentfolge auf. Manchmal waren meterdicke hellrote, gallertartige Schichten erhalten, die aus Zyanobakterien bestanden. Das galt etwa für die Probe aus dem Untergrund eines Sees auf Washington Island. In anderen Fällen bestand das Sediment aus braunem Schlamm, der reich an Schwefelwasserstoff war (also bestialisch stank) und Reste von Mangrovenblättern enthielt. Ab und zu fand sich auch eine Schicht mit zweischaligen Muscheln – so auf einer Insel des Staates Palau.

Obwohl es uns um die Rekonstruktion früherer Regenfälle ging, mussten wir zunächst die Eigenschaften des jeweiligen Ökosystems unter den heutigen Klimabedingungen erfassen. Nur so konnten wir beurteilen, was die analogen Messwerte in der früheren Umwelt über die damaligen Niederschläge verrieten. Deshalb nahmen wir Wasserproben aus verschiedenen Tiefen, um die chemische Zusammensetzung und das Wasserstoffisotopen-Verhältnis sowie die Algen- und Mikrobenpopulationen zu bestimmen. Mit dünnen Glasfaserfiltern fingen wir Plankton und Mikroben auf und lagerten sie zur Konservierung sofort auf Eis. Zudem sammelten wir Vegetationsproben aus der unmittelbaren Umgebung. Später wollten wir die Fettstoffe (Lipide) in den Zellhüllen analysieren.

Sorgsamer Umgang mit empfindlichen Bohrkernen

Nach dem Ziehen der Bohrkerne mussten wir dafür sorgen, dass sie unverfälscht ins Labor gelangten. Um eine Durchmischung der Sedimentschichten zu vermeiden, trennten wir die obersten Lagen, die besonders weich sind, in einen Zentimeter dicke Scheiben auf und steckten jede davon einzeln in ein markiertes Plastiktäschchen.

Mit Stapeln von Eiskisten voller Sediment-, Wasser- und Planktonproben sowie langen Pappkartons mit jenen Teilen der Bohrkerne, die nicht portioniert werden mussten, reisten wir nach unseren Expeditionen schließlich zurück zu unserem Labor an der University of Washington in Seattle. Dort maßen wir die beiden stabilen Wasserstoffisotope in den Lipiden der Algen, die sich in tiefen Schichten der Sedimente erhalten hatten, und bestimmten das Alter der Proben. So konnten wir auf die Regenmenge zu Lebzeiten der Organismen schließen (siehe Kasten auf S. 80).

Über die Jahre konnten wir die Karte der historischen Regenfälle und damit der einstigen ITCZ-Position mit immer

neuen Daten stetig präzisieren. Und wir forschen weiter: Die jüngste Expedition führte uns nach Kosrae in Mikronesien. Die Analyse der dort gesammelten Proben wird noch einige Monate in Anspruch nehmen. Doch schon jetzt zeigen die Resultate unserer früheren Fahrten, kombiniert mit Daten von Kollegen, dass sich geringfügige Änderungen im Wärmegehalt der Atmosphäre während der kleinen Eiszeit stark auf

die tropischen Regenfälle auswirkten. Damals ging die am Oberrand der Atmosphäre einfallende Sonnenenergie etwa 100 Jahre lang um nur zwei Promille zurück. Trotzdem wanderte die ITCZ rund 500 Kilometer weit nach Süden, Richtung Äquator. Dadurch trockneten feuchte Regionen wie der Palau-

Archipel aus, und vordem aride Zonen wie die Galapagosinseln erhielten reichlich Regen.

Diese Empfindlichkeit gegenüber geringen Temperaturänderungen verheißt für die Zukunft nichts Gutes. Den Projektionen des UN-Klimarats (IPCC) zufolge wird sich der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre – vor allem durch die Emissionen von Fahrzeugen und Kraftwerken – bis Mitte des Jahrhunderts verdoppeln und bis 2100 verdreifachen. Dadurch erwärmt sich die Atmosphäre zwei- bis dreimal so stark wie am Ende der kleinen Eiszeit, als die Sonne wieder heller strahlte.

Damals blieb die Mittellinie des Regenbands durchweg südlich von 5° N. Heute schwankt sie im Jahresverlauf zwischen 3° N und 10° N. Durch den menschengemachten Treibhauseffekt droht bis 2100 eine weitere Verlagerung um fünf Grad oder 550 Kilometer nach Norden – auf 8° N bis 15° N. Das würde die Niederschlagsverteilung in vielen Regionen drastisch ändern.

Für diese Prognose sprechen die Ergebnisse unserer Untersuchungen auf den Pazifikinseln. So fallen auf Washington Island, das bei 5° N liegt, heute im Jahr 3000 Liter Regen pro Quadratmeter. Vor 400 Jahren waren es – bei höheren Verdunstungsraten – weniger als 1000. Umgekehrt herrschten auf dem heute wüstenartigen Hochland der bei 1° S gelegenen Galapagosinsel San Cristóbal während der kleinen Eiszeit wesentlich feuchtere Bedingungen.

Archäologische Befunde bestätigen unsere Resultate. Demnach bauten die Bewohner Indonesiens und anderer Inseln im Südpazifik zwischen Anfang und Ende der kleinen Eiszeit deutlich mehr Wehranlagen. Der Grund dürfte sein, dass mit der Verschiebung des Regenbands nach Süden die Inseln im Norden austrockneten. Möglicherweise löste das eine Völkerwanderung aus, der die Bewohner der südlicheren Inseln mit Schutzmauern zu begegnen suchten.

Heutzutage verringern Entsalzungsanlagen und Schiffshandel die Abhängigkeit von Regenfällen. Dennoch würde eine Verlagerung des Regenbands um fünf Grad nach Norden Hunderte von Millionen Menschen gefährden, die nah am Äquator leben und ihre eigenen Nahrungsmittel anbauen – ganz zu schweigen von der Artenvielfalt in den Tropen. Viele Staaten innerhalb der aktuellen ITCZ sind Entwicklungslän-

Die Verlagerung des Regenbands löste eine Völkerwanderung aus

der, deren Bevölkerung in diesem Jahrhundert voraussichtlich stark zunehmen wird. Wahrscheinlich haben sie nicht die Mittel für die nötigen Anpassungen. Schwindende Regenfälle auf der einen Seite und zunehmende Überflutungen auf der anderen – beides innerhalb von Jahrzehnten oder sogar nur wenigen Jahren – würden die Landwirtschaft hart treffen. Da außerdem die Bevölkerung wächst, wären Nahrungsmangel und politische Unruhen die Folge. Letztendlich käme es vermutlich zu Wanderungsbewegungen großen Ausmaßes.

Ertragseinbrüche bei Kaffee und Bananen

Zu den Gebieten, die neu in der ITCZ lägen und mehr Niederschlag abbekämen, zählen El Salvador und Teile der Philippinen. Dafür würden die feuchten Gebiete im nördlichen Indonesien, in Malaysia, den südlichen Philippinen, Mikronesien, Thailand und Kambodscha aus dem Regenband herausfallen. Inwieweit ein stärkerer Monsun die dadurch ausbleibenden Niederschläge kompensieren könnte, ist eine offene Frage. Generell dürften diese Länder aber trockener werden. Pflanzenarten, die für die heutigen Wachstumsbedingungen ideal geeignet sind, würden nicht länger gedeihen. Kaffeepflanzen zum Beispiel brauchen – ähnlich wie Weinreben – zu Beginn der Wachstumsperiode viel Regen. Um verwertbare Bohnen zu entwickeln, benötigen sie insgesamt mehr als 1800 Liter pro Quadratmeter.

In Südamerika würden Ecuador und Kolumbien aus der ITCZ herausfallen und entsprechend trockener werden. Die wachsende Verstädterung könnte helfen, mit der neuen Lage zurechtzukommen; denn die Landwirtschaft verliert dadurch an Bedeutung. Kolumbien ist aber der drittgrößte Kaffeeproduzent der Welt, und weniger Niederschlag würde hier wie in Indonesien langfristig den Ertrag schmälern. Die meisten Anbaugelände, die südlich von 8° N liegen, dürften ab Mitte bis Ende des Jahrhunderts betroffen sein. Am stärksten bedroht sind ertragreiche Gebiete im Süden und an der Küste Kolumbiens, da sie am weitesten vom Regenband entfernt sein werden.

Auch die Zukunft von Ecuadors Bananenproduktion dürfte trüb aussehen. Gute Bananen benötigen hohe Temperaturen und 2000 bis 2500 Liter Regen pro Quadratmeter und Jahr. Aber Ecuador liegt heute schon südlich der ITCZ. Reicht der Niederschlag dort derzeit gerade noch aus, dürfte er durch die weitere Verlagerung des Regenbands bis zum Jahr 2100 auf 1000 Liter pro Quadratmeter sinken. Bananen ließen sich dann nicht mehr erzeugen. Ein Beispiel, wie schnell die Erträge einbrechen können, liefern die Philippinen. Dort produzierte ungefähr die Hälfte der Plantagen wegen einer ungewöhnlich langen Trockenzeit Anfang 2010 Früchte, die zu klein für die kommerzielle Verwertung waren.

In allen genannten Gebieten wäre auch die Subsistenzwirtschaft der Landbewohner betroffen. Als Folge käme es zu einer massiven Abwanderung in die Städte, wo zusätzliche Elendsviertel entstünden. Der Mangel an lokal erzeugten

Lebensmitteln müsste durch teure Einfuhren ausgeglichen werden.

Wenn das Regenband weiter so schnell nach Norden wandert wie in den letzten 400 Jahren, wirkt sich das auch auf die Niederschläge in den USA aus. Anzeichen dafür gibt es schon. So leidet der Südwesten der USA gerade unter einer schweren mehrjährigen Dürre, die bei ungebremster Emission von Treibhausgasen womöglich zur Norm im 21. Jahrhundert wird. Höhere Temperaturen und eine stetige Verlagerung des Regenbands drohen die nördlich daran anschließende subtropische Trockenzone, die sich derzeit über Nordmexiko erstreckt, in den Süden der USA zu verschieben.

Sichere Vorhersagen erfordern noch einige Arbeit. Die früheren und heutigen Muster der Regenfälle in den Tropen lassen sich am Computer bisher nicht präzise simulieren. Erst wenn Klimamodelle, welche Daten von Sedimentbohrkernen und anderen Quellen berücksichtigen, die in der Vergangenheit und Gegenwart beobachtete Niederschlagsverteilung exakt reproduzieren, lassen sich wirklich handfeste Prognosen erstellen. Unsere Kollegen an der University of Washington und andernorts arbeiten daran.

Wir hingegen werden weiterhin Sedimente von tropischen Inseln innerhalb der ITCZ sowie nördlich und südlich davon untersuchen, um die Position des Regenbands während des letzten Millenniums noch genauer zu bestimmen – als Basis für immer bessere Abschätzungen, wo die Niederschlagszone künftig verlaufen wird. ∞

DIE AUTOREN



Julian P. Sachs (links) ist Associate Professor für Ozeanografie an der University of Washington in Seattle. Sein Team arbeitet an der Entwicklung und Anwendung von Methoden, durch Analyse von Molekülen oder Isotopen

klimatische sowie geo- und biochemische Vorgänge während der letzten 2000 Jahre aufzuklären. **Conor L. Myhrvold** studiert Geowissenschaften an der Princeton University (New Jersey) und hat als Assistent von Sachs und Fotograf an den letzten Expeditionen teilgenommen.

QUELLEN

Field, J.S., Lape, P.V.: Paleoclimates and the Emergence of Fortifications in the Tropical Pacific Islands. In: *Journal of Anthropological Archaeology* 29, S. 113–124, 2010

Mann, M.E.: Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105, S. 13252–13257, 2008

Sachs, J.P. et al.: Southward Movement of the Pacific Intertropical Convergence Zone AD 1400–1850. In: *Nature Geoscience* 2, S. 519–525, 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067449

Die Jagd nach dem Quark-Gluon-Plasma

Schießt man die Kerne von Bleiatomen mit großer Energie aufeinander, entstehen im resultierenden Feuerball tausende neue Teilchen. Sie verraten den Forschern des ALICE-Experiments am Teilchenbeschleuniger LHC, was im Innersten der Materie vor sich geht – und enthüllen, wie das Universum kurz nach dem Urknall aussah.

