

Spektrum

DER WISSENSCHAFT



ÖKOLOGIE
Zivilisations-
keime bedrohen
Meeressäuger

NOVEMBER 2013

SCHWERPUNKT-
THEMA

Die Ernährungsfalle

Forscher entdecken
verblüffende Ursachen
für Übergewicht

ARCHÄOLOGIE

Einblicke in die
Kultur der Gallier

COMPUTER

Die Mikroprozessoren
der Zukunft

Eine neue Quantentheorie

Gibt die Wellenfunktion
nur die subjektive
Sicht des Beobachters
wieder?

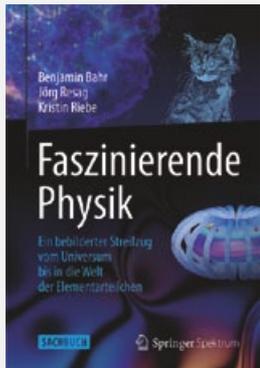
8,20 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E





Spektrum Sachbücher

Aktuelle Neuerscheinungen

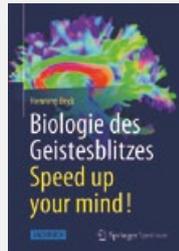


2013, 326 S., 680 Abb. in Farbe. Geb.
ISBN 978-3-642-37811-9
€ (D) 29,99 | € (A) 30,83 | *sFr 37,50

B. Bahr, J. Resag, K. Riebe
Faszinierende Physik

Dieses reich illustrierte Lesebuch bietet einen packenden Streifzug durch die spannendsten und aktuellsten Themen der modernen Physik! Auf jeweils einer Doppelseite wird dem Leser dabei mit vielen Bildern ein kompakter und klar verständlicher Einstieg in jeweils ein Thema und den Stand der Forschung geboten – und so insgesamt etwa 140 verschiedene Themen beleuchtet und jedes klar – fast ganz ohne Formeln – erläutert.

€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. Die mit * gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.



2013, 243 S. 63 Abb. in Farbe. Brosch.
ISBN 978-3-642-36532-4
€ (D) 14,99 | € (A) 15,37
*sFr 16,50

Henning Beck
Biologie des Geistesblitzes

Anhand von Beispielen aus dem Alltag erklärt der deutsche Science-Slam-Meister 2012 Henning Beck was die Hirnforschung zum Thema „Kreativität“ zu sagen hat, was ein sogenannter Geistesblitz überhaupt ist und wie dieser entsteht.



2013, XI, 365 S. 2 Abb. Brosch.
ISBN 978-3-642-37340-4
€ (D) 19,99 | € (A) 20,51
*sFr 25,00

Kelly G. Lambert
Lehrmeister Ratte

Was wir von den erfolgreichsten Säugetieren der Welt lernen können, erzählt dieses unterhaltsame Buch. Es veranschaulicht, wie die Ratte uns Vieles über Arbeit und Spiel, Partnerwerbung, Kinderaufzucht und Sucht offenbaren kann.



2013. 310 S. 140 Abb. Brosch.
ISBN 978-3-642-37713-6
€ (D) 19,99 | € (A) 20,55
*sFr 25,00

Boris Lemmer
Bis(s) ins Innere des Protons

Science Slam-Meister Boris Lemmer über die Weit der Teilchenphysik.
„Bei vielen seiner witzigen Ideen, Physik humorvoll zu erklären, war ich echt sauer. Ich dachte mir: Warum zum Teufel bin ich da nicht drauf gekommen ...“ **Vince Ebert**



2013. 290 S. 10 Abb. Geb.
ISBN 978-3-642-37736-5
€ (D) 19,99 | € (A) 20,51
*sFr 25,00

Thomas Grüter
Offline!

Noch in diesem Jahrhundert wird die Informationsgesellschaft zusammenbrechen, weil die globalen Informationsnetze zerreißen werden. Das ist die provozierende These des Wissenschaftlers und Sachbuchautors Thomas Grüter.

Einfach bestellen: SpringerDE-service@springer.com



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Wege zum Übergewicht

»**D**ass du dabei nicht fett wirst!« »Du bist wohl ein schlechter Futtermittler?« Sprüche wie diese habe ich seit Kindertagen zu hören bekommen, wenn sich mal wieder größere Essensportionen auf meinem Teller türmten. So etwa im Studium, wenn ich zum obligatorischen »Nachschlag holen« ging. Besonders krass war es mir während der Grundausbildung des Wehrdienstes ergangen, als ich trotz riesiger vertilgter Essensberge bis auf unter 60 Kilogramm abnahm – wurde man dort doch permanent körperlich auf Trab gehalten.

Inzwischen sind mit den Jahren und meiner überwiegend sitzenden Tätigkeit die Essensportionen zwar allmählich etwas kleiner geworden, aber ohne ein zweites Frühstück komme ich immer noch nicht über den Tag. Ein Luxusproblem? Vielleicht. Viele meiner Bekannten kämpfen umgekehrt massiv mit den Kilos, trotz mehr oder weniger strenger Gegenmaßnahmen. Gesellschaftlich betrachtet sind Übergewicht und Fettleibigkeit gewaltig auf dem Vormarsch. In Deutschland gelten heute rund 20 Prozent der Erwachsenen als krankhaft fettleibig (adipös), in den USA trifft das sogar bereits mehr als ein Drittel der Bevölkerung.

Woran liegt das? Einfach nur »an den Genen«, wie man oft hört, oder halt eben doch an mangelnder Selbstdisziplin? Oder lassen sich spezifische physiologische Mechanismen festmachen, welche die auf den ersten Blick mysteriösen individuellen Unterschiede erklären? Mit dieser Frage beschäftigt sich unser Schwerpunkt zu Ernährung und Übergewicht ab S. 30. Dort argumentiert Paul Kenny vom amerikanischen Scripps Research Institute, dass Adipositas eine echte Suchterkrankung sein könnte. Moderne, extrem kalorienreiche Nahrung wie Sahnetorte oder Hamburger wäre demnach eine Art Droge, auf die unser Gehirn ähnlich reagiert wie etwa auf Kokain.

Ab S. 40 stellt Gary Taubes wiederum die ebenso verbreitete wie plausibel klingende Ansicht in Frage, Übergewicht entstehe dann, wenn man regelmäßig mehr Energie zu sich nimmt als man verbraucht. Laut seiner alternativen Hypothese ist eher entscheidend, in welcher Form man die Kalorien zu sich nimmt. Leicht verdauliche Kohlenhydrate würden demnach den Insulinstoffwechsel aus dem Gleichgewicht bringen, worauf der Körper Fett anhäuft statt es zur Energiegewinnung zu nutzen. Rigide klinische Tests sollen hier schon bald Klarheit schaffen.

Der Biologe Robert Dunn schließlich kritisiert ganz grundsätzlich die Kalorienangaben auf Nahrungsmittelverpackungen (S. 36). Sein Standpunkt: Diese pauschalen Zahlen können allenfalls der groben Orientierung dienen – denn wie viel Energie der Einzelne seinem Essen tatsächlich entnimmt, unterliegt ganz unterschiedlichen Einflüssen, etwa der Zubereitungsart oder auch der individuellen Zusammensetzung der Darmflora.

Trotz allem einen guten Appetit wünscht Ihr

Hartwig Hanser

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Physiker **Hans Christian von Baeyer** plädiert für eine neue, radikal subjektive Deutung der Quantenmechanik: Deren Formeln besagen nichts über die Natur an sich, sondern drücken nur unser unvollständiges Wissen über Quantenphänomene aus (S. 46).



Ein bisschen Nationalstolz mag auch dabei sein: Der Archäologe und Historiker **Christian Goudineau** korrigiert ab S. 68 das Bild eines barbarischen Gallien in vorrömischer Zeit.



Arndt Bode (links) von der TU München und Intel-Mitarbeiter **Herbert Cornelius** wagen einen Blick in die Zukunft der Computertchips (S. 86).



3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

12 Spektrogramm

Größter Vulkan der Erde • Stammzellen in lebenden Tieren erzeugt • »Monstervogel« war wohl Vegetarier • Schwarzes Loch auf Diät • Ameisensäure • Stickstoffreduzierende Enzyme arbeiten mit Eisen

15 Bild des Monats

Mysteriöses Gerät aus dem 19. Jahrhundert

16 Forschung aktuell

Genom des Quastenflossers
Erhellendes zum Landgang der Wirbeltiere

Die Ein-Pixel-Kamera
Neues Prinzip der Objektabbildung

Wo Karl der Große Hof hielt
Die Baugeschichte der Aachener Pfalz

Neurogenese im Gehirn
Atombombentests liefern den gesuchten Beweis

Bedrohliche Plastiksuppe
Massen winziger Kunststoffartikel im Meer

SPRINGER'S EINWÜRFE
Beginnt die digitale Kohlenstoffära?

36

Wie viele Kalorien liefert eine Kartoffel?

Energiegehalt einer rohen, mittelgroßen Kartoffel:

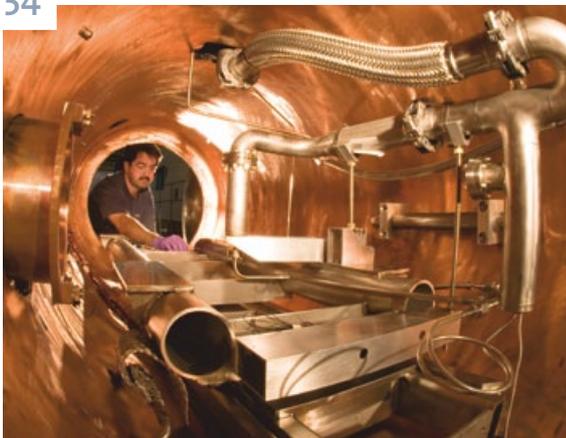
157 g Wasser	$\times 0 \text{ kcal/g} = 0 \text{ kcal}$
36 g Kohlenhydrate	$\times 4 \text{ kcal/g} = 144 \text{ kcal}$
4,3 g Protein	$\times 4 \text{ kcal/g} = 17 \text{ kcal}$
2,6 g Ballaststoffe	$\times 2 \text{ kcal/g} = 5,2 \text{ kcal}$
0,2 g Fett	$\times 9 \text{ kcal/g} = 1,8 \text{ kcal}$
Summe: 168 kcal	

Kochen: + 37 kcal Verdauungsarbeit: - 6 kcal Darmbakterien verwerten: - 2 kcal

Energiegewinn aus der gekochten Kartoffel:

197 kcal

54



BIOLOGIE & MEDIZIN

► 30 Süchtig nach Essen

Paul J. Kenny

Sind krankhaft übergewichtige Menschen genauso vom Essen abhängig wie Drogensüchtige von Rauschmitteln?



36 Trügerische Kalorienangaben

Rob Dunn

Zahlen auf Lebensmittelverpackungen täuschen: Zu viele verschiedene Aspekte spielen bei der Energieausbeute mit.

40 Was macht wirklich dick?

Gary Taubes

Möglicherweise entsteht Fettleibigkeit vor allem durch größere Mengen leicht verdaulicher Kohlenhydrate.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

52 Verräterische Tröpfchenmuster

H. Joachim Schlichting

Auf welchen Wegen fließt Luft an Fenstern entlang? Beschlagene Scheiben liefern die Antwort.

54 Teilchenschleudern der Zukunft

Gerhard Samulat

Um noch höhere Energien zu erzielen, planen Physiker schon mögliche Nachfolger des LHC.

MENSCH & KULTUR

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

64 Sudoku für Feinschmecker

Christoph Pöppe

Auch beim KenKen muss man Kästchen mit Zahlen füllen – aber auf äußerst raffinierte Art.



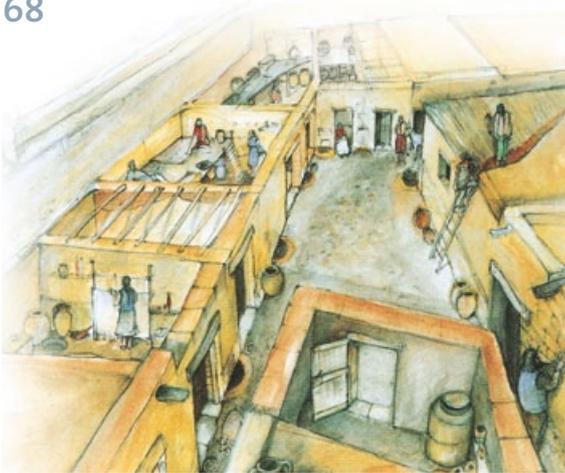
► TITELTHEMA

46 Eine neue Quantentheorie

Hans Christian von Baeyer

Der Quanten-Bayesianismus geht davon aus, dass die von Erwin Schrödinger eingeführte Wellenfunktion nur die subjektive Erwartungshaltung des quantenmechanischen Beobachters wiedergibt.

68



► 68 Klischees mit Tradition

Christian Goudineau

Seit dem 19. Jahrhundert kursiert das Bild eines barbarischen Gallien. Die Archäologie lehrt uns etwas anderes.

INTERVIEW

74 Basisdemokratie gallischer Art

Der französische Forscher Jean-Louis Brunaux erkennt demokratische Strukturen im vorrömischen Gallien.

76 Anatomie einer Keltenstadt

Fabrice Bessière

Archäologen erforschen Bibracte, den Hauptort der Häduer. Stark befestigt, erinnert es an antike Städte.

ERDE & UMWELT

80



► 80 Warum Katzen Delfine umbringen

Christopher Solomon

Krankheitserreger des Menschen und seiner Tiere gefährden zunehmend Meeresbewohner.

TECHNIK & COMPUTER

► 86 Der Mikroprozessor als Alleskönner

Arndt Bode und Herbert Cornelius

Durch die Miniaturisierung verleiben sich die winzigen Chips allmählich alle Funktionen eines Computers ein.

94 Rezensionen

Hakan Baykal: Der erste Reporter • *Tim Flannery*: Im Reich der Inseln • *Thomas Junker*: Die Evolution der Phantasie • *Ernst Künzl*: Die Thermen der Römer • *Bruno P. Kremer*: Blütengeheimnisse • *Thomas de Padova*: Leibniz, Newton und die Erfindung der Zeit u. a.

105 Wissenschaft im Rückblick

Vom Vogelgefieder zur Korallenuhr

106 Vorschau

Titelmotiv: Kenn Brown, Mondolithic Studios
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



Lesegenuss

Welche unterschiedlichen Schicksale Sterne durchlaufen können, beschrieb der Astrophysiker Rolf Launhardt («Das wechselhafte Leben der Sterne», August 2013, S. 46).

Rainer Hamp, Neuburg/Donau: Dem Autor ist es gelungen, einen vielschichtigen Sachverhalt – die Sternentwicklung – sprachlich in Satzbau und Wortwahl und inhaltlich im Aufbau so klar

Der Blick auf das Sternentstehungsgebiet im südlichen Sternbild Achterdeck zeigt gewaltige Gaswolken im intensiven Licht junger, heißer Sterne.

und einleuchtend darzustellen, dass es ein Genuss war, den Text zu lesen. Sehr gut gelungen ist auch der letzte Abschnitt, in dem Herr Launhardt den Inhalt noch einmal mit wenigen Sätzen so zusammenfasst, dass man sich den Gesamtprozess der Sternentwicklung gut vorstellen kann.

Feuerbrand befällt nicht Reis

Pflanzenzüchter versuchen, mittels Transportproteinen der Ertrag von Getreidearten zu steigern («Hilfreiche Transporter in Nutzpflanzen», September 2013, Forschung aktuell, S. 15).

Achim E. Gau, Minden: Auf S. 16 wird ein Artikel von Ting Li zitiert (*Nature Biotechnology* 30, S. 390–392, 2012), bei dem die genannten Wissenschaftler gegen Feuerbrand resistenten Reis züchten. Feuerbrand (englisch: fire blight) ist

eine schwer wiegende bakterielle Pflanzenkrankheit, die von dem Bakterium *Erwinia amylovora* hergerufen wird. Nach meinem Kenntnisstand befällt dieses Pathogen keine Reispflanzen, sondern infiziert Pomoideae, unter anderem Apfel- und Birnbäume; Quitte, Himbeere, Feuerdorn, Rotdorn, Hagedorn, Mispeln. Bei Sichtung der Originalliteratur stellt man jedoch fest, dass es sich bei dem in der zitierten Arbeit genannten Pathogen um das Bakterium *Xanthomonas oryzae* pv. *Oryzae* handelt. Dieses ruft beim Reis den so genannten »bacterial blight« hervor und nicht »fire blight« (Feuerbrand), wie es fälschlich in Ihrem Artikel genannt wurde.

Präzise, bitte!

Eine jüngst bewiesene Annahme ist ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zum Beweis der goldbachschen Vermutung («Goldbach-Variationen», Forschung aktuell, August 2013, S. 16).

Martin Brandenburg, Münster: Die Formulierung der ternären Goldbach-Vermutung im Untertitel sowie im Text – jede ungerade Zahl ist Summe

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)

Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findekle (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com

Ständiger Mitarbeiter: Mike Beckers, Dr. Michael Springer

Editor-at-Large: Dr. rer. nat. habil. Reinhard Breuer

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Anne Angowski, Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistent: Erika Eschwei

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 -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

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: Michaela Butler, Maren Emmerich, Dr. Markus Fischer, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer.

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

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Prof. Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. 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: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Nicole Klemmer, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1373

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 34 vom 01.01.2013. **Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung,

Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2013 (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.



dreier Primzahlen – ist nicht ganz richtig. Stattdessen muss es genauer heißen: Jede ungerade Zahl größer als 5 kann als Summe dreier Primzahlen geschrieben werden. Denn 1, 3 und 5 können nicht so zerlegt werden.

Dunkler Unsinn?

Der theoretische Astrophysiker Volker Springel sieht Chancen, mit neuen Experimenten die geheimnisvolle Materie zu enträtseln (»Der Dunkle Kosmos«, September 2013, S. 60).

Rudolf Thilo, Niederwerrn: Die schon viele Jahre anhaltende Diskussion um »Dunkle Materie« und »Dunkle Energie« verfolge ich mit zunehmender Erheiterung: Da gibt es etwas »Dunkles«, das vermeintlich viel häufiger und insgesamt wichtiger erscheint als alles das, was sich direkt beobachten und nachweisen lässt; aber ganz egal, wie raffiniert die Experimente auch ausgeklügelt werden, der Kram lässt sich einfach mit nichts nachweisen!

Das erinnert mich an die Suche nach dem »Wärmestoff« bis vor einigen Jahrhunderten: Beim Verbrennen von Holz und Kohle oder auch dem Reiben der Hände sollte dieser freigesetzt werden, wodurch die wärmende Wirkung entstehe.

Erst mit dem Bohren von Kanonrohr (bei dem immense Hitze entsteht) und Nachwiegen von Kanone und Bohrabfall wurde ein Gewichtsverlust von genau null bewiesen. Damit war klar, dass ein »Wärmestoff« als Quelle der Wärmewirkung nicht in Frage kommt, was die Sache aber noch rätselhafter machte, da es jetzt gar keine Erklärung für Wärme mehr gab. Es dauerte noch sehr lange, bis Robert Brown die nach ihm benannte Molekularbewegung entdeckte und so klar wurde, dass es sich bei Wärme um Materieschwingungen handelt.

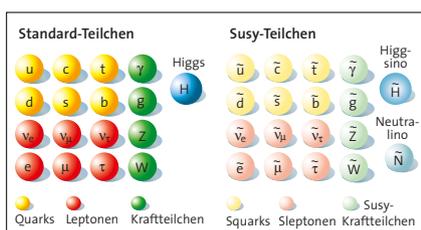
Meine dreiste Behauptung ist, dass es weder Dunkle Materie noch Dunkle Energie gibt, sondern dass das Bekannte und Sichtbare alles Kosmische korrekt erklärt, wenn man nur den richtigen Blickwinkel hat. Entweder gilt es,

ein ganz grundlegendes physikalisches Phänomen neu zu verstehen (wie einst die Molekularbewegung), oder aber unser Sonnensystem befindet sich ganz trivial nicht an einem durchschnittlichen Platz in unserer Galaxis und im Universum, so dass unser irdischer »Blickwinkel« ein ganz ausgefallener ist, der unsere Beobachtungen verzerrt. Ganz persönlich bin ich fest davon überzeugt: Es gibt keine Dunkle Energie und keine Dunkle Materie, genauso wenig wie die »Dunkle Seite der Macht« aus »Star Wars«.

Erratum

»Der dunkle Kosmos«, September 2013, S. 60

Unser Leser Arnold Krause wies uns zu Recht auf einen Tippfehler hin: In einer Grafik auf S. 69 wurden das Higgs-Teilchen und das Higgsino falsch beschriftet, nämlich mit W und \tilde{W} statt mit H und \tilde{H} .



Drei Eigenschaften Gottes

Michael Springer spekulierte über die Auswirkungen des Datensammelns im Internet (»Das Netz gewinnt Macht«, Springers Einwurfe, September 2013, S. 22).

Paul Kalbhen, Gummersbach: Springers Unverständnis »Das finde ich zunächst kaum schlimmer als die Idee, es gebe einen allwissenden Gott« beruht vielleicht darauf, dass die Mehrzahl der Theologen beider westlicher Konfessionen (Protestanten und Katholiken) aus der »zeitlosen« Allwissenheit Gottes im Sinn einer nicht determinierenden »Vorhersicht« allen Geschehens eine vorherbestimmende Prädestinations-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

lehre im Sinn einer allgemeinen göttlichen »Vorsehung« beziehungsweise »Fügung« gemacht hat. Insofern hat Augustinus mit seiner verabsolutierenden Gnadenlehre, die dem Menschen im Prinzip keine Freiheit lässt, nicht nur den Katholizismus verseucht, sondern auch Luther und Calvin infiziert. Ich setze meine eigene These dagegen: Aus der christlichen Offenbarung kann man drei absolute Eigenschaften Gottes folgern:

- die Allgüte – da Gott als absolute Liebe außerhalb des Bösen existiert;
- die Allwissenheit – da Gott als absolutes Sein außerhalb von Raum und Zeit existiert;
- die Allmacht – da Gott alle Freiheit besitzt, innerhalb seiner Allgüte und Allwissenheit zu wirken.

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

Wenn die Blätter fallen

steht **Weihnachten** bald vor der Tür!

Sorgenfrei in die Weihnachtszeit mit einem Geschenkabonnement!



Sterne und Weltraum

Alles über Astronomie und Raumfahrt: direkt aus den Forschungslaboren der Welt. 12 Ausgaben pro Jahr; € 89,- (ermäßigt € 67,80)

Spektrum der Wissenschaft

Experten aus Wissenschaft und Forschung berichten monatlich über die aktuellen Erkenntnisse – kompetent, authentisch und verständlich. 12 Ausgaben pro Jahr; € 89,- (ermäßigt € 69,90)

Gehirn und Geist

Spannende Einblicke in die Welt der Psychologie, Hirnforschung und Pädagogik, geschrieben von renommierten Wissenschaftlern und Fachjournalisten. 10 Ausgaben pro Jahr; € 71,- (ermäßigt € 57,-)

Schon jetzt an Weihnachten denken und bestellen!

So einfach erreichen Sie uns:

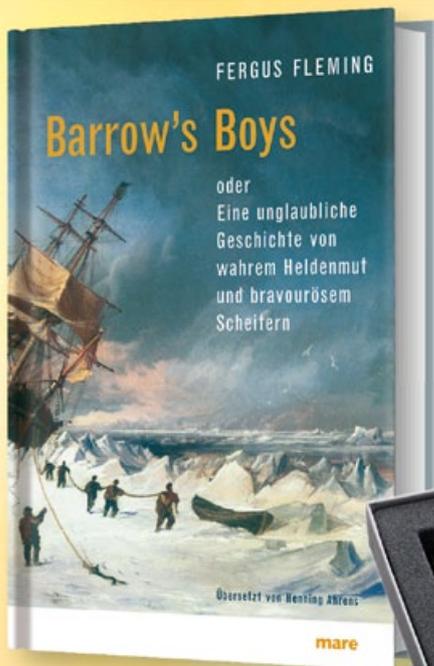
Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/geschenk

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com



Oder QR-Code per Smartphone scannen und Angebot sichern!



WÄHLEN SIE IHR
GESCHENK!



Barrow's Boys

Hinter allen Expeditionen der Royal Navy in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts steckte der Zweite Sekretär der Englischen Admiralität, John Barrow. Er träumte davon, die weißen Flecken von der Landkarte zu tilgen. Viele seiner Boys gaben für diese Träume ihr Leben, wie etwa John Franklin, der sich auf der Suche nach der Ost-West-Passage verirrte und am Ende seine Stiefel aß. Gründlich recherchiert, sehr unterhaltsam und mit viel britischem Humor erzählt.

Lamy-Schreibset »logo«:

Das Schreibset in einer schönen Geschenkverpackung beinhaltet neben einem Kugelschreiber und Druckbleistift auch noch ein elegantes Lederetui für beide Schreibwerkzeuge.

Ihre Vorteile im Geschenk-Abo:

+ EIN GANZES JAHR FREUDE:

Schenken Sie ein Magazin mit anspruchsvollen Artikeln über die neuesten internationalen Entwicklungen aus allen Bereichen der Wissenschaft, Forschung und Technik.

+ 2 IN 1:

Zusätzlich zum Abo gibt es noch den kostenlosen Zugriff auf die Digitalausgabe und das komplette Onlinearchiv des gewünschten Magazins! (Gilt nur bei »Spektrum der Wissenschaft«, »Sterne und Weltraum« sowie »Gehirn und Geist«)

+ MIT GRUSSKARTE:

Pünktlich zum Fest erhält der Beschenkte das erste Heft mit einer Grußkarte in Ihrem Namen (Lieferung der aktuellen Ausgabe bei rechtzeitiger Bestellung einige Tage vor Weihnachten).

Echte Weihnachtsüberraschungen

für Groß und Klein!



FÜR KLEINE
ENTDECKER MIT
GROSSEM
WISSENSHUNGER

Spektrum NEO

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert. Jedes Heft mit einem neuen Schwerpunktthema.
4 Ausgaben pro Jahr; 22,- €

UNSER
DANK FÜR IHR
SPEKTRUM
NEO-ABO



Spiel »Einfach genial«

In diesem Würfelspiel geht es darum, sich als Erster mit Geschick alle Symbole des Wertungsblattes zu erwürfeln. Doch Vorsicht: Der letzte eigene Wurf ist immer auch die Vorlage für alle anderen Mitspieler!



Buch »Die drei ??? und der Eisenmann«

In diesem Buch der Kinderkrimireihe stoßen die 3 ??? auf den Künstler Drago und sein einzigartiges Werk, den Eisenmann. Doch Drago wird verfolgt und fürchtet um sein Leben. Kurz bevor die drei ??? den Fall lösen können, lockt sie jemand in einen gemeinen Hinterhalt ...

Schon jetzt an Weihnachten denken und bestellen!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/geschenk

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



GESCHENKABO

Spektrum – Die Woche
 Deutschlands einziges wöchentliches **digitales Wissenschaftsmagazin** bietet Ihnen auf mehr als 40 Seiten News, Hintergründe, Analysen, Kommentare und Bilder aus der Wissenschaft.
 52 Ausgaben pro Jahr, € 39,95 (ermäßigt € 30,-)

Biologie · Medizin · Hirnforschung:

Diese Reihe beschäftigt sich mit Themen, die um das Leben im weitesten Sinn kreisen. Sie umfasst die Gebiete Biologie, Medizin, Psychologie und Hirnforschung.

Physik · Mathematik · Technik

Diese Spezial-Reihe widmet sich den Naturwissenschaften von Physik über Astronomie, Geowissenschaften, Informatik und Mathematik bis hin zu den technischen Disziplinen.

Archäologie · Geschichte · Kultur

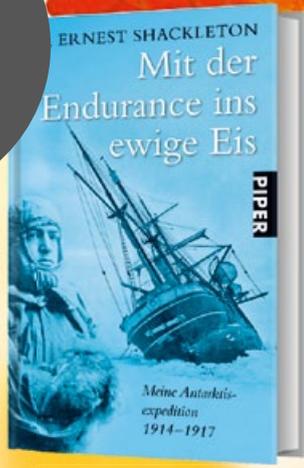
In dieser Reihe werden spannende Themen aus Archäologie, Geschichte und Kulturwissenschaften auf hohem fachlichem Niveau, aber gut verständlich aufbereitet.

Jede Spezialreihe erscheint 4-mal pro Jahr und kostet € 29,60 (ermäßigt € 25,60).

UNSER DANK FÜR IHR SPEKTRUM-SPEZIAL ODER SPEKTRUM – DIE WOCHE-ABO



Das Tablet Sleeve von Reisetel
 Das sichere Zuhause für Ihren Tablet-Computer. Maße: 16,8 x 24,1 x 1 cm. Mit Polster, Reißverschluss, Steckfach und Stecktasche. Außenmaterial: reißfestes Polyestergewebe.



Buch »Mit der Endurance ins ewige Eis« von E. Shackleton
 1914 bricht Sir Ernest Shackleton auf, um als erster Mensch den antarktischen Kontinent mit einem Hundeschlitten zu durchqueren. Doch sein Schiff steckt schon bald im Packeis fest und zerbricht. Zurück bleiben 27 Männer und Shackleton, der seine Mannschaft retten und wieder über das Polarmeer nach Hause bringen muss. Ein Wettkampf mit dem Tod beginnt ...

Geologie

Gigantischer Unterwasservulkan vor Japan

Das Tamu-Massiv im nordwestlichen Pazifik ist der wohl größte Vulkan der Erde – und zugleich einer der gewaltigsten Feuerberge des Sonnensystems. Ein Forscherteam um William Sager von der Texas A&M University (USA) hat unter anderem seismische Messungen und Bohrkerne analysiert und aus den Ergebnissen geschlossen, dass das Tamu-Massiv trotz seiner enormen Ausmaße aus nur einem zentralen Schlot heraus entstand.

Der mittlerweile erloschene Schildvulkan bedeckt eine Fläche von 300 000 Quadratkilometern – das entspricht der Fläche Großbritanniens und Irlands zusammen – und ist etwa 30 Kilometer mächtig. Allerdings drückt sein immenses Gewicht ihn tief in den Erdmantel. Vom Meeresgrund ragt er immerhin noch vier Kilometer in die Höhe; sein Gipfel liegt zwei Kilometer unter der Wasseroberfläche.

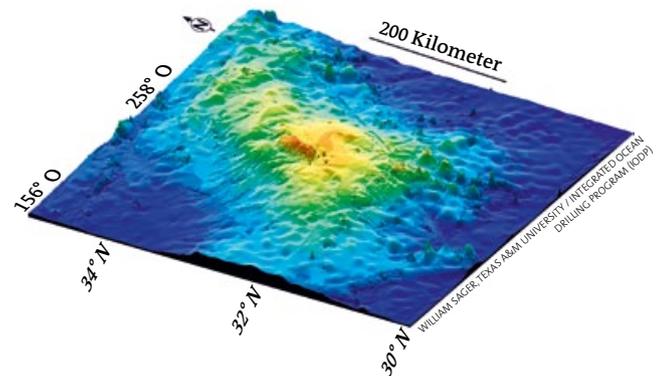
Die Hänge des Massivs fallen extrem flach ab. Im Gipfelbereich beträgt die Neigung lediglich 1 Grad, weiter hangabwärts sogar nur 0,5 Grad. Der Vulkan verdankt seine erstaunlichen Abmessungen nicht nur der enormen Menge an Lava, die hier einst austrat, sondern auch deren Zusammensetzung: Das geschmolzene Gestein war gasarm, sehr dünnflüssig und verteilte sich deshalb über ein großes Areal. Entstanden ist der Berg vor 145 Millionen Jahren, während des Übergangs

von der späten Jura- zur frühen Kreidezeit, und erreichte seine Größe innerhalb von fünf Millionen Jahren.

Mit seinen Ausmaßen übertrifft das Tamu-Massiv den größten aktiven Vulkan der Erde, Mauna Loa, und ist vergleichbar mit dem Olympus Mons auf dem Mars. Allerdings besitzt dieser größte bekannte Feuerberg des Sonnensystems noch 25 Prozent mehr Volumen.

Nat. Geosci. 10.1038/ngeo1934, 2013

Das Tamu-Massiv (hier als 3-D-Modell dargestellt) ist hunderte Kilometer lang und erhebt sich um mehr als vier Kilometer über den Grund des Pazifischen Ozeans.



Biotechnologie

Künstliche Stammzellen in lebenden Mäusen erzeugt

Differenzierte Körperzellen ließen sich bisher nur in Zellkultur in Stammzellen zurückverwandeln. Jetzt haben Forscher das direkt im lebenden Organismus geschafft.

Induzierte pluripotente Stammzellen (iPS-Zellen) entstehen durch Rückprogrammierung von ausgereiften Körperzellen. Sie ähneln natürlichen Stammzellen, beispielsweise können sie sich unbegrenzt vermehren und verschiedene Zelltypen des Körpers hervorbringen. Forscher erzeugen sie, indem sie spezielle Gene ins Erbgut von reifen Körperzellen einfügen und die Zellen anschließend von außen dazu anregen, die Gene abzulesen.

Ein Team um Manuel Serrano vom Spanischen Nationalen Krebsforschungszentrum in Madrid baute die

entsprechenden Erbanlagen ins Genom von Mäusen ein und sorgte dafür, dass sie »eingeschaltet« wurden, sobald die Tiere das Antibiotikum Doxycyclin verabreicht bekamen. Tatsächlich entstanden in den Organen der so behandelten Mäuse kleine, gutartige Tumoren, hervorgegangen aus stammzellähnlichen Zellen – ein klarer Hinweis darauf, dass Körperzellen der Tiere zu iPS-Zellen umprogrammiert worden waren. Diese konnten sich sogar in noch mehr Gewebearten differenzieren als iPS-Zellen aus der Petrischale. Woher der Unterschied rührt, ist nicht bekannt. Eventuell lassen sich dank solcher Erkenntnisse Verfahren entwickeln, um geschädigte Gewebe und Organe im Körper zu regenerieren.

Nature 10.1038/nature12586, 2013

Spektrum DER WISSENSCHAFT **DIE WOCHE**

Das Bild zeigt ein Tablet, das das Cover des Magazins 'Spektrum DIE WOCHE' anzeigt. Das Cover hat den Titel 'nature' und die Nummer '39'. Ein Hauptbild zeigt die Erde. Text auf dem Cover: 'Nur die Temperaturen pausieren', 'Die Flut kommt', 'Entzauberte Antibiotika', 'Die Informatik kann das besser'. Unten rechts steht 'nature 10.1038/nature12586, 2013'.

Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Jeden Donnerstag neu!
52-mal im Jahr mehr als 40 Seiten News, Kommentare, Analysen und Bilder aus der Forschung

www.spektrum.de/diewoche

»Monstervogel« war wohl harmloser Vegetarier

Der ausgestorbene Riesenvogel *Gastornis*, den viele Wissenschaftler für den Topräuber seiner Zeit halten, dürfte in Wirklichkeit ein friedlicher Pflanzenfresser gewesen sein. Die bis zu zwei Meter hohen, flugunfähigen Tiere lebten vor etwa 56 bis 40 Millionen Jahren. Sie hatten einen riesigen, massiven Schnabel, mit dem sie gewaltige Beißkräfte ausüben konnten. Eine verbreitete Auffassung lautet, dass sie damit Beutetiere ergriffen und zermalmten.

Paläontologen um Thomas Tütken von der Universität Bonn bezweifeln das nun. Sie haben die Kalziumisotope in fossilen Knochen des Vogels analysiert. Entlang der Nahrungskette reichern sich leichte Kalziumisotope in Knochen und Zähnen an, weshalb sie in den Überresten von Fleischfressern einen relativ hohen Anteil haben. Das Isotopenverhältnis in *Gastornis*-Knochen unterscheidet sich aber deutlich von den Werten fleischfressender Tiere und entspricht dem von pflanzenfressenden Säugern und Dinosauriern.

Damit mehren sich die Indizien, dass der Riesenvogel Vegetarier war. Fußspuren, die ihm zugeschrieben werden, lassen keine greifvogeltypischen Krallen erkennen; zudem erscheint fraglich, ob sich seine kurzen Beine überhaupt zum Jagen eigneten.

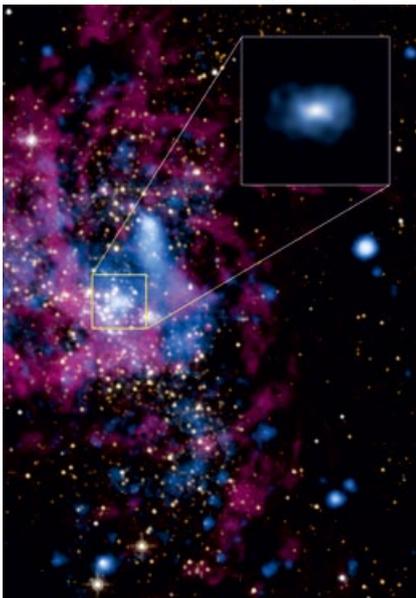
Pressemitteilung der Universität Bonn, 30. 8. 2013



Gastornis' Schnabel beeindruckt, doch diente er vermutlich dem Abrupfen von Grünzeug und nicht dem Töten von Tieren.

THOMAS TÜTKEN, UNIVERSITÄT BONN

RÖNTGEN: NASA / UMASS AMHERST, DANIEL WANG ET AL.; INFRAROT: NASA, STSCI



Eine zusammengesetzte Aufnahme der Region um Sagittarius A*. Blau: Röntgenlicht; violett und gelb: Infrarotlicht.

ASTRONOMIE

Schwarzes Loch auf Diät

Das als Sagittarius A* bezeichnete Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße saugt nur etwa ein Prozent des Gases auf, das in sein Schwerefeld eintritt. Der Rest verlässt diesen Einzugsbereich wieder, ohne den Ereignishorizont zu erreichen. Dies haben Forscher um Q. Daniel Wang von der University of Cambridge mit Hilfe des Röntgensatelliten Chandra festgestellt.

Gas, das in ein Schwarzes Loch strömt, wird zunächst Teil der Materiescheibe, die um seinen Schlund rotiert, die so genannte Akkretions-scheibe. Dazu muss es aber Drehimpuls und Wärme abgeben, was offenbar häufig nicht in hinreichen-

dem Maß geschieht. Die Forscher bestimmten die Temperatur und Dichte der Gasschwaden im Einflussbereich von Sagittarius A* und stellten fest, dass dort beinahe genauso viel Materie ab- wie einströmt. Weniger als ein Prozent des Gases erreicht die innerste Region. Das erklärt, warum uns aus dem galaktischen Zentrum viel weniger Röntgenstrahlung erreicht als erwartet. Würde der Schlund das gesamte Gas in seinem Einflussbereich verschlingen und sich dieses dabei in der Akkretions-scheibe aufheizen, dann würde die Umgebung des Schwarzen Lochs im Röntgenlicht eine Million Mal stärker leuchten als beobachtet.

Science 341, S. 981–983, 2013

BIOLOGIE

Pilzzüchtende Ameisen halten sich bewaffnete Söldner

Ameisen der Gattung *Sericomyrmex* ernähren sich von eigens gezüchteten Pilzkulturen. Häufig werden ihre Kolonien von Schmarotzern unterwandert. Insbesondere Ameisen der entfernt verwandten

Gattung *Megalomyrmex* nisten sich oft dauerhaft in *Sericomyrmex*-Nestern ein, ohne an der Pilzzucht mitzuwirken – und wären somit Parasiten, wie man bislang glaubte. Neue Befunde zeigen jedoch, dass es sich eher um

Symbionten handelt. Demnach sind die »Schmarotzer« eine Art stehendes Heer für die Pilzzüchter. Denn *Sericomyrmex*-Kolonien, in denen sich *Megalomyrmex* eingenistet hat, fallen seltener den Attacken von räuberischen Ameisen zum Opfer. Dies fanden Forscher um Rachele Adams von der Universität Kopenhagen in Feldbeobachtungen und Laborversuchen heraus.

Megalomyrmex besitzt eine hoch effektive Waffe: Die Tiere spritzen ein giftiges Alkaloid auf feindliche Insekten. Das Toxin wirkt auch gegen räuberische Ameisen der Gattung *Gnamptogenys*, die häufig die Kolonien der Pilzzüchter attackieren. Wie die Forscher beobachteten, tötet das Alkaloid die *Gnamptogenys*-Angreifer entweder direkt oder markiert sie, so dass sie nach dem Rückzug von Bewohnern ihres eigenen Nests bekämpft werden. Die Räuber haben sich daran angepasst und erkennen Pilzzüchterkolonien, die von *Megalomyrmex* unterwandert sind, am Geruch – worauf sie den Angriff scheuen.

PNAS 110, S. 15752–15757, 2013

**Kampf eines vermeintlichen Schmarotzers gegen den Feind seines Wirts:
Eine Söldnerameise der Spezies *Megalomyrmex symmetochus* (oben) attackiert
einen Vertreter der räuberischen Ameisenart *Gnamptogenys hartmani* (unten).**



ANDERS ILLUM, UNIVERSITÄT KOPENHAGEN

CHEMIE

Stickstoffreduzierende Enzyme arbeiten mit Eisen

Stickstoff ist in der Luft zwar reichlich vorhanden, als Molekül aber sehr reaktionsträge. Nur wenige Lebewesen können ihn reduzieren und damit in eine Form überführen, die sich in Proteine und Erbmoleküle einbauen lässt. Lange Zeit glaubte man, dass bei natürlich vorkommenden Enzymen, die Stickstoff zu Ammoniak reduzieren, die entscheidenden katalytischen Prozesse an Molybdänatomen ablaufen. Forscher um John Anderson vom California Institute of Technology (USA) bezweifeln das nun. Sie haben die entsprechenden Reaktionsschritte

mit einem Eisenkomplex katalysiert und vermuten, dass sie auch bei natürlichen Enzymen an Eisenatomen stattfinden.

Anderson und seine Kollegen versetzten Tris(phosphanyl)boran-Eisen-Komplexe unter bestimmten Reaktionsbedingungen mit molekularem Stickstoff. Später stellten sie an etwa jedem dritten Komplex gebundenes Ammoniak fest. An anderen Komplexen befanden sich noch unidentifizierte Stoffe, in denen die Forscher Zwischenstufen der Reaktion vermuten. Eine wesentliche Rolle für

die katalytische Funktion scheinen Wechselwirkungen zwischen den Bor- und Eisenatomen zu spielen, auf Grund derer die Komplexe ihre Geometrie verändern können.

In weiteren Versuchen wiesen sie mit isotoptenmarkiertem Stickstoff nach, dass die Komplexe tatsächlich die Reaktion von freiem Stickstoff zu Ammoniak katalysieren. Natürlich vorkommende Enzyme scheinen ähnlich zu funktionieren, nur dass dort Kohlenstoffatome die Rolle des Bors übernehmen.

Nature 501, S. 84–88, 2013

MYSTERIÖSES FUNDSTÜCK

Die physikalische Sammlung des Augsburgers Holbein-Gymnasiums beherbergt ein großes Rätsel: ein Gerät aus dem 19. Jahrhundert, dessen Funktion bis heute unbekannt ist. Es besitzt zwei Wasserwaagen, einen Winkelkranz, ein Objektiv, ein Pendel, zwei Spulen und einen Stromanschluss. Eine Gravur deutet darauf hin, dass es von dem Mechaniker Johann Michael Ekling in Wien gebaut wurde. Insgesamt erinnert das Objekt an ein Magnetometer, das Carl Friedrich Gauß 1832 erfunden und mit Wilhelm Eduard Weber weiterentwickelt hatte.

Um die Funktion des Geräts zu klären, haben das Holbein-Gymnasium, das Deutsche Museum und acatech (die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) einen Preis ausgeschrieben:

www.holbein-gymnasium.de/Forscher-Wettbewerb



EVOLUTION

Zeitreise mit dem Quastenflosser

Ein internationales Forscherteam hat das Genom des Afrikanischen Quastenflossers sequenziert und analysiert. Zwar handelt es sich dabei nicht um die allernächsten lebenden Fischverwandten der ersten Landwirbeltiere, aber dieser Fisch steht ihnen sehr nah. Seine Gene geben Aufschluss, welche Voranpassungen die Eroberung des Landes ermöglichten.

VON AXEL MEYER UND MANFRED SCHARTL

Als wäre ihm auf der Straße ein Dinosaurier begegnet – so fühlte sich J. (James) L. B. Smith, als er den ein- einhalb Meter langen blausilbrigen, weißgefleckten Fisch zum ersten Mal sah. Marjorie Latimer, damals junge Kuratorin am Naturkundemuseum des südafrikanischen Städtchens East London am Indischen Ozean, hatte dieses erste Exemplar der bis dahin unbekannten Art kurz vor Weihnachten 1938 auf dem lokalen Fischmarkt entdeckt und, da es ihr höchst merkwürdig erschien, gleich den bekannten Ichthyologen von der Rhodes University in Grahamstown informiert. Smith erkannte sofort, dass der an die 60 Kilogramm schwere Fisch mit seinen großen, harten Schuppen, den fleischigen, fast an Gliedmaßen erinnernden Flossen und der breiten, zu einer Quaste auslaufenden Schwanzflosse zu einer evolutionären Linie gehörte, die als vor über 70 Millionen Jahren ausgestorben galt. Er gab ihm kurz darauf den wissen-

schaftlichen Namen *Latimeria chalumnae* – nach der Entdeckerin sowie dem Fluss, bei dessen Mündung dieses »lebende Fossil«, wie bald alle Welt es nannte, ins Netz gegangen war.

Tatsächlich sah das Tier äußerlich längst ausgestorbenen Quastenflossern verblüffend ähnlich. Trotz großer Bemühungen dauerte es fast 14 Jahre, bis Smith ein zweites Exemplar der neuen Art fand – diesmal auf den Komoren. Mit Hilfe der südafrikanischen Luftwaffe entführte er es regelrecht aus der französischen Kolonie nach Südafrika. Bis heute haben Wissenschaftler von weniger als 300 Fängen von Quastenflossern Kenntnis, die meisten stammen aus dem südlichen Indischen Ozean. Fischern sind diese Exoten allerdings nicht völlig fremd, und auf Tauchgängen mit kleinen Unterwasserbooten haben Forscher sie inzwischen sogar schon in ihrem Lebensraum in einigen hundert Metern Tiefe beobachtet. Im Jahr 1997 wurde überdies bei Su-

lawesi (dem früheren Celebes) eine weitere Art gefunden, der Manado-Quastenflosser, *Latimeria menadoensis*.

Der Sensationsfund vor 75 Jahren stellte die bis dahin herrschende Vorstellung vom Landgang der Wirbeltiere auf den Kopf. Nachdem um die Mitte des 19. Jahrhunderts die Lungenfische entdeckt worden waren, galten sie als die nächsten lebenden Vettern der Landwirbeltiere unter den Fischen (Bild unten). Nun wies man diesen Rang jedoch den Quastenflossern zu, die ihn dann mehr als fünf Jahrzehnte lang in den meisten Schul- und Lehrbüchern behaupteten. Dass beide Evolutionslinien nah miteinander verwandt sind und den Amphibien näher stehen als »typische« Fische, war bald klar. Nur: Welcher Linie gebührt tatsächlich die Ehre, die nächsten lebenden Verwandten der Tetrapoden – der vierbeinigen Wirbeltiere – zu sein?

Dass *Latimeria* wieder entthront würde, deutete sich schon vor etwa 25 Jahren an. Damals gelang es, kurze Erbsequenzen eines Quastenflossers und eines Afrikanischen Lungenfisches zu bestimmen und zu vergleichen. In dieselbe Richtung wies vor zehn Jahren eine weitere DNA-Studie. Viele Einzelheiten blieben aber noch unsicher. Jetzt wurde am Broad Institute des Massa-



GETTY IMAGES / PHOTO RESEARCHERS / TOM MC HUGH

Frühere Lungenfische gelten als Vorfahren der Tetrapoden und somit der Landwirbeltiere. Sie brauchen Luft, und manche von ihnen überstehen Trockenphasen. Die wenigen heutigen Arten verteilen sich auf Afrika, Australien und Südamerika; hier der Westafrikanische Lungenfisch *Protopterus annectens*.



Erst 1938 wurde der erste lebende Quastenflosser entdeckt, *Latimeria chalumnae* genannt. Vorfahren dieser urtümlich erscheinenden Fische stehen nahe der evolutionären Wurzel, die zu den Landwirbeltieren führte.

CORBIS / HÖBERMAN COLLECTION

chusetts Institute of Technology in Boston das komplette Genom eines Afrikanischen Quastenflossers bestimmt, der von den Komoren stammte. Ein internationales Team, zu dem unsere Labore in Konstanz und Würzburg gehören, hat die fast drei Gigabasen seines Erbguts analysiert (*Nature* 496, S. 311–316, 2013) und zudem viele der Gene mit verwandten Abschnitten des Westafrikanischen Lungenfisches (*Protopterus annectens*) verglichen.

Das Quastenflossergenom hat fast die Größe des menschlichen. Demgegenüber ist das Lungenfischgenom mehr als 30-mal größer als das unsere: Mit über 100 Gigabasen stellt es eines der größten Genome überhaupt dar. Daher ist es technisch immer noch nicht möglich und wäre auch zu teuer, es komplett zu bestimmen. Für die Evolutionsanalysen benutzten wir deshalb das Transkriptom vom Lungenfisch – also seiner Gene für Proteine. So konnten wir zumindest deren Sequenzen in den Vergleich mit dem Quastenflosser einbeziehen.

Auch nach den neuen Analysen sind die Lungenfische tatsächlich etwas näher mit Landwirbeltieren verwandt als die Quastenflosser. Für den aktuellen Stammbaum (siehe Bild S. 18) wurden

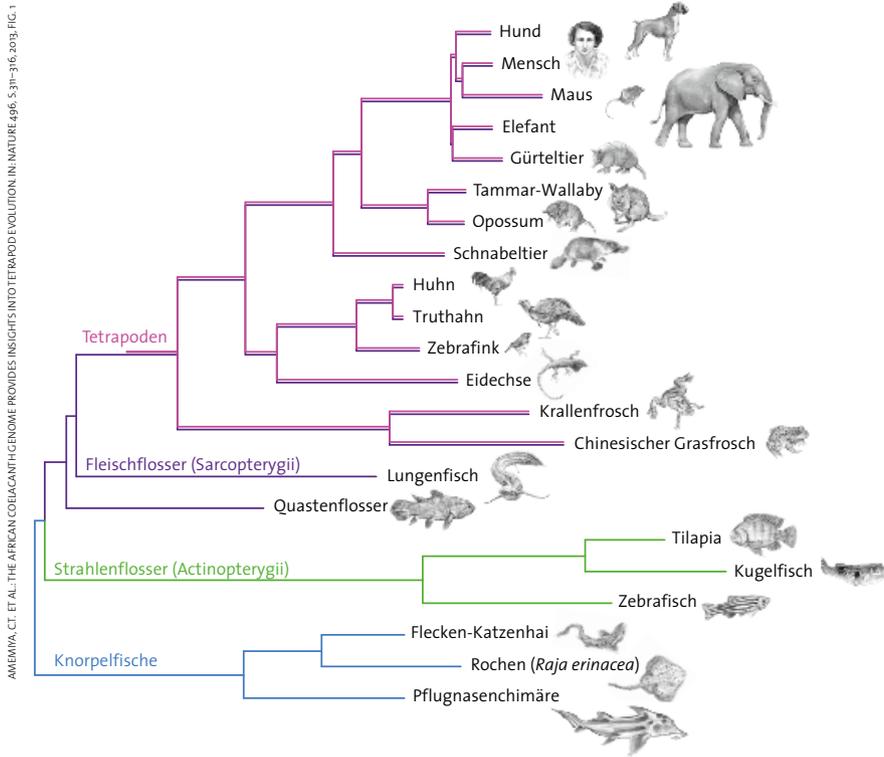
von 23 verschiedenen Wirbeltierarten hunderte äquivalente Gene gemeinsamer Herkunft verglichen. Insgesamt gingen 251 solche »orthologen« Gene in die Auswertungen ein. Wie es jetzt aussieht, lebte unser letzter gemeinsamer Vorfahre mit den Quastenflossern vor etwas mehr als 400 Millionen Jahren. Die letzten Vorfahren der Lungenfische und Landwirbeltiere existierten vor vielleicht »nur« 380 Millionen Jahren.

Aufbruch aufs trockene Land

Genvergleiche zwischen Quastenflosser, Lungenfisch und Vertretern anderer Gruppen geben unter anderem wertvollen Aufschluss über die Voraussetzungen zum »Landgang« der Wirbeltiere, also über eventuelle genomische »Voradaptationen« (Präadaptationen) bei den früheren Quastenflossern und damit ebenso bei dem gemeinsamen Vorfahren von Lungenfischen und Landwirbeltieren. Bei den Vergleichsstudien war zu berücksichtigen, dass auch die heutigen Quastenflosser nochmals eine eigene Evolution von 400 Millionen Jahren hinter sich haben, zwischen unseren Genen und denen ihrer heutigen Arten also zusammen mehr als 800 Millionen Jahre an Veränderungen lie-

gen. Dies bei den Analysen in Betracht zu ziehen, um genetische Merkmale der Frühzeit zu rekonstruieren, erforderte einiges Geschick. Trotzdem gelang das den Forscherteams in etlichen Fällen.

Genau genommen darf man einen heutigen Quastenflosser also keineswegs als »lebendes Fossil« bezeichnen, wie auch andere urtümlich erscheinende jetzige Arten nicht. Äußerlich mag er den Vorfahren immer noch verblüffend ähneln, aber die molekulare Ebene muss das nicht notwendigerweise widerspiegeln. Und tatsächlich ist gut zu erkennen, dass auch beim Quastenflosser einigermaßen regelmäßig Mutationen in der Abfolge der DNA-Bausteine in den Genen stattfanden. Wie die Daten allerdings zeigen, geht diese »Mutationsuhr« langsamer als bei den meisten anderen Wirbeltieren. Möglicherweise hängt das mit dem relativ trägen Stoffwechsel dieser Tiere zusammen, was sich vielleicht mit ihrer vergleichsweise konstanten Umwelt in der Meeresresttiefe erklärt. Immerhin konnten die Afrikanischen Quastenflosser in ihren verschiedenen Lebensräumen, vor den Küsten Süd- und Ostafrikas und bei den Komoren, mit der Zeit mehrere genetisch unterschiedliche Populationen herausbilden, wie einige molekula-



Dieser Stammbaum der landlebenden Wirbeltiere fußt auf genetischen Vergleichen zwischen den angeführten Arten. Die Evolutionslinien der Quastenflosser und der Lungenfische trennten sich vor über 400 Millionen Jahren. Vor rund 360 Millionen Jahren eroberten die Wirbeltiere das Land.

re Marker zeigten (*Current Biology* 22, S. R439–R440, 2012).