Von Johanna Stachel und Peter Braun-Munzinger

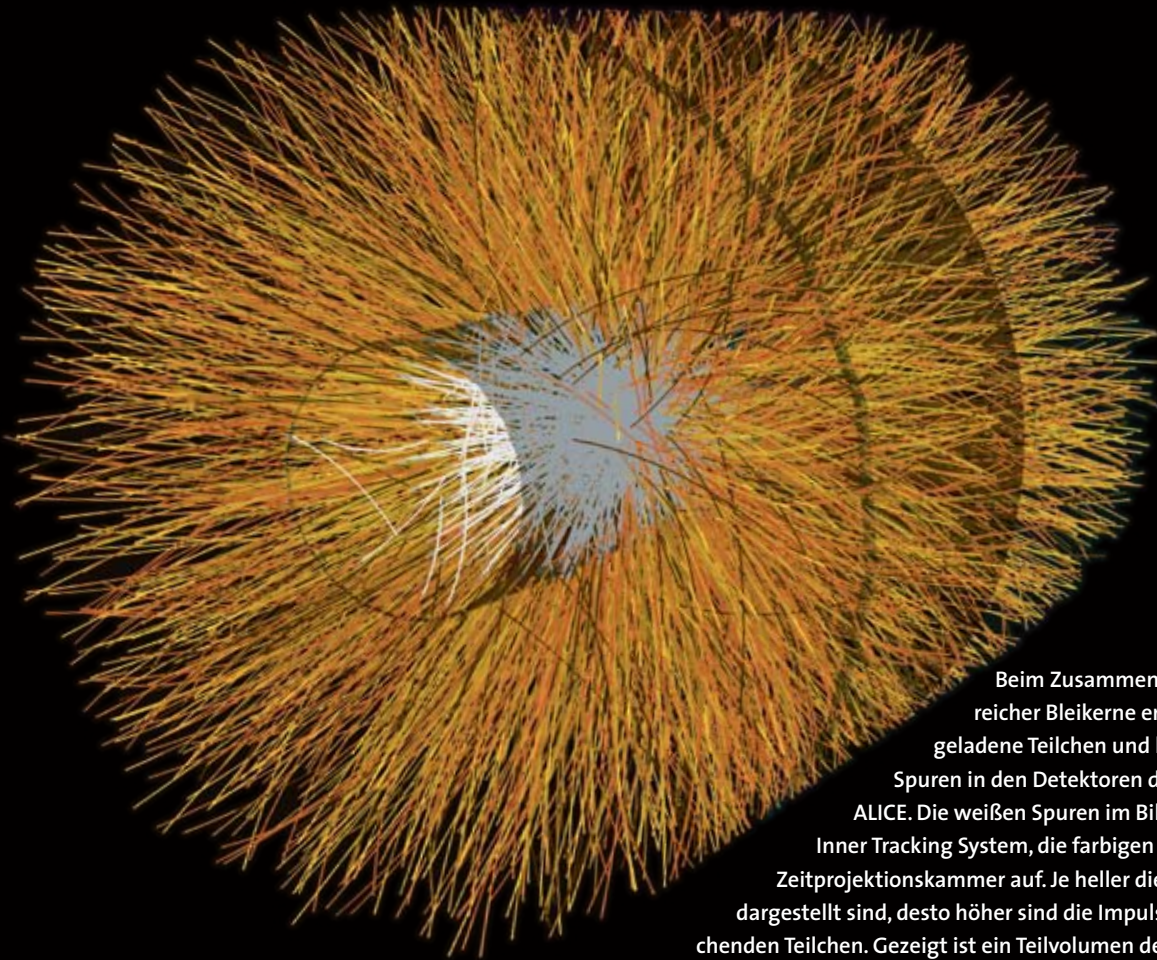
Am 8. November 2010 kurz nach 11 Uhr ist es so weit. Zum ersten Mal herrschen im Beschleuniger LHC stabile Bedingungen für Kollisionen von Bleikernen: Die Teilchenstrahlen sind so fokussiert, dass sie mit konstanter Rate aufeinanderprallen. Das ist das Signal für die Experten im Kontrollraum des ALICE-Experiments, ihre empfindlichen Messinstrumente einzuschalten. Wenige Minuten später startet die erste Messkampagne, bei der wir Kollisionen von schweren Atomkernen studieren können. Als sie vier Wochen später endet, wurden Daten für etwa 20 Millionen solcher Kollisionen registriert, gespeichert, an Rechenzentren in aller Welt verschickt und von den Wissenschaftlern des ALICE-Teams einer ersten Analyse unterzogen. Schon zu diesem Zeitpunkt haben internationale Fachzeitschriften erste Ergebnisse zur Veröffentlichung akzeptiert.

Der LHC (Large Hadron Collider) am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf ist der weltweit größte Beschleuniger. In seinem 27 Kilometer langen Ringtunnel prallen gegenläufige Teilchenstrahlen bei bisher un-

erreichten Energien und Intensitäten aufeinander. Während der kontinuierliche Betrieb mit Protonen, also Wasserstoffkernen, schon im November 2009 aufgenommen wurde, ließ die Beschleunigermannschaft rund ein Jahr später erstmals auch Bleikerne kollidieren. Das Messprogramm mit schweren Atomkernen wird über 1000 Wissenschaftler aus derzeit 33 Ländern mindestens während der nächsten Dekade in Atem halten.

Die erste Messkampagne war der vorläufige Höhepunkt einer Entwicklung, die vor gut 20 Jahren begonnen hatte. Bei einem Workshop am CERN diskutierten Forscher im Dezember 1990 erstmals über ein Experiment mit schweren Atomkernen. Damals war der LHC bereits in Planung, und die Physiker hofften, ab 1998 mit Protonen experimentieren zu können.

Dies erwies sich allerdings als allzu optimistisch. Als wir beide unsere Professuren an der Stony Brook University im US-Bundesstaat New York aufgaben und Weihnachten 1995 wieder nach Deutschland zogen, war der deutsche Teil des ALICE-Projekts noch sehr provisorisch organisiert. Immer-



Beim Zusammenstoß energiereicher Bleikerne entstehen tausende geladene Teilchen und hinterlassen Spuren in den Detektoren des Experiments ALICE. Die weißen Spuren im Bild stammen vom Inner Tracking System, die farbigen zeichnete die Zeitprojektionskammer auf. Je heller die farbigen Spuren dargestellt sind, desto höher sind die Impulse der entsprechenden Teilchen. Gezeigt ist ein Teilvolumen der Zeitprojektionskammer von etwa fünf Meter Länge und fünf Meter Durchmesser. Ein Magnetfeld entlang der Zylinderachse zwingt die Teilchen auf spiralförmige Bahnen.

CERN / ALICE KOLLABORATION

hin war klar, wer teilnehmen sollte: die Darmstädter GSI (das heutige GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung), sowie Institute an den Universitäten in Frankfurt, Heidelberg und Münster. Doch zu diesem Zeitpunkt verfolgte jeder dieser ebenso kompetenten wie selbstbewussten Partner noch seine eigenen technischen und experimentellen Ideen (von denen sich einige später als unrealisierbar herausstellten). Überdies mussten wir noch jahrelang darum kämpfen, dass zunächst ein Startbudget von 25 Millionen Mark, später dann insgesamt 20 Millionen Euro vom Bundesforschungsministerium bewilligt wurden. Als 1997 die wissenschaftlichen Gremien dem Bau von ALICE zugestimmt hatten, stand die Finanzierung noch keineswegs auf sicheren Beinen. Doch am Ende hatten wir uns zu einer starken Truppe zusammengerauft, in der alle am selben Strang zogen.

ALICE steht für »A Large Ion Collider Experiment«. Hier sollen also Strahlen aus Ionen oder auch »nackten« Atomkernen miteinander kollidieren. Dies sind Atome, die ihre Elektronen abgestreift haben, zum Beispiel beim schnellen Durchgang durch dünne Kohlenstofffolien. Je schwerer die Kerne

AUF EINEN BLICK

ZURÜCK BIS ZUM URKNALL

1 Am größten Teilchenbeschleuniger der Welt, dem LHC bei Genf, wurden Ende 2010 erstmals **Kerne von Bleiatomen** aufeinander geschossen. Teilchenphysiker vermuten, dass dabei ein **Quark-Gluon-Plasma** entsteht. Dieser Materiezustand entspricht dem Zustand des Universums unmittelbar nach dem Urknall.

2 Einer der vier LHC-Detektoren, **ALICE**, wurde eigens dazu entwickelt, die Eigenschaften des **Quark-Gluon-Plasmas** zu ermitteln. Die ersten Resultate überraschen. Sie stimmen nur teilweise mit dem überein, was frühere Experimente erwarten ließen.

3 Mit den Bleiexperimenten wollen Physiker den **tiefsten Geheimnissen der Materie** auf den Grund gehen. Denn die Bestandteile des Quark-Gluon-Plasmas sind vermutlich fundamentale, also nicht mehr weiter teilbare Teilchen.

sind, desto mehr Energie können sie in die Kollision einbringen. Daher bietet sich insbesondere eines der schwersten stabilen Elemente an: Blei, genauer – sein häufigstes stabiles Isotop Pb-208. Sein Kern besitzt 82 Protonen und 126 Neutronen, also insgesamt 208 Kernteilchen oder Nukleonen.

Protonen kann der LHC auf eine Energie von sieben Teraelektronvolt beschleunigen ($1 \text{ TeV} = 10^{12}$ Elektronvolt, siehe auch »Experimentieren am Limit«, SdW 9/2010, S. 34). Bei einem Zusammenprall zweier Protonen beträgt die Schwerpunktennergie (siehe Glossar S. 90/91) also $2 \cdot 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$. Kollidieren hingegen zwei Bleikerne mit je 208 Nukleonen, wirkt die beschleunigende Kraft nur auf deren elektrisch geladene Bestandteile, also auf jeweils 82 Protonen. Dadurch erreicht die Energie den Wert $82 \cdot 2 \cdot 7 \text{ TeV}$. Das sind 0,18 Millijoule und damit schon eine makroskopische Energie – genug, um ein Gummibärchen einen Zentimeter hochzuheben, wie einer unserer Mitarbeiter ausgerechnet hat.

Fände die Kollision nicht im Vakuum statt, könnte man den Zusammenstoß prinzipiell sogar hören. Die freigesetzte Energie führt zu einer ungeheuren Erhitzung der Kollisionszone, zu einem winzigen »Feuerball«. Dieser kühlt schnell wieder ab, und seine Energie materialisiert sich in Zehntausenden neu entstandener Teilchen, die man im Experiment aufspüren kann. Das Bild auf der vorigen Seite zeigt die »Aufnahme« einer solchen Kollision zweier Bleikerne.

Die Protonen und Neutronen in Atomkernen bestehen ihrerseits aus Quarks und Gluonen. Über die so genannte starke Wechselwirkung sind diese fundamentalen Teilchen extrem fest aneinandergebunden. Doch bei sehr hohen Tempe-

raturen oder auch bei sehr großer Dichte werden sie aus der starken Bindung befreit und bilden einen neuen Materiezustand, in dem sie sich sogar zu Gebilden mit makroskopischen Ausdehnungen formieren könnten. Über diese Möglichkeit hatten Physiker bereits 1975 spekuliert. Damals war die theoretische Beschreibung der starken Wechselwirkung, die so genannte Quantenchromodynamik (QCD), gerade einmal drei Jahre alt.

Schon Ende der 1970er Jahre erhielt der neue Materiezustand den Namen Quark-Gluon-Plasma (QGP). Denn er ähnelt in gewisser Weise einem elektromagnetischen Plasma. In einem solchen Plasma, das bei hoher Temperatur aus Atomen entsteht, können sich deren Bestandteile – elektrisch geladene Elektronen und Ionen – frei bewegen. Entsprechend besteht das QGP aus Quarks und Gluonen, die so genannte Farbladungen tragen. Zur Erzeugung eines elektromagnetischen Plasmas genügt es, die atomaren Bindungsenergien zu überwinden, die in der Größenordnung von mehreren Elektronvolt bis Kiloelektronvolt liegen. (Teilchenphysiker messen Temperaturen nicht in Grad Celsius, sondern in thermischer Energie; so entspricht Raumtemperatur etwa $1/40 \text{ eV}$.) Um ein QGP zu erzeugen, sind hingegen viel höhere Temperaturen nötig.

200 000-mal heißer als im Inneren der Sonne

Erstaunlicherweise hatten schon erste Abschätzungen vor rund drei Jahrzehnten recht zutreffende Werte für die kritische Temperatur ergeben, bei der Quarks und Gluonen aus den Nukleonen befreit werden. Sie beruhten auf der bei anderen Experimenten bestimmten Federspannung (*string tension*), die sich bemerkbar macht, wenn man Quarks auseinanderziehen will. In der Tat zeigen modernste so genannte Gitter-QCD-Rechnungen, in denen man die Gleichungen der QCD numerisch auf Supercomputern löst, dass die kritische Temperatur etwa 170 MeV entspricht. Das ist rund zehn Millionen Mal höher als die Temperatur, die man benötigt, um Wasserstoff zu ionisieren. Und immer noch 200 000-mal höher als die Temperatur im Inneren der Sonne.

Die Idee, dass man diese Temperaturen bei Kollisionen extrem energiereicher Atomkerne erzeugen könnte, führte in den USA bereits 1983 zu dem Vorschlag, einen speziellen Collider für schwere Atomkerne zu bauen. Dieser »Relativistic Heavy Ion Collider« RHIC ging im Jahr 2000 im Brookhaven National Laboratory (BNL) tatsächlich in Betrieb. Um die lange Wartezeit bis dahin zu überbrücken, führten Forscher aber schon ab 1986 sowohl am CERN als auch in Brookhaven Experimente durch, bei denen sie mit stark beschleunigten Kernen ruhende Zielmaterialien, so genannte stationäre Targets, bombardierten.

Bei diesen »Fixed-Target-Experimenten« erzielte man allerdings viel niedrigere Energien, am CERN aber immerhin viermal so hoch wie in Brookhaven. Der heutige RHIC übertrifft die Energie der Fixed-Target-Experimente am BNL schon um das 40-Fache, der LHC sogar um das 1150-Fache. Im Fall stationärer Targets wächst die Schwerpunktennergie näm-

Die Zeitprojektionskammer vermisst gleichzeitig bis zu 15 000 Teilchenspuren. Auf dem Zylinder-»Deckel« (Foto) des Instruments sitzt neben komplexer Ausleseelektronik auch deren Wasserkühlung, die gerade von einem Mitarbeiter des ALICE-Teams überprüft wird.



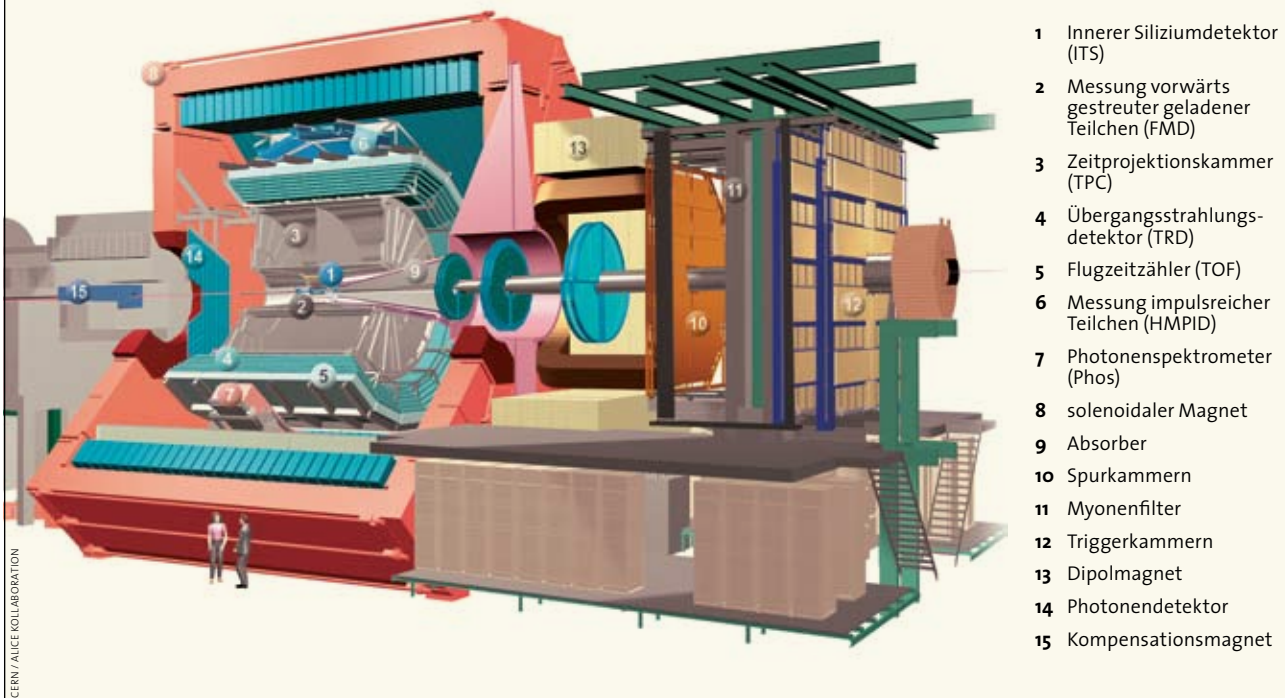
CERN/ANTONIO SABA

Der Aufbau des ALICE-Experiments

Beim Anblick von ALICE fällt zunächst der riesige Magnet auf (8). Zum Glück mussten wir für ihn nichts bezahlen: Wir konnten ihn vom CERN-Experiment L3 übernehmen. Dieses gehörte zum Beschleuniger LEP, für den in den 1980er Jahren der 27-Kilometer-Tunnel gebaut worden war, der heute den Large Hadron Collider (LHC) beherbergt. Der Magnet ist zwölf Meter hoch und enthält fast so viel Eisen wie der Eiffelturm. Die Instrumente in seinem Inneren decken den Winkelbereich von plus/minus 45 Grad relativ zur Strahlrichtung ab. Um den Kollisionspunkt sind sechs Lagen von Siliziumdetektoren (1) mit insgesamt 35 Millionen Pixeln angeordnet. Sie erlauben uns, den Ort der Wechselwirkung und die Ursprünge der gemessenen Spuren zu bestimmen. Sind Letztere nicht mit dem Ort der Wechselwirkung identisch, wissen wir, dass die entsprechenden Teilchen aus Zerfallsprozessen der bei der Kollision entstandenen Partikel stammen müssen.

In radialer Richtung nach außen folgt eine Zeitprojektionskammer (TPC, 3) mit 560 Millionen Pixeln. Sie misst die überwiegende Zahl der Punkte, aus denen wir schließlich die Spuren der Teilchen rekonstruieren. Aus diesen Spuren lassen sich die Impulse und Identitäten der geladenen Partikel bestimmen. Dann kommen die sechs Lagen (35 Millionen Pixel) des Übergangsstrahlungsdetektors (TRD, 4), der die Elektronen vermisst. Diese lassen sich wegen ihrer fast lichtschnellen Bewegung anderweitig nur sehr schwer identifizieren. Dem folgt ein Flugzeitzähler (5) für die Ermittlung von Geschwindigkeiten. Noch weiter außen befinden sich elektromagnetische Kalorimeter zur Messung von Photonen (und Elektronen). Anders als bei ATLAS und CMS decken sie nicht den gesamten Raumwinkel ab. In Vorwärtsrichtung wird das Experiment durch ein Spektrometer für Myonen (10–13) komplettiert.

J.S. und P.B.-M.



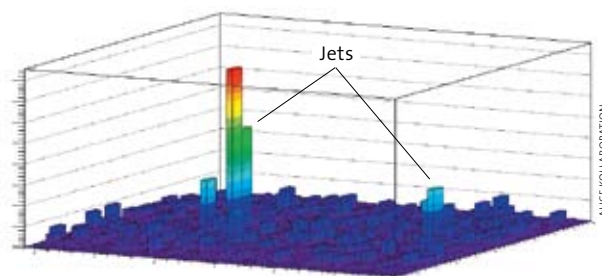
lich nur mit der Wurzel aus der Strahlenergie. Im Fall kollidierender Strahlen wächst sie linear, also viel schneller.

Für relativistische, das heißt sehr stark beschleunigte Quarks und Gluonen gilt allerdings, dass die Temperatur nur mit der vierten Wurzel aus der Energiedichte (Energie pro Volumeneinheit) wächst. Um die Temperatur zu verdoppeln, braucht man also die 16-fache Energiedichte. Entsprechend hoch sind apparativer Aufwand und Kosten, um die zur Entstehung des QGP nötigen extremen Temperaturen zu erreichen.

Anders als beispielsweise die Entdeckung neuer Elementarteilchen ist die Untersuchung des QGP ein schrittweiser

Prozess, da es sich um einen äußerst komplexen und flüchtigen Materiezustand handelt. Als im Jahr 2000, wenige Monate vor dem Start von RHIC, das Programm mit stationären Targets am CERN und in Brookhaven abgeschlossen war, veröffentlichte Ersteres eine Presseerklärung: Bei den Kollisionen schwerer Kerne am CERN werde ein neuer Materiezustand erzeugt, in dem die Quarks aus ihrer starken Bindung befreit sind. Den Begriff Quark-Gluon-Plasma vermieden die Physiker, weil sie noch keine seiner Eigenschaften gemessen hatten. Kaum überraschend, provozierte die Presseerklärung scharfe und skeptische Kommentare der US-Kollegen. Schließlich wollte man mit RHIC genau diesen Sachverhalt

Als Stapel bunter »Legosteine« zeigen so genannte Legoplots die Energie zweier miteinander korrelierter Bündel von Teilchen. Diese Teilchenjets entstehen unmittelbar nach Beginn der Kollision, erhalten dabei einen großen Impuls und verlassen das Plasma in unterschiedliche Richtungen. Der Jet rechts hat offenbar viel Energie verloren. Vermutlich durchquerte er auf seinem Weg einen großen Teil des Plasmas. In der Ebene sind Raumwinkelkoordinaten aufgetragen, nach oben ist die Energie der gemessenen Teilchen in logarithmischen Werten dargestellt.



belegen. In den folgenden Jahren konnten sie die Ergebnisse vom CERN aber bestätigen und darüber hinaus erste Schritte zur Charakterisierung des neuen Materiezustands machen. So scheint sich das Quark-Gluon-Plasma wie eine nahezu ideale Flüssigkeit zu verhalten – wenn man die Expansion des Feuerballs berechnet, kann man also Reibungsverluste fast vernachlässigen.

ALICE soll nun dafür sorgen, dass wir das Quark-Gluon-Plasma und seine Eigenschaften wirklich verstehen. Das Experiment ist darauf ausgelegt, möglichst viele der bei der Kollision auftretenden Phänomene und Teilchen zu erfassen. Das beginnt mit der Messung der Multiplizitäten (siehe Glossar unten) aller produzierten Teilchensorten. Neben Teilchen wie Protonen und Pionen, die aus leichten Valenzquarks bestehen, sind das solche mit Strange-Quarks oder auch schweren Charm- oder Beauty-Quarks. Auch Antikerne etwa von Helium-4 oder exotische Objekte wie so genannte Antihyperkerne erwarten wir noch zu sehen. Darüber hinaus finden wir bereits Paare von Elektronen oder Myonen ebenso wie extrem energiereiche Photonen. Von all diesen Teilchen wollen wir ihre Impulsverteilungen, die Spektren, über einen möglichst großen Bereich messen und weiterhin wissen, ob ihre Anzahlen, Impulse oder Richtungen miteinander korreliert sind. Aus solchen Messungen lassen sich schließlich die Eigenschaften des QGP ableiten.

Fantastisch wäre es, wenn wir eine Beobachtung machen könnten, die einem endgültigen Beleg für die Existenz des QGP nahekommt. Diese »smoking gun« könnte Charm-Quarks und Anticharm-Quarks liefern, die wasserstoffähnliche Zustände bilden, so genannte Charmonia. Ein bestimmter energetischer Zustand dieser Charmonia wird als J/ψ -Teilchen bezeichnet, und sein Zerfall macht sich als scharfe Linie im Massenspektrum von Elektron-Positron-Paaren (oder Myon-Antimyon-Paaren) bemerkbar.

Bereits vor 24 Jahren wurde vorausgesagt, dass bei Teilchenkollisionen weniger J/ψ -Teilchen entstehen, wenn sich dabei ein Quark-Gluon-Plasma bildet. Denn das Plasma mit seinen vielen freien Farbladungen schirmt die Charm-Quarks und -Antiquarks voneinander ab. Diese ursprüngliche Argumentation haben wir inzwischen noch weitergeführt. Bei den sehr hohen LHC-Energien entstehen in einer Blei-Blei-Kollision bis zu 100 Paare von Charm- und Anticharm-Quarks, die im Plasma keine J/ψ -Teilchen produzieren. Wenn jetzt das Quark-Gluon-Plasma in normale hadronische Mate-

rie ausfriert, sind genug dieser Teilchen vorhanden, so dass je zwei davon zu einem Charmonium zusammenfinden können. Es könnten sich also entgegen der ursprünglichen Voraussage sogar mehr J/ψ -Teilchen bilden, als man ohne Quark-Gluon-Plasma erwartet hätte. ALICE wird dies herausfinden.

Das QGP ist nicht nur ein Zustand, den wir im Labor erzeugen. Vielmehr befand sich einst auch unser Universum für kurze Zeit in einer solchen Phase. Unmittelbar nach dem Urknall kühlte es von extrem hohen Temperaturen ab. Als es milliardstel Sekunden alt war, hatte es schon eine rasante Entwicklung hinter sich und war in die QGP-Phase eingetreten. Nach etwa zehn millionstel Sekunden war es genügend abgekühlt, um zu normaler, stark wechselwirkender Materie auszufrieren. Dem folgte die Bildung der ersten Elemente, die bereits nach etwa drei Minuten abgeschlossen war.

Weil wir die primordialen Elementhäufigkeiten immer noch messen können – diese Elemente, nämlich Wasserstoff, Helium und Lithium, existieren noch heute! –, ist dies der früheste Zeitpunkt in der Entwicklung unseres Universums,

Glossar

LONGITUDINALIMPULS: Komponente des Teilchenimpulses entlang des Strahls

LUMINOSITÄT: Ein Maß für die Zahl der zu erwartenden Kollisionsereignisse pro Zeiteinheit, wenn zwei Teilchenstrahlen aufeinandergelenkt werden

MULTIPLIZITÄT: Zahl der Teilchen einer bestimmten Sorte (Protonen, Neutronen, Pionen, Elektronen, Photonen ...), die pro Kollision entstehen. Typischerweise wird die Multiplizität in Abhängigkeit von Transversalimpuls, Rapidität und Winkel relativ zur Reaktionsebene gemessen.

NUKLEARER MODIFIKATIONSFAKTOR (R_{AA}): Diese Zahl dient als Maß dafür, wie viel Energie Teilchen im Quark-Gluon-Plasma verlieren. R_{AA} setzt die Spektren aus Kollisionen zweier Bleikerne in ein Verhältnis zu Spektren aus Proton-Proton-Kollisionen. Im Fall streifender Kollisionen von Kernen liegt der Wert nahe bei eins: Dann unterscheidet sich die Physik der Ereignisse kaum von Proton-Proton-Kollisionen, und es entsteht kein oder wenig Plasma, in dem die Teilchen Energie verlieren könnten. Bei zentralen Treffern entsteht viel Plasma; dann ist R_{AA} niedrig.

der uns durch Beobachtung bislang zugänglich war. Mit der Erzeugung und Charakterisierung des Quark-Gluon-Plasmas in Laborexperimenten drehen wir die Uhr nun noch weiter zurück. Statt einen Zeitpunkt rund 100 Sekunden nach dem Urknall zu betrachten, beobachten wir jetzt, was nur zehn Mikrosekunden danach geschah.

Allerdings starten wir im Labor bei einer vergleichsweise niedrigen Temperatur. Bei Fixed-Target-Experimenten übersritten die Forscher die kritische Temperatur für den QCD-Phasenübergang um gerade einmal 20 Prozent. Bei RHIC wurde sie um den Faktor zwei übertroffen. Beim LHC erwartet man über einen Faktor fünf, hat diesen Wert aber bislang noch nicht gemessen. Wegen der geringen Temperatur ist die Lebensdauer des QGP im Labor sehr viel kürzer als der Zeitraum, während dessen es nach dem Urknall existierte.