Große Vielfalt springender Gene

Im Gegensatz zu den proteinkodierenden Passagen des Genoms läuft die Evolution so genannter Transposons bei *Latimeria* ebenso schnell ab wie bei anderen Fischen und bei den Landwirbeltieren. Es handelt sich dabei um genetische Abschnitte, die im Genom in oft vielen tausenden Kopien vorhanden sind und »springen«, also mitunter das Chromosom wechseln und dadurch in erheblichem Maß für Umstrukturierungen sorgen. Nicht selten liefern sie Vorlagen für neue regulatorische Elemente oder sogar für proteinkodierende Genbereiche. Das Quastenflossergenom enthält relativ viele Transposons und auffälligerweise mehr Superfamilien davon als das von Landwirbeltieren. Viele scheinen sogar immer noch aktiv zu sein.

Zu der Reihe besonderer Merkmale von Landtieren, für die in der Studie

nach möglichen Voranpassungen bei Quastenflossern gesucht wurde, gehörten unter anderem die Ausscheidung von Stickstoff, der Geruchssinn und die Gene, die für die Entwicklung von Gliedmaßen verantwortlich sind.

Stickstoff fällt beim Protein- und Aminosäurestoffwechsel in Form von Ammoniak an. Fische geben das giftige, wasserlösliche Endprodukt direkt an ihre Umwelt ab. Die landlebenden Amphibien und Säuger machen daraus in der Leber im Harnstoffzyklus mit Hilfe von Enzymen ungiftigen Harnstoff.

Wie Artenvergleiche zeigten, stand beim Übergang zum Landleben gerade das Schlüsselenzym für die Harnstoffsynthese – nämlich das für den Harnstoffzyklus geschwindigkeitsbestimmende Eingangsenzym CPS1 (Carbamoylphosphatsynthase 1) – unter einem starken Selektionsdruck. Bei den Landtieren sind wichtige funktionelle Domänen des Enzyms verändert – offensichtlich war das ein wichtiger Schritt bei der Eroberung des Landes.

Stark umgestellt hat sich auch das Riechsystem. Anscheinend vermehrten und differenzierten sich die Gene für Geruchsrezeptoren und ihre Regulatoren bereits früh in der Evolution hin zu den Landtieren. Offenbar war es vorteilhaft, möglichst viele der diversen flüchtigen chemischen Substanzen in der Luft genau identifizieren zu können.

Ein Grund, warum Quastenflosser früher als Vorläufer der Landwirbeltiere galten, war die Gestalt ihrer Flossen, die auf kurzen, fleischigen Stümpfen sitzen. Die Anordnung der Knochen darin erinnert tatsächlich schon an die in den Gliedmaßen der Tetrapoden. Den Landtieren sind elf Gene verlorengegangen, die sich bei Fischen an der Flossenbildung beteiligen. Dafür entstanden neue regulatorische Elemente zu den Genen, die nun die Gliedmaßen ausbilden. Wie wichtig diese Regulatoren von Anfang an waren, zeigt sich daran, dass sie sich in der späteren Evolution der Landwirbeltiere nicht mehr wesentlich verändert haben. Für das Gliedmaßenwachstum spielen verschiedene so genannte Hox-Gene eine entscheidende Rolle – sie geben beim Embryo vor, wohin welche Strukturen gehören. Wie sich nun zeigte, enthält schon ein bestimmtes Hox-Gencluster des Quastenflossers spezielle regulatorische Sequenzen – also »Genschalter« –, die dann bei Landtieren neue Funktionen bekamen. Hier dürfte eine Voranpassung für den Landgang vorliegen, die schon vor über 400 Millionen Jahren existierte.

Solange es nicht möglich ist, das Genom eines Lungenfisches komplett zu sequenzieren, bietet das Quastenflossergenom also immer noch den besten Zugang zu vielen Fragen, was die Eroberung des Landes durch Wirbeltiere betrifft. Die dafür erforderlichen Umstellungen gehörten sicherlich zu den wichtigsten auch unserer Evolutionsgeschichte.

Axel Meyer hat an der Fakultät für Biologie der Universität Konstanz den Lehrstuhl für Zoologie und Evolutionsbiologie inne. **Manfred Schartl** hält den Lehrstuhl für Physiologische Chemie I am Biozentrum der Universität Würzburg.

Wo Karl der Große Hof hielt

Die Aufarbeitung alter Grabungsbefunde und neuer Messungen liefert überraschende Einsichten in die Baugeschichte der Aachener Pfalz.

VON SEBASTIAN RISTOW

Um ihr Reich gut zu verwalten und Konflikte schnell zu bereinigen, reisten die fränkischen Könige mit ihrem Hofstaat durch das Reich und residierten zeitweilig in »Pfalzen«. Diese Bezeichnung ist abgeleitet von »palatium« beziehungsweise dem Palatin, einem der sieben Hügel Roms, auf dem der Palast des Kaisers stand. Die bekannteste und für das Frühmittelalter wohl auch prachtvollste Anlage war die Pfalz Karls des Großen (regierte 768–814) in Aachen. Von ihrem Kernbereich sind noch zwei Großbauten erhalten – der Dom, einst die Marienkirche, sowie das historische Rathaus mit dem angebauten Granusturm, das als Aula erbaut worden war (siehe Plan rechts). Sie markieren sozusagen die beiden Pole der Königsherrschaft nach damaligem Verständnis: Der König war als weltlicher Herrscher auch Bewahrer des Christentums.

Nicht aus einem Guss

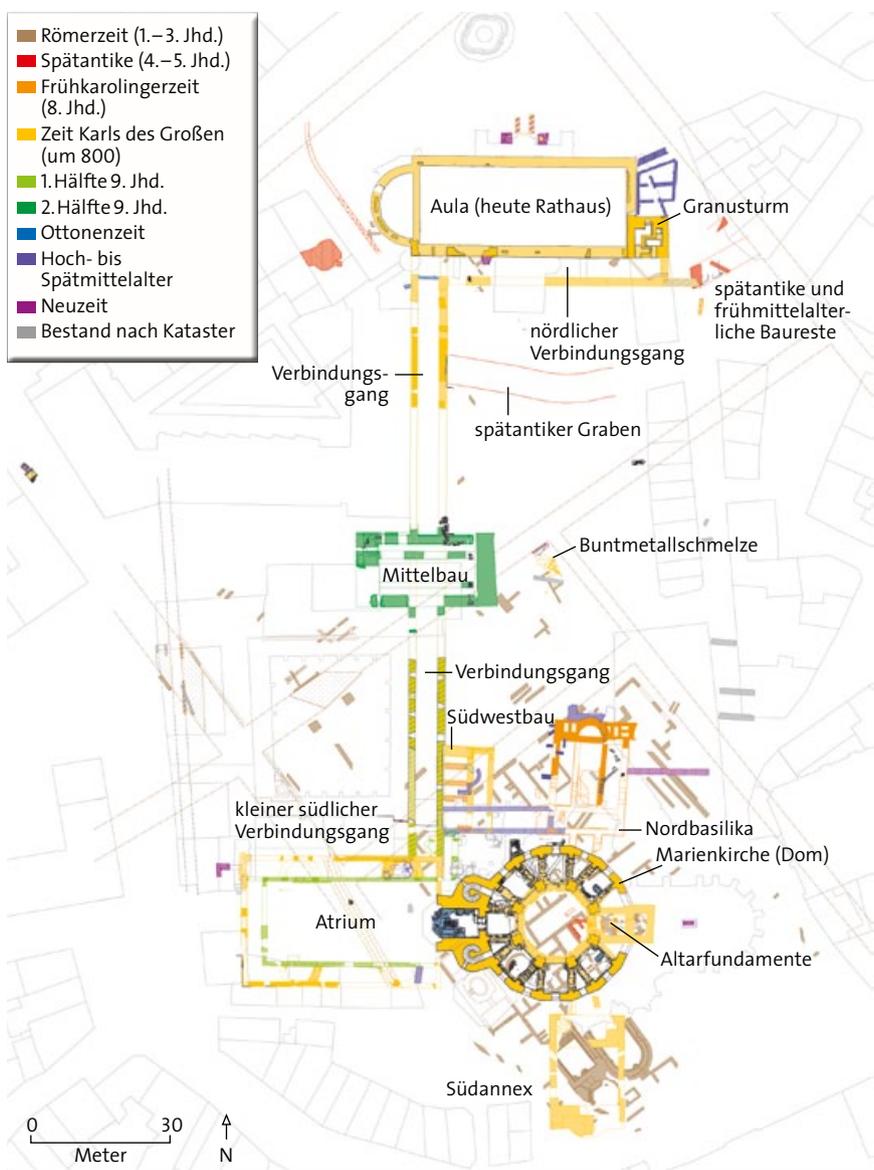
Seit gut 120 Jahren haben Grabungen weitere Gebäudeteile ans Licht gebracht, und es mangelt nicht an Versuchen, den Gesamtkomplex zu rekonstruieren. Dieser, so die Lehrmeinung, sei von den Baumeistern Karls in einem Rutsch geplant und errichtet worden. Neue Grabungen sowie die kritische Prüfung der Funde und Dokumentationen früherer Untersuchungen ermöglichen nun aber erstmals, verschiedene Bauabschnitte zu unterscheiden. Demnach gab es Vorläuferbauten – und der Auftraggeber erlebte die Vervollendung der Kernpfalz nicht mehr!

Von 1910 bis 1914 hatte der damalige Regierungsbaumeister Erich Schmidt fast das gesamte Innere des Domes und die westlichen Teile des zwischen der Kirche und dem heutigen Rathaus liegenden »Katschhofs« aufgedeckt – bis

hinunter zu Schichten aus römischer Zeit. Zwei Weltkriege forderten ihren Preis: Funde, Materialproben und ein Teil der Aufzeichnungen gingen verloren.

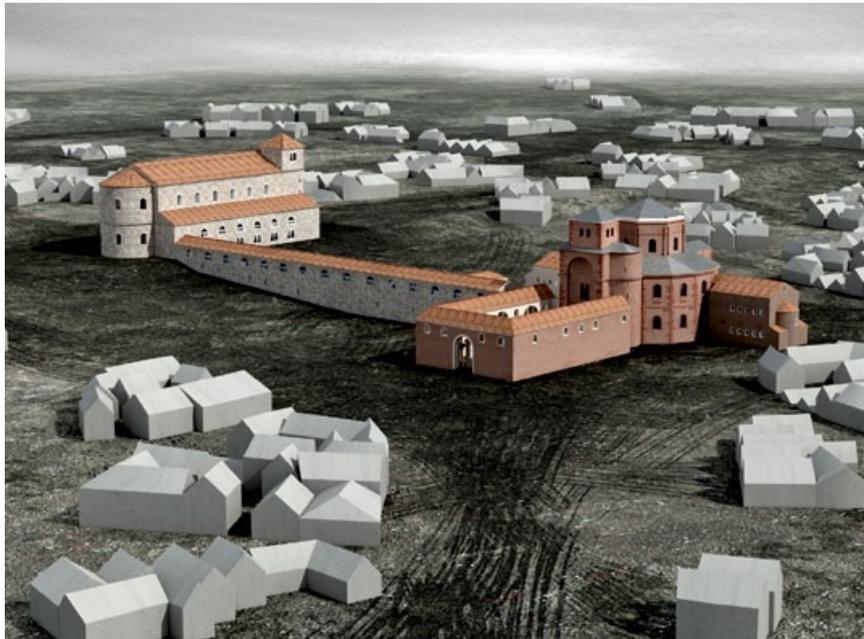
Aachener Stadtarchäologen öffneten einige der Grabungsareale zwischen 2007 und 2011 erneut. Ihre Ergebnisse

wurden auf Initiative der Stadt Aachen mit den verbliebenen Dokumentationen Schmidts abgeglichen. Zudem forschten die Projektmitarbeiter auch in den Depots von Dom und Museum sowie in einschlägigen Archiven Aachens, Bonns und Kölns, wo sie manch verloren geglaubten Fund und Doku-



Anders als lange angenommen entstand Aachens Karolinger-Residenz nicht in einer, sondern in mehreren Bauphasen. Grabungen brachten auch antike Gebäude zu Tage.

NARMER ARCHITECTURE STUDIO, BUDAPEST (ZSOLT VASÁROS, MÁRTON ZOLTÁN TÓTH UND GÁBOR NAGY) UND ARCHAEOPLANRISTOW, KÖLN (SEBASTIAN RISTOW UND ALEXANDER KOBE)



Diese Rekonstruktion zeigt die Pfalanlage um 800 mit Aula (links) und Marienkirche mit vorgebautem Atrium (rechts).

mentationsrest wiederentdeckten und in das Gesamtbild einpassten.

Im Licht dieser Neuauswertung zeigt sich, dass Karls Baumeister bereits etliche Gebäude und Baureste vorfanden und teils weiterverwendeten. Einige davon waren unter Pippin III. (regierte 751–768), andere schon im 5. Jahrhundert, also noch in gallo-germanorömischer Zeit errichtet worden. Im Bereich des historischen Rathauses etwa, das im Wesentlichen Karls »Aula« umfasst, in der er seine Gesprächspartner empfing, erhob sich in der Antike ein »burgus«, also ein von Wehrmauer und Graben umgebener Festungsbau. Etwa seit Christi Geburt existierte im Bereich der heutigen Innenstadt eine umfangreiche römische Siedlung. Das spätantike Kleinkastell schützte die verbliebenen Bewohner vor den Bedrohungen der Franken, die die Römerstraße von Köln nach Boulogne-sur-Mer für Einfälle ins Reich nutzten.

Mit der Eroberung Galliens im 5. Jahrhundert durch die fränkische Dynastie der Merowinger begann aus Sicht der Historiker das westeuropäische Frühmittelalter mit seinen neuen Herrschaftsformen und später auch mit der Dominanz der Kirche. Wie Aa-

chen im Bereich des heutigen Stadtzentrums bis 751 ausgesehen hat, wissen wir nicht. Dann jedoch lässt sich ein von Südwesten herangeführter Kanal nachweisen, der vielleicht von dem Karolingerkönig Pippin III. in Auftrag gegeben worden war – das legen Radiokohlenstoffdatierungen von Holzkohle nahe, die im Mörtel entdeckt wurde. Auch von Pippins Pfalz in Aachen kamen einige Baureste zu Tage, darunter die zweigeschossige Nordbasilika, die um 800 in die Marienkirche einbezogen worden ist. Dort, wo später deren Chor entstand, gab es Reste eines Vorläuferbaus – Schmidt hatte Teile einer Apsis und das Fundament eines Altars ausgegraben. In diesem Bereich lag im 7. und 8. Jahrhundert vermutlich auch ein Friedhof, allerdings ist die Fundlage hier nicht eindeutig.

Datierung anhand von Bauholz

Unter dem Fundament des Oktogons – des achteckigen Kuppelbaus der Marienkirche – konnten bei Ausgrabungen im Jahre 1910 und zuletzt wiederum 2009 Gründungspfähle geborgen werden. Diese Hölzer waren zur Stabilisierung in den Untergrund gerammt worden. Mit den Methoden der Dendro-

chronologie lässt sich das Fälldatum mit einer Genauigkeit von fünf Jahren auf das Jahr 798 festlegen. Baubeginn des Gotteshauses war also auf jeden Fall nach 793. Einem Brief jener Zeit zufolge standen 798 im Inneren der Kirche bereits Säulen. Zeitgenossen nannten den Bau »ecclesia«, »basilica« oder ähnlich, erst in den 870er Jahren sprach man von »Pfalkapelle«.

Um die auf die Kuppel einwirkenden Kräfte aufzunehmen, waren in 25 Metern Höhe vier eiserne und ein hölzerner Ringanker eingebracht worden. Die in sich geschlossene Holzkonstruktion entstand laut Dendrochronologie um 803 plus/minus 10 Jahre.

Für das Jahr 803 überliefern die Reichsannalen ein Erdbeben für den Raum Aachen, und geologische Untersuchungen bestätigen schwere Erschütterungen der Kirche. Wahrscheinlich hatte man damals im Erdgeschoss einen provisorischen Boden eingezogen, um die Weihe zu ermöglichen. Doch bei dem Beben riss er von den Wänden ab.

Die großartige Kuppel ließ Karl anscheinend zunächst mit einem Fresko ausschmücken – eine Übergangslösung. In den nächsten Jahren entstanden in Aachen etwa zwei Millionen Glasmosaikquader, so genannte Tessellae, die aber wohl erst unter Karls Nachfolger Ludwig dem Frommen über die Fresken gesetzt wurden. Vermutlich hatte ihre Fertigung einfach zu lange gedauert. Andererseits gelangten die Mosaikwürfel auch an andere Orte. Sogar in Germigny-des-Près, einer Kirche des 9. Jahrhunderts an der Loire, wurden Tessellae verwendet, die wahrscheinlich aus Aachen stammten.

Schon 1911 hatte Erich Schmidt einen Bereich auf dem Katschhof ausgemacht, auf dem Metallhandwerker die Türen und Bronzegitter für die Pfalz gefertigt hatten. Seine Dokumentation kam in Archiven wieder zum Vorschein und erlaubte es, die Anlage zu rekonstruieren. Demnach war es dort tatsächlich möglich gewesen, die fast vier Meter hohen Flügel des großen westlichen Domportals zu gießen.

Vor diesem Haupteingang lag ein Atrium, in diesem Fall ein von Säulengän-

gen flankierter Innenhof, dessen Zustand für die Zeit um 800 anhand der Aufarbeitung und neuen Vermessungen nun erstmals bekannt ist. Ob der bei früheren Grabungen entdeckte Verbindungsgang zur Aula zur Zeit Karls des Großen schon bis an das Atrium reichte oder nur bis zum Südwestbau, sollen künftige Untersuchungen klären. In letzterem Fall bestand zwischen Südwestbau und Obergeschoss des Kirchenumgangs möglicherweise zunächst ein hölzerner Gang.

Sicher ist aber, dass der Mittelbau, laut der Datierung von Bauhölzern erst in der zweiten Hälfte des 9. Jahrhunderts hinzukam. Seine Funktion ist einstweilen nicht zu deuten. Vielleicht entstand er als befestigter turmartiger Bau im Vorfeld der Normannenbedrohungen in den 870er Jahren, möglicherweise aber auch erst, nachdem die

Normannen die Pfalz Aachen gebrandschatzt hatten, also nach 881 oder erst in den 890er Jahren.

Aula, Granusturm, nördlicher und großer Verbindungsgang entstanden nach und nach, aber in einem durchgehenden Bauvorgang. Die Vollendung des Granusturmes hatte Karl nicht mehr erlebt: Neu datierte Bauhölzer verweisen den unteren Teil auf die Zeit nach 800, das Jahr der Kaiserkrönung; der obere Bereich wurde aber erst nach 815 fertig gestellt.

Insgesamt umfasste die Errichtung der Kernpfalz also einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren. Angesichts des Bauvolumens überrascht das nicht, zumal Anpassungen und Planänderungen den Ablauf immer wieder gebremst haben dürften. Die hier vorgestellten neuen Rekonstruktionen werden in die neuen Ausstellungs-

bereiche des Centre Charlemagne in Aachen eingehen, das Mitte 2014 eröffnet werden soll.

Sebastian Ristow ist Archäologe und Experte für spätantike und frühmittelalterliche Kirchenarchitektur. Neben seiner Lehrtätigkeit an der Universität zu Köln bildet die Aufarbeitung der Altgrabungen der Aachener Kaiserpfalz, besonders die Klärung der verschiedenen Bauabschnitte einen Forschungsschwerpunkt.

Literatur:

Giertz, W., Ristow, S.: Goldtessellae und Fensterglas. Neue Untersuchungen zur Herstellung und Nutzung von Glas im Bereich der karolingerzeitlichen Pfalz Aachen. In: Antike Welt 5, S. 59–66, 2013

Ristow, S.: Buntmetallherstellung für die Marienkirche. In: Kraus, T.R. (Hg.): Aachen. Von den Anfängen bis zur Gegenwart 2. Mayersche Buchhandlung Aachen 2013, S. 188–193

ÖKOLOGIE

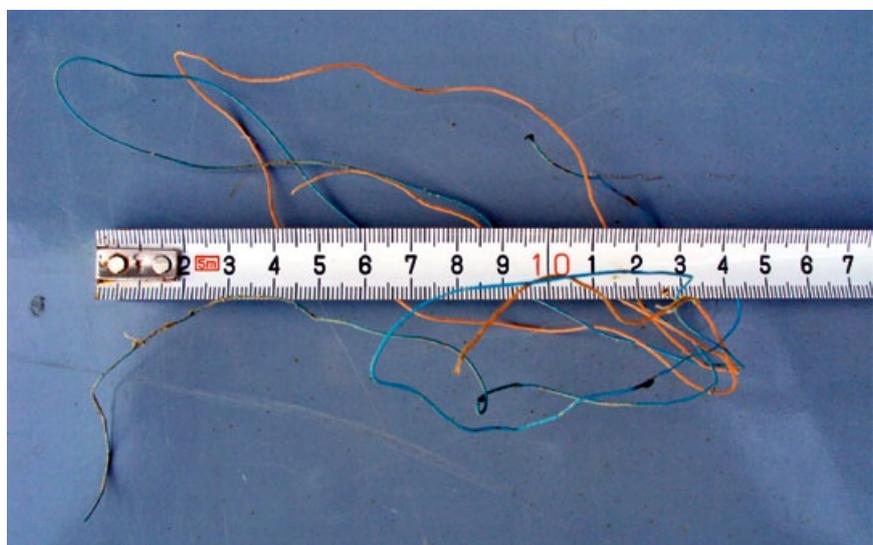
Bedrohliche Plastiksuppe

Weltweit schwimmen massenhaft winzige Plastikstücke im Meerwasser. Neue Studien zeigen: Auch in der Nordsee finden sich große Mengen der Partikel. Diese könnten Giftstoffe in die Nahrungskette einschleusen, aber auch ganze Ökosysteme verändern.

VON TIM HAARMANN

Die größte Müllhalde der Welt schwimmt im Nordpazifik. Dort drehen sich drei Millionen Tonnen Abfall, darunter enorme Mengen Plastik, auf einer riesigen Fläche von 15 Millionen Quadratkilometern mit der Meeresströmung in Kreis. Am entgegengesetzten Ende der Größenskala entdeckten Forscher in den letzten Jahren aber auch eine andere – und vielleicht nicht minder schwerwiegende – Art der Verschmutzung. Der Blick durch das Mikroskop offenbart: Im Meerwasser schwimmen unzählige, millimetergroße Plastikstückchen; Tendenz steigend.

Als einer der Ersten bemerkte der an der University of Plymouth forschende Meeresbiologe Richard Thompson, dass immer mehr Kleinstplastik durch die Meere treibt. Zusammen mit Kollegen



Solche Kunststofffasern entdeckten die Meeresforscher Fatehi Dubaish und Gerd Liebezeit von der Universität in Oldenburg im Jadebusen. Zum Größenvergleich wurde ein Zentimetermaßband mitfotografiert.

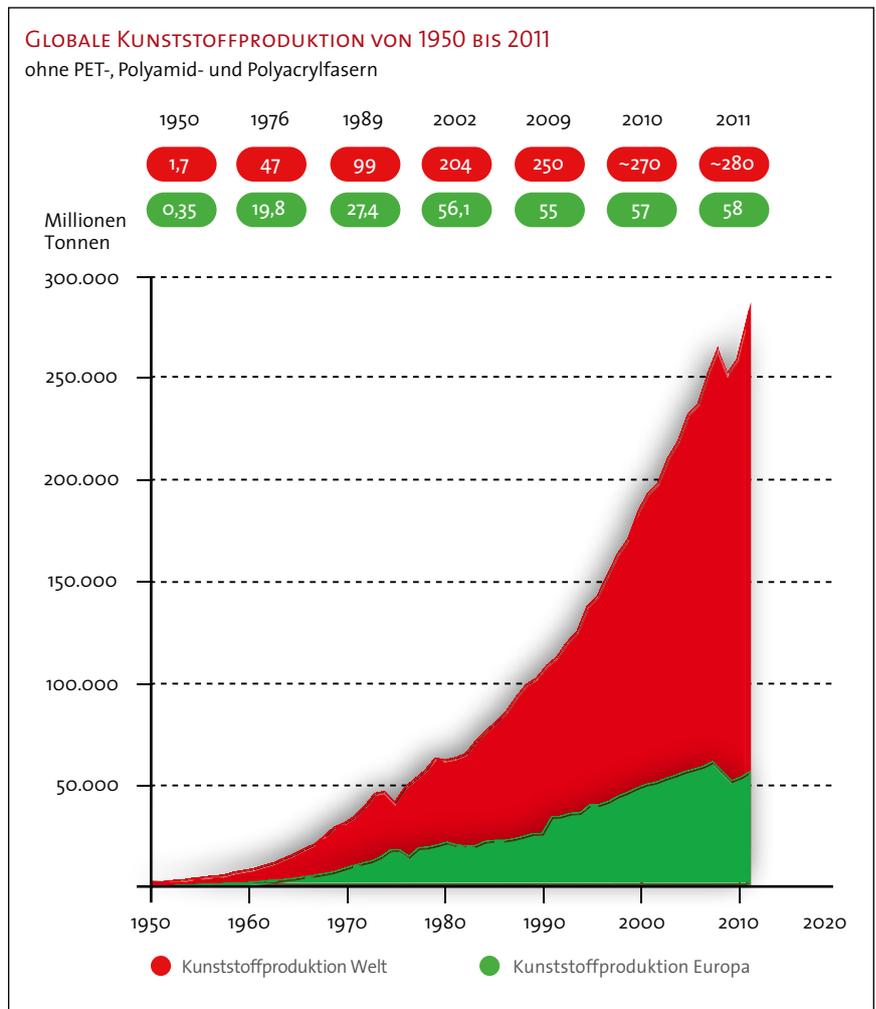
In den letzten 60 Jahre explodierte die Plastikproduktion von knapp 2 auf rund 280 Millionen Tonnen weltweit pro Jahr. Entsprechend nahm auch der Mikroplastikmüll in den Weltmeeren dramatisch zu.

hatte er im Jahr 2004 verschiedene Wasserproben des Nordatlantiks aus den 1980er und 1990er Jahren mit solchen aus den beiden Jahrzehnten davor verglichen (*Science* 304, S. 838, 2004). Das Ergebnis war erschreckend: Die Menge des Mikroplastiks hatte sich innerhalb weniger Jahrzehnte mehr als verdreifacht; mit solch einem rapiden Anstieg hatte bis dahin niemand gerechnet. Thompson verglich die Konzentrationen im Meer mit der globalen Kunststoffproduktion und kam zu dem Schluss, dass beide ähnlich schnell wachsen – eine beängstigende Einschätzung, denn in den letzten 60 Jahren ist der jährliche Plastikausstoß der Fabriken von knapp 2 Millionen auf rund 280 Millionen Tonnen angestiegen.