Quark-Gluon-Plasma entsteht jedes Mal, wenn zwei Bleikerne frontal kollidieren

Wie muss ein Experiment aussehen, das sich auf die Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma begibt? Es unterscheidet sich deutlich von den anderen LHC-Detektoren wie ATLAS und CMS. Diese sind konzipiert, um neue Partikel wie zum Beispiel das Higgs-Teilchen zu finden. Dafür benötigen sie hohe Energien, erreichen aber keine hohen Temperaturen. Auch produzieren sie weder besonders viele Teilchen noch erzeugen sie makroskopische Materiezustände.

Bei einer einzigen Kollision in ALICE entstehen hingegen einige zehntausend Teilchen. Dies erfordert eine sehr hohe Granularität des Aufbaus, weshalb das Experiment über 600 Millionen Auslesepunkte, Pixel, verfügt. Andererseits ist es

ausreichend, wenn bei ALICE eine vergleichsweise geringe Kollisionsrate erreicht wird. Denn während das Higgs-Teilchen extrem selten auftritt, wird das QGP praktisch immer gebildet, wenn die Energiedichte hoch genug ist – wenn sich die zwei Bleikerne also zentral treffen. Das wird bei voller Luminosität (siehe Glossar) des LHC mehrere hundertmal pro Sekunde der Fall sein.

Während die ATLAS- und CMS-Forscher sich vor allem für Teilchen mit hohen Impulsen interessieren, sind bei ALICE auch niedrige Impulse von großer Bedeutung. Einerseits ist das ein Vorteil: Um sie präzise zu messen, darf das Magnetfeld nicht zu hoch sein; der Magnet blieb also bezahlbar. Andererseits ist die Auflösung bei hohen Impulsen geringer. Dies konnten wir aber in Kauf nehmen.

Will man niedrige Impulse messen, darf nur sehr wenig Material zwischen Erzeugungspunkt der Teilchen und Impulsmessung liegen. Dann werden die Ergebnisse auch nur geringfügig verfälscht. Doch die Teilchen müssen unter anderem die Wand des Strahlrohrs, die ersten Schichten eines Siliziumdetektors und die darauf sitzenden mikroelektronischen Bauteile durchqueren; selbst Kabel und Kühlsysteme sind im Weg. Bei ALICE haben wir es aber geschafft, dass die vom Kollisionspunkt wegspritzenden Teilchen über die ersten 2,5 Meter des Experimentaufbaus nur zehn Prozent einer Strahlungslänge (siehe Glossar) durchqueren; das entspricht einer Siliziumschicht von gerade einmal neun Millimetern. Im Fall von ATLAS und CMS durchqueren sie 50 bis über 100 Prozent einer Strahlungslänge.

Für ALICE ist auch entscheidend, dass wir möglichst viele Teilchensorten identifizieren können. Dazu setzen wir prak-

QUARK-GLUON-PLASMA (QGP): Quarks und Gluonen sind Teilchen, aus denen sich Neutronen und Protonen zusammensetzen, die Bestandteile des Atomkerns. Sie tragen eine »Farbladung« und sind normalerweise fest aneinander gebunden. Bei hoher Energie lässt die Wechselwirkung stark nach, und es entsteht vermutlich ein Quark-Gluon-Plasma. Dieses verhält sich ähnlich einer Flüssigkeit und weist Gemeinsamkeiten mit einem elektromagnetischen Plasma auf, in dem sich Elektronen und Ionen frei bewegen. Im Vergleich dazu entsteht das QGP erst bei sehr viel höheren Temperaturen. Diese lassen sich in Teilchenbeschleunigern erzeugen, herrschten aber auch kurz nach dem Urknall.

RAPIDITÄT: Bei extrem beschleunigten Teilchen kommen relativistische Effekte ins Spiel. Die Forscher erleichtern sich die entsprechenden Berechnungen, indem sie den Longitudinalimpuls in eine andere Größe, die Rapidität, umwandeln.

REAKTIONSEBENE: Gedachte Ebene, die durch die Richtung des Strahls sowie die Verbindungslinie zwischen den Zentren der beiden Kerne aufgespannt wird

RIGIDITÄT: Diese Größe beschreibt, wie stark ein Teilchen der Krümmung seiner Bahn durch ein Magnetfeld »widersteht«. Sie wächst mit zunehmendem Impuls beziehungsweise sinkt mit steigender Ladung.

SCHWERPUNKTENERGIE: Nach der Kollision zweier Bleikerne muss der Gesamtimpuls des Systems denselben Wert wie zuvor aufweisen. Dies erfordert, dass das aus sämtlichen Reaktionsprodukten gebildete System eine kinetische Mindestenergie besitzt. Außerdem bleibt Energie übrig. Aus dieser Schwerpunktenenergie entstehen neue Teilchen, oder sie heizt das System auf. Je nach Kollisionsgeometrie ist die Schwerpunktenenergie die Summe der Strahlenergien oder nur ein Bruchteil davon. Kollidieren identische Teilchen mit einander entgegengerichteten Impulsen, ist die Schwerpunktenenergie einfach die Summe der beiden Strahlenergien. Befindet sich eines der beiden Teilchen im Labor hingegen in Ruhe (Fixed-Target-Experiment), wächst die Schwerpunktenenergie nur mit der Wurzel der Strahlenergie. Dann ist also die Zahl neuer Teilchen geringer oder die Temperatur niedriger.

STRAHLUNGSLÄNGE: Die typische Wegstrecke, nach der ein energiereiches Elektron seinen Impuls bis auf den Bruchteil 1/e durch Bremsstrahlung in einem Material verloren hat. Je mehr Material, gemessen in Einheiten der Strahlungslänge, einem Teilchen vor seiner Impulsmessung im Weg steht, desto stärker wurde es zuvor abgebremst und desto ungenauer sind die Messungen.

TRANSVERSALIMPULS: Komponente des Teilchenimpulses senkrecht zum Strahl



Im Herzen von ALICE: »Spektrum«-Autoren Johanna Stachel von der Universität Heidelberg und Peter Braun-Munzinger vom Darmstädter GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung während des Aufbaus der 90 Kubikmeter großen Zeitprojektionskammer

tisch alle zur Verfügung stehenden Techniken ein, darunter die Zeitprojektionskammer, den Übergangsstrahlungsdetektor und den Flugzeitzähler (siehe Kasten S. 89). Zudem wollen wir auch relativ seltene Signaturen des QGP aufspüren. So erwarten wir, dass nur bei einer von 250 000 Kollisionen folgende Kombination von Ereignissen auftritt: Aus dem Zusammenprall gehen ein Bottom- sowie ein Anti-Bottom-Quark hervor, die sich zu dem wasserstoffähnlichen Ypsilon-Zustand verbinden. Dieser zerfällt dann in ein Elektron-/Positron-Paar, das im Detektor auch tatsächlich nachgewiesen wird und uns nicht »entwischt«.

Diese Ereigniskombination, deren Eintreten wir möglichst ausnahmslos messen wollen, kann der Übergangsstrahlungsdetektor identifizieren. Angesichts der Rate von Blei-Blei-Kollisionen, die maximal zehn Kilohertz betragen wird – derzeit haben wir etwa 150 Hertz erreicht –, kann er sich für die Entscheidung, ob die entsprechenden Daten gespeichert werden, immerhin zehn Mikrosekunden Zeit lassen.

Für alle Experimente in der Teilchenphysik gilt: Man kann die Messinstrumente nicht einfach kaufen oder bestellen. Die Wissenschaftlerteams müssen sie einschließlich der Elektronik zu ihrer Steuerung und zum Auslesen der Daten selbst entwickeln. Als wir 1996 in das Projekt ALICE einstiegen, waren wichtige Vorarbeiten geleistet, doch in mancher Hinsicht lag noch völlig unerforschtes Neuland vor uns. Mit im Boot waren damals bereits die Gruppen vom GSI sowie aus Frankfurt, Heidelberg und Münster. Ihre Mitglieder hatten schon das Fixed-Target-Programm mit Schwerionen am CERN angestoßen und entscheidend zu seiner Realisierung beigetragen. Ebenso hatten sie Initiativen ergriffen, die schließlich zur Entwicklung von RHIC führten.

In der folgenden Zeit stießen die TU Darmstadt und später auch die Fachhochschulen Köln und Worms zu unserem Projekt hinzu. All diese Partner erbrachten gemeinsam die deutschen Beiträge zu ALICE, darunter die Zeitprojektions-

kammer (die in internationaler Zusammenarbeit, vor allem gemeinsam mit dem CERN entstand), den Übergangsstrahlungsdetektor und den High-Level-Trigger. Die Zeitprojektionskammer (*Time Projection Chamber*, TPC) war von Anfang an der zentrale Detektor des ALICE-Experiments. Sie sollte mit hoher räumlicher Auflösung und in drei Dimensionen gleichzeitig die Spuren von bis zu 15 000 geladenen Teilchen rekonstruieren. Eine TPC ist typischerweise ein großer, gasgefüllter Zylinder. Durchqueren geladene Teilchen das Gas, ionisieren sie es und setzen dabei Elektronen frei. In einem extrem homogenen elektrischen Driftfeld, für dessen Erzeugung ein so genannter Feldkäfig verantwortlich ist, driften die Elektronen dann entlang der Achse des Zylinders zu dessen Endflächen.

Dort werden sie über so genannte Vieldrahtproportional-kammern registriert. In diesen sind unter Hochspannung stehende Drähte gespannt, an denen jedes Elektron ein Signal hervorruft. Aus dem Ort der Signalerzeugung und der Ankunftszeit des Signals lässt sich dann der Ursprungsort des Elektrons errechnen. Die Stärke des Signals hängt davon ab, wie viele Elektronen beim Durchgang des zu identifizierenden Teilchens freigesetzt wurden, wie viel Energie das Teilchen dadurch also verloren hat. Weil dieser Energieverlust bei gegebenem Impuls spezifisch für die Ladung und Masse des Teilchens ist, lässt sich dieses schließlich identifizieren (Diagramm rechts unten).

Die größte je gebaute Zeitprojektionskammer

Mit einem Volumen von 90 Kubikmetern sollte die ALICE-TPC die größte je gebaute Zeitprojektionskammer, aber auch die beste ihrer Art werden. Ironischerweise waren wir Ende 1997, gerade als wir endlich die Genehmigung für den Bau erhalten hatten, in einer technischen Sackgasse gelandet. Einige Experten meinten sogar, eine TPC mit den geforderten Spezifikationen könne man überhaupt nicht konstruieren. Es war Zeit für einen Neuanfang. Ein Jahr lang haben wir das ganze Konzept überdacht, und am Ende war klar: Die TPC ließ sich doch realisieren, und zwar ohne Abstriche – wenn auch mit ganz anderen Designparametern.

Nun konnten wir an den Entwurf von zwei spezifischen Mikrochips gehen. Sie sollten die von den Proportionalkammern generierten Signale weiterverarbeiten und kamen im fertigen Instrument jeweils 35 000-mal zum Einsatz. Einen davon entwickelten wir im ASIC-Labor (ASIC = Application Specific Integrated Circuit) der Universität Heidelberg. Für den anderen beschränkten wir einen völlig neuen Weg.

Wir überzeugten einen der großen industriellen Chipentwickler, dass wir mit seiner Hilfe unsere eigene digitale Prozessierung auf einen seiner hoch entwickelten Analog-Digital-Wandler-Chips setzen und aufs Engste mit dessen Funktionen integrieren durften. Dazu setzten sich die Elektronikentwickler beider Seiten zwei Wochen zusammen in ein Labor. Das funktionierte so gut, dass der Industriepartner gleich unser ganzes Mikroelektronikteam abwerben wollte. Zum Glück schlugen die Teammitglieder das attraktive An-

gebot aus – die Entwicklungsabteilung des CERN hat eben eine besonders abwechslungsreiche Arbeit zu bieten.

Der Vorzug des Chips ist unter anderem seine geringe Leistungsaufnahme. Trotzdem müssen wir die TPC mit 30 Kilowatt Leistung versorgen, und in den massiven Kupferleitungen fließen insgesamt rund zehn Kiloampere Strom. Für den Übergangsstrahlungsdetektor (TRD), ebenfalls ein wichtiger Bauteil von ALICE, liegen diese Werte sogar noch höher.

In derselben Zeit nahmen wir mit CERN-Forschern und einem weiteren industriellen Partner die Entwicklung des Feldkäfts der TPC auf. Er ist im Wesentlichen eine riesige Tonne aus zwei konzentrischen Zylindern, die extreme Anforderungen an mechanische Präzision und Stabilität erfüllen und vollständig gasdicht sein muss. Zudem darf sie praktisch nichts wiegen, damit den zu messenden Teilchen möglichst wenig Material im Weg steht.