Kunststoffkörnchen an deutschen Gestaden

Inzwischen entdeckten Forscher die Partikel in den verschiedensten Meeresregionen, von den Tropen bis zu den Polargebieten. Die Zunahme scheint sogar noch weit stärker zu sein, als Thompson befürchtet: So kommen im so genannten subtropischen Nordpazifikwirbel heute stellenweise über 70-mal höhere Kunststoffkonzentrationen vor als noch in den 1970er und 1980er Jahren! Und die Plastiksuppe schwappt auch an deutsche Gestade. Vor Kurzem berichteten die Meeresforscher Fatehi Dubaish und Gerd Liebezeit von der Universität in Oldenburg über ihre Messungen im Jadebusen. Stellenweise fanden sie dort in einem Liter Wasser bis zu 1770 Plastikkörner (*Water, Air & Soil Pollution* 224:1352, 2013).

Bisher sind die Daten noch spärlich gesät und die Konsequenzen der unsichtbaren Verschmutzung daher schwer einzuschätzen. Doch Meeresbiologen und Umweltverbände befürchten, dass die Plastikstückchen ihren Weg in die marine Nahrungskette finden.



Am Ende könnten Gifte, die ihnen anhaften, auch auf unserem Teller enden.

Wie schnell so etwas geschehen kann, hatte Richard Thompson bereits 2004 gezeigt. In einem mit Mikroplastik verschmutzten Aquarium hatten Krebse und Wattwürmer bereits nach wenigen Tagen erhebliche Mengen des Mülls gefressen. Inzwischen haben Forscher die Kunststoffe auch in frei lebendem Plankton, in Seegurken, Muscheln, Krebsen, Fischen und sogar Meeressäugern nachgewiesen. Aller kleinste Partikel gelangten bei Experimenten mit Miesmuscheln sogar in das tierische Gewebe hinein. Laborversuche verheißen zudem nichts Gutes: Chemische Zusatzstoffe im Plastik wirken giftig auf Fische, Säugetiere und Weichtiere und können deren Hormonhaushalt stören. Besonders heimtückisch ist, dass sich zusätzlich organische Schadstoffe und Schwermetalle an die Kleinstteilchen anlagern. Gifte, die sonst in unbe-

denklichen Konzentrationen im Meerwasser vorliegen, reichern sich auf diese Weise an.

Auch für ganze Ökosysteme befürchten Forscher Konsequenzen. Die schwer zersetzbaren Partikel könnten Mikroorganismen und invasiven Arten als langlebige Transportvehikel dienen und sie in fremde, ungeschützte Ökosysteme transportieren. Dass Kleinstplastik ein gutes, künstliches Mikrohabitat ist, zeigte im vergangenen Jahr die Meeresbiologin Miriam Goldstein von der Scripps Institution of Oceanography (*Biology Letters* 8, S. 817–820, 2012). Sie konnte erstmals einen Zusammenhang zwischen der Mikroplastikmenge in Teilen des Pazifiks und der Vermehrung des Meerwasserläufers, eines kleinen Insekts, herstellen. Demnach profitieren die Tiere davon, dass sie ihre Eier auf den immer zahlreicheren im Wasser schwimmenden Kunststoffteilchen ablegen können. Was dies für das Öko-

system bedeutet, ist bislang noch unklar (siehe dazu auch www.spektrum.de/alias/plastikmuell/fertig-zum-entern/1202476).

Inzwischen scheint sicher, dass ein Großteil des Mikroplastiks durch die Verwitterung größerer Kunststoffteile entsteht. Er stammt aus abgerissenen Stücken von Fischernetzen, Abfällen von Schiffen und aus Plastikmüll vom Land. Vor allem Strände haben Meeressforscher als eine Hauptquelle identifiziert. Denn dort sind die großen Plastikteile viel intensiverer ultravioletter Strahlung und Hitze ausgesetzt als im offenen Ozean. Das macht das Material spröde, so dass es dann vor Ort zu Mikroplastik zerrieben wird.

Eine weitere – noch wenig einschätzbare – Verschmutzungsquelle kommt hinzu: Auch in aufgereinigtem Klärwasser finden sich kleinste Plastikstücke und -fasern. Offensichtlich können die Filter der Klärwerke solche Partikel nicht zurückhalten – wobei hierzu kaum Studien existieren. Zumindest eine wichtige Quelle des mit dem Klärwasser in die Meere eingetragenen

Plastiks scheint aber aufgedeckt: Von Kunststofftextilien lösen sich beim Waschen erhebliche Mengen feinsten Fasern, die problemlos die Filter der Waschmaschinen passieren (*Environmental Science & Technology* 45, S. 9175–9179, 2011). Zudem setzen Kosmetikfirmen ihren Produkten zunehmend Plastik-Kügelchen zu, die als »Peeling« wirken sollen – eine vermeidbare Verschmutzung, gegen die Umweltschutzverbände derzeit angehen.

Kampf der unsichtbaren Verschmutzung

Forscher und Naturschützer stehen bei der Untersuchung und Bekämpfung der unsichtbaren Verschmutzung vor erheblichen Schwierigkeiten. So gibt es noch nicht einmal eine standardisierte Methode, um den Verschmutzungsgrad des Wassers zu erfassen. Verschiedene Forschergruppen bereiten Proben unterschiedlich auf und sind sich uneins darüber, welche Partikelgröße als »Mikroplastik« gilt. Das erschwert es, verschiedene Meeresregionen zu vergleichen, um herauszufinden, welche

Gebiete besonders belastet sind. Immerhin schreiten Bemühungen zur Müllvermeidung voran und nehmen sogar an Fahrt auf. Im April veranstalteten das Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt zusammen mit der EU-Kommission eigens einen Kongress, um über die Plastikverschmutzung der Meere zu diskutieren und Gegenstrategien zu entwickeln (www.marine-litter-conference-berlin.info). Dort betonte auch Bundesumweltminister Peter Altmaier, dass »die Vermüllung der Meere ein weltweit drängendes Problem ist, dem wir unsere ganze Aufmerksamkeit im internationalen Meeresschutz widmen müssen«. Das lässt hoffen – aber es wird hierfür auch höchste Zeit. Europäische Richtlinien zum Meeresschutz fordern von den EU-Staaten, bis 2020 einen »guten Zustand der Meeresumwelt zu erreichen«. Angesichts der Plastiksuppe vor unserer Küste kann bisher davon noch kaum die Rede sein.

Tim Haarmann ist promovierter Geograf und freier Wissenschaftsjournalist in Bremen.

OPTIK

Die Ein-Pixel-Kamera

Ein neuartiges Abbildungsprinzip nimmt Fotos direkt in komprimierter Form auf. Dabei kommt es ohne Linse und mit nur einem einzigen Sensor aus.

VON MARTIN SCHEUFENS

Mit minimalem Aufwand an Material und Daten ein Objekt möglichst präzise abzubilden: Für dieses Ziel haben Gang Huang, Hong Jiang, Kim Matthews und Paul Wilford von den Bell Laboratories in Murray Hill (New Jersey) einen ungewöhnlichen Weg eingeschlagen. Die von ihnen entwickelte Kamera kommt ohne Linse aus und besitzt nur einen Sensor ([arXiv:1302.1789](https://arxiv.org/abs/1302.1789), [arXiv:1305.7181](https://arxiv.org/abs/1305.7181)).

Der kastenförmige Aufbau erinnert an eine Lochkamera, die ebenfalls über keine Linse verfügt. Der auffälligste Unterschied zwischen beiden: In einer

Lochkamera fällt das Licht durch eine Öffnung auf viele Sensoren, in der neuen Entwicklung fällt es durch viele Öffnungen auf einen einzigen Sensor.

Die Löcher lassen sich einzeln öffnen und schließen und sind in einem Raster angeordnet wie die Fensterfront eines Bürohochhauses. In ihrem Prototyp realisieren die Forscher dieses Raster durch eine Anordnung aus 302·217 Flüssigkristallen (Liquid Crystal Display, LCD), die sich einzeln durch Anlegen einer elektrischen Spannung von undurchsichtig auf transparent schalten lassen.

Das Display bildet die Vorderseite der Kamera; auf der Rückwand sitzt der einzige Sensor. Es kann sich um einen einzelnen Photodetektor handeln oder, wie in einer Digitalkamera, um ein Ensemble aus drei Detektoren, wobei je einer für rotes, grünes und blaues Licht empfindlich ist.

Wenn man aus der Position des Sensors durch das Raster auf das Objekt blickt, zeigt jede Blende einen kleinen Ausschnitt der Außenwelt (Darstellung S. 24). Um ein vollständiges Bild aufzunehmen, könnten die Forscher eine Blende nach der anderen öffnen, wor-

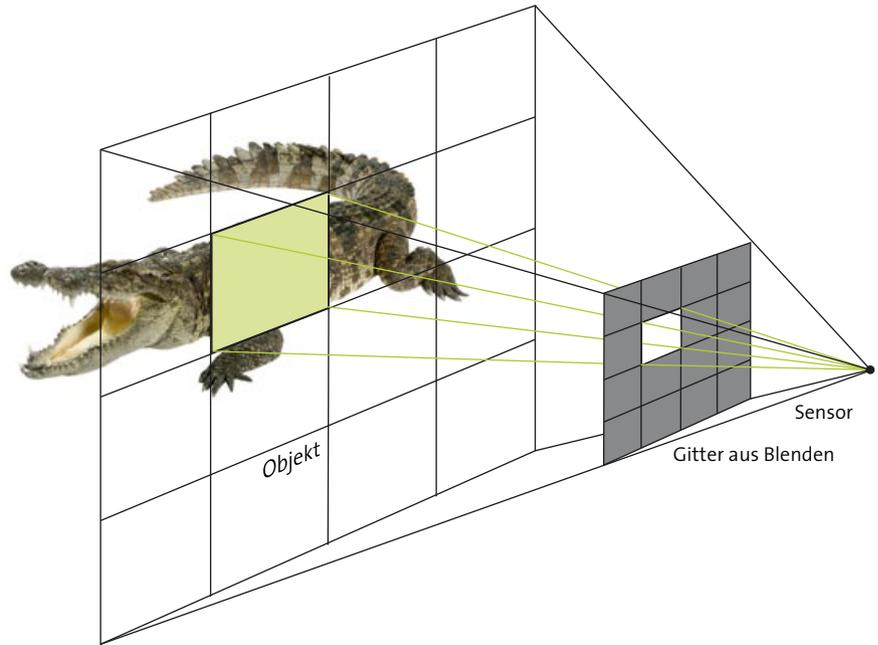
auf der Sensor das einfallende Licht misst und der Messwert an die der Blendenposition entsprechende Stelle einer Tabelle geschrieben wird.

Damit liefert jeder der Ausschnitte ein Pixel einer Bilddatei, wie sie auch die zahlreichen Sensoren einer Digitalkamera liefern. Mit ihren $302 \cdot 217 = 65534$ Pixeln bleibt die Auflösung des Prototyps allerdings noch weit unter heutigen Standards.

Viel Geduld notwendig

Das Prinzip weist viele Vorteile auf. Da keine Linse benötigt wird, werden nahe und ferne Objekte gleich scharf abgebildet, und Linsenfehler wie sphärische Aberration und Astigmatismus können gar nicht erst auftreten. Allerdings entspricht die Lichtstärke des Aufbaus auch nur der einer Lochkamera, wobei die einzelnen Blenden und der Sensor im Prototyp jeweils knapp einen Millimeter messen. Außerdem ist der Zeitbedarf beträchtlich: Ein einziges Bild erfordert 65534 Einzelmessungen, was bei der Reaktionsträgheit der verwendeten Flüssigkristalle auf viele Stunden hinausläuft.

Um die Messdauer zu verkürzen, öffnen die Forscher daher bei jeder Einzelmessung mehrere Blenden. Dann misst der Sensor die Summe der Lichtintensitäten, die durch die verschiedenen Blenden einfallen. Entsprechend müssen die Intensitäten der einzelnen Bildpunkte nachträglich berechnet werden. Dies entspricht einem linearen Gleichungssystem mit $N = 65534$ Unbekannten, nämlich den gesuchten Bild-



KROKODIL: FOTOLIA / ORINAWAKASAWA, GRAFIK: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH HUANG U. ET AL. LENSELESS COMPRESSIVE SENSING IMAGING, ARXIV 1302.7189, 2013

Ist eine Blende geöffnet, kann der Sensor nur einen Teil des Objekts sehen. Der Objektausschnitt, der einen Bildpunkt liefert, ist somit durch die Geometrie von Sensor und Blende vorgegeben.

punkten. Jede Gleichung ergibt sich aus einem Messwert sowie der Information, welche Blenden dabei geöffnet waren. Um ein lineares Gleichungssystem zu lösen, sind normalerweise ebenso viele Gleichungen wie Unbekannte erforderlich. Man benötigt also dieselbe Zahl von Messungen wie im einfachen Aufnahmemodus und spart keine Zeit.

Bemerkenswerterweise kommen die Forscher jedoch mit einem Bruchteil der Messungen aus. Letztlich wenden sie eine unkonventionelle Form von Datenkompression an: Statt wie sonst aus einem vollständigen Bild eine Version mit weniger Daten zu berechnen,

die gleichwohl den wesentlichen Teil der Information enthält, nehmen sie von vornherein nur einen Teil der Daten auf (compressed sensing).

Durch den vorzeitigen Abbruch der Messungen fehlt der größte Teil der Gleichungen; damit ist das Gleichungssystem nicht mehr eindeutig lösbar. Gleichwohl enthält es ausreichend Information, um das Bild annähernd zu rekonstruieren.

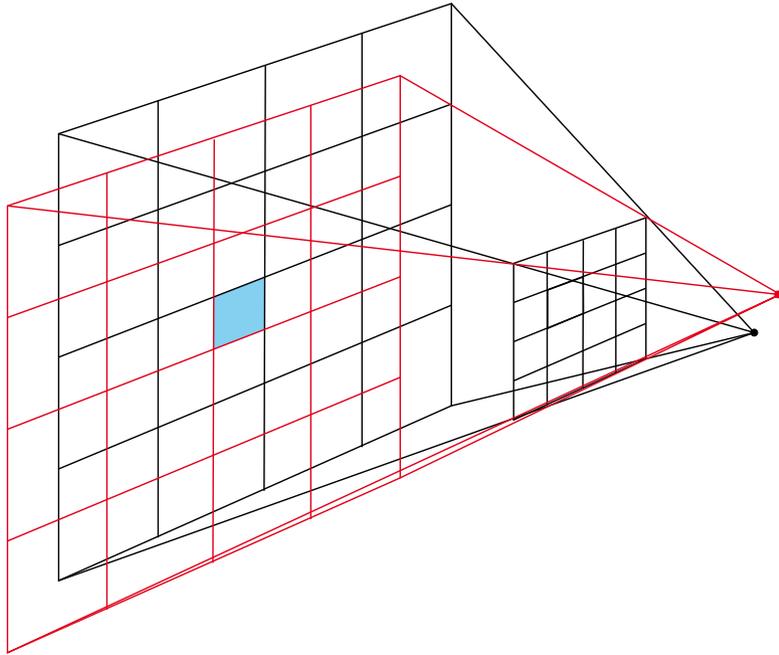
Dazu nutzen die Forscher die Tatsache, dass Bilder echter Objekte »glatt« sind; das heißt, starke Kontraste zwischen unmittelbar benachbarten Bildpunkten sind eher die Ausnahme als die Regel. Unter allen möglichen Lösungen des unterbestimmten Gleichungssystems sucht man daher die glatteste.

Gang Huang und seine Kollegen wählten dazu folgenden mathemati-

Die Hälfte der theoretisch erforderlichen Messungen liefert bereits ein recht gutes Bild vom Fußball (links); mit einem Achtel (Mitte) sieht man immer noch das Wesentliche. Für die schlafende Katze (rechts) wurde nur ein Viertel der Messungen vorgenommen.

MITFIDEL GEN VON GANG HUANG, BELLABS, ALCATEL-LUCENT





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein feineres Pixelraster entsteht, wenn zwei Sensoren um ein nicht ganzzahliges Vielfaches (hier $1/2$, aus praktischen Gründen meist $3/2$ oder größer) der Blendenbreite gegeneinander versetzt und ihre Aufnahmen miteinander verrechnet werden.

schen Weg: Ein Bild ist an einem speziellen Bildpunkt besonders »glatt«, wenn die Summe der (positiv genommenen) Differenzen zu den vier Nachbarpunkten klein ist. Nennt man diese Summe die »Variation« des Bildpunktes und die Summe über alle Variationen die »totale Variation« des Bildes, ist unter allen Lösungen des unterbestimmten Gleichungssystems diejenige gesucht, welche die totale Variation minimiert.

Zufall schlägt Systematik

Wie bei sehr großen Minimierungsproblemen üblich, überfordert die exakte Lösung des Problems jede denkbare Rechenkapazität. Aber anstelle des unübersehbaren abstrakten Raums aller Lösungen lässt sich eine geeignete Teilmenge nach einem Minimum durchsuchen, was akzeptable Ergebnisse liefert.

Nach welchen Kriterien wählt man nun die Muster aus, nach denen man bei jeder Messung die Blenden öffnet? Laut theoretischen Überlegungen birgt jede Systematik Nachteile. Die besten Rekonstruktionsergebnisse erhält man, wenn der Zufall die Öffnungsmuster bestimmt. Je komplexer das Motiv ist, desto mehr Messungen sind nötig, um

die Aufnahme sinnvoll zu rekonstruieren. In den ersten Probed Bildern (Bilder unten links) kam die Prototypkamera bereits mit einem Viertel oder gar einem Achtel der theoretisch notwendigen Einzelmessungen zu achtbaren Ergebnissen. Entsprechend der langen Aufnahmedauer haben Gang Huang und seine Kollegen dabei nur ruhende Objekte abgelichtet.

Ein zusätzlicher Sensor erweitert das System nach Bedarf um mehrere Funktionen ([arXiv:1306.3946](https://arxiv.org/abs/1306.3946)):

- Zwei Sensoren nebeneinander schauen aus leicht verschobenen Blickpunkten durch dasselbe Blendenmuster und nehmen dadurch das Objekt aus verschiedenen Perspektiven auf. Damit lässt sich schon eine Stereobildkamera bauen.

- Bei weit entfernten Objekten haben beide Sensoren im Wesentlichen dieselbe Perspektive und können daher einander vertreten, mit dem Effekt, dass man mit der halben Aufnahmedauer auskommt.

- Zwei um ein nicht ganzzahliges Vielfaches der Blendenbreite versetzte Sensoren legen sozusagen zwei gegeneinander versetzte Raster über das – hinreichend weit entfernte – Objekt (Grafik

Machen Sie sich schlauer!

VINCE EBERT

löst die Rätsel des Alltags



€ 9,99 (D) / € 10,30 (A) / sFr. 14,90 (UVP)

Naturwissenschaft trifft Komik, eine Kombination mit Sprengstoff für unser Gehirn. In der ARD-Sendung »Wissen vor acht – Werkstatt« stellt sich der Diplom-Physiker und Kabarettist Vince Ebert mit Leib und Seele jedem noch so skurrilen naturwissenschaftlichen Phänomen: Warum schmeckt ein Earl Grey auf dem Gipfel des Mount Everest nicht, und warum stehen wir ständig im Stau, Ameisen hingegen nie? Verblüffende Antworten auf ungewöhnliche Fragen unseres Alltags.

MIT FRIEDLICHEN VON GONG HUANG, BELL LABS, AICAF, ELLUCENT



Die äußeren Bilder stammen von zwei gegeneinander versetzten Sensoren, wobei diese jeweils nur ein Viertel der theoretisch erforderlichen Messungen aufnahmen. Die Verrechnung beider Bilder liefert eines mit höherer Auflösung (Mitte).

S. 25). Eine geeignete Verrechnung der Messwerte liefert auch Informationen über Objektausschnitte der halben Kantenlänge, wodurch sich die Auflösung erhöht (Bilder oben).

Warum das Ganze? Sicherlich bildet diese Kamera keine Konkurrenz zu bisherigen Digitalkameras, denn Lichtsensoren oder Speicherplatz brauchen nicht eingespart zu werden – beides ist in modernen Digitalkameras reichlich vorhanden. Die Kamera treibt bisherige

Konzepte auf die Spitze und ist damit ein extrem puristisches Beispiel für das aufkommende Gebiet des »compressed sensing«. Allein der Nachweis, dass im Prinzip ein Sensor pro Kamera genügt, ist von wissenschaftlichem Interesse. Darüber hinaus erprobt die Kamera Verfahren, Bilder aus unvollständigen Informationen zu rekonstruieren. Das kann sich in anderen Fällen als nützlich erweisen, wo die fehlenden Daten auch mit viel Geduld nicht zu erlangen sind.

Für weitere Bereiche des elektromagnetischen Spektrums könnten sich zudem ganz konkrete Anwendungen des Abbildungsprinzips eröffnen: John Hunt und seine Kollegen von der Duke University haben einen Mikrowellen-scanner entworfen, der die Sicherheitstechnik an Flughäfen revolutionieren könnte (*Science* 339, S. 310–313, 2013). An Stelle der langsamen Flüssigkristalle bestehen die Blenden hierbei aus Metamaterial – mikroskopischen Strukturen mit vollkommen neuartigen optischen Eigenschaften.

Martin Scheufens ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

NEUROGENESE

Was Atombombentests über das Gehirn verraten

Spuren, die oberirdische nukleare Explosionen in unserem Gehirn hinterlassen haben, liefern nun endlich den gesuchten Beweis: Entgegen früherer Überzeugung entstehen dort lebenslang neue Zellen.

VON JAN DÖNGES

Es galt lange als unumstößliche Lehrbuchweisheit, dass im Gehirn eines Erwachsenen keine neuen Nervenzellen mehr heranreifen. Lernen, Erinnern und Vergessen liefen demnach ausschließlich in den Verbindungen zwischen den Zellen ab. Seit einigen Jahren haben Forscher jedoch den begründeten Verdacht, dass es sich dabei nicht um die ganze Wahrheit handelt: Zumindest der Gyrus dentatus, der als Teil des Hippocampus mitten in der neuronalen Schaltzentrale unseres Gedächtnisses sitzt, stellt offenbar eine Ausnah-

me von dieser Regel dar. Anzeichen dafür hatte man zunächst bei verschiedenen Säugetieren beobachtet. So sind beispielsweise im Gyrus dentatus von Mäusen und Ratten Gene aktiv, die bei der Zellteilung eine Rolle spielen. Offenbar scheinen hier auch bei ausgewachsenen Tieren so genannte Körnerzellen heranzureifen und sich in die bestehenden neuronalen Netze einzuklinken. Allerdings: Was für die kurzlebigen Nagetiere gilt, muss nicht auf das komplexe Gehirn eines Menschen übertragbar sein.

Diese Frage definitiv zu klären, erwies sich als überaus kompliziert. Denn die übliche Methode bei Tierversuchen – Markersubstanzen werden in den Körper injiziert und nach dem Tod in Hirnschnitten sichtbar gemacht – ist beim Menschen aus offensichtlichen ethischen Gründen nicht anwendbar. Es ist teilweise dem Zufall zu verdanken, dass eine Arbeitsgruppe um den 2007 verstorbenen schwedischen Hirnforscher Peter S. Eriksson an der Göteborger Universität den ersten soliden Hinweis auf »adulte Neurogenese«,

also Nervenzellneubildung im Erwachsenenalter, beim Menschen fand.

Die Wissenschaftler hatten Ende der 1990er Jahre erfahren, dass bei klinischen Tests zur Krebsdiagnostik einige Patienten dieselbe Markersubstanz erhalten hatten, die man auch im Tierversuch zum Neurogenesenachweis einsetzt. Dieses so genannte Bromodesoxyuridin baut der Körper in neugebildete DNA ein. Lässt es sich später in einer Zelle nachweisen, ist sie folglich erst nach Verabreichung der Substanz entstanden. Eriksson und seinen Kollegen gelang es damals, bei fünf dieser Patienten eine Autopsie durchzuführen und Gewebeproben zu entnehmen. Wie sich zeigte, waren bei den durchschnittlich mit Mitte sechzig Verstorbenen einige Neurone des Gyrus dentatus neu herangewachsen. Wie viele und unter welchen Bedingungen, konnten die Wissenschaftler – auch angesichts der geringen Probandenzahl – damals jedoch nicht sagen.

Den direkten Beweis haben nun Forscher um Kirsty Spalding mit Hilfe

einer verblüffenden Methode geliefert (*Cell* 153, S. 1219–1227, 2013). Der Trick der Wissenschaftler vom Karolinska-Institut der Universität Stockholm: Sie suchten nach den Spuren, die oberirdische Atomtests des Kalten Kriegs in unseren Gehirnen hinterlassen haben. Das ermöglichte ihnen nicht nur den grundsätzlichen Nachweis der adulten Neurogenese beim Menschen, sondern – wichtiger noch – auch Einblicke in die Zellentstehungsrate im Hippocampus.

Das Team um Spalding konzentrierte sich auf eine Begleiterscheinung der Nukleartests: Jedes Mal wenn eine Bombe explodierte, entstanden große Mengen des radioaktiven Isotops Kohlenstoff-14, daher schoss sein Gehalt in der Atmosphäre ab 1955 dramatisch in die Höhe. Nach Verabschiedung des Moskauer Atomteststoppabkommens von 1963 begann er langsam wieder abzusinken (siehe Grafik unten). Über die Nahrungskette gelangten die Kohlenstoffisotope auch in den menschlichen Körper, der sie – genau wie das gängige C-12-Isotop – als Baumaterial für neue

Zellen nutzte. Den Stockholmer Forschern zufolge lässt sich dank des charakteristischen zeitlichen Verlaufs der C-14-Konzentration das Alter einer Zelle bestimmen: Hat sie sehr viel C-14, stammt sie aus der Hochphase der Atombombentests, mittlere Werte deuten auf die Jahre danach, und Zellen mit sehr geringen C-14-Werten stammen wahrscheinlich aus der Zeit davor.

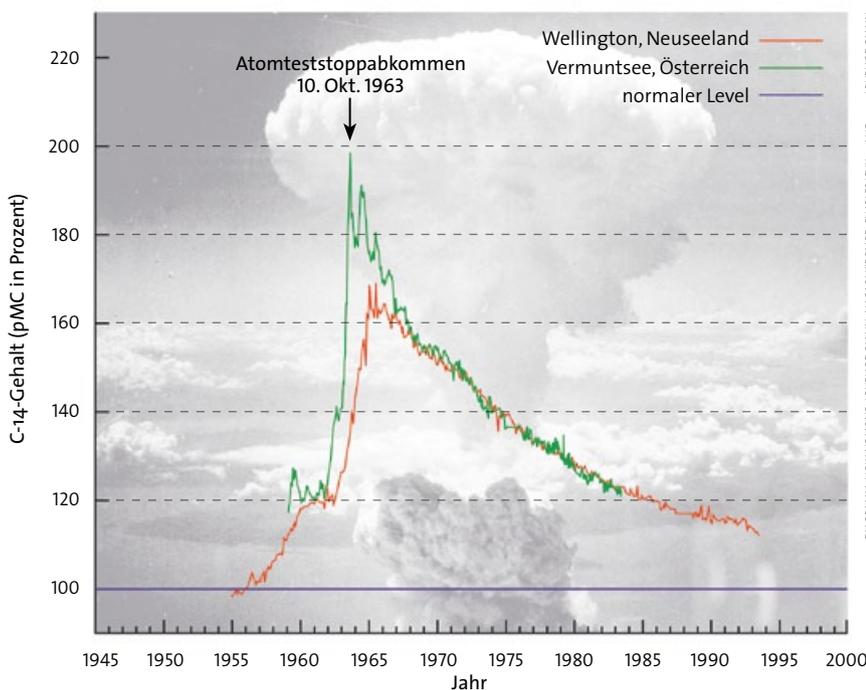
DNA konserviert C-14-Gehalt

Wie Spalding und Kollegen in jahrelanger Arbeit unter anderem an Fettzellen heraustüftelten, funktioniert das Verfahren sehr gut – allerdings nur, wenn man die Erbsubstanz einer Zelle betrachtet. Viele andere Zellbestandteile werden über die Zeit immer wieder erneuert, die DNA jedoch bildet sich einmalig bei der Entstehung der Zelle und konserviert dabei die aktuell herrschende Konzentration von atmosphärischem C-14. Entsprechend simpel ist im Grund das Datierungsverfahren: Man entnimmt von Verstorbenen Hirngewebe und bestimmt dann die Isotopenzusammensetzung in den Zellkernen ihres Hippocampus. Wenn alle das gleiche Alter hätten, wäre die Neurogenese widerlegt.