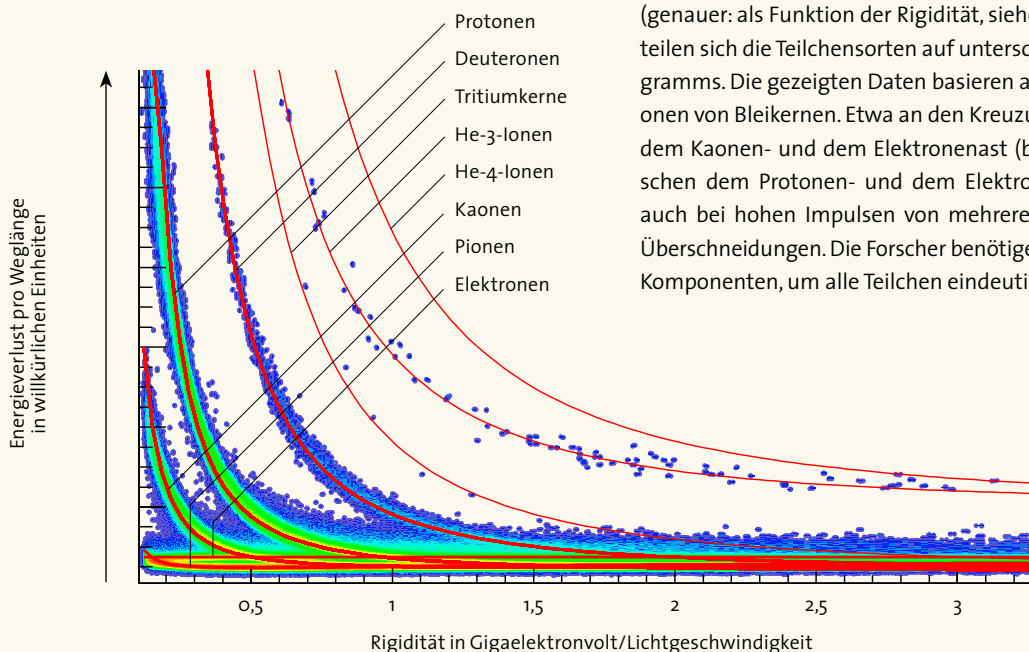
Wir hofften also auf Experten aus der Luft- und Raumfahrt oder auch auf Hersteller, die mit modernen Kompositmaterialien etwa für Ski oder Tennisschläger arbeiten. Eine erste weltweite Ausschreibung endete damit, dass wir ein einziges Angebot erhielten, das uns um den Faktor zehn zu teuer war. Im Nachhinein erschien uns der Preis allerdings verständlich, denn ein kommerzielles Unternehmen muss sich gegen das große Risiko eines Fehlschlags absichern. Wir konnten den Preis nur dadurch senken, dass wir die Verantwortlichkeiten klar regelten und das Projekt schließlich partnerschaftlich mit Industrie, CERN- und GSI-Mitarbeitern durchführten. In der Tat war das Risiko groß: Der erste Ver-

such schlug fehl, der innere Zylinder war nicht dicht. Aber der zweite war perfekt!

Nach der letzten Inspektion (Foto links, mit den Autoren) ersetzen wir die im Bild sichtbaren gelben Holzplatten in den beiden Endflächen durch insgesamt 72 Ausleseammern, die in der Zwischenzeit in Heidelberg, bei der GSI und an der Comenius-Universität in Bratislava (Slowakei) gebaut worden waren. Dann drehten wir den TPC-Feldkäfig um 90 Grad. Nach einem Jahr sorgfältigster Tests war es im Januar 2007 so weit: Die TPC wurde aus dem Reinraum, in dem sie zusammengebaut worden war, in der rund 50 Meter unter dem Erdboden liegenden ALICE-Kaverne installiert und in Betrieb genommen. Statt Teilchen aus Blei-Blei-Kollisionen vermaß sie zu Kalibrierungszwecken zunächst kosmische Strahlung und die Zerfälle von radioaktivem Krypton, das wir dem TPC-Gas zugesetzt hatten. Rechtzeitig zum erwarteten LHC-Start im September 2008 war das zehnjährige Projekt abgeschlossen.

Ein anderes großes Projekt der deutschen Arbeitsgruppen, dessen Dimensionen mit dem Bau der TPC vergleichbar sind, war der Übergangsstrahlungsdetektor TRD. Er erlaubt es, aus Tausenden produzierter Teilchen die Elektronen zu identifizieren. Das muss ihm binnen etwa zehn Mikrosekunden gelingen, damit er dazu beitragen kann, dass ALICE nur die wirklich interessanten Daten speichert. Das Grundprinzip des Detektors besteht darin, Röntgenphotonen zu messen, die von extrem energiereichen Teilchen beim Durchgang durch die Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes ausgesandt werden.

Wie sortiert man Milliarden von Teilchen?



In der Zeitprojektionskammer verlieren die Teilchen abhängig von ihrem Anfangsimpuls einen Teil ihrer Energie. Stellt man diese verlorene Energie als Funktion des Teilchenimpulses dar (genauer: als Funktion der Rigidität, siehe Glossar S. 90/91), verteilen sich die Teilchensorten auf unterschiedliche Äste des Diagramms. Die gezeigten Daten basieren auf 2,2 Millionen Kollisionen von Bleikernen. Etwa an den Kreuzungspunkten zwischen dem Kaonen- und dem Elektronenast (bei 0,5 GeV/c) und zwischen dem Protonen- und dem Elektronenast (1 GeV/c) oder auch bei hohen Impulsen von mehreren GeV/c kommt es zu Überschneidungen. Die Forscher benötigen daher weitere ALICE-Komponenten, um alle Teilchen eindeutig zu identifizieren.

ALICE KOLLABORATION

(Ein solches Instrument ist auch in »Mit der ISS der Dunklen Materie auf der Spur«, SdW 9/2010, S. 22, beschrieben).

Obwohl die Detektoren selbst schon eine Vorauswahl treffen, fällt ein extrem großes Datenvolumen an. Darum kommt ein Experiment wie ALICE nicht ohne zusätzliche kluge Algorithmen aus, die wichtige Informationen von unwichtigen trennen. Der vor allem in Heidelberg sowie im norwegischen Bergen entwickelte High-Level-Trigger ist eine hochmoderne Computerfarm, die bis zu 17,5 Terabyte Daten pro Sekunde verarbeiten kann – das entspricht dem Informationsgehalt von über 20 000 CDs. Sie erlaubt es, noch vor der Speicherung den Informationsgehalt der Daten zu analysieren, weniger interessante Ereignisse zu verwerfen und die verbleibenden Daten geschickt zu komprimieren.

Derzeit sind in dem vom Bundesforschungsministerium finanzierten Forschungsschwerpunkt ALICE rund 100 Wissenschaftler zusammengeschlossen, darunter 41 Doktoranden. Hinzu kommen hoch qualifizierte Techniker sowie zahlreiche Studenten, die im Rahmen von Projektpraktika oder ihren Diplom-, Bachelor- oder Masterarbeiten mitarbeiten. Bis heute flossen allein in den Bau der Komponenten aus Deutschland, die ziemlich genau einem Fünftel des gesamten Experimentaufbaus entsprechen, rund 500 Mannjahre Arbeit.

Seit der Messbetrieb begann, zeigt sich der Detektor auch bei höchster Teilchenmultiplizität allen Herausforderungen gewachsen und liefert hervorragende Datenqualität. Noch im Jahr 2010 konnte das internationale ALICE-Team die ersten fünf wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Blei-Blei-Kollisionen einreichen. Schon die ersten Resultate sind höchst bemerkenswert. ALICE hat die Multiplizität der produzierten Teilchen bei zentralen Blei-Blei-Kollisionen gemessen (bei solchen also, bei denen sich die Kerne frontal treffen). Pro Kollision werden im Mittel 3200 geladene Teilchen im Winkelbereich zwischen 45 und 135 Grad relativ zur Strahlrichtung produziert und registriert. Zählen wir die neutra-

len Teilchen hinzu, deren Auftreten wir im Wesentlichen aus einigen wenigen Messungen hochrechnen, so sind es in diesem Winkelbereich mehr als 4800. Dies ist die höchste je bei einer Kern-Kern-Kollision gemessene Multiplizität und liegt am oberen Rand der auf Basis von RHIC-Daten erwarteten Werte.

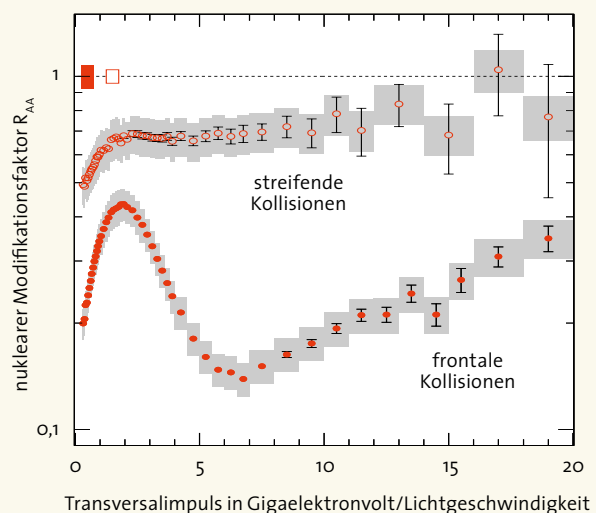
Was bedeutet das? Ein für das QGP zentraler Begriff ist die Entropie. Sie ist einfach gesagt ein Maß für die Zahl der Mikrozustände eines Systems und hängt mit der Temperatur des Systems zusammen. Weil jedes Teilchen eine definierte Entropiemenge trägt, ist die Multiplizität der produzierten Teilchen ein Maß für die Gesamtentropie. Und weil diese im Lauf der Expansion des Feuerballs kaum zunimmt – das weiß man, weil die Ausdehnung praktisch ohne Energieaustausch mit der Umgebung stattfindet –, kann man aus der sehr hohen gemessenen Multiplizität auf eine hohe Entropie schließen. Das wiederum weist darauf hin, dass in der Frühphase der Kollision ein sehr heißes Medium produziert wurde.

Eine zweite wichtige Frage lautet: In welchem Maß lässt sich das QGP auch bei LHC-Energien als ideale Flüssigkeit beschreiben? Durch den thermischen Druck dehnt sich der heiße Feuerball aus und kühlt dabei sehr schnell ab. Die Expansion des heißen Mediums lässt sich, so zeigen unsere Messungen, durch hydrodynamische Gesetze beschreiben. Genaue quantitative Untersuchungen erlauben dann Rückschlüsse auf die Art der QGP-Flüssigkeit. Die Information über diese Phase erhalten wir aus den Spektren. Messen wir die Impulse der Teilchen in bestimmte Richtungen relativ zur Reaktionsebene (siehe Glossar) und vergleichen die jeweiligen Spektren miteinander, so können wir aus deren Unterschieden auf Anisotropien – richtungsabhängige Vorgänge – im expandierenden Feuerball rückschließen.

Auch wenn eine genaue theoretische Analyse noch aussteht, zeigte sich sofort, dass das gemessene Expansionsverhalten stark dem ähnelt, was man von einer zwar heißen und komprimierten, ansonsten aber idealen Flüssigkeit erwartet.

Unerwartetes Verhalten

Wenn aufeinandergeschossene Bleikerne einander nur streifen (obere Kurve), ähnelt das Geschehen dem Fall, in dem nur Protonen miteinander kollidieren. Der nukleare Modifikationsfaktor R_{AA} (siehe Glossar) liegt darum nahe beim Wert 1. Prallen Kerne hingegen zentral oder fast zentral aufeinander (untere Kurve), entsteht viel Quark-Gluon-Plasma. Die untere Kurve zeigt unerwartete Merkmale: zum einen das Minimum bei einem Transversalimpuls von etwa sieben Gigaelektronvolt/Lichtgeschwindigkeit, zum anderen den markanten Anstieg hin zu höheren Impulswerten. Beides hatten Experten auf Basis von Experimenten am amerikanischen Beschleuniger RHIC so nicht erwartet.



ALICE KOLLABORATION

Diese ist durch einen extrem kleinen Wert der Viskosität pro Freiheitsgrad gekennzeichnet, also durch starke Wechselwirkung zwischen ihren Bestandteilen. Dieses Resultat ähnelt den Ergebnissen von RHIC – und das ist eine Überraschung! Denn anfangs, so haben die Messungen ja gezeigt, wird am LHC ein deutlich heißerer Feuerball als am RHIC erzeugt. Man hätte daher erwarten können, dass sich die Quarks und Gluonen im Plasma eher ähnlich wie ein ideales Gas als wie eine ideale Flüssigkeit verhalten. In einem idealen Gas ist die Viskosität pro Freiheitsgrad groß, weil die Wechselwirkung zwischen den Bestandteilen schwach ist.

Wie lange expandiert der Feuerball?


Schließlich haben wir auch Informationen über die Größe des Feuerballs am Ende seiner Expansion gewonnen. Dafür nutzen wir eine Methode aus der Quantenphysik, die Astronomen in den 1950er Jahren erfunden hatten, um die Größe von Sternen zu vermessen. Die Hanbury-Brown-und-Twiss-Korrelation beruht auf der gleichzeitigen Messung zweier identischer Teilchen wie zum Beispiel Photonen. Das Verfahren lässt sich aber auch mit Pionen durchführen und so erweitern, dass wir nicht nur die Größe, sondern auch die Expansionsdauer des Feuerballs vermessen können. Den ALICE-Messungen zufolge nimmt er am Ende einer etwa $3 \cdot 10^{-23}$ Sekunden andauernden Expansion das rund Zehnfache des Volumens eines Bleikerns ein.

Vielleicht das überraschendste Resultat betrifft die Beobachtung, dass bestimmte Quarks und Gluonen im Plasma viel Energie verlieren. Es handelt sich dabei um jene Teilchen, die ganz zu Beginn der Kollision aus Nukleonen herausgeschlagen werden. Dabei wird ein erheblicher Anteil des Strahlimpulses – bis zu einige hundert Gigaelektronvolt im Fall der LHC-Experimente – auf sie übertragen. Aus ihnen bilden sich dann normalerweise Bündel energiereicher Teilchen. Diese Jets verlassen den Ort ihrer Entstehung paarweise in unterschiedliche Richtungen. Durchqueren sie dabei ein QGP mit seinen zahlreichen freien Farbladungen, verlieren sie viel Energie (siehe Grafik S. 90).

Zur Quantifizierung der Energieverluste der Jets nutzen die Teilchenphysiker den nuklearen Modifikationsfaktor R_{AA} (siehe Glossar). Er setzt die Spektren aus Kollisionen zweier Bleikerne in ein Verhältnis zu Spektren aus Proton-Proton-Kollisionen. Im Fall streifender Kollisionen unterscheidet sich die Physik der Ereignisse wie erwartet kaum von Proton-Proton-Kollisionen. Offenbar hat sich dann kein oder nur wenig Plasma gebildet, in dem die Teilchen Energie verlieren könnten. Der Wert des Modifikationsfaktors liegt darum nahe bei 1. Kommt es hingegen zu zentralen Treffern, ist der Energieverlust für mindestens einen der Jets groß, abhängig vom Entstehungsort des Jetpaars, und der Modifikationsfaktor nimmt kleinere Werte an. Das entsprechende Diagramm (Abbildung links) überraschte die Fachleute. Ausgehend von den RHIC-Daten hatten sie weder vorhergesehen, wie stark der Modifikationsfaktor mit wachsendem Impuls absinken, noch, dass er danach so kontinuierlich wieder ansteigen wür-

de. Bislang ist allerdings völlig offen, ob sich der Anstieg bei höheren Impulsen fortsetzen wird.

Wohin werden uns die kommenden Jahre führen? Können die Daten als Hinweise auf ein extrem heißes und damit dichtes Medium gelten? Können wir hoffen, mit der Zeit auch die Art des Phasenübergangs zwischen normaler, stark wechselwirkender Materie und dem Quark-Gluon-Plasma zu verstehen? Und werden wir auf diese Weise weitere Geheimnisse der Materie lüften?

All diese Experimente können sich nicht an ihrem Nutzen messen lassen. Sie sind Kulturleistungen wie die sieben Weltwunder der Antike, die abendländischen christlichen Kathedralen oder auch technische Errungenschaften der Neuzeit. Wir leisten sie uns, weil wir sie uns leisten können und weil uns fasziniert, was sie uns über die Welt verraten können. Und so führt uns der LHC in diesen Jahren in eine höchst spannende neue Ära der Grundlagenforschung. 

DIE AUTOREN



Johanna Stachel ist Professorin für Experimentalphysik an der Universität Heidelberg und seit 2006 Sprecherin des Forschungsschwerpunkts ALICE des Bundesforschungsministeriums. Sie gehört unter anderem der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften an. Ebenso wie Peter Braun-Munzinger kehrte sie für das ALICE-Experiment 1995 von der Stony Brook University im US-Bundesstaat New York nach Deutschland zurück. Seither koordiniert sie die deutschen Beiträge für ALICE und verantwortet den Übergangsstrahlungsdetektor. Ab April 2012 wird sie Präsidentin der Deutschen Physikalischen Gesellschaft sein.

Peter Braun-Munzinger ist Professor an der TU Darmstadt, leitender Wissenschaftler beim Darmstädter GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung und Direktor des dortigen ExtreMe Matter Institute (EMMI) sowie Senior Fellow am Frankfurter Institute for Advanced Science. Der Schwerionenphysiker ist insbesondere für die Zeitprojektionskammer des ALICE-Experiments verantwortlich.

QUELLEN

Aamodt, K. et al. (ALICE Collaboration): Centrality Dependence of the Charged-Particle Multiplicity Density at Mid-Rapidity in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. In: Physical Review Letters 106, S. 032301, 8.12.2010

Aamodt, K. et al. (ALICE Collaboration): Suppression of Charged Particle Production at Large Transverse Momentum in Central Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. In: Physics Letters B 696, S. 30–39, 5.12.2010

Aamodt, K. et al. (ALICE Collaboration): Charged-Particle Multiplicity Density at Mid-Rapidity in Central Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. In: Physical Review Letters 105, S. 252301, 17.11.2010

Aamodt, K. et al. (ALICE Collaboration): Elliptic Flow of Charged Particles in Pb-Pb Collisions at 2.76 TeV. In: Physical Review Letters 105, S. 252302, 17.11.2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1067450

Gehirn steuert künstliche Hände

»Das zentrale Forschungsinstitut für Prothesen in Moskau soll künstliche Hände entwickelt haben. Die sogenannten Bioströme, die durch die Nerven fließen, wenn das Gehirn Befehle an die Muskeln erteilt, werden den Berichten zufolge am Handgelenk in einer Art Armband aufgefangen. Nachdem sie dann Verstärker und ein Elektronengehirn durchlaufen haben, steuern sie einige magnetische Vorrichtungen, die über ein Kolben- und Hebelsystem die mechanische Hand öffnen und schliessen.« Neuheiten und Erfindungen, Mai 1961, S. 74

Diabetes und Bürgertum

»Je größer der Wohlstand ist, um so häufiger kommt die Zuckerkrankheit vor. Geistesarbeiter erkranken häufiger an Diabetes. Bäuerliche Bevölkerungskreise erkranken seltener. Aber zu einem allgemein gültigen Schluß, daß die Zuckerkrankheit ein bevorzugtes Leiden der gehobenen Bevölkerungsschichten sei, berechtigt das doch nicht. Das scheint ein Widerspruch zu sein, der sich dadurch erklären ließe, daß die erstgenannte Gruppe ein höheres Lebensalter zu erreichen pflegt, also häufiger in das Alter kommt, in dem die Zuckerkrankheit zum Vorschein kommt.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Mai 1961, S. 193

Spiegelei auf dem Papierteller

»Zauberei in der Küche ist es, wenn man auf einem Papierteller ein Spiegelei braten soll. Mit dem neuen RCA-Herd ist es möglich. Luft aus einem Gebläse vermischt



sich mit dem Gas und wird an der Seite des Brenners hinausgedrückt, an der sich das Gemisch entzündet. Im Mittelteil des Brenners wird mehr Luft hinaufgedrückt, sie liegt waagrecht über der Flamme und bildet zwischen Flamme und Pfanne ein Luftkissen. Auf diesem Luftkissen erwärmt sich die Pfanne gleichmäßig, bekommt keine heißen Stellen, und es verbrennt nicht einmal der Papierteller.« Populäre Mechanik, Mai 1961, S. 23

Ein Luftkissen spart Geschirr.



Ruckelfreie Bilder dank Druckluft

»Beim Hantieren mit Operngläsern, Fernrohren und Feldstechern verhindert das



Zittern der Hand häufig eine genaue Beobachtung des Objektes. Ähnlich steht es mit photographischen Handkameras. Besonders störend ist dieser Umstand aber bei kinematographischen Apparaten, die ohne Stativ überhaupt unverwendbar sind. Man hat daher den Gedanken gehabt, durch eine Kreisellvorrichtung für Stabilisierung zu sorgen. Der zum Antriebe des Kreisels dienende Druckluftmotor ist leicht und nimmt wenig Platz ein. Der Druckluftbehälter wird mittels einer Handpumpe auf 30 bis 50 Atm. gefüllt. Die Pumpe läßt sich in der Rocktasche unterbringen.« Umschau, Mai 1911, S. 394 f.

Filmen, ohne zu wackeln – und das sogar hoch zu Ross

Eine Stunde mehr Licht

»Während für die Beleuchtung in den Abendstunden Millionen ausgegeben werden, kommt die Tageshelle in den Morgenstunden der Sommermonate fast niemandem zugute. Um eine Verbesserung herbeizuführen, hat ein Engländer, Mr. Willet, den Vorschlag gemacht, die Uhren im April um eine Stunde voran- und im September zurückzustellen. Gegen den Entwurf wurden seitens der Gas- und Elektrizitätswerke, die verringerte Einnahmen, und seitens der Theater, die verminderten Besuch befürchten, geltend gemacht.« (Anm. d. Red.: Während der Weltkriege wurde die Umstellung im Deutschen Reich vorübergehend praktiziert, als Reaktion auf die Ölkrise von 1973 europaweit beschlossen und in der Bundesrepublik 1980 eingeführt.) Umschau, Mai 1911, S. 458

Meteore mit dem Fahrrad vermessen

»Ein Astronom hat einen Versuch gemacht, das Fahrrad in den Dienst seiner Arbeiten zu stellen. An dem Rade waren in regelmäßigen Abständen Schirme befestigt. Die dunklen Schirme bringen dann während der Aufnahme Unterbrechungen des vom Meteor auf der Platte erzeugten Lichtstreifens hervor, und wenn die Geschwindigkeit des Fahrrads, die Abstände dieser Schirme und die Zeit bekannt sind, läßt sich die Geschwindigkeit des Meteors berechnen.« Die Welt der Technik, Mai 1911, S. 198

Meilenstein aus Stahlbeton

Für den Bauingenieur Oskar von Miller (1855–1934) eignete sich nur ein Material, um dem von ihm initiierten Deutsche Museum für Technik und Naturwissenschaften auch architektonisch einen Vorbildcharakter zu verleihen: der armierte, das heißt durch Stahleinlagen bewehrte Beton.

Der französische Gärtner Joseph Monier (1823–1906) hatte das zukunftsweisende Prinzip als einer der Ersten entdeckt – um Blumentöpfe leicht, haltbar und billig zu machen. Er goss sie zunächst aus Zement, den er durch Drahteinlagen verstärkte. Letztere nehmen Zugkräfte auf, der Zement widersteht Druck. Daraus entwickelte er den Eisenbeton (Zement ist ein Grundbestandteil des Betons).

Der Bauunternehmer Conrad Freytag (1846–1921) hatte das Verfahren 1884 anlässlich einer Ausstellung in Trier kennen gelernt und von Monier die Lizenz für das Bauunternehmen Wayss & Freytag erworben. Noch im selben Jahr wurde ein experimentelles Gebäude errichtet – eine Hundehütte, 1,19 Meter lang, 0,86 Meter breit, 1,005 Meter hoch und stattliche 273 Kilogramm schwer. Auf ein Eisengeflecht aus dünnen, glatten Eisenstäben, die in einem Quadratraster mit zehn Zentimeter Kantenlänge miteinander verflochten waren, brachte man eine nur etwa zwei Zentimeter starke Betonschicht auf. Im Bereich des Satteldachs und auf der Rückseite strich man deren Oberfläche glatt, die vordere und die seitlichen Schaufflächen wurden mit einer Reliefstruktur aus Zementsträngen überzogen. Den Eingang ziert eine Tür, deren Sturz mit einem Bogen abschließt. Ein Metallring diente dem Anketten des Hundes.

Dieser Meilenstein auf dem Weg zum modernen Stahlbetonbau gelangte durch

eine Stiftung der Nachkommen Freytags 1933 in das Museum (Wayss & Freytag gehört heute zu den weltweit führenden Unternehmen der Branche und ist auf Großprojekte wie Tunnel- oder Stadienbau spezialisiert). Von Miller hatte stets enge Kontakte zur Zementindustrie gepflegt, die 1908 die Stiftung des für den Museumsbau erforderlichen Zements beschlossen hatte: zu diesem Zeitpunkt 450 Waggons Portlandzement im Fabrikationswert von 120 000 Reichsmark. Viele Jahre lang war die Münchner Museumsinsel denn auch die größte Stahlbetonbaustelle Deutschlands gewesen, und von Anfang an wurden entsprechende Materialproben und Produkte gesammelt, auf Schautafeln und Gemälden hat man über Herstellungsprozesse informiert und das Tragverhalten von Betonbauteilen dem Publikum demonstriert.

Im Museum wurde später ein Stück aus dem Dach der Hundehütte ausgeschnitten, wohl um es genauer zu untersuchen, leider fehlt darüber jede Dokumentation. Transporte zu anderen Ausstellungen setzten dem Objekt ebenfalls zu. Heute steht es daher auf einer Stahlplatte und wird nur noch selten bewegt.

Der Architekt **Dirk Bühler** ist Kurator des Deutschen Museums in München und zuständig für die Ausstellungen zum Bauwesen.



Der Unterschied zu einem Wolkenkratzer könnte größer kaum sein – dennoch trugen die Erfahrungen beim Bau dieser Hundehütte zur Entwicklung der Stahlbetonbauweise bei.



John Michell, Allan Brown
So ist die Welt gebaut
Die kosmologische Bedeutung der Heiligen Geometrie
 Aus dem Englischen von Matthias Fersterer.
 AT, Aarau 2010. 288 S., € 29,90

GEOMETRIE

So ist die Welt sicher nicht gebaut

Ein untauglicher Versuch, die Welt mit Geometrie zu erklären, produziert bemerkenswerte Flächenaufteilungen.

»Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben« (Galilei) – schon recht, aber man kann sich in dieser Sprache auch Unfug zusammenschreiben. Eine prominente Fehlinterpretation stammt von Johannes Kepler, der die Bahnen der Planeten und die fünf platonischen Körper abwechselnd ineinanderschachtelte und damit die Bahnradialen erklären wollte.

Kepler selbst hat sich noch rechtzeitig von derartigen Ideen verabschiedet, um die wahren Gesetze der Planetenbewegung zu entdecken. Aber sie leben fort, und im Geist von John Michell (1923–2009) sogar bis in die jüngste Vergangenheit. Der britische Privatge-

lehrte hat mehr als 40 Bücher über fliegende Untertassen, »Maßsysteme der Tempel«, »Die Geomantie von Atlantis« und ähnliche Themen verfasst. Er greift die Zahlenmystik des Pythagoras auf, erschließt aus der Offenbarung des Johannes den Grundriss des heiligen Jerusalem bis in feinste Details und entnimmt tiefe Weisheiten jenen Kornkreisen, die vor einigen Jahren in seinem Heimatland grassierten. Haarscharf schreibt er an der Behauptung vorbei, Außerirdische hätten uns diese Botschaften übermittelt – so lächerlich will er sich dann doch nicht machen.