Doch der Teufel steckt im Detail. Die Beschleunigermassenspektrometrie, welche die Forscher zum C-14-Nachweis benutzten, benötigt deutlich größere Probenmengen als nur einen einzelnen Zellkern. So waren die Forscher dazu gezwungen, immer viele Zellen zusammenzunehmen zu untersuchen und sich mit einer gemittelten C-14-Konzentration für jedes Individuum zufriedenzugeben.

Um sich dennoch einen Reim auf die Messergebnisse zu machen, entwickelten sie ein ausgefeiltes mathematisches Modell, das unterschiedliche Ausmaße von Werden und Vergehen der Zellen simuliert und in die jeweils zu erwartende C-14-Konzentration umrechnet. Mittels Umkehrschluss lernten die Wissenschaftler, wie ausgeprägt sich der Gyrus dentatus erneuert hatte.

Die Ergebnisse waren eindeutig: Täglich kommen in unserem Hirn rund 1400 neue Neurone hinzu, während



Auf Grund oberirdischer Atomtests schoss der Gehalt des radioaktiven Kohlenstoffisotops C-14 in der Atmosphäre ab 1955 in die Höhe. Erst mit dem Moskauer Atomteststoppabkommen von 1963 begann er wieder abzunehmen. Über die Nahrung gelangt C-14 in den menschlichen Körper, der es wie normalen Kohlenstoff in Biomoleküle einbaut.

Beginnt die digitale Kohlenstoffära?

Der erste Nanoröhrencomputer funktioniert schon.

Technologisch betrachtet leben wir im Siliziumzeitalter. Nichts prägt unsere Epoche mehr als das weltumspannende Netz der digitalen Elektronik, und deren Grundsubstanz ist nun einmal das Element mit dem chemischen Symbol Si, ein auf Erden praktisch unerschöpflich vorhandener Halbleiter.

Mit Silizium chemisch eng verwandt ist Kohlenstoff, dessen einmalige Bindungsfreude – ob mit seinesgleichen oder anderen Elementen – die Vielfalt jener Makromoleküle schafft, auf denen irdisches Leben beruht. Die Bedeutung und Verwandtschaft beider Elemente hat nicht nur Verfasser fantastischer Literatur zu Spekulationen angeregt, ob auf fernen Planeten vielleicht Leben auf Siliziumbasis entstehen könnte. Der amerikanische Astrophysiker und Exobiologe Carl Sagan (1934–1996) sprach gar polemisch vom »Kohlenstoffchauvinismus«, der verhindere, dass uns anorganische – nicht auf Kohlenstoff basierende – Lebensformen plausibel vorkämen. So tauchen in Sciencefiction-Stories gelegentlich bewegungsaktive kristalline Gewächse und mineralische Intelligenzen auf, aber solchen ausgedachten Wesen fehlt die Überzeugungskraft: und das wohl nicht nur, weil wir kohlige Chauvinisten sind, sondern weil sich Siliziumverbindungen tatsächlich nicht annähernd mit dem fast grenzenlosen Reichtum der organischen Chemie messen können.

Doch was wäre, wenn (Exo-)Biologie und Elektronik nicht auf der letztlich doch allzu schmalen Siliziumbasis zusammenfänden, sondern umgekehrt der Kohlenstoff beide Domänen besetzen würde? Angenommen, er bleibt nicht nur – bis auf Weiteres unangefochten – das Lebelement, sondern erobert obendrein auch noch den Bereich der Digitaltechnik?

Seit gut zehn Jahren versuchen Forscher, Transistoren auf Kohlenstoffbasis zu konstruieren, in denen Nanoröhren als Halbleiterelemente dienen. Das verspricht mehrere Vorteile: Die mikroskopischen Kohlenstoffröhrchen ergeben Schaltelemente, die schneller reagieren, weniger Energie schlucken und darum nicht so viel Kühlung brauchen wie herkömmliche Siliziumkomponenten. Der Nachteil: Nanoröhren lassen sich schwer standardisieren; bei der Herstellung entsteht eine Menge Ausschuss, und Defekte machen die erwähnten Vorzüge größtenteils zunichte.

Dennoch ist es einem Team um den jungen Computerwissenschaftler Max M. Shulaker an der Stanford University in Kalifornien nun erstmals gelungen, einen kompletten Rechner auf Kohlenstoffbasis zu konstruieren. Dieser besteht aus 178 Kohlenstoff-Nanoröhren-Transistoren und vermag per Multitasking mehrere einfache Rechenaufgaben scheinbar gleichzeitig, das heißt in schnellem Wechsel, zu lösen (*Nature* 501, S. 526–530, 2013). Damit wurde, wie der Nanoröhrenexperte Franz Kreupl von der Technischen Universität München anmerkt, im Prinzip der Prototyp eines vollwertigen, beliebig programmierbaren Kohlenstoffcomputers geschaffen. Seine Rechenleistung liegt allerdings weit unter der heute üblichen: Sie entspricht dem Niveau von 1955 (*Nature* 501, S. 495–496, 2013).

Noch steht dahin, ob und wann der Nanoröhrentyp mit herkömmlichen Siliziumgeräten gleichziehen, sie überholen oder am Ende gar ganz verdrängen wird. Jedenfalls fasziniert mich die Aussicht auf Denkmaschinen, die auf dem Lebelement Kohlenstoff beruhen. Andere Forscher nutzen bereits die organische Chemie der Makromoleküle und lassen DNA-Stücke komplizierte Aufgaben lösen. So verringert sich ganz allmählich der Abstand zwischen Bio- und Technoevolution. Als Kohlenstoffwesen sind wir dabei, künstliche Intelligenzen aus Kohlenstoff in unser Leben zu integrieren.



Michael Springer

entsprechend alte absterben. Gyrusdentatus-Zellen haben damit eine um den Faktor zehn geringere Lebenserwartung als andere Hirnzellen. Etwa 1,75 Prozent der Gesamtmasse dieser Region wird im Lauf eines Jahres erneuert, wobei diese Rate über alle Altersstufen hinweg weitgehend konstant bleibt. Bei den 55 untersuchten Personen gab es kaum Unterschiede – egal, ob sie nun 19 oder 92 Jahre alt waren. Auch zwischen den Geschlechtern variierten die Werte nicht nennenswert.

Neurogenese als Störfaktor

Alles in allem ist damit das Ausmaß der Nervenzellneubildung noch deutlich höher als bei der Maus. Das dürfte einige Forscher überraschen, gab es doch gute Gründe für die Annahme, beim Menschen würde sich kaum Neurogenese nachweisen lassen. Denn das Ersetzen von Nervenzellen scheint zumindest laut einigen Simulationen die neuronalen Netzwerke immer wieder durcheinanderzubringen und dadurch eine dauerhafte Erinnerungsspeicherung unmöglich zu machen.

Offensichtlich erfüllt die Neurogenese jedoch eine wichtige Funktion in dieser Hirnregion. Welche genau, ist leider immer noch unklar und Gegenstand vielerlei Spekulationen. Ein Team um den Hirnforscher Fred Gage vom Salk Institute in La Jolla vermutet, dass sich die Zellen im Lauf ihres Reifungsprozesses unterschiedlich verhalten (*Nature Reviews Neuroscience* 11, S. 339–350, 2010). In ihrer »Jugendphase« gehen sie höchst bereitwillig Verbindungen mit anderen Netzwerken ein und verknüpfen dadurch alle Erinnerungen, die das Individuum während dieser Phase macht. Die Gyrusdentatus-Zellen wirken dadurch wie die unbeschriebenen Seiten eines Tagebuchs, auf denen die unterschiedlichsten Dinge notiert werden können, sofern sie im gleichen Zeitraum stattfanden. Spaldings Entdeckung zeigt nun, dass uns die Seiten dieses Tagebuchs offenbar ein Leben lang nicht ausgehen werden.

Jan Dönges ist Linguist und Redakteur bei »Spektrum.de«.

SO BEKOMMEN SIE IHR RECHT.

JETZT AM
KIOSK.



500 Top-Privatanwälte:

Nach Postleitzahlen geordnet: Familien- und Erbrecht, Miet- und Wohneigentumsrecht sowie Arbeits-, Verkehrs- und Strafrecht.

500 Top-Wirtschafts- und -Großkanzleien:

Die besten Wirtschafts- und Großkanzleien, aufgeschlüsselt nach Tätigkeitsfeldern – von Kartellrecht bis Seerecht.

Großer Serviceteil:

Wie finde ich den besten Anwalt, wie läuft das Erstberatungsgespräch und was zahlt die Rechtsschutzversicherung? **Plus:** Wie wehrt man sich gegen Internetmobbing? Wie setzt man Entschädigungen bei Urlaubsmängeln durch?

Dazu: Tipps zum Gesundheitsrecht.

FOCUS-SPEZIAL gibt es auch unter Tel. 018064801000*, Fax 018064801001*, www.focus-spezial.de

* 0,20€/Anruf aus dem dt. Festnetz. Mobil max. 0,60 €/Anruf.

NEU: AUCH ALS
E-PAPER



ALLES ZU EINEM THEMA.
IN EINEM HEFT.

FOCUS
SPEZIAL



Süchtig nach Essen

Neue Erkenntnisse könnten erklären, warum fett- und zuckerhaltige Nahrungsmittel dick machen – durch ähnliche Mechanismen nämlich, die auch bei Drogenabhängigkeit eine Rolle spielen.

Von Paul J. Kenny

Würde eine Ratte den Tod riskieren, nur um ein Stückchen Schokolade zu fressen? Kürzlich habe ich es herausgefunden. In meinem Labor gaben wir Ratten uneingeschränkten Zugang zu ihrem normalen Futter. Zusätzlich boten wir ihnen aber auch äußerst appetitanregende, kalorienreiche Nahrungsmittel an: Wurst, Käsekuchen, Schokolade. Die Ratten verschmähten daraufhin ihr gesundes, aber »langweiliges« Standardfressen und bedienten sich fast nur noch an den Kalorienbomben. Sie nahmen immer mehr zu und wurden schließlich fettleibig.

Dann installierten wir ein Blitzlicht, das den fressenden Ratten signalisierte, dass sie gleich einen sehr unangenehmen elektrischen Schlag an den Pfoten erhalten würden. Tiere, die sich gerade über normales Futter hermachten, hörten nach einem solchen Blitz sofort mit dem Fressen auf und rannten weg. Fettleibige Ratten hingegen, die Wurst, Kuchen oder Schokolade vertilgten, ignorierten das Warnsignal. Ihr Verlangen danach war stärker als ihr Selbsterhaltungstrieb. Ähnliche Beobachtungen hatte zuvor schon der Neurowissenschaftler Barry Everitt von der University of Cambridge gemacht – allerdings waren seine Ratten nicht scharf auf Schokolade, sondern kokainsüchtig.

Sind demnach die fettleibigen Nager fresssüchtig? Die Unfähigkeit, ein bestimmtes Verhalten zu vermeiden, obwohl es vorhersehbare schädliche Folgen hat, ist ein allgemeines Merkmal von Suchtkranken. Sie findet sich auch bei übergewichtigen Menschen. Fast alle Fettleibigen geben an, weniger essen zu wollen. Dennoch nehmen sie weiterhin viel zu viel zu sich, obwohl sie sich der negativen Konsequenzen für ihre Gesundheit und ihr Sozialleben bewusst sind. Studien zufolge aktiviert das exzessive Aufnehmen von Nahrung

die Belohnungssysteme in unserem Gehirn – bei manchen Menschen so sehr, dass kein Sättigungsgefühl mehr entsteht. Je mehr diese Menschen essen, umso stärker wächst ihr Verlangen nach weiterer Nahrung – ähnlich wie bei Alkoholikern und Rauschgiftabhängigen die Gier nach der Droge mit dem Konsum zunimmt. Stimuliert übermäßige Nahrungsaufnahme also dieselben Hirnregionen wie Drogenkonsum? Falls ja, sollten Medikamente, die das Belohnungssystem im Gehirn dämpfen, übergewichtigen Menschen dabei helfen, ihre Kalorienaufnahme einzuschränken.

Bis in die frühen 1990er Jahre hinein galt Fettleibigkeit, lateinisch »adipositas«, lediglich als Verhaltensstörung. Übergewichtigen Menschen, so glaubte man, mangle es einfach an Willenskraft und Selbstbeherrschung. Seither hat sich die Sichtweise dramatisch verändert, zumindest bei Wissenschaftlern. Grund dafür ist nicht zuletzt, dass sich die Fettleibigkeit epidemisch ausbreitet (siehe SdW 7/2003, S. 86).

Einer der Ersten, die diesen Sinneswandel angestoßen haben, war der kanadische Biochemiker Douglas Coleman, der früher am Jackson Laboratory in Bar Harbor (Maine, USA) forschte. Er fand bereits in den 1960er Jahren Hinweise darauf, dass krankhaftes Übergewicht und gestörtes Essverhalten unter anderem auf genetische Faktoren zurückgehen. Zahlreiche seiner Überlegungen konnte später der amerikanische Molekulargenetiker Jeffrey Friedman von der Rockefeller University (New York) bestätigen. Beide Wissenschaftler führten Experimente mit Mäusestämmen durch, die erblich bedingt dazu neigen, an Adipositas und Diabetes mellitus zu erkranken.

Wie sich herausstellte, besitzt einer dieser Stämme einen Gendefekt, der verhindert, dass die Fettzellen das Hormon Leptin freisetzen. Der Signalstoff wird bei Mäusen und Menschen normalerweise nach den Mahlzeiten ausgeschüttet, zügelt den Appetit und dämpft so das Verlangen nach weiterer Nahrung. Ein anderer Mäusestamm, der zur Fettleibigkeit tendiert, erwies sich ebenfalls als Träger einer Genmutation: Die Körperzellen der betroffenen Tiere sprechen nicht mehr richtig auf Leptin an. Zusammengefasst bestätigten diese Ergebnisse, dass Hormone den Appetit und damit das Körpergewicht regulieren. Ein hormonelles Ungleichgewicht kann demnach zu gestörtem Essverhalten führen. Tatsäch-

DIE ARTIKEL IM ÜBERBLICK

SCHWERPUNKT: ÜBERGEWICHT

- ▶ Süchtig nach Essen S. 30
- ▶ Trügerische Kalorienangaben S. 36
- ▶ Was macht wirklich dick? S. 40

lich kommt Fettleibigkeit in bestimmten Familien mit genetisch bedingtem Leptinmangel häufig vor.

Doch es wäre zu kurz gesprungen, Adipositas nur auf eine Hormonstörung zurückzuführen. Erstens leiden längst nicht alle Übergewichtigen an einem erblich erworbenen Missverhältnis von appetitregulierenden Hormonen. Zweitens müssten Blutttests an adipösen Menschen dann regelmäßig entweder zu wenig appetitzügelnde oder zu viel appetitsteigernde Hormone anzeigen. Jedoch ist eher das Gegenteil der Fall. Paradoxerweise fallen fettstüchtige Menschen oft durch

erhöhte Spiegel an appetitzügelnden Hormonen auf, unter anderem Leptin und Insulin.

Hier kommt das Konzept von der Esssucht ins Spiel. Appetitsteuernde Hormone beeinflussen neuronale Schaltkreise im Hypothalamus – jenem Abschnitt des Zwischenhirns, der die vegetativen Körperfunktionen reguliert. Zudem stehen sie in Wechselwirkung mit Belohnungssystemen im Gehirn. Je heftiger der Hunger, umso intensiver die Befriedigung, sobald wir etwas essen. Für diesen Mechanismus sind Hormone verantwortlich, die in Fastenzeiten das Reaktionsver-



Pizza, Burger, Eis: Kalorienreiche Lebensmittel können die normalen Sättigungsmechanismen außer Kraft setzen und zu suchttähnlichem Essverhalten antreiben.

UNERSÄTTLICH – UND ABHÄNGIG?

1 Neuen Forschungen zufolge entsteht krankhafte Fettleibigkeit (Adipositas) oft dadurch, dass kalorienreiche Nahrungsmittel die **Belohnungszentren des Gehirns** zu stark stimulieren und somit Kontrollmechanismen aushebeln, die normalerweise das Essverhalten regulieren.

2 Forscher streiten darüber, ob Menschen, die dauerhaft exzessiv essen, an **einer Form von Sucht** leiden. Falls ja, könnten sich daraus neue Ansätze ergeben, um Adipositas zu behandeln.

3 Bereits jetzt gibt es **Arzneistoffe**, die sowohl gegen Essstörungen als auch gegen Drogensüchte helfen. Rimonabant etwa reduziert bei Rauchern das Verlangen nach Nikotin und zügelt zugleich den Appetit, hat aber auch gefährliche Nebenwirkungen.

mögen von mit Nahrung assoziierten Belohnungszentren erhöhen, vor allem im Corpus striatum (kurz Striatum). Dieses Hirnareal ist durch hohe Spiegel an Endorphinen gekennzeichnet, körpereigenen Verbindungen, die Glücks- und Belohnungsgefühle verstärken.

Während wir einer guten Mahlzeit frönen, produzieren Magen und Darm appetitzügelnde Hormone, welche die vom Striatum und von anderen Teilen des Belohnungssystems ausgehenden Glücksgefühle dämpfen. Zugleich setzen sie die Intensität des Genussempfindens herab. Die Speisen erscheinen uns daraufhin immer weniger begehrenswert, bis wir schließlich aufhören zu essen.

Wenn das Gefühl, satt zu sein, nicht mehr durchdringt

Moderne, extrem kalorienreiche Nahrungsmittel jedoch, die viel Fett und Zucker enthalten und oft besonders ansprechend aussehen, stimulieren unsere Belohnungssysteme so stark, dass die appetitzügelnde Wirkung von Leptin und anderen Hormonen nicht mehr dagegen ankommt. Infolgedessen essen wir immer weiter, auch wenn wir keinen Hunger mehr haben. Wir alle kennen diesen Effekt: Eben haben wir ein reichliches Abendessen zu uns genommen und kriegen keinen Bissen mehr herunter. Da serviert die Gastgeberin Schokoladentorte, und auf wundersame Weise geht diese Leckerei – eine der kalorienreichsten des Tages – dann doch noch irgendwie rein.

Unser Gehirn hat eine effiziente Maschinerie entwickelt, um das Körpergewicht auf stabilem, gesundem Niveau zu halten. Sie signalisiert uns, wann es Zeit ist zu essen und wann nicht. Unnatürlich kalorienreiche Nahrungsmittel können diese Signale jedoch aushebeln und uns zu einem krank machenden Essverhalten antreiben. Sahnetorte, Mousse au Chocolat & Co. sind künstliche Leckereien, mit denen unsere Vorfahren nicht konfrontiert waren – weshalb wir auch keine Gelegenheit hatten, im Zuge der Evolution einen angemessenen Umgang damit zu entwickeln.

Der Organismus reagiert auf das Kalorienbombardement, indem er den Blutspiegel appetitzügelnder Hormone wie

Leptin und Insulin in dem Maß erhöht, in dem das Körpergewicht steigt. Jedoch büßen diese Signalstoffe irgendwann an Wirkung ein, weil der Körper eine Toleranz gegen sie entwickelt. Zudem reagieren die Belohnungssysteme im Gehirn übergewichtiger Menschen nur noch schwach auf den Verzehr von Speisen, wie Forscher des Brookhaven National Laboratory und des Oregon Research Institute mittels bildgebender Verfahren feststellten. Diese Abstumpfung führt zu ausbleibender Befriedigung und damit zu depressiver Verstimmung. Und was tut der Mensch dagegen? Er isst noch mehr, um seine Stimmung zeitweilig aufzuhellen – was den Teufelskreis perfekt macht. Fettleibige müssen wahrscheinlich erheblich mehr verzehren als Schlanke, um den gleichen Grad an Befriedigung zu erreichen.

Adipositas entsteht also offenbar nicht (nur) aus einem Mangel an Willenskraft. Auch Hormonstörungen sind als Auslöser eher selten. Zumindest in einigen Fällen scheint ihre Ursache in einem Außer-Kraft-Setzen der Belohnungssysteme im Gehirn durch extrem gehaltvolle und wohl-schmeckende Nahrungsmittel zu liegen. Genau wie Sucht erzeugende Drogen können sie eine Rückkopplungsschleife im Gehirn anstoßen – je mehr Leckereien der Mensch zu sich nimmt, umso stärker wird sein Verlangen danach und desto schwerer fällt es, die Begierde zu stillen. Aber ist lustvolles Essen deswegen eine Sucht?

Abhängig machende Drogen, etwa Morphine, stimulieren die Belohnungssysteme des Gehirns auf die gleiche Weise wie Nahrungsmittel. Doch es gibt noch weitere Gemeinsamkeiten. Injiziert man Ratten Morphin in das Striatum, so löst dies bei den Tieren exzessive Fressanfälle aus, und zwar auch dann, wenn sie sich kurz zuvor satt fressen konnten. Morphine und andere Opiate imitieren demzufolge die Effekte von bestimmten Neurotransmittern – Botenstoffen, mit denen unser Gehirn das Essverhalten reguliert.

Können dann nicht Medikamente, die solche Botenstoffe hemmen, auch das übermäßige Verlangen nach Nahrung dämpfen? Laut neueren Studien senken Endorphinblocker die Aktivität von Belohnungszentren bei Menschen und Nagern, denen verlockende Speisen dargeboten werden – mit dem Ergebnis, dass die Betroffenen weniger davon zu sich nehmen. Behandelt man Drogenabhängige mit solchen Wirkstoffen, konsumieren sie anschließend weniger Heroin, Alkohol oder Kokain. Dies stützt die These, wonach exzessivem Essen und Drogensucht dieselben Mechanismen zu Grunde liegen. Wenn Ratten, die an tägliche Völlerei gewohnt sind, Endorphinblocker erhalten, dann zeigen sie ein Verhalten ähnlich den Entzugssymptomen bei Drogenabhängigen. Übermäßiges Essen kann demnach einen Zustand herbeiführen, der einer Drogensucht gleicht.

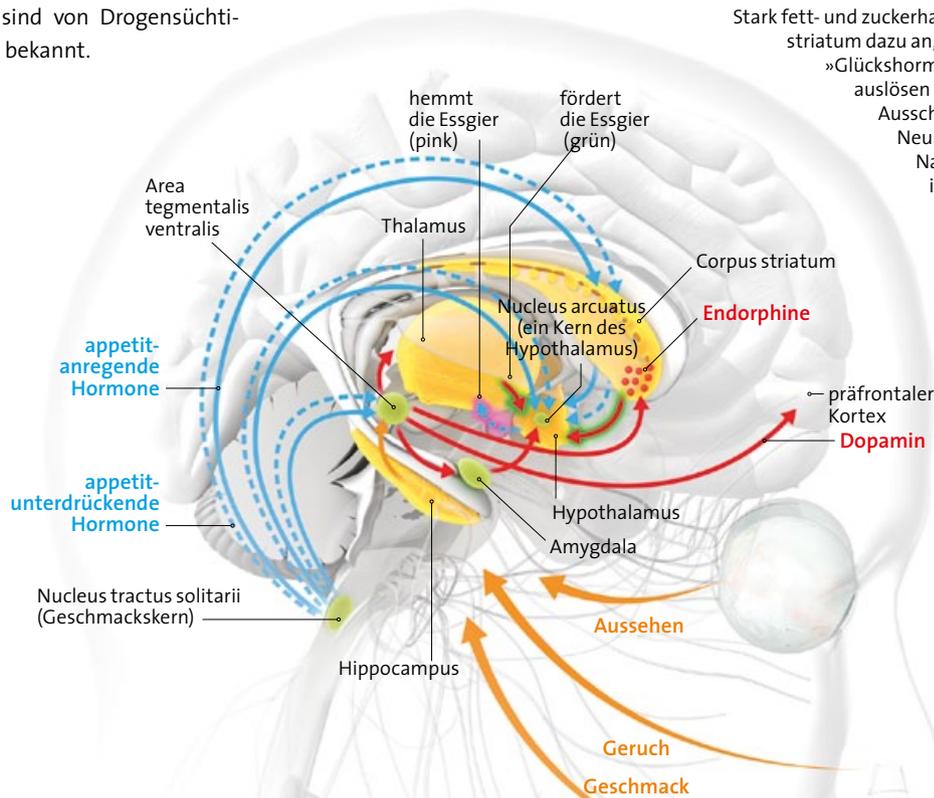
Auch im Hinblick auf einen weiteren wichtigen Neurotransmitter, Dopamin, gibt es Gemeinsamkeiten. Bekanntermaßen bewirken Sucht erzeugende Drogen die Freisetzung von Dopamin ins Striatum. Der Botenstoff spielt eine wesentliche Rolle beim Entstehen von Motivationen und treibt Süchtige dazu an, sich die Droge zu beschaffen. Die meisten

Experten meinen, dass dieser Mechanismus die Abhängigkeit herbeiführt, wenngleich die genauen Vorgänge umstritten sind. Experimenten zufolge stimulieren auch attraktive Nahrungsmittel die Ausschüttung von Dopamin ins Striatum. Der Neurotransmitter motiviert die Betroffenen dazu,

sich auf das Essen zu fokussieren. Bildgebende Verfahren belegen nun, dass im Striatum fettliebiger Menschen auffallend wenig Dopamin-2-Rezeptoren (D2R) vorhanden sind – Andockproteine für Dopamin, die Signalprozesse in Hirnzellen auslösen. Ähnliche Befunde sind von Alkoholikern

Zwischen Hunger und Sättigung

Unser Gehirn steuert das Körpergewicht, indem es signalisiert, wann wir essen müssen und wann wir damit aufhören sollten. Hormone regulieren neuronale Netze, die den Appetit und das Sättigungsgefühl kontrollieren (blau). Kalorienreiche Nahrungsmittel, die sehr viel Fett und Zucker enthalten, verleiten manche Menschen dazu, immer weiter zu essen (rot). Je mehr die Betroffenen verzehren, umso stärker wird ihr Verlangen nach weiteren Leckereien. Ähnliche Muster sind von Drogensüchtigen bekannt.