Bemerkenswerterweise hindert dieser ganze Unfug seinen Autor nicht da-

ran, interessante Geometrie zu betreiben. Die kleinen ganzen Zahlen $n = 3, 4, 5, \dots$ der Reihe nach durchprobierend, findet er Aufteilungen der Ebene mit n -zählig symmetrischen Strukturen. Für $n=5$ entdeckt er wie schon Kepler, dass sehr symmetrische, aber eben nicht sich periodisch wiederholende Muster zu Stande kommen, wenn man regelmäßige Fünfecke, Fünfsterne und zugehörige Füllelemente in konzentrischen Ringen anordnet. Das ist das von Roger Penrose ausgearbeitete Prinzip, das in der Theorie der Quasikristalle eine überraschende Anwendung findet (siehe S. 73). Auf diese Weise konstruiert Michell, streng nach Platons Schriften, den Bauplan von Atlantis, Hauptstadt des gleichnamigen sagenhaften Weltreichs, mit handgezeichneten Bildern, bis er bei den letzten Mustern wegen deren großer Komplexität widerwillig zur Computergrafik Zuflucht nimmt.

Was stört es schon einen großen Geist, dass dieser Grundriss mit städtischem Leben jeglicher Art nicht in Einklang zu bringen ist und dass die Vorstellung, Atlantis sei letztlich an einem Mangel an geometrischer Vollkommenheit zu Grunde gegangen, jeder Vernunft ins Gesicht schlägt? Die Muster sind von bemerkenswerter Qualität.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Von links nach rechts: »Die Vereinigung der Sieben und der Zwölf und die Offenbarung der himmlischen Stadt«; Elemente aus der Geometrie des regelmäßigen Fünfecks bilden ein spezielles Sechseck; dieses wird noch viel kleinteiliger gefüllt.



Allan J. Hobson

Das optimierte Gehirn

Wie wir unser Bewusstsein reparieren, manipulieren, ruinieren

Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober.

Klett-Cotta, Stuttgart 2010. 394 S., € 29,95

HIRNFORSCHUNG

Ein Rezept für die Traum-Apotheke

Ein renommierter Psychiater und Schlaf Forscher will nicht etwa unser Gehirn optimieren, sondern die Traumdeutung auf eine neurobiologische Grundlage stellen.

Allan J. Hobson (Jahrgang 1933) hat sich Großes vorgenommen. Er möchte ein altes, aber misslungenes Projekt Sigmund Freuds (1856–1939) endlich zum Erfolg führen: die Gründung der Psychologie und insbesondere der Traumtheorie auf ein neurowissenschaftliches Fundament. Wenn es nach ihm ginge, dann würde die immer noch einflussreiche Psychodynamik Freuds durch eine aktuelle »Neurodynamik« ersetzt, deren Grundzüge Hobson vorstellt. Das ist kein bescheidenes Unterfangen; doch der Autor verfügt über jahrzehntelange Erfahrung als Professor für Psychiatrie an der Harvard Medical School und gilt als einer der bedeutendsten Schlaf Forscher unserer Zeit.

Nach der Auffassung Hobsons vermitteln sowohl die wissenschaftliche als auch die subjektive Untersuchung von Träumen Einsichten in die Funktionsweise des Bewusstseins – bei Gesunden wie bei psychisch Kranken. Wir alle, so der Autor weiter, erleben in unseren Träumen Amnesien oder psychotische (Wahn-)Vorstellungen, und gesunde Menschen unterscheiden sich von den kranken lediglich dadurch, dass sie im Wachzustand davon verschont bleiben. Die zu Grunde liegenden Arbeitsprozesse des Gehirns seien jedoch prinzipiell von gleicher Art. Daher widmet Hobson sich ausführlich den neurobio-

logischen Grundlagen, erklärt und veranschaulicht die Arbeitsweise zentraler Stoffwechselsysteme und macht deutlich, zu welchen Problemen Funktionsstörungen führen.

Am provokantesten ist wohl seine Kritik an Freuds Idee der Traumdeutung und damit auch an der psychoanalytischen Praxis. Da Freud nicht über das neurowissenschaftliche Wissen unserer Zeit verfügte, sei sein Versuch einer neurobiologisch fundierten Psychologie zum Scheitern verurteilt gewesen und seine »verfehlte« Traumtheorie nur ein magerer Ersatz für das große Projekt.

Freud und die moderne Neurowissenschaft

Hobson ist jedoch selbst ein erklärter Liebhaber von Traumtagebüchern. Nur bedürfen Träume seiner Theorie zufolge keiner Deutung, da sie auf spontanen Aktivierungen des Gehirns basieren. Wie in einem Wörterbuch übersetzt er psychodynamische Begriffe in eine neurowissenschaftliche Sprache und will damit zeigen, dass die psychoanalytische Erklärung überflüssig ist. Beispielsweise seien Emotionen als Traumphänomen nicht Folge einer »sekundären Abwehrreaktion des Ich«, sondern »Primäraktivierungen des limbischen Systems«.

An dieser Stelle wird deutlich, dass der deutsche Text eine beinahe zehn

Jahre alte Vorlage wiedergibt. Gerade im Bereich von Bewusstseinsforschung und Psychopharmakologie haben Theorien jedoch eine kurze Halbwertszeit. So erfuhr Hobson seit dem Erscheinen der Originalausgabe seines Buchs 2002 viel Widerspruch, und zwar nicht nur von Psychoanalytikern. Auf der internationalen Bewusstseinskonferenz in Tucson (Arizona) 2006 wurde eigens eine »Dream Debate« zwischen ihm und Mark Solms organisiert, auf der Freuds Traumtheorie zur Disposition stand. Solms, der ebenfalls neurowissenschaftlich arbeitet, verteidigte dort die Kompatibilität zentraler Annahmen Freuds mit den Ergebnissen der heutigen Neurowissenschaft. Die anschließende Abstimmung unter den mehreren hundert Teilnehmern gewann er haushoch. Die Kontrahenten zeigten sich anschließend versöhnt; ob Hobson seitdem zumindest ein Stück von seinem Standpunkt abgerückt ist, verrät uns das Buch auf Grund seines Alters leider nicht.

Darüber hinaus lässt die Übersetzung selbst zu wünschen übrig. Flüchtigkeitsfehler und sogar übersehene Steuerzeichen für den Satz lassen auf mangelnde Sorgfalt schließen. Eigenwillige Fachausdrücke wie »Frischgedächtnis« statt des geläufigen Wortes »Kurzzeitgedächtnis« wirken verwirrend. Und da, wo der Autor die absurde Behauptung aufzustellen scheint, die Einnahme eines bestimmten Antidepressivums könne zu Depressionen führen, hat der Übersetzer schlicht zwei Begriffe verwechselt, die heimtückischerweise dieselbe Abkürzung haben: Nicht die wiederkehrende kurze Depression (*recurrent brief depression*, RBD), sondern die REM-Schlaf-Verhaltensstörung (*REM sleep behavior disorder*, RBD) war gemeint.

Zudem ist der Titel irreführend: Es geht in dem Buch nicht um das »optimierte Gehirn« im Sinn der aktuellen Debatte um das »Gehirndoping«, die Verbesserung des Denkens und Fühlens durch neurowissenschaftliche Mittel. Die »Traum-Apotheke« (»dream drugstore«) des Originaltitels ist eine Metapher für das Gehirn und seine bioche-

mische Konfiguration, in der Bewusstsein entsteht und durch Eingriffe verändert werden kann.

Hobsons Buch hat noch einen weiteren Schwerpunkt, der eher zeitlos und damit auch von obiger Kritik weniger betroffen ist: bewusstseinsverändernde («psychedelische») Drogen. In Anlehnung an die psychonautische Bewegung aus den 1950er und 1960er Jahren diskutiert er die psychedelische Wirkung von Substanzen wie LSD, dem aus Kakteen gewonnenen Meskalin oder dem Psilocybin aus bestimmten hallu-

zinogenen Pilzen. Die durch sie ausgelöst biochemischen und subjektiven Veränderungen macht er für die wissenschaftliche Analyse nutzbar und integriert sie in sein Bewusstseinsmodell. Gleichzeitig warnt er vor einem unbedachten Einsatz sowohl von Drogen als auch von Psychopharmaka, zwischen denen er ohnehin keine scharfe Grenze zieht. Beide könnten neben akuten Problemen auch zu bleibenden Schlafstörungen führen.

Das Buch hat ein interessantes Thema, ist unterhaltsam geschrieben und

profitiert vom Erfahrungsreichtum des Autors. Insoweit ist es durchaus empfehlenswert. Allerdings hätte ich wegen der mangelnden Aktualität und der Schwächen der Übersetzung doch ernsthaft Zweifel, ob mir das Werk 30 Euro wert wäre.

Stephan Schleim

Der Rezensent ist Assistenzprofessor für Theorie und Geschichte der Psychologie an der Universität Groningen (Niederlande) und beschäftigt sich mit dem Grenzgebiet zwischen Hirnforschung, Psychologie und Philosophie.



Gerhard Roth, Klaus-Jürgen Grün,
Michel Friedman (Hg.)
Kopf oder Bauch?
Zur Biologie der Entscheidung
Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2010.
158 S., € 16,95

KOGNITIONSWISSENSCHAFT

Wie wir uns entscheiden

Manche Handlungen folgen strenger Rationalität, die meisten jedoch nicht.

Bleiben oder gehen? Bremsen oder beschleunigen? Reden oder schweigen? Es zählt zum Wesen menschlichen Handelns, sich immer wieder entscheiden zu können. Das betrifft nicht nur spontane Aktionen, sondern auch größere, planvollere: Was will ich studieren? Mit wem will ich zusammenleben? Wo will ich wohnen? Unser subjektives Gefühl von Freiheit und Selbstverwirklichung ist eng verbunden mit dem Erlebnis, zwischen verschiedenen Optionen »frei« wählen zu können.

Der Bremer Hirnforscher Gerhard Roth legt zusammen mit dem Frankfurter Philosophen Klaus-Jürgen Grün und dem Publizisten Michel Friedman bereits zum dritten Mal den Sammelband einer Tagung zum Thema Hirnforschung und Gesellschaft vor. Während die Themen der früheren Bände

»Gehirn und Freiheit« und »Entmoralisierung des Rechts – Maßstäbe der Hirnforschung für das Strafrecht« waren, geht es diesmal generell um Entscheidungen.

Unvermeidlich werden darin die grundsätzlichen Aspekte angesprochen, die menschliches Handeln kennzeichnen: Rationalität und Gefühle, Vernunft und Ökonomie, Moral und Ethik, Schuld und Verantwortung. Wer wüsste nicht gerne, wie das alles zusammenhängt, wie es uns beeinflusst, steuert und dennoch (angeblich) frei und verantwortlich entscheiden lässt? Der schmale Band liefert Einordnungen, klärt Zusammenhänge und gibt viele nützliche Hinweise, ohne ein Ratgeber sein zu wollen. Vor allem lehrt er uns, dass unser Handeln seine Ursachen »in unserer biologischen und oft unbewusst

wirkenden Natur« hat und in »dem Bewusstsein nicht zugänglichen Hirnarealen maßgeblich« vorbereitet wird.

Gerhard Roths besonders erhellender Beitrag widmet sich der Frage, wie man denn die beste Entscheidung finden könne im Spannungsfeld zwischen »Verstand und Gefühl«. Das kommt – wen wundert's – auf die Art der Entscheidung an. Automatisierte Entscheidungen laufen eben anders ab als »reflektierte« oder »aufgeschobene intuitive«. Roth betont, dass die Frage nicht auf die Alternative zwischen einem rationalen und einem irrationalen Verhalten hinausläuft. »Es handelt sich um zwei verschiedene Arten von Logik und Erfahrung.«

Es mag manchen enttäuschen, aber bei einem so komplexen Vorgang wie dem Entscheiden ist unser »bewusstes Ich nur teilweise beteiligt«. Auch die weiteren Beiträge tragen dazu bei, unser Bild bedingungsloser Wahlfreiheit zu relativieren. So wird über Frans de Waals Arbeiten zur Moralität von Primaten berichtet. Der Verhaltensforscher macht klar, dass es in der Geschichte der Evolution des Menschen einen Zustand ohne Moral und Kultur nie gegeben habe. Moralisches Verhalten ist demnach bei menschlichen wie nichtmenschlichen Primaten verankert. Ein Buch zum Nachdenken – über sich und andere Tiere.

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Andreas Kilian
Die Logik der Nicht-Logik
 Wie Wissenschaft das Phänomen der Religion
 heute biologisch definieren kann
 Alibri, Aschaffenburg 2010. 230 S., € 17,-

RELIGIONSWISSENSCHAFT

Das »Alpha-Tier« muss unerforschlich sein

Andreas Kilian unternimmt es, Religion aus der Sicht eines Biologen zu betrachten.

Bis heute fehlt eine allgemein akzeptierte Definition dessen, was unter Religion eigentlich zu verstehen ist. Nicht einmal die Religionswissenschaftler können ihren Forschungsgegenstand hinreichend präzise bestimmen – wenig verwunderlich bei mehr als 100 000

verschiedenen Glaubensgemeinschaften weltweit mit reichlich einer halben Million Göttern. Gegen entsprechende Versuche der Geisteswissenschaftler setzt der promovierte Biologe Andreas Kilian sein Unternehmen, von der Warte des Biologen her dem nachzugehen, was

immer man unter Religion oder Spiritualität verstehen mag.

Eine bessere oder zumindest brauchbarere Definition ist dabei nicht herausgekommen. Doch zieht der Autor alle Register, um nachzuweisen, dass Religion am einfachsten als eine auf das Diesseits bezogene, persönliche und sozialpolitische Erfolgsstrategie zu begreifen sei.