Exzessiver Verzehr: Neurotransmitter übernehmen die Kontrolle

Stark fett- und zuckerhaltige Nahrung regt das Corpus striatum dazu an, Endorphine zu produzieren, »Glückshormone«, die exzessives Essen auslösen können. Zudem kommt es zur Ausschüttung von Dopamin, einem Neurotransmitter, der die Nahrungsaufnahme anregt und im präfrontalen Kortex Entscheidungen beeinflusst. Endorphine, Dopamin und andere Stoffe wirken auf die Belohnungszentren. Sie können hormonelle Signale, die eine Sättigung anzeigen, überdecken und so zu immer weiterem Essen antreiben. Selbst das Wissen um die schädlichen Folgen kann die Völlerei oft nicht unterbinden.

Normales Essverhalten: Hormone signalisieren »Start« und »Stopp«

Appetitanregende Hormone aus dem Magen-Darm-Trakt aktivieren neuronale Netzwerke im Hypothalamus (durchgezogene blaue Linien). Sie stimulieren zudem Belohnungszentren, etwa die Area tegmentalis ventralis im Mittelhirn und das Corpus striatum im Großhirn, was das Genussenempfinden beim Essen steigert. Während einer Mahlzeit, wenn sich der Magen füllt und der Blutzuckerspiegel steigt, werden appetitunterdrückende Hormone wie Leptin und Insulin freigesetzt (gestrichelte blaue Linien). Ihre Wirkung auf den Hypothalamus und die Belohnungszentren führt zu verminderter Esslust und gedämpftem Genussenempfinden, was weiteres Essen weniger attraktiv erscheinen lässt.

Behandlungsansätze

So wie kalorienreiche Nahrungsmittel führen auch Sucht erzeugende Drogen zur Ausschüttung von Dopamin und setzen Rückkopplungsschleifen in Gang, die das Verlangen nach dem Reiz mehr und mehr ansteigen lassen. Arzneistoffe, die dem entgegenwirken, könnten möglicherweise sowohl gegen Fettleibigkeit als auch gegen Drogensucht helfen.

bekannt sowie von Personen mit einer Sucht nach Kokain, Methamphetamin oder Opiaten.

Zudem erkranken Menschen, die auf Grund genetischer Besonderheiten nur verhältnismäßig wenige Dopamin-2-Rezeptoren produzieren, häufiger an Adipositas oder Drogenabhängigkeit. Der Mangel an diesen Molekülen führt zu einer verminderten Aktivität der Belohnungszentren des Gehirns, so dass die Betroffenen intensivere Stimuli durch Nahrungs- oder Rauschmittel benötigen, um den gleichen Grad an Befriedigung zu erlangen wie normale Menschen. Es fällt ihnen auch schwerer, Handlungen zu vermeiden, die negative Folgen haben. Offenbar ist hier die Funktion von Hirnregionen beeinträchtigt, die riskante, aber potenziell befriedigende Verhaltensweisen unterdrücken, etwa den exzessiven Konsum von Speisen oder Drogen.

Unsere Laborversuche an Ratten untermauern diese These. Fettleibige Tiere, die trotz unangenehmer elektrischer Schläge nicht davon abließen, kalorienreiche Leckereien zu fressen, wiesen nur wenige Dopamin-2-Rezeptoren im Striatum auf. Auch andere Untersuchungen ergaben, dass drogensüchtige oder adipöse Ratten nicht vom Objekt ihrer Begierde ablassen, selbst wenn daraus negative Konsequenzen erwachsen. Bei Menschen beobachten wir ähnliche Phänomene: Viele Adipöse leiden so sehr unter der Unfähigkeit, ihr Essverhalten zu steuern, dass sie sich freiwillig riskanten Eingriffen unterziehen, etwa einer Magen-Bypass-Operation. Oft erleiden sie trotzdem einen Rückfall und nehmen wieder zu.

Starkes Übergewicht – eine psychische Krankheit?

So weit gehen die Experten dann doch nicht

Destruktives Fehlverhalten, das kurzfristige Glücksgefühle verursacht, gefolgt vom Versuch, davon loszukommen – und schließlich der Rückfall: Dieses Muster ähnelt auffallend dem Teufelskreis einer Drogenabhängigkeit. Den neuesten Forschungsergebnissen zufolge ist Fettleibigkeit das Ergebnis eines übermächtigen Verlangens, die Belohnungszentren im Gehirn zu aktivieren und Befriedigung zu erreichen. Hormonelle Störungen und Stoffwechselentgleisungen könnten demnach die Folgen der Gewichtszunahme sein – und nicht ihre Ursachen.

Wegen der Gemeinsamkeiten zwischen Adipositas und Suchterkrankungen haben einige Experten vorgeschlagen, beides mit den gleichen Methoden zu therapieren. Einige empfahlen sogar, das Krankheitsbild Fettleibigkeit in die neueste Auflage des »Diagnostical and Statistical Manual of Mental Disorders« (Diagnostisches und statistisches Handbuch psychischer Störungen) aufzunehmen, der »Bibel« der Psychiater. Das unter dem Kürzel DSM-5 bekannte Werk enthält Richtlinien zur Diagnostik psychischer Erkrankungen. Dieser Vorschlag führte unter Fachleuten zu lebhaften Debatten, wurde aber letztlich abgelehnt – in erster Linie, um fettleibige Menschen nicht als seelisch krank zu stigmatisieren.

Vorsicht scheint tatsächlich angebracht, da sich Adipositas und Suchterkrankungen trotz aller Ähnlichkeiten deut-



lich unterscheiden. Wenn Nahrungsmittel eine Sucht hervorrufen können, so müssten dafür bestimmte Inhaltsstoffe verantwortlich sein – das »Nikotin des Junkfood« sozusagen. Tatsächlich legen Arbeiten der Neurowissenschaftlerin Nicole Avena von der University of Florida und anderen Forschern nahe, es könnte sich um Fette oder Zucker handeln. Einer kleinen Studie des Mediziners David Ludwig vom Boston Children's Hospital (USA) zufolge könnten industriell aufbereitete, leicht verdauliche Kohlenhydrate das Verlangen auslösen. Dennoch deutet die Erkenntnislage insgesamt darauf hin, dass nicht einzelne Inhaltsstoffe die Abhängigkeit verursachen. Vielmehr scheint eine Kombination aus Fetten, Zuckern und hohem Kaloriengehalt die »Glückswirkung« zu maximieren.

Andere Experten vertreten die Auffassung, dass sich Adipositas und Drogenabhängigkeit grundsätzlich voneinander unterscheiden. Und ernten damit reichlich Widerspruch. Denn wenn fettleibige Menschen mehr und mehr essen müssen, um Befriedigung zu erlangen, dann ähnelt das doch sehr der Toleranzentwicklung, die man von Rauschmittelsüchtigen kennt. Und wenn man Übergewichtige auf Diät setzt, damit sie abnehmen, kann das bei ihnen zu Verstimmungen und Depressionen führen, was wiederum einer Entzugssymptomatik nahekommt.

Schließlich gibt es Fachleute, die das Postulat einer Esssucht durchweg für unsinnig halten. Schließlich, so ihr Argument, seien wir doch alle irgendwie süchtig nach Nahrungsmitteln. Wären wir es nicht, würden wir nicht überleben. Diese Sichtweise vernachlässigt aber einen wichtigen Aspekt der Adipositas: Moderne, unnatürlich kalorienreiche Speisen können die biologischen Rückkopplungsmechanismen unseres Körpers so effektiv außer Kraft setzen, wie es mit natürlichen Nahrungsmitteln gar nicht möglich ist. Während Millionen von Jahren der Evolution lag die größte Sorge der Menschen nicht darin, ihren Appetit zu zügeln, sondern ausreichend Nahrung zu erjagen, zu sammeln oder anzubauen.

Die Gefahr zu verhungern dürfte weit größer gewesen sein als die, zu viel zu essen. Es erscheint plausibel, dass unser Gehirn den exzessiven Verzehr kalorienreicher Nahrung positiv bewertet und mit Zufriedenheitsgefühlen belohnt – denn er führt dazu, dass wir uns Reserven anfuttern. Für unsere Vorfahren ein durchaus sinnvolles Verhalten, denn in ihrem Leben als Wildbeuter war es stets unsicher, wann man das nächste Mal etwas zwischen die Zähne bekommen würde. Heute jedoch, angesichts eines in westlichen Ländern überreichen Angebots an Nahrungsmitteln, führt dieses Verhalten zu schädlichen Konsequenzen.

Medikamente mit gefährlichen Nebenwirkungen

Wissenschaftler, die den Suchtcharakter der Adipositas bestreiten, bringen durchaus vernünftige Einwände vor. Sie haben Recht damit, dass der Begriff »Abhängigkeit« mit Konnotationen befrachtet ist, die hier wenig helfen. Dennoch weisen exzessives Essen und Drogensucht viele Gemeinsamkeiten auf, in erster Linie einen Kontrollverlust. Wir müssen herausfinden, ob es sich dabei um mehr handelt als um oberflächliche Parallelen. Noch wichtiger ist die Frage, ob ein verändertes Verständnis der Adipositas uns erlaubt, neue Behandlungsansätze zu entwickeln. Andernfalls bleibt die Diskussion nur eine akademische Übung.

Erste Therapien, die in die neue Richtung weisen, gibt es bereits. Das Arzneimittelunternehmen Arena Pharmaceuticals hat kürzlich von der US-Arzneimittelbehörde FDA die Zulassung für seinen Appetitzügler Lorcaserin erhalten. Er soll übergewichtige Patienten beim Abnehmen unterstützen. Lorcaserin stimuliert so genannte Serotonin-2C-Rezeptoren im Gehirn. An Laborratten hat sich gezeigt, dass dies auch zu einem verminderten Verlangen nach Nikotin führen kann.

Ein anderer Arzneistoff ist Rimonabant, das in Europa eine Zeit lang als Appetitminderer zur Behandlung fettleibiger Menschen zugelassen war. Der Stoff hemmt den Cannabinoidrezeptor 1, der eine wichtige Rolle bei Heißhungerattacken spielt, wie sie etwa nach dem Konsum von Cannabis auftreten. Das Blockieren des Rezeptors dämmt die Gier nach Essen ein. Aber nicht nur das: Rimonabant erleichtert es Rauchern zudem, auf Zigaretten zu verzichten. Bei Ratten senkt es das Verlangen nach Alkohol, Opiaten und Kokain.

Allerdings löst Rimonabant bei einigen Patienten Depressionen aus, manche entwickeln sogar Selbstmordgedanken. Die Europäische Arzneimittelagentur empfahl deshalb vor fünf Jahren, die Zulassung auszusetzen, und die FDA lehnte die Einführung des Mittels auf dem US-Markt von vornherein ab. Warum das Präparat Depressionen verursacht, ist weiterhin unklar. Jedoch zeigt das Beispiel, dass neue Therapieansätze, die sich aus dem Konzept der Adipositas als Suchterkrankung ergeben, sorgfältig zu prüfen sind.

Um definitiv zu klären, ob Fettleibigkeit eine Suchterkrankung darstellt, müssen die Forscher zunächst detail-

liert offenlegen, welche neuronalen Netzwerke und zellulären Anpassungsvorgänge eine Drogensucht hervorrufen – um anschließend zu prüfen, ob dieselben Mechanismen auch Völlerei fördern. Es ist möglich und sogar wahrscheinlich, dass die neuronalen Netze, die bei Kokainabhängigkeit beziehungsweise übermäßigem Essen eine Rolle spielen, zwar in verschiedenen Hirnregionen lokalisiert sind, jedoch ähnlich arbeiten. Eine wichtige Frage ist auch, ob genetische Abweichungen wie der Mangel an Dopaminrezeptoren sowohl Drogenabhängigkeit als auch Adipositas begünstigen. Falls es gemeinsame Risikogene gibt, könnten sie vielleicht als Angriffspunkte für Medikamente dienen, die beide Störungen lindern.

Selbst wenn sich herausstellt, dass Fettleibigkeit auf einer echten Nahrungsmittelsucht beruht, und man wirksame Arzneistoffe dagegen findet, werden übergewichtige Menschen weiterhin mit Familienmitgliedern, Freunden und Kollegen zusammenleben, die ihrerseits zu viel essen. An ihrem oft problematischen Umfeld wird sich also nichts ändern. Wie wir von Drogenabhängigen und Alkoholikern wissen, die den Ausstieg aus der Sucht geschafft haben, sind Umgebungsreize ein sehr häufiger Grund für Rückfälle. Die westlichen Gesellschaften mit ihrem Überfluss an fett- und zuckerhaltigen Versuchungen werden es deshalb auch künftig jedem Übergewichtigen schwer machen, von seinem Laster loszukommen. ~

DER AUTOR



Paul J. Kenny ist außerordentlicher Professor am Scripps Research Institute in Jupiter, Florida (USA). Gemeinsam mit seinen Mitarbeitern untersucht er die Mechanismen von Drogenabhängigkeit, Fettleibigkeit sowie Schizophrenie und sucht nach medikamentösen Therapien gegen diese Krankheiten.

QUELLEN

Johnson, P.M., Kenny, P.J.: Dopamine D2 Receptors in Addiction-like Reward Dysfunction and Compulsive Eating in Obese Rats. In: Nature Neuroscience 13, S. 635–641, 2010

Stice, E. et al.: Relation between Obesity and Blunted Striatal Response to Food is Moderated by Taq1A A1 Allele. In: Science 322, S. 449–452, 2008

Ziauddeen, H. et al.: Obesity and the Brain: How Convincing is the Addiction Model? In: Nature Reviews Neuroscience 13, S. 279–286, 2012

WEBLINKS

www.jax.org/news/archives/2013/doug-coleman.html
Englischsprachige Würdigung von Douglas Coleman und Jeffrey Friedman, frühen Entdeckern der genetischen Komponenten von Fettleibigkeit

www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Themen/Uebergewicht_Adipositas/Uebergewicht_Adipositas_node.html
Themenschwerpunkt »Übergewicht und Adipositas« beim Robert Koch-Institut

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1207563

Wie viele
Kalorien
liefert
eine Kartoffel?

Energiegehalt
einer rohen, mittelgroßen Kartoffel:

157 g Wasser x 0 kcal/g = 0 kcal
36 g Kohlenhydrate x 4 kcal /g = 144 kcal
4,3 g Protein x 4 kcal /g = 17 kcal
2,6 g Ballaststoffe x 2 kcal /g = 5,2 kcal
0,2 g Fett x 9 kcal /g = 1,8 kcal

Summe: 168 kcal

Kochen: + 37 kcal Verdauungsarbeit: - 6 kcal * Darmbakterien verwerten: - 2 kcal

Energiegewinn aus der
gekochten Kartoffel:

197 kcal

Proteine sind schwerer verdaulich als Fett.

Garen »übernimmt« einen Teil der Verdauung.

»Hunger« der Darmbakterien verschiedener Menschen ist nicht gleich.

*geschätzt



NAHRUNGSVERWERTUNG

Trägerische Kalorienangaben

Der auf den Verpackungen von Lebensmitteln angegebene Brennwert sagt wenig aus: Wie viel Energie unser Körper aus dem Essen gewinnt, kann individuell sehr verschieden sein!

Von Rob Dunn

In einer besonders verrückten Phase meines Forscherlebens wühlte ich in Kothaufen von Emus, den größten australischen Verwandten der Strauße. Mich interessierte, wie viele der gefressenen Samen die Verdauungsprozedur überstehen und keimfähig bleiben. Tausende einigermaßen unversehrte Überreste säten meine Mitarbeiter und ich aus, und tatsächlich wuchsen bald kleine Wäldchen.

Ganz klar haben Nahrungspflanzen wie jene der Emus Anpassungen für widerstandsfähige Samen erworben – sozusagen im Dienst ihrer Verbreitung. Aber die Vögel, die sich über die Früchte hermachen, sind eigentlich darauf aus, dem Futter möglichst viel Energie zu entnehmen. Dass auch die Menschen mit ihrer Nahrung manches Tauziehen veranstalten und die üblichen Kalorienberechnungen deswegen überhaupt nicht stimmen, wurde mir erst viel später bewusst.

Essen soll dem Körper Energie zuführen. Zu dem Zweck zerlegen Verdauungsenzyme in Mund, Magen und Darm komplexe Moleküle in einfachere, etwa Stärke in Zucker und Proteine in einzelne Aminosäuren. So zerkleinert gelangen sie ins Blut und zu den Zellen, welche die Moleküle weiter abbauen und sich die Energie zu Nutze machen, die in den chemischen Bindungen steckt. In Deutschland wird der Brennwert einer Speise heute korrekterweise in Joule oder Kilojoule angegeben. Allerdings ist vielfach daneben noch die ältere und ungenauere Bezeichnung Kilokalorie gebräuchlich, oft vereinfachend auch kurz als »Kalorie« abgekürzt. Ein Gramm Fett soll demnach ungefähr neun Kilokalorien liefern – entsprechend 38 Kilojoule –, ein Gramm Proteine oder Kohlenhydrate dagegen nur etwa vier Kilokalorien. So genannte Ballaststoffe, also schlecht verdauliche Bestandteile, bringen sogar nur zwei Kilokalorien pro Gramm ein.

Nach diesen Richtwerten, die Forscher im 19. Jahrhundert in Laborversuchen ermittelten, kommen im Grunde bis heute die Angaben auf Lebensmitteln zu Stande. Man geht einfach davon aus, dass jeder die gleiche Energie aus einer

bestimmten Nahrungssorte und -menge bezieht, egal wie unterschiedlich die einzelnen Personen sind und wie verschiedenartig die Nahrungsmittel.

Neuere Forschungsergebnisse zeigen aber, dass diese Sichtweise die wahren Verhältnisse zu stark vereinfacht. Denn wie viel Energie jemand aus einer Mahlzeit gewinnt, hängt von zahllosen Faktoren ab. Dazu gehört natürlich zunächst, ob die Speise Evolutionsanpassungen aufweist, die sie vor dem Verdautwerden mehr oder weniger schützen. Zudem verändert die Art der Zubereitung, etwa Kochen oder Backen, Flambieren oder Erhitzen in der Mikrowelle, ihre Strukturen und chemischen Eigenschaften. Des Weiteren kommt es darauf an, wie viel Arbeit der Körper an Vorleistung aufbringen muss, um die verschiedenen Lebensmittel jeweils bis in kleinste Moleküle zu zerlegen. Nicht zuletzt spielen die unzähligen Bakterien im Darm eine wichtige Rolle: Sie sind als Verdauungshelfer unverzichtbar, verbrauchen aber auch ihren eigenen Anteil an Energie – und sie bilden bei den einzelnen Menschen sehr individuelle Populationen (siehe »Tausend Billionen Freunde«, SdW 11/2012, S. 26).

Warum es keine verlässlichen Richtwerte gibt

Langsam gewinnen Ernährungswissenschaftler in solche Randbedingungen zumindest so viel Einblick, dass etwas stimmigere Kalorienangaben auf Nahrungsmitteln möglich erscheinen. Hierfür eine allgemein verlässliche Formel zu erstellen, dürfte allerdings auch zukünftig nicht gelingen – das Verdauungsgeschehen ist dafür einfach viel zu komplex und verworren angelegt. Eine Reihe Physiologen haben im 19. und frühen 20. Jahrhundert die Vorstellungen zum Energiebedarf und -umsatz eines Organismus und zum Brenn- und Nährwert von Nahrungsmitteln etabliert, darunter in Deutschland unter anderem der Mediziner Max Rubner (1854–1932) und in den Vereinigten Staaten der Chemiker

Wilbur Olin Atwater (1844–1907), der als junger Wissenschaftler einige Jahre an deutschen Forschungsstätten verbracht hatte. Sie erkannten wesentliche Zusammenhänge – doch sie interessierten sich vornehmlich für Durchschnittswerte, auf die heutige Kalorienangaben zurückgehen. Dabei verhalten sich die einzelnen Nahrungsmittel bei der Verdauung und Verwertung grundverschieden.

Zum Beispiel die diversen Gemüse. Von Hunderten unterschiedlicher Pflanzen konsumieren wir Blätter, Stängel, Knollen oder Wurzeln. Bei manchen davon sind die Zellwände in den Stängeln oder Blättern deutlich härter und dicker als bei anderen. Sogar bei ein und derselben Pflanze kann das variieren. Auch sind ältere Blätter meist zäher als junge. Allgemein gewinnen wir umso mehr Energie aus der Pflanzenkost, je weicher die Zellwände sind. Günstig ist, wenn sie leicht zerfallen, so dass der Zellinhalt besser zugänglich wird. Letzteres leistet auch Erhitzen, jedoch wiederum in unterschiedlichem Maß. Bei Spinat oder Zucchini platzen die Zellen durch Kochen rasch, bei Maniok oder Wasserkastanien sind sie viel robuster. Besonders feste, harte Zellwände wie von rohen Maiskörnern dürften den Darm unversehrt passieren.

Früchte als Nahrung: Herausforderungen in der Evolution

Die Früchte von Pflanzen sind daran angepasst, Tiere zum Fressen zu verlocken, so dass die darin enthaltenen Samen verbreitet werden. Diese passieren ihrerseits dank besonderer Adaptationen den Verdauungstrakt oft unversehrt – einschließlich Nährgewebe, das der Keimling benötigt. Besonders leicht lassen sich weiche, zuckrige Gewebe von Früchten verdauen, aber auch harte Nüsse oder Körner sind energiereich, wenngleich mühsamer zu fressen und aufzuschließen. Früchte – darunter Nüsse – kamen in der Kreidezeit auf (die etwa von vor 145 bis vor 65 Millionen Jahren datiert wird), nicht lange nachdem erste Säugetiere aufgetreten waren. Seitdem haben sich beide Organismengruppen immer wieder in ihren Entwicklungen aufeinander abgestimmt.

Wissenschaftliche Untersuchungen zu Erdnüssen, Pistazien und Mandeln lassen vermuten, dass wir ihnen weniger Energie entnehmen als gewöhnlich angenommen. Wir verwerten also die darin enthaltenen Proteine, Kohlenhydrate und Fette in geringerem Maß als bei anderen, leichter verdaulichen Nahrungsmitteln gleicher Zusammensetzung. So nutzten die Teilnehmer einer kürzlich durchgeführten Studie von einer Portion Mandeln nicht wie auf der Packung angegeben 170 Kilokalorien, sondern nur 129.

Selbst die Verdaulichkeit von Lebensmitteln, die nicht daran angepasst sind, die Magendarmpassage zu überstehen, unterscheidet sich teilweise gravierend. So erfordert der Aufschluss von Proteinen mitunter bis zu fünfmal so viel Energie wie der von Fetten, weil es viel Enzymarbeit erfordert, die eng verwundenen Aminosäurestränge voneinander zu lösen. Bei den üblichen Kalorienangaben ist dergleichen allerdings nicht berücksichtigt. Hingegen wird unser Verdau-

AUF EINEN BLICK

WIE VIEL ENERGIE GIBT NAHRUNG WIRKLICH?

1 Die **Kalorienangaben auf Nahrungsmittelverpackungen** verleiten zu falschen Vorstellungen. Die genannten Durchschnittsbrennwerte entsprechen nicht der Energie, die der einzelne Konsument einem Produkt entnimmt.

2 Einerseits werden verschiedene Speisen, vor allem auch abhängig von der **Zubereitungsart**, unterschiedlich gut verdaut.

3 Andererseits ist die **Nahrungsverwertung** in vieler Hinsicht reichlich individuell, nicht zuletzt wegen der persönlichen Darmflora.

ungssystem beispielsweise bei Honig kaum beansprucht. Denn manche Nahrung, gerade Zucker, löst sich sofort oder wird schnell zerlegt und gelangt fast unverzüglich ins Blut.

Nicht zuletzt vergisst man beim Kalorienzählen gern, dass das Innere von Magen und Darm eigentlich Außenwelt darstellt, weshalb das Immunsystem dort Wache hält. Es überprüft die oft stark keimbelastete Nahrung auf Krankheitserreger, die es bei Bedarf bekämpft, damit sie nicht weiter in den Körper gelangen. Den Energieaufwand dafür hat noch niemand präzise ermittelt, gering dürfte er aber nicht sein. Rohes oder halbgares Fleisch kann eine Menge potenziell gefährliche Mikroben aufweisen. Und selbst wenn das Immunsystem gegen viele der im Essen enthaltenen Keime keine Attacke starten muss, ist es doch zumindest damit beschäftigt, ihre Unbedenklichkeit festzustellen.

Die üblichen Kalorienangaben berücksichtigen zudem überhaupt nicht, wie stark die Art der Zubereitung von Speisen die Nahrungsqualität verändert. Schon das Zerkleinern etwa durch Mahlen kann die Energiezufuhr erhöhen. Besonders die verschiedenen Formen von Erhitzen steigern die Verdaulichkeit mancher Nahrungsmittel enorm. Der britische Primatologe und Schimpansenfreilandforscher Richard Wrangham, der heute an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) die Menschenevolution untersucht, probierte in den 1970er Jahren, sich genauso wie Schimpansen zu ernähren – doch er gab den Versuch schließlich wieder auf, denn er wurde dabei einfach nicht satt. Aus seinen Ernährungsstudien folgert er, dass Erfindungen wie das Garen mittels Feuer und das Zerstoßen von Lebensmitteln mit Steinen Meilensteine in der Menschenevolution gewesen sein müssen. Kein Menschenaffe bereitet seine Nahrung in nennenswerter Weise zu. Aber alle menschlichen Kulturen besitzen Technologien, um Lebensmittel zu verändern, ob durch Zerreiben, Erhitzen oder Fermentieren. Wrangham vermutet deshalb, dass die Menschen plötzlich deutlich mehr Energie aus der Nahrung gewannen, als sie anfangen, Essen zu garen und insbesondere Fleisch. Das wiederum könnte die Hirnentwicklung befördert haben, denn ein großes Gehirn verbraucht unverhältnismäßig viele Kalorien.

Allerdings hatte bis vor wenigen Jahren niemand diese Thesen experimentell überprüft. Inzwischen liegt dazu aber

eine Studie an Mäusen vor, die Wranghams Doktorandin Rachel N. Carmody durchführte. Sie und ihre Kollegen fütterten die Tiere jeweils vier Tage lang entweder nur mit Süßkartoffeln oder mit magerem Rindfleisch. Beides war entweder roh oder gekocht und entweder unzerkleinert oder zerrieben, wurde also immer nur in einer von vier verschiedenen Formen verfüttert. Davon durften die Mäuse beliebig viel fressen.

Bei ausschließlich ungekochten Süßkartoffeln nahmen die einzelnen Mäuse in den paar Tagen etwa vier Gramm ab – etwas weniger, wenn die rohe Nahrung zerrieben war. Dagegen wurden sie mit gekochten Süßkartoffeln in beiden Formen etwas fatter. Bei reiner Fütterung mit magerem Fleisch nahmen alle Tiere einige Gramm ab – wie bei einseitiger Proteinernährung physiologisch zu erwarten –, aber die mit gekochtem Fleisch versorgten Mäuse deutlich weniger als bei roher Nahrung. Das lässt sich erklären, da Proteine unter Hitze denaturieren und dann einfacher verdaulich werden. Außerdem wird das Immunsystem des Darms entlastet, weil das Kochen Bakterien abtötet.

Auch für industriell verarbeitete Lebensmittel dürften diese Ergebnisse wichtig sein. In einer Studie von 2010 aß die Hälfte der Teilnehmer Brot aus Vollkornweizen, das mit Sonnenblumenkernen und Getreidekörnern angereichert war, dazu Cheddar-Hartkäse. Die andere Hälfte bekam Weißbrot mit einem aufbereiteten Käseprodukt. Dabei enthielten die Portionen jeweils gleich viele Kalorien. Die Probanden der ersten Gruppe benötigten zur Verdauung doppelt so viel Energie wie jene der zweiten. Wie sich zeigte, liefert Vollkornweizenbrot dem Körper zehn Prozent weniger Kalorien als reines Weißbrot.

Därme vermessen

Hinzu kommt die oft sehr verschiedene individuelle Verwertung gleicher Speisen. Sogar bei praktisch identischer Zusammensetzung und Zubereitung kann die Kalorienaufnahme zwischen einzelnen Menschen beträchtlich differieren. Wiederum bei Mäusen zeigten Carmody und ihre Kollegen, dass sogar Tiere, die sich genetisch sehr stark ähnelten, trotzdem bei gleichem Futter verschieden gut gediehen. Menschen aber unterscheiden sich von vornherein in vielerlei Hinsicht, selbst in der Länge des Darms. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde es bei europäischen Forschern Mode, Dickdarmlängen zu messen. Dabei entdeckten sie, dass einige Bevölkerungsgruppen Russlands durchschnittlich 57 Zentimeter mehr Dickdarm besaßen als manche Gruppen in Polen. Auch in diesem Darmabschnitt werden noch bestimmte Nährstoffe resorbiert, etwa dort von Bakterien aufgeschlossene Fettverbindungen.

Eine große Rolle für die Ernährung spielt die individuelle Enzymausstattung. So bilden nur in wenigen Bevölkerungsgruppen Erwachsene noch das Milchzuckerenzym Laktase, können also unbeschwert Milch konsumieren. Den Übrigen beschert ein Latte Macchiato nicht mehr Speckröllchen, sondern Durchfall.

Völlig unterschätzt haben Forscher lange die Bedeutung der Darmflora. Heute betrachten sie die hochkomplexe Mikrobengemeinschaft des Magen-Darm-Trakts, die sogar bei eineiigen Zwillingen verschieden zusammengesetzt ist, quasi als eigenen Organismus und sprechen von einem Mikrobiom. Im menschlichen Darm herrschen zwei Bakterienstämme vor, die Bacteroidetes und die Firmicutes. Letztere sind Studien zufolge bei fettleibigen Menschen in größerer Menge vorhanden als bei schlanken. Manche guten Nahrungserwerter verdanken ihr Übergewicht vielleicht unter anderem diesen Bakterien, die einige Bestandteile des Essens besonders effizient aufschließen können, etwa komplexe Kohlenhydrate. Es gibt auch Darmmikroben, die nur in bestimmten Weltregionen auftreten. So beherbergen manche Japaner ein Bakterium, das hilft, Seetang besonders gut zu verdauen. Es hat Gene von einem Meeresbakterium übernommen, das auf Tang lebt. Bei den vielen leicht verdaulichen Speisen, die wir heutzutage essen, ist nicht auszuschließen, dass sich dies auf die Darmmikroben auswirkt. Möglicherweise gehen solche Bakterien zurück, die auf so genannte Ballaststoffe spezialisiert sind. Wir würden dann faserhaltige Nahrungsmittel wie etwa Sellerie weniger verwerten können.

Es dürfte einigermassen aufwändig werden, mit Kalorienangaben auf Lebensmittelverpackungen den hier geschilderten Befunden gerecht zu werden. Letztlich müssten sämtliche Nahrungsmittel nochmals einzeln akribisch daraufhin geprüft werden, wie viel Energie sie dem Menschen wirklich liefern und wie viel davon er ungenutzt wieder ausscheidet. Und auf den Einzelnen würden solche Berechnungen ohnehin nie ganz genau passen. ~

DER AUTOR



Rob Dunn ist Biologe an der North Carolina State University in Raleigh und Wissenschaftsautor.

QUELLEN

Barr, S.B., Wright, J.C.: Postprandial Energy Expenditure in Whole-Food and Processed-Food Meals: Implications for Daily Energy Expenditure. In: Food & Nutrition Research 54, doi: 10.3402/fnr.v54i0.5144, 2010

Dunn, R.: The Wild Life of Our Bodies: Predators, Parasites, and Partners That Shape Who We Are Today. Harper, New York 2011

Nowotny, J.A. et al.: Discrepancy between the Atwater Factor Predicted and Empirically Measured Energy Values of Almonds in Human Diets. In: American Journal of Clinical Nutrition 96, S. 296–301, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel, weitere Literatur und Webadressen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/1207568



Was macht wirklich dick?

Die Ursache für Fettleibigkeit gilt als geklärt: Betroffene nehmen zu viele Kalorien zu sich. Doch möglicherweise ist die Menge leicht verdaulicher Kohlenhydrate viel wichtiger? Streng kontrolliert durchgeführte Studien sollen nun die Antwort liefern.

Von Gary Taubes

Warum werden so viele Menschen übergewichtig? Laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) liegt die Antwort auf der Hand: »Die Hauptursache für Fettleibigkeit und Übergewicht ist ein Ungleichgewicht zwischen Kalorienaufnahme und Kalorienverbrauch.« Mit anderen Worten: Entweder wir essen zu viel oder wir bewegen uns zu wenig – oder beides. Wenn dies zutrifft, wird jeder Kalorienüberschuss unweigerlich auf unseren Hüften landen. Dabei ist es egal, ob er aus Proteinen, Kohlenhydraten oder Fetten stammt, den drei Hauptkomponenten unserer Nahrung (Makronährstoffen). Die Lösung für das Problem wäre dann offensichtlich: Iss weniger, bewege dich mehr!

Allerdings wurde diese Lösung jetzt schon vier Jahrzehnte lang in unsere Köpfe eingehämmert, und trotzdem hat die Akkumulation von ungesunden Mengen an Körperfett, fachlich Adipositas genannt, nie zuvor beobachtete Ausmaße angenommen. Heute gilt über ein Drittel aller Amerikaner als fettleibig, da sie einen Body-Mass-Index (Körpergewicht in Kilogramm dividiert durch das Quadrat der Körpergröße in Metern) von über 30 aufweisen. Das sind mehr als doppelt so viele wie vor 40 Jahren. Weltweit fallen mehr als eine halbe Milliarde Menschen unter diese Kategorie; in Deutschland betrifft es immerhin rund 20 Prozent der Erwachsenen. Dabei werden wir nicht nur dicker, sondern entwickeln auch vermehrt Stoffwechselkrankheiten, wie zum Beispiel Typ-2-Diabetes, die wesentlich häufiger fettleibige Personen treffen als schlanke.

Wieso spitzt sich dieses Problem weiterhin zu, obwohl scheinbar eine allgemein anerkannte Lösung vorliegt? Dafür gibt es zwei mögliche Antworten. Entweder sind die Ursachen für Fettleibigkeit zwar korrekt beschrieben, die Betroffenen aber unfähig oder unwillig, ihr Verhalten zu ändern – sei es auf Grund ihrer Gene oder ihrer Umwelt. Oder die Vorstellung ist falsch und damit auch der landläufige Ratschlag, wie man mit dem Problem umgehen soll.

Es gibt nämlich durchaus alternative Hypothesen. So könnte die Ursache für Übergewicht hormonell bedingt sein. Dieser Vorstellung zufolge wäre der Hauptverdächtige für Fettleibigkeit die Menge und Art an Kohlenhydraten, die wir zu uns nehmen. Wir wären demnach einem fundamen-

talen Irrtum erlegen, was die Fettleibigkeit angeht. Nicht der Energiegehalt der Nahrungsmittel – gleichgültig ob Avocados, Steaks, Brot oder Saft – würde dick machen, sondern die Auswirkungen vor allem der Kohlenhydrate auf jene Hormone, welche die Akkumulation von Fetten im Körper regulieren.

Angesichts der Überzeugung und Häufigkeit, mit der die Experten Adipositas als Störung des Energiegleichgewichts bezeichnen, sollte man annehmen, dass sie diesen Zusammenhang schon vor Jahrzehnten auf Herz und Nieren geprüft haben. Doch hat eine strenge wissenschaftliche Untersuchung niemals stattgefunden. Die dafür notwendigen Experimente und Studien waren zu schwierig, vielleicht auch zu teuer, um korrekt durchgeführt zu werden. Deshalb bleiben die wissenschaftlichen Hintergründe eines der brisantesten Gesundheitsprobleme unserer Zeit – die rasante Zunahme von Fettleibigkeit und Diabetes sowie die daraus resultierenden Folgeschäden – bis heute ungeklärt.

Um diesen Missstand anzugehen, habe ich letztes Jahr zusammen mit Peter Attia, einem ehemaligen Chirurgen und Krebsforscher, eine Non-Profit-Organisation gegründet: die Nutrition Science Initiative (NuSI). Mit Unterstützung der Laura and John Arnold Foundation in Houston, Texas, haben wir unabhängige Wissenschaftler rekrutiert, die Experimente entwerfen und durchführen sollen, um die verschiedenen Hypothesen zur Fettleibigkeit und allgemeiner zur Gewichtszunahme zu überprüfen. Damit hoffen wir, innerhalb der nächsten sechs Jahre eindeutige Beweise für die biologischen Ursachen der Adipositas vorlegen zu können.

Das Berücksichtige an der Hormonhypothese der Fettleibigkeit ist, dass sie dort weiterhilft, wo die konventionelle Erklärung versagt. Die Vorstellung, dass wir dick werden, wenn wir mehr Kalorien zu uns nehmen, als wir verbrauchen, beruht vermutlich auf der physikalisch begründeten Vorstellung,

Gemäß landläufiger Meinung zählen Hackfleischfrikadellen eher zu den Dickmachern als einfache Wecken. Doch möglicherweise sind nicht die Gesamtkalorien entscheidend, sondern die Mengen an leicht verdaulichen Kohlenhydraten – aus denen das Brötchen fast ausschließlich besteht.



WASGE: DREAMSTIME / VICHVA KRITYING-ANESLIEE, BROTTCHEN: FOTOLIA / SUGGERIED SCHNEFF, FRIKADELLE: FOTOLIA / BRIGIT REITZ-HOFMANN, COMPOING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ANKE HEINZELMANN

dass Energie weder gebildet noch zerstört wird. Frei übertragen auf die Biologie hieße das: Nimmt ein Organismus Energie auf, muss er sie entweder durch den Stoffwechsel in eine nutzbare Form bringen, ausscheiden oder speichern. Und wenn wir mehr Kalorien zu uns nehmen, als wir verbrauchen oder loswerden, dann muss logischerweise der Überschuss uns fatter und schwerer machen. So weit, so gut. Doch sagt das noch nichts darüber aus, warum wir mehr Kalorien aufnehmen, als wir verbrauchen, und warum der Überschuss als Fett gespeichert wird. Genau diese Fragen gilt es zu beantworten.

Je leichter verdaulich die Kohlenhydrate, desto schneller schießt der Blutzuckerspiegel nach oben

Beschäftigt man sich näher mit dem Thema, landet man unabweisbar bei der Rolle des Insulins. Sobald etwa nach einem kohlenhydratreichen Essen der Pegel von Traubenzucker (Glukose) im Blut ansteigt, schüttet die Bauchspeicheldrüse das Hormon aus. Es sorgt dafür, dass der Blutzuckerspiegel nicht zu hoch wird, indem es Körperzellen Glukose aufnehmen und als Brennstoff verwenden lässt. Daneben regt es im Speziellen die Fettzellen an, Fette für eine spätere Verwendung zu speichern. Solange der Insulinspiegel im Blut hoch ist, häuft der Körper also Fette an, anstatt mit ihrer Hilfe seinen Energiebedarf zu decken.

Die Hauptquelle für Glukose sind stärke- oder zuckerhaltige Nahrungsmittel. Je leichter verdaulich die Kohlenhydrate sind, desto schneller und stärker steigt der Blutzuckerspiegel – ein Vorgang, den Ballaststoffe und Fette in der Nahrung deutlich bremsen können. Deshalb verursachen Nahrungsmittel mit stark prozessierten, also sozusagen bereits vorverdauten Kohlenhydraten eine höhere Insulinausschüttung als andere. Bestimmte Zuckerformen wie beispielsweise Saccharose (Rohrzucker) oder Maissirup mit hohem Fruktosegehalt (englisch: high fructose corn sirup), die etwa in Softdrinks und vielen gesüßten Lebens-

AUF EINEN BLICK

KALORIEN ODER KOHLENHYDRATE?

1 Wie entsteht **krankhafte Fettleibigkeit**? Ernährungsexperten glauben zwar, die Antwort zu kennen, doch wurde die Frage bis jetzt niemals wissenschaftlich exakt untersucht.

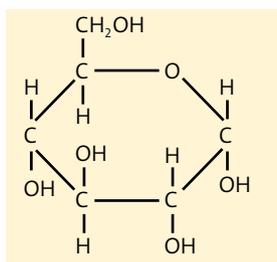
2 Die gängige Meinung sieht die Ursache in einer überhöhten Kalorienzufuhr. Ihr entgegen steht die Hypothese, dass bestimmte Nahrungsmittel, vor allem leicht verdauliche Kohlenhydrate, **hormonelle Regelkreise aus dem Gleichgewicht** bringen. Speziell soll eine Unempfindlichkeit von Zellen gegenüber Insulin dazu führen, dass diese Fett anhäufen.

3 Wissenschaftler der Nutrition Science Initiative (NuSi) werden nun bei Freiwilligen die **Nahrungsaufnahme kontrollieren**, exakt den Energieverbrauch messen und bestimmen, wie sich dieser mit unterschiedlicher Nahrungszusammensetzung verändert. Damit hoffen sie, eine klare Antwort auf die Frage zu bekommen, wie Fettleibigkeit zu Stande kommt.

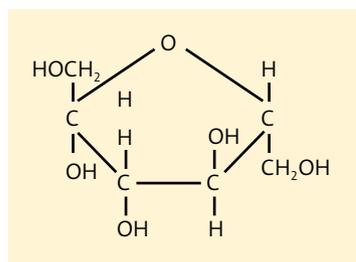
mitteln vorkommen, könnten eine Schlüsselrolle bei der Gewichtszunahme spielen. Das dürfte an der in ihnen enthaltenen Fruktose liegen. Forscher vermuten, dass ein hoher Gehalt an diesem Zuckermolekül zur so genannten Insulinresistenz beiträgt, bei der Körperzellen schwächer auf das Hormon reagieren. Dann ist zur Kontrolle des Blutzuckerspiegels entsprechend mehr Insulin erforderlich, das wiederum verstärkt Fett in den Fettzellen akkumuliert. 10 oder 20 Kalorien pro Tag als überschüssiges Fett gespeichert genügen, um über Jahrzehnte hinweg zu Adipositas zu führen.

Gemäß der Hormonhypothese gibt es nur einen Weg aus diesem Dilemma: jene Zucker und Kohlenhydrate vermeiden, die den Insulinspiegel ansteigen lassen. Dann wird der Körper zur Energiegewinnung automatisch seine Fettreserven anzapfen und verbrennen. Das würde auch geschehen, wenn die gesamte Menge an aufgenommenen Kalorien gleich bleibt. Um überschüssiges Körperfett zu verlieren, müssten also die Kohlenhydrate in der Nahrung begrenzt und am besten durch Fette ersetzt werden, da diese die Insulinausschüttung nicht stimulieren. Wir sollten demnach zuallererst Zucker vermeiden und den Verzehr von stärkehaltigem Gemüse und Getreide einschränken – anstatt uns darüber Gedanken zu machen, wie viel wir essen und wie sehr wir uns bewegen.

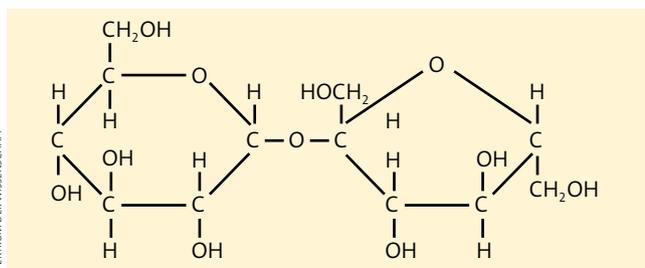
Nicht immer haben Wissenschaftler die heute vorherrschende Hypothese vom Energieungleichgewicht unterstützt. Bis zum Zweiten Weltkrieg fanden sich die führenden Kapazitäten zum Thema Fettleibigkeit – wie auch der meisten anderen medizinischen Fachgebiete – in Europa. Sie betrachteten Adipositas als Wachstumsstörung und führten sie entsprechend auf hormonelle und regulatorische Defekte zurück. Irgendetwas musste folglich falsch mit den körpereigenen Molekülen laufen, die für das Speichern von Fett in Zellen zuständig sind. Der deutsche Internist Gustav von Bergmann (1878–1955) entwickelte die ursprüngliche Hypothese vor mehr als 100 Jahren. Noch heute ist die höchste



Glukose



Fruktose



Saccharose

Auszeichnung, die von der Deutschen Gesellschaft für Innere Medizin verliehen wird, die Gustav-von-Bergmann-Medaille.

Nach dem Zweiten Weltkrieg verschwand dieses Konzept, als Englisch die deutsche Sprache als wissenschaftliche Lingua franca ersetzte. Techniken, um Fettsäuren und Hormonspiegel im Blut akkurat zu messen, entstanden in den späten 1950er Jahren. Erst mit ihrer Hilfe lässt sich untersuchen, wie die Fettakkumulation in Zellen gesteuert wird – und damit die biologische Grundlage der Adipositas.

Bösewicht Cholesterin

Mitte der 1960er Jahre war klar, dass vor allem Insulin die Fettspeicherung reguliert, doch zu diesem Zeitpunkt galt Adipositas schon als Essstörung, die nur zu behandeln war, indem Betroffene weniger Kalorien zu sich nehmen. Als Studien dann auch noch den Cholesterinspiegel im Blut mit dem Risiko für Herzerkrankungen in Verbindung brachten und Ernährungswissenschaftler gesättigte Fettsäuren als Hauptursache für dieses Übel festmachten, gaben Fachleute die Losung aus, Nahrungsmittel mit möglichst wenig Fett,

dafür aber viel Kohlenhydraten zu sich zu nehmen. Doch in den letzten 20 Jahren häuften sich die Indizien für zwei miteinander zusammenhängende Annahmen: dass die Hormonhypothese tatsächlich erklärt, warum wir dick werden, und dass Insulinresistenz, eventuell verursacht durch Zucker aus Nahrungsmitteln, nicht nur Typ-2-Diabetes, sondern auch Herzerkrankungen und sogar Krebs fördert. Aus diesem Grund ist es nun wirklich an der Zeit, endlich streng kontrollierte Experimente zur Rolle der Kohlenhydrate und ihres Zusammenspiels mit Insulin durchzuführen.

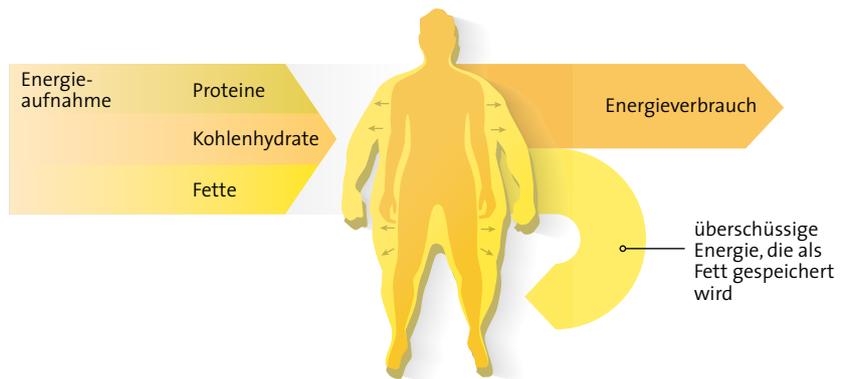
Vor allem wollen wir herausfinden, auf Grund welcher äußerer Einflüsse und durch welche Prozesse der Körper überschüssiges Fett akkumuliert. Da sich Adipositas jedoch über Jahrzehnte hinweg entwickeln kann, sind monatliche Zuwächse möglicherweise zu gering, um sich nachweisen zu lassen. Daher werden unsere Wissenschaftler zuerst die verschiedenen Hypothesen zum Gewichtsverlust untersuchen, der vergleichsweise schnell ablaufen kann. Sobald hierzu Ergebnisse vorliegen, sollte es leichter fallen, zukünftige Experimente zu planen, die den zu Grunde liegenden Mechanismen auf die Spur kommen.

Wettstreit zweier Hypothesen

In den nächsten Jahren wollen von der NuSi unterstützte Wissenschaftler die Ursachen der Fettleibigkeit unter exakten wissenschaftlichen Bedingungen überprüfen und herausfinden, welche der beiden konkurrierenden Hypothesen zutrifft.

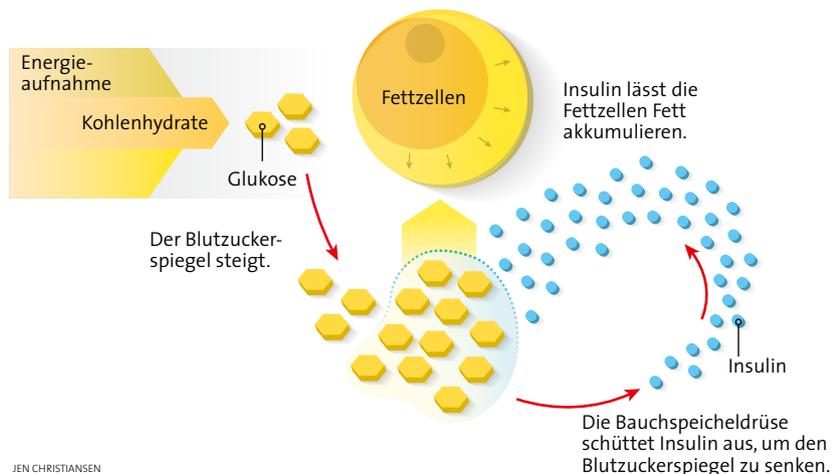
Energiegleichgewicht

Die konventionelle Erklärung konzentriert sich darauf, wie viel Energie, gemessen in Kalorien, der Körper aufnimmt und verbraucht. Isst man zu viel, egal ob Fette, Kohlenhydrate oder Proteine, nimmt das Körperfett zu. Fett kann man nur abbauen, wenn man weniger isst oder mehr Kalorien verbraucht.



Hormonungleichgewicht

Die alternative Annahme betrachtet die komplexen physiologischen Regulationsvorgänge der Fettzellen. Die Aufnahme von Kohlenhydraten erhöht den Blutzuckerspiegel, was wiederum die Ausschüttung des Hormons Insulin veranlasst. Fettzellen reagieren auf Insulin, indem sie ihre Fettspeicher bewahren und sogar aufstocken. Man nimmt zu, wenn der Insulinspiegel über längere Zeit erhöht bleibt, ausgelöst durch die Aufnahme von Kohlenhydraten.



JEN CHRISTIANSEN



Gemeinsam mit Forschern von der Columbia University, den National Institutes of Health, dem Translational Research Institute for Metabolism and Diabetes in Orlando, Florida, und dem Pennington Biomedical Research Center in Baton Rouge, Louisiana, haben wir bereits ein wegweisendes Experiment im Detail geplant. Bei dieser Pilotstudie werden 16 übergewichtige beziehungsweise fettleibige Teilnehmer während des gesamten Zeitraums in den Forschungseinrichtungen leben, damit sich Kalorienaufnahme und Energieverbrauch bei ihnen exakt bestimmen lassen.

Messung in der Stoffwechselkammer

In der ersten Phase werden die Probanden eine Diät erhalten, die jener durchschnittlicher Amerikaner entspricht: 50 Prozent Kohlenhydrate (davon 15 Prozent Zucker), 35 Prozent Fette und 15 Prozent Proteine. Die Wissenschaftler werden die Kalorienzufuhr so lange regulieren, bis die Teilnehmer weder zunehmen noch abnehmen. Die Energieaufnahme wird dann also genau dem Verbrauch entsprechen, was sich in einer so genannten Stoffwechselkammer (englisch: metabolic chamber) messen lässt. In der zweiten Phase erhalten die Probanden exakt genauso viele Kalorien wie bisher, über genauso viele Mahlzeiten und Imbisse verteilt, doch der Anteil an Kohlenhydraten wird jetzt nur noch ungefähr fünf Prozent betragen. Das entspricht etwa jener Menge, die normalerweise in einer Diät aus Fleisch, Fisch, Geflügel, Eier, Käse, tierischem Fett, pflanzlichem Öl und grünem Blattgemüse vorkommt. Der Proteingehalt unterscheidet sich nicht von dem in Phase eins und liegt weiterhin bei 15 Prozent der Kalorienzufuhr. Der Rest, nämlich 80 Prozent der Kalorien, stammt dafür aus Fetten in den genannten Nahrungsmitteln. Damit will man nicht etwa untersuchen, ob diese Diät gesund ist oder gar für das ganze Leben empfehlenswert, sondern den Insulinspiegel der Teilnehmer in möglichst kurzer Zeit maximal senken.

Gut geplante wissenschaftliche Experimente schaffen eine Situation, in der konkurrierende Hypothesen unterschiedliche Ergebnisse vorhersagen. In diesem Fall: Wenn Fettakkumulation vor allem auf einem Energiemissverhältnis beruht, sollten die Probanden während Phase zwei weder Gewicht zulegen noch verlieren; sie nehmen nämlich weiterhin exakt die gleiche Anzahl an Kalorien zu sich, wie sie verbrauchen. Sollten aber die Versuchsteilnehmer nun abnehmen und Fettpolster abbauen, würde dies die Annahme stützen, dass Kalorien aus Kohlenhydraten dicker machen als

solche aus Proteinen oder Fetten – und zwar wahrscheinlich vor allem wegen des Insulineffekts.

Eine solche gründliche Vorgehensweise hat allerdings einen großen Nachteil: Sie braucht viel Zeit. Allein diese Pilotstudie wird fast ein Jahr lang dauern, die noch ehrgeizigeren Folgeuntersuchungen dürften weitere drei Jahre benötigen. Darüber hinaus hoffen wir in Zukunft beispielsweise untersuchen zu können, welche Rolle die Makronährstoffe bei anderen Krankheiten spielen, wie Diabetes, Krebs und neurologischen Störungen.

Doch wir sind davon überzeugt, dass sich der Aufwand lohnt. Denn Ernährungsratschläge müssen auf exakter Wissenschaft beruhen und nicht auf vorgefassten Meinungen oder unkritischer Anpassung an die Mehrheitsansicht. Fettleibigkeit und Typ-2-Diabetes sind nicht nur ernsthafte Bedrohungen für die Betroffenen, sondern auch für unsere Gesundheitssysteme und damit für die gesamte Wirtschaft. Bei dem Kampf gegen diese Krankheiten benötigen wir unbedingt eindeutige Beweise, was sie verursacht. Die Experimente von NuSi werden sie nun hoffentlich erbringen. ~

DER AUTOR



Gary Taubes ist Wissenschaftsjournalist und Mitbegründer der Nutrition Science Initiative (NuSi).