Glaubensinhalte – nach Auffassung Kilians Erfindungen des menschlichen Geistes – seien zwar nicht in irgendeinem Sinn wahr, dafür aber höchst nützlich. Sich auf einen der 500 000 Götter und sonstigen »übernatürlichen Wesen« zu berufen, verschaffe Ansehen, Macht, Reichtum – und die Mittel zur Repression gegenüber Nicht- und Andersgläubigen. Raffiniert verklammere sich religiös motivierter Lug und Trug mit den Strukturen der Gesellschaft, und das bis zum heutigen Tag. Mythen und Argumente folgten einem darwinischen Ausleseprozess (»Evolution der Lüge«): Je gebildeter die potenziell Gläu-

ANZEIGE

Natur erleben

So macht Lernen und Beobachten Spaß: Sechs Bücher, Website und App sind miteinander vernetzt

- Für Naturfreunde, die mehr entdecken möchten
- Für Eltern, die ihren Kindern die Natur näher bringen möchten
- Für Lehrende, die wertvolle Tipps für den Unterricht wünschen

www.haupt.ch



Haupt NATUR

Die **neuen Naturführer** aus dem Haupt Verlag!

Jeder Band: 200 Seiten, mehr als 200 Abbildungen, Flexibroschur, € 22,-

978-3-258-07589-1

Auf der Wiese

978-3-258-07590-7

Im Wald

Weitere Bände in Vorbereitung!

www.naturerleben.net



240 S., 200 Farbfotos, 61 Karten
 € 29.90
 978-3-258-07629-4



224 S., 160 farb., 4 sw Abb.
 € 39.90
 978-3-258-07655-3
 Erscheint Mai 2011



256 S., 220 Abb., 24 Karten
 € 29.90
 978-3-258-07660-7



Stephan Schleim

Die Neurogesellschaft. Wie die Hirnforschung Recht und Moral herausfordert

Heise, Hannover 2011. 203 S., € 18,90

Ist das Gehirn das Maß aller Dinge? Stephan Schleim, ein junger und produktiver Neurophilosoph an der Universität Groningen (Niederlande), versucht, aus dem Hype über das Gehirn, der offenbar die Gehirne vernebelt, alle Übertreibungen herauszunehmen. Er durchkämmt akribisch die einschlägigen Experimente – und ist nicht erbaut. Die bildgebende Hirnforschung sei »noch nicht reif genug für den Einsatz vor Gericht«. Die Kernspintomografie werde häufig überschätzt. So sei bis heute noch keine einzige psychische Erkrankung auf diesem Weg diagnostiziert worden. Auch Lügen, Aggressivität oder Gefährlichkeit ließen sich keineswegs damit eindeutig ausmachen. Und zur Lösung »traditionsreicher Probleme der Philosophie« leiste das Hightech-Gerät – entgegen Schleims eigener früherer Überzeugung – keinen nennenswerten Beitrag. Die Hirnforscher haben noch viel zu lernen, bevor eindeutige Aussagen über unser Denken und Verhalten möglich werden. REINHARD BREUER



Gwynne Dyer

Schlachtfeld Erde. Klimakriege im 21. Jahrhundert

Aus dem Englischen von Susanne Held. Klett-Cotta, Stuttgart, 2. Auflage 2010, 383 S., € 22,95

Der kanadische Militärexperte Gwynne Dyer schildert eine von Klimawandel und Überbevölkerung gebeutelte Menschheit zwischen 2019 und 2045. Indien und Pakistan streiten sich um das Wasser, in Mexiko wird das Essen knapp, Kanada und Russland prügeln sich um das arktische Öl: Jedes der sieben Kapitel beginnt mit einem apokalyptischen Szenario, gefolgt von Klimadaten und Experteninterviews, welche die Dringlichkeit zum Handeln klarmachen sollen. Diese Ausführungen sind teilweise langatmig und ohne roten Faden. Zum Schluss serviert der Autor als einzigen, verzweifelten Ausweg aus der miserablen Lage der Welt das Geo-Engineering – dessen Gefahren er jedoch zugleich drastisch schildert. Alarmiert, aber auch ratlos bleibt der Leser zurück. Wer gute Thriller mit Sciencefiction-Touch mag, ist indes mit »Schlachtfeld Erde« bestens bedient. SABRINA HÜTTERMANN



Andreas Kleineberg, Christian Marx, Eberhard Knobloch, Dieter Lelgemann

Germania und die Insel Thule. Die Entschlüsselung von Ptolemaios' »Atlas der Oikumene«

Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2010. 132 S., € 29,90

Im 2. Jahrhundert kompilierte Klaudios Ptolemaios (ja, der mit dem ptolemäischen Weltbild) in Alexandria einen Atlas der ganzen damals bekannten Welt, mit Längen- und Breitengraden entsprechend heutigem Brauch. Das Monumentalwerk litt schon bei seiner Entstehung unvermeidlich unter Übermittlungs-, Schreib- und Rechenfehlern. Hinzu kamen die Irrtümer der Kopisten (das Werk ist nur in Abschriften überliefert), mit der Folge, dass von den dort aufgeführten Orten Germaniens bislang kaum einer im heutigen Deutschland wiederzufinden ist. Geodäten von der TU Berlin haben nun mit Hilfe mathematischer Verfahren für jeden Ort in *Germania Magna* die Koordinaten berechnet, die mit den ptolemäischen Daten, plausiblen Annahmen über die Fehlerfortpflanzung sowie weiteren Quellen am ehesten vereinbar sind – eine Sisyphusarbeit zu Gunsten der Altertumswissenschaft. Lassen sich doch »Hunderte Verortungen erstmals schlüssig klären«. CHRISTOPH PÖPPE



Stefanie Voigt, Markus Köhlerschmidt

Die philosophische Wollust. Sinnliches von Sokrates bis Sloterdijk

Primus, Darmstadt 2011. 196 S., € 19,90

Der Rückentext verspricht erstaunliche Einsichten in das gar nicht so prude Denken vieler klassischer Philosophen. In der Tat überrascht manche Aussage sonst als asketisch bekannter Geistesgrößen – etwa wenn Arthur Schopenhauer schreibt, die intimste Kenntnis des Wesens der Welt sei durch die Wollust im Akt der Kopulation zu erlangen. Allerdings werden auch Erotomanen wie der Marquis de Sade und Giacomo Casanova oder Psychologen wie Sigmund Freud bemüht, um eine positive Einstellung vieler »Philosophen« zum Sex zu belegen. Und etliche großen Denker wie René Descartes oder Immanuel Kant bestätigen sehr wohl das gängige Bild vom unversöhnlichen Gegensatz zwischen Erhabenem und Vulgärem. Insofern bietet das Buch sogar mehr, als der Rückentext verheißt: eine kurz gefasste Geistesgeschichte der Sexualität in der abendländischen Kultur. GERHARD TRAGESER

VIDEOS

AUS DER WISSENSCHAFT –
SPANNEND UND INFORMATIV

TECHNIKGESCHICHTE

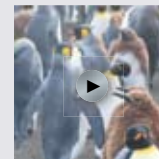
Der Mechanismus von Antikythera



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

ÖKOLOGIE

Viel mehr als nur lästig



Die Befürchtungen sind nicht neu: Könnten Pinguine, die zu Forschungszwecken markiert wurden, unter den an ihren Flügeln angebrachten Metallbändern leiden? Nun hat eine Langzeitstudie Belege geliefert.

STREITGESPRÄCH

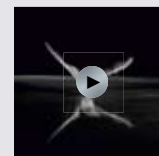
Der modellierte Patient



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

KOGNITIONSFORSCHUNG

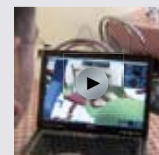
Der akustische Spiegel



Dass Fledermäuse ihre Beute per Echoortung identifizieren, ist lange bekannt. Doch woher wissen sie, ob unter ihnen eine ausgedehnte Wasserfläche liegt?

BIOCHEMIE

Foldit – das Online-Spiel zur Proteinfaltung



Erst die dreidimensionale Struktur, zu der sich ein Protein faltet, entscheidet darüber, welche Funktion es im Körper übernimmt. Doch wie findet man anhand der DNA-Sequenz des Proteins heraus, welche Struktur es einnehmen wird?

bigen, umso erlesener müsse die Argumentationskunst der Religionsvertreter sein. Das »Alpha-Tier« in der Riege der transzendenten Wesen – sprich: Gott – muss undefinierbar, unerkennbar und letztendlich unbegreifbar bleiben, um jedweder Überprüfung entzogen zu sein. Ganz im Sinn des im Buch zitierten Ambrose Bierce: Die Religion ist eine Tochter der Furcht und der Hoffnung, die den Nichtwissenden das Wesen der Unerkennbarkeit erklärt.

Nicht minder raffiniert sei auch der Versuch der Glaubensvertreter, die Wissenschaft mit ins Boot zu holen. Die Religiösen deuten Schöpfung als »Evolution plus X« und empfehlen eine Art Stillhalteabkommen: Die Religion möge sich nicht in die Wissenschaft einmischen und umgekehrt. Doch das untergräbt unter dem Vorwand der Toleranz ein Grundprinzip der Wissenschaft, nämlich alles in Frage zu stellen und alles kritisch zu untersuchen.

Verhältnismäßig wenig geht Kilian auf die hirnbioologischen Untersuchungen zur Spiritualität ein, obwohl gerade sie doch recht gut erahnen lassen, warum wir – oft dem eigenen Verstand entgegen – eine Neigung zum Mystischen verspüren. Ohne eine solche Tendenz wären die Allgegenwart und der Erfolg der Religionen noch erstaunlicher als ohnehin. Sicher hat der amerikanische Genetiker Dean Hamer mit seinem Buch »Das Gottes-Gen« (2006) zu kurz gegriffen, als er die Neigung zur Spiritualität an einem einzelnen Gen festmachte. Dennoch spricht vieles dafür, dass es charakterlich gebundene Bereitschaften für religiöses Denken gibt, für Hoffen und Glauben – Verhaltenstendenzen, die auf der Kombination von mehreren oder auch vielen Genvarianten beruhen mögen.

Resümee: ein kluger, glänzend formulierter Text auf dem neuesten Stand der Forschung, der Logik dort einsetzt,

wo es der anderen Seite an solcher gebracht. Verhaltensbiologische und sozialpolitische Aspekte stehen im Vordergrund. Von der Anlage her mag Kilians Buch anderen naturwissenschaftlich orientierten, religionskritischen Werken der Gegenwart vergleichbar sein, etwa dem »Gotteswahn« von Richard Dawkins oder Daniel C. Dennetts »Den Bann brechen« (rezensiert in Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 118 und 1/2010, S. 100). Bei weniger als dem halben Umfang aber ist es bündiger in der Diktion und zudem voller eigenständiger Gedanken und Argumente.

Was fängt ein Mensch, der bei den »großen und letzten« Fragen eher alogisch, gefühlsmäßig operiert, mit den Überlegungen des Autors an? Auf der Suche nach Sinn und Trost hofft er auf den rettenden Strohalm. Das wird er trotz Kilian und der vielen anderen Aufklärer weiterhin tun, so er deren Denkart überhaupt zur Kenntnis nimmt. Und die anderen, die vom Baum der Erkenntnis nicht genug naschen können? Ich bin mir sicher, so manche sehnen sich aus ihren eisigen intellektuellen Höhen hinab in die Ebene der herzerwärmenden Lebenslügen. Schließlich der Autor selbst? Auf Seite 65 kündigt er einen Abschnitt 3,5 zur Sinngebungsrolle der Religionen an, spricht dort aber über etwas ganz anderes: über »Interpretationshoheit«. Zeigt sich hier ein persönliches Problem?

Übrigens: Unter demselben Titel hätte auch ein Buch über die »großen und letzten« Fragen der Quantenmechanik und der modernen Astrophysik geschrieben werden können, Disziplinen, bei denen unsere gewohnte logische Richtschnur über weite Strecken hin ebenfalls versagt. Spätestens dann, wenn es auf der Suche nach einer das Uni- oder Multiversum gestaltenden Kraft geht, um das anthropische Prinzip also, mischt selbst bei Einhaltung streng wissenschaftlicher Kriterien die Gottesfrage wieder mit – Logik oder Nicht-Logik?

Gerald Wolf

Der Rezensent ist emeritierter Professor für medizinische Neurobiologie an der Universität Magdeburg.

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



Maxwells Dämon – supercool

Ein Gedankenexperiment aus dem 19. Jahrhundert brachte Forscher auf die Idee, winzige Atommengen durch ein raffiniertes Sortierverfahren auf bislang unerreichte Tiefsttemperaturen zu kühlen

ADAM VOORHES



KATJA MOMBAUR

Roboter auf zwei Beinen

Die mathematische Modellierung des menschlichen Gehens erlaubt, Bewegungsabläufe auch für einen Roboter zu programmieren



DAVID LUTTSCHWAGER

Blutmoleküle in Dinofossilien

In manchen versteinerten Saurierknochen hielten sich mehr als 65 Millionen Jahre lang Reste von Proteinen. Sogar die Bausteinfolge lässt sich noch bestimmen – für Verwandtschaftsanalysen hochwillkommen

Philosophie der Naturwissenschaft

Die Grundfragen von Physik und Biologie beschäftigen auch Philosophen: Was sind Objekte? Warum fließt die Zeit nur in eine Richtung? Was sind Naturgesetze? Und nicht zuletzt auch die Frage nach der Ursache und dem Wesen von Kausalitäten in der Genetik

Aufrüstung gegen Malaria

Um die tödliche Tropenkrankheit zu besiegen, entwickeln Forscher nicht nur neue Impfstoffe, sondern versuchen auch, Moskitos zu immunisieren – die Überträger des Erregers

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