QUELLEN

- Wells, J. C. K., Siervo, M.:** Obesity and Energy Balance: Is the Tail Wagging the Dog? In: European Journal of Clinical Nutrition 65, S. 1173–1189, 2011
- Wilcox, G.:** Insulin and Insulin Resistance. In: Clinical Biochemist Reviews 26, S. 19–39, 2005. Online frei verfügbar unter www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1204764

LITERATURTIPP

Taubes, G.: Why we Get Fat: And what to Do about it. Knopf, 2010
Der Autor stellt die von ihm recherchierten Belege für die Hypothese vor, dass vor allem leicht verdauliche Kohlenhydrate Fettleibigkeit verursachen.

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/sep2013/Taubes-video
Videoaufnahme (englisch) einer Podiumsdiskussion zwischen Autor Gary Taubes und Christopher Gardner, Ernährungsexperte von der Stanford University, zum Thema Kohlenhydrathypothese und Fettleibigkeit

www.adipositas-gesellschaft.de
www.kompetenznetz-adipositas.de
Umfangreiche wissenschaftliche Informationen zu Übergewicht und Fettleibigkeit in Deutschland

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/1207569

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projektes nicht möglich, und deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



BOSCH



Ferdinand-Braun-Institut
für Höchstfrequenztechnik

theben



INEOS Phenol

OSRAM



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebritzer Agrarbetriebesgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Stadtwerke Düsseldorf | Kernkraftwerk Isar, Essenbach | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Maschinenfabrik GmbH | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Sternwarte am Wallgarten | Förderverein des Thomas-Mann-Gymnasium Stutensee | Förderverein der Leibnizschule e. V. | KIT Karlsruhe | Volksbank Bigge-Lenne eG | Meissner AG | Förderverein der Justus-Liebig-Schule Darmstadt | Dominique Mayer | Rotary Club Buchloe

Eine neue Quantentheorie

Im Jahr 1926 führte Erwin Schrödinger die Wellenfunktion in die Quantentheorie ein. Wie sie zu verstehen ist, darüber zerbrechen sich die Physiker bis heute die Köpfe. Eine neue Deutung namens QBismus geht davon aus, dass die Wellenfunktion nur die subjektive Erwartungshaltung des quantenmechanischen Beobachters wiedergibt.

Von Hans Christian von Baeyer

Die Quantenmechanik erklärt das Verhalten der Materie präzise – von subatomaren bis zu astronomischen Größenordnungen. Sie ist die erfolgreichste physikalische Theorie und zugleich die seltsamste: In der Quantenwelt scheinen sich Teilchen an zwei Orten zugleich aufzuhalten; Information pflanzt sich vermeintlich mit Überlichtgeschwindigkeit fort, und Katzen können gleichzeitig tot und lebendig sein. Seit nunmehr 90 Jahren plagen sich Wissenschaftler ohne rechten Erfolg mit solchen Paradoxien herum. Während die Erkenntnisse der Evolutionstheorie und Kosmologie längst fest zu unserem Weltbild gehören, gilt die Quantentheorie sogar vielen Physikern als bizarre Abnormität – eine zwar fast magisch wirksame, aber im Grund unerklärliche Gebrauchsanleitung zum Bau technischer Geräte wie Laser, Transistoren oder Kernspintomografen. Die nach wie vor zutiefst unklare Bedeutung der Quantentheorie verfestigt den Eindruck, für unser Alltagsleben seien ihre exotischen Ergebnisse eigentlich irrelevant.

Doch schon 2001 begann ein Forscherteam ein Modell zu entwickeln, das die Paradoxien eliminiert oder wenigstens entschärft. Der so genannte Quanten-Bayesianismus oder

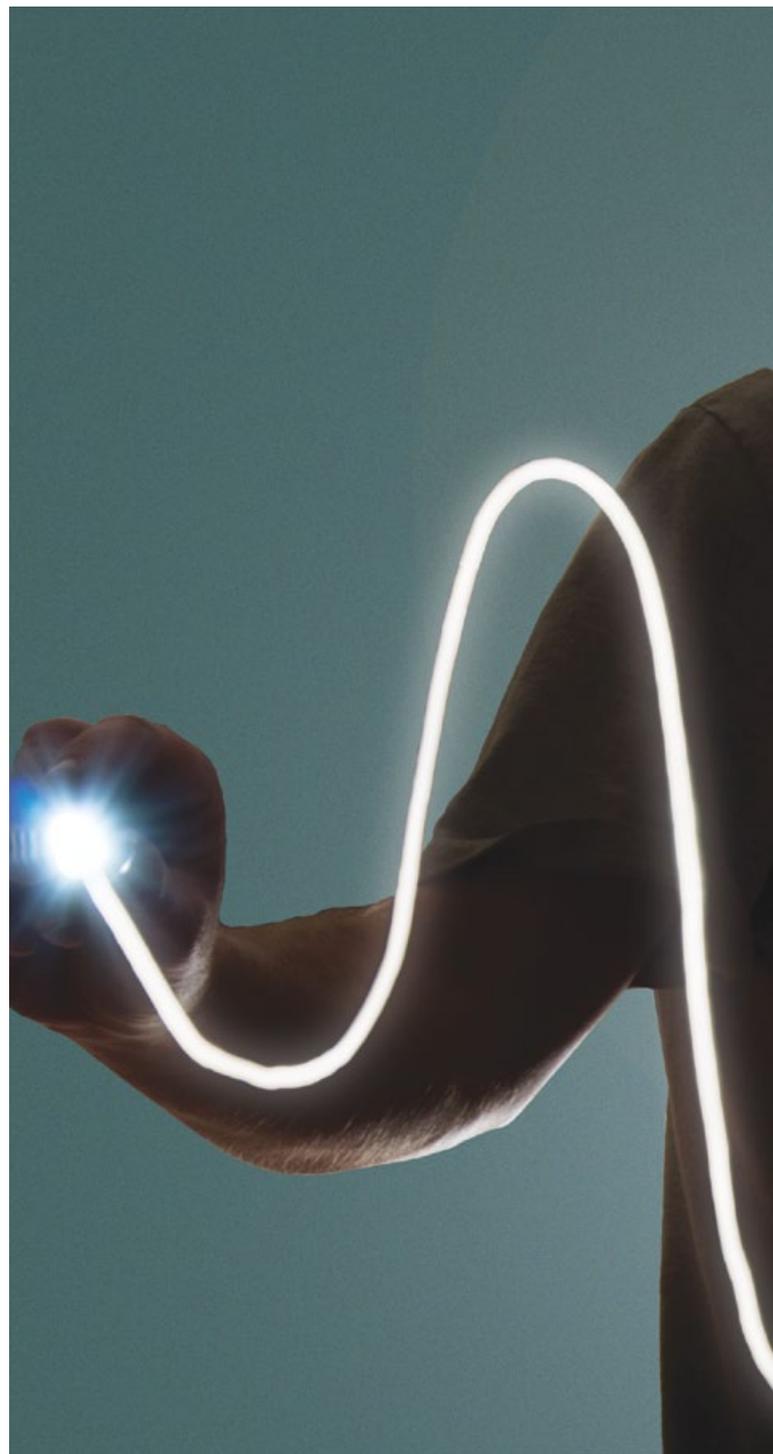
AUF EINEN BLICK

REIN SUBJEKTIVE BESCHREIBUNG?

1 Die Quantenmechanik steckt trotz all ihrer Erfolge voller Paradoxien. Ein neues Modell namens **Quanten-Bayesianismus** – kurz **QBismus** – **kombiniert Quanten- und Wahrscheinlichkeitstheorie**, um die Widersprüche zu entschärfen.

2 Der QBismus interpretiert die Quelle aller Quantenparadoxien – die **Wellenfunktion** – auf neue Weise. Physiker berechnen mit ihr die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen eine bestimmte Eigenschaft hat, dass es zum Beispiel an einem Ort ist und nicht an einem anderen.

3 Dem QBismus zufolge ist die Wellenfunktion nicht real, sondern bloß ein **mathematisches Werkzeug**, mit dem ein Beobachter seine **persönliche Überzeugung** ausdrückt, dass ein Quantensystem eine bestimmte Eigenschaft hat. Nach dieser Deutung existiert die Wellenfunktion nicht objektiv, sondern gibt nur die **subjektive Befindlichkeit** einer Person wieder.



kurz QBismus (gesprochen wie Kubismus) liefert ein neues Bild der so genannten Wellenfunktion, auf der die Seltsamkeit der Quanten letztlich beruht.

Nach der herkömmlichen Auffassung wird ein Quantenobjekt, etwa ein Elektron, durch die Wellenfunktion repräsentiert – durch einen mathematischen Ausdruck, der die Eigenschaften des Objekts beschreibt. Will man vorhersagen, wie sich das Elektron verhalten wird, so berechnet man, wie sich seine Wellenfunktion zeitlich entwickelt. Das Ergebnis liefert die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Teilchen eine bestimmte Eigenschaft haben wird – zum Beispiel, dass es an einem Ort sein wird und nicht an einem anderen. Probleme entstehen, sobald Physiker annehmen, die Wellenfunktion sei real.

Darum bestreitet der QBismus die objektive Realität der Wellenfunktion. Indem er Quanten- und Wahrscheinlich-

keitstheorie kombiniert, deutet der QBismus die Wellenfunktion als reine Gebrauchsanleitung, als mathematisches Werkzeug, mit dessen Hilfe der Beobachter klügere Entscheidungen über die ihn umgebende Quantenwelt trifft. Das heißt, die Wellenfunktion drückt die persönliche Überzeugung eines Beobachters über eine spezielle Eigenschaft des Quantensystems aus, wobei seine Entscheidungen und Aktionen das System in unbestimmter Weise beeinflussen. Ein anderer Beobachter wiederum verwendet seine eigene Wellenfunktion, welche die Welt so beschreibt, wie er sie sieht. Er mag zu einer völlig unterschiedlichen Schlussfolgerung bezüglich desselben Quantensystems kommen. Ein System – oder ein Ereignis – kann so viele unterschiedliche Wellenfunktionen besitzen, wie es Beobachter gibt. Erst nachdem die Beobachter miteinander kommuniziert und ihre priva-



FOTO: CALEB CHARLAND

Nach Überzeugung der Quanten-Bayesianer beschreibt die Wellenfunktion nicht die physikalische Realität, sondern allein die Überzeugungen eines potenziellen Beobachters.

ten Wellenfunktionen dem neu erworbenen Wissen angepasst haben, ergibt sich ein übereinstimmendes Weltbild.

So gesehen könnte die Wellenfunktion »durchaus die mächtigste Abstraktion sein, die wir je gefunden haben«, meint der Theoretiker N. David Mermin von der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York), der sich kürzlich zum QBismus bekehrt hat.

Die Idee, dass die Wellenfunktion nicht real sei, geht auf einen Mitbegründer der Quantentheorie in den 1930er Jahren zurück: Der dänische Physiker Niels Bohr (1885–1962) betrachtete die Wellenfunktion als rein symbolisches Rechenwerkzeug im Rahmen des Quantenformalismus. Der QBismus ist das erste Modell, das Bohrs Behauptung mathematisch untermauert. Es verbindet die Quantentheorie mit der bayesschen Statistik, die der englische Mathematiker Thomas Bayes (1701–1761) entwickelte, indem er Wahrscheinlichkeit als den Grad persönlicher Überzeugung definierte. Die bayessche Statistik liefert mathematische Regeln dafür, wie man subjektive Einsichten im Licht neuer Informationen aktualisiert. Die Anhänger des QBismus behaupten nun: Die rätselhaften Paradoxien der Quantenmechanik verschwinden, wenn man die Wellenfunktion als eine subjektive Überzeugung interpretiert, die einer Revision gemäß den Regeln der bayesschen Statistik unterworfen wird.

So wissen wir etwa, dass wir ein Elektron bei jedem Nachweis an einem bestimmten Ort finden. Doch wenn wir nicht nachsehen, kann sich die Wellenfunktion des Elektrons »verschmieren«; das heißt, das Teilchen scheint sich gleichzeitig an vielen unterschiedlichen Orten zu befinden. Nun führen wir erneut eine Messung durch – und finden das Elektron wiederum an genau einem Ort. Nach der Standardinterpretation verursacht die Beobachtung einen augenblicklichen »Kollaps« der Wellenfunktion zu einem eindeutigen Wert.

Da der Kollaps – auch wenn es sich um mehrere Teilchen handelt – überall zu exakt derselben Zeit geschieht, scheint er das Prinzip der Lokalität zu verletzen, dem zufolge jede Veränderung eines Objekts von einem Vorgang in dessen unmittelbarer Umgebung verursacht werden muss. Die Nichtlokalität führt zu den rätselhaften Quantenphänomenen, die Albert Einstein »spukhafte Fernwirkung« nannte.

Seit der Entstehung der Quantenmechanik sehen manche Physiker im Kollaps der Wellenfunktion eine paradoxe und zutiefst beunruhigende Eigenschaft der Theorie. Sie suchen darum nach alternativen Versionen der Quantenmechanik – mit recht gemischtem Erfolg (siehe Kasten auf der gegenüberliegenden Seite).

Doch der QBismus besagt, dass gar kein Paradox vorliegt. Der Kollaps der Wellenfunktion bedeutet nur, dass ein Beobachter auf Grund neuer Informationen plötzlich und sprunghaft seine Wahrscheinlichkeitsaussage revidiert – genau wie ein Arzt, der auf Grund einer neuen Computertomografie die Prognose eines Krebspatienten anders einschätzt. Das Quantensystem hat sich nicht auf seltsame und unerklärliche Weise gewandelt; verändert hat sich die Wellenfunktion, mit welcher der Beobachter seine Erwartungen ausdrückt.

Wir können diese Deutung auf das berühmte Paradoxon von Schrödingers Katze anwenden. Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) stellte sich eine Kiste vor, in die eine anfangs quicklebendige Katze sowie ein Giftfläschchen und ein radioaktives Atom gesperrt werden. Das Atom zerfällt nach den Regeln der Quantenmechanik innerhalb einer Stunde mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit. Wenn es zerfällt, zertrümmert ein Hammer das Fläschchen und setzt das Gift frei; andernfalls überlebt die Katze.

Man wartet nun eine Stunde, ohne die Kiste zu öffnen. Gemäß der herkömmlichen Quantentheorie bildet die Wellenfunktion des Atoms nach Ablauf einer Stunde eine Überlagerung von zwei Zuständen: zerfallen und nicht zerfallen. Doch da man den Inhalt der Kiste noch nicht überprüft hat, erstreckt sich die Superposition weiter: Auch der Hammer ist in einem Überlagerungszustand, ebenso auch das Giftfläschchen. Und nach dem quantenmechanischen Standardformalismus ist groteskerweise sogar die Katze eine Superposition – sie ist zugleich lebendig und tot.

Der QBismus löst das Rätsel, indem er darauf beharrt, die Wellenfunktion sei keine objektive Eigenschaft der Katze in der Kiste, sondern eine subjektive Idee des Beobachters. Natürlich ist das Tier entweder am Leben oder nicht, und nicht beides auf einmal. Zwar ist seine Wellenfunktion eine Superposition von »lebend« und »tot«, aber damit werden nur Annahmen des Beobachters beschrieben. Die Aussage, die Katze sei wirklich zugleich lebendig und tot, gleicht dem Kommentar eines Sportreporters, das Spiel sei unentschieden – zugleich »gewonnen« und »verloren« –, bis das entscheidende Tor fällt. Dass der Kenntnisstand einer Person die Welt so oder anders erschafft, ist eine absurde, geradezu größensinnige Idee.

»Gutartiger Unfriede«

Am Beginn des QBismus stand ein kurzer Artikel unter dem Titel »Quantum Probabilities as Bayesian Probabilities«, den Carlton M. Caves von der University of New Mexico in Albuquerque, Christopher A. Fuchs, damals an den Bell Laboratories in Murray Hill (New Jersey), und Rüdiger Schack von der University of London im Januar 2002 publizierten. Alle drei sind erfahrene Quanteninformatiker, und ihre jeweilige Zugehörigkeit zu einer physikalischen Fakultät, einem Industrielabor und einer Mathematikfakultät illustriert den interdisziplinären Charakter des Forschungsgebiets.

Seither ist Fuchs in das Perimeter Institute in Ontario (Kanada) umgezogen und zum Hauptvertreter des QBismus



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

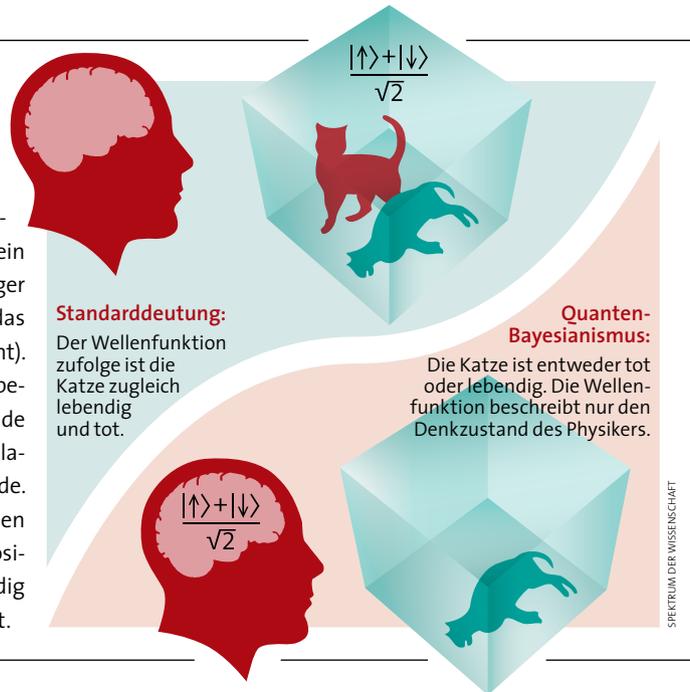


Unser Online-Dossier »Quantenphysik«
finden Sie unter

www.spektrum.de/quanten

Ein Paradoxon löst sich auf

Der Unterschied zwischen der Kopenhagener Standarddeutung der Quantenmechanik und dem Quanten-Bayesianismus lässt sich gut an dem berühmten Beispiel von Schrödingers Katze illustrieren. Hierbei werden eine Katze und ein Giftfläschchen in eine Kiste gesperrt. Ein mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit eintretendes Quantenereignis zerbricht das Fläschchen (oder nicht) und tötet dadurch die Katze (oder nicht). Bevor ein Beobachter die Kiste öffnet, bildet die das System beschreibende Wellenfunktion eine Superposition der Zustände »lebend« und »tot«. Erst durch den Beobachtungsvorgang kollabiert die Wellenfunktion der Katze in einen der beiden Zustände. Hingegen beschreibt die Wellenfunktion im QBismus nur den subjektiven Denkkzustand des Beobachters, und die Superposition gilt nur für diesen Zustand: Die Katze ist entweder lebendig oder tot; die Beobachtung klärt dann, was von beidem zutrifft.



avanciert. Kollegen, die den humorvollen Texaner kennen, sind nicht überrascht, wenn er einen Artikel mit den Worten eröffnet: »In dieser Arbeit versuche ich ein bisschen gutartigen Unfrieden zu stiften.« Für Fuchs ist Wissenschaft ihrem Wesen nach eine gemeinsame Aktivität, und tiefe Erkenntnisse werden nur in heftigem intellektuellem Streit geboren. Wie ein Wirbelwind fegt er mit seinem Laptop im Rucksack um die Welt, organisiert Konferenzen, leitet Arbeitsgruppen und hält Vorlesungen.

Nebenbei hat Fuchs eine neue Art von Literatur geschaffen. Im Jahr 2011 veröffentlichte Cambridge University Press seine E-Mail-Korrespondenz mit Forschern aus aller Welt als 600-Seiten-Buch unter dem Titel »Coming of Age with Quantum Information«. Es berichtet von den Geburtswehen des QBismus und gibt einen plastischen Eindruck davon, wie Menschen in lebhaften Debatten theoretische Physik betreiben. Das Buch dokumentiert auch, dass Fuchs im Unterschied zu den meisten Wissenschaftlern Philosophie für wichtig hält. Dies nicht nur wegen ihres Einflusses auf die Physik, sondern auch, weil sie ihrerseits von physikalischen Erkenntnissen angeregt wird.

Zum Beispiel ist die Frage, was wir unter Wahrscheinlichkeit verstehen, im Grund philosophischer Natur. Für sie gilt wie für die Zeit: Wir wissen, was das ist, bis wir aufgefordert werden, es zu definieren. Gewiss besagt die 50-prozentige Wahrscheinlichkeit von »Kopf« beim Münzwurf etwas über das Resultat von 100 Würfeln – aber was bedeutet die Aussage »Die Wahrscheinlichkeit, dass es heute Abend regnen wird, liegt bei 60 Prozent« oder die Einschätzung von US-Präsident Barack Obama vor der Geheimoperation gegen Osama bin Laden, die Erfolgswahrscheinlichkeit betrage 55 Prozent?

Seit drei Jahrhunderten existieren zwei ganz unterschiedliche Definitionen nebeneinander. Die seit Langem vorherrschende Variante heißt frequentistische Wahrscheinlichkeit; sie ist definiert als die relative Häufigkeit eines Ereignisses

bei einer Serie von Zufallsversuchen. Diese Zahl gilt als objektiv und durch wissenschaftliche Experimente direkt verifizierbar. Das typische Beispiel ist der Münzwurf: Bei einer großen Anzahl von Würfeln wird ungefähr zur Hälfte »Kopf« herauskommen, und somit beträgt die Wahrscheinlichkeit für Kopf rund 0,5. Genau genommen verlangt die Definition unendlich viele Würfe; erst dann nimmt die Wahrscheinlichkeit den exakten Wert 0,5 an. Leider wird der Wert damit unverifizierbar und büßt seinen Anspruch auf Objektivität ein. Um diese Definition auf Wettervorhersagen anzuwenden, könnte man reale oder simulierte Wettermuster abzählen, doch für Präsident Obamas Vermutung ist die frequentistische Interpretation nutzlos, denn die Aktion gegen Bin Laden war nicht wiederholbar.

Die zweite Variante ist der bereits erwähnte, nach Thomas Bayes benannte Bayesianismus, den der französische Mathematiker Pierre-Simon Laplace (1749–1827) später präziserte und – zusammen mit dem eben skizzierten Frequentismus – in der Fachwelt bekannt machte. Im Gegensatz zum Frequentismus ist die bayessche Wahrscheinlichkeit subjektiv: Sie misst die Stärke der Überzeugung, dass ein Ereignis eintreten wird. Der Überzeugungsgrad gibt an, wie viel eine Person auf das Ereignis wetten würde. In einfachen Fällen wie dem Münzwurf stimmen Frequentismus und Bayesianismus überein. Doch bei Wettervorhersagen oder beim Ergebnis einer militärischen Aktion steht es dem Bayesianer im Gegensatz zum Frequentisten frei, quantitative statistische Daten mit intuitiven Schätzungen zu kombinieren, die auf früheren Erfahrungen beruhen.

Mit Einzelfällen – über die der Frequentismus nichts zu sagen weiß – kommt der Bayesianismus ohne Weiteres zurecht, und er vermeidet es, sich auf im Prinzip unendlich viele Vergleichsfälle wie beim genannten Münzenwerfen zu berufen. Doch sein eigentlicher Vorteil ist, dass Wahrscheinlichkeitsaussagen sich ändern können, da der Überzeugungsgrad

Vier Deutungen der Quantenmechanik

Was geht in der Quantenwelt vor sich? Forscher haben ein rundes Dutzend unterschiedlicher Interpretationen für den mathematischen Formalismus angeboten. Der Quanten-Bayesianismus ist die wohl radikalste Deutung. Folgende vier Alternativen wurden unter Physikern und Naturphilosophen besonders intensiv diskutiert.



Die Kopenhagener Deutung wurde vor allem von dem dänischen Physiker Niels Bohr (1885–1962) und seinem deutschen Kollegen Werner Heisenberg (1901–1976) entwickelt. Sie ist die orthodoxe Version der Quantenmechanik. Die messbaren Eigenschaften eines Atoms oder eines anderen Systems bilden demnach dessen Quantenzustand. Dieser wiederum wird entweder durch eine Matrix oder eine Wellenfunktion beschrieben, die alle möglichen Messresultate umfasst. Den Kontakt zur Realität stellt die bornsche Regel her, benannt nach Heisenbergs Lehrer Max Born (1882–1970); sie liefert zu einem gegebenen Quantenzustand messbare Wahr-

scheinlichkeiten. Durch die Messung verursacht der Beobachter den »Kollaps der Wellenfunktion« zu einem neuen Zustand, der das tatsächliche Messergebnis beschreibt. Der augenblickliche Kollaps erlaubt Wirkungen, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit ausbreiten.



Die Führungsfeld-Deutung: Einige Physiker, darunter vorübergehend auch Albert Einstein (1879–1955), versuchten ein reales Quantenfeld einzuführen, das die Bewegung eines Teilchens steuert. Leider verliert dieses Modell jede Anschaulichkeit, sobald mehrere Teilchen beteiligt sind:

nicht feststeht. Ein frequentistischer Meteorologe vermag zwar die Niederschlagswahrscheinlichkeit zu berechnen, wenn das regionale Klima seit vielen Jahren stabil und vorhersagbar ist. Doch im Fall einer plötzlichen Veränderung wie einer Dürre, über die es nur wenige Daten gibt, kann ein Bayesianer die neue Information berücksichtigen und damit das Wetter besser vorhersagen.

Den Kern der Theorie bildet eine einfache Formel, der so genannte Satz von Bayes. Damit wird berechnet, wie sich eine Wahrscheinlichkeitsschätzung unter dem Einfluss neuer Informationen ändert. Besteht beispielsweise bei einem Patienten Verdacht auf Krebs, so bestimmt der Arzt zunächst eine A-priori-Wahrscheinlichkeit, ausgehend von der generellen Häufigkeit des Leidens, der Krankheitsgeschichte der Verwandtschaft des Patienten und anderen Faktoren. Wenn die Testresultate vorliegen, aktualisiert der Arzt diese Wahrscheinlichkeit mittels der bayesschen Formel. Das Resultat drückt nicht mehr und nicht weniger aus als den persönlichen Überzeugungsgrad des Arztes.

Die meisten Physiker vertrauen eher der frequentistischen als der bayesschen Wahrscheinlichkeit, weil sie gelernt haben, alles Subjektive zu meiden. Doch sobald es gilt, eine Vorhersage zu machen, kommt der bayessche Ansatz ins Spiel, meint Marcus Appleby, ein Mathematiker an der University of London. Schließlich finden wir es verrückt, bei einer Lotterie zu wetten, wenn wir wissen, dass seit zehn Jahren Woche für Woche dieselbe Person gewonnen hat – obwohl ein strenger Frequentist darauf beharren müsste, dass frühere Wettergebnisse nichts über künftige Gewinner aussagen. In der Praxis ignoriert aber niemand derart auffällige Erfahrungswerte. Man nimmt den bayesschen Standpunkt ein, aktualisiert den Kenntnisstand und handelt nach bestem Wissen.

Obwohl der QBismus die Realität der Wellenfunktion bestreitet, negiert er keineswegs die Realität an sich. Wie der Mitbegründer Rüdiger Schack betont, ist das von einem Be-

obachter untersuchte Quantensystem durchaus real. Philosophisch gesprochen, meint Mermin, unterstellt der QBismus eine Spaltung oder Grenze zwischen der Lebenswelt des Beobachters und der Erfahrung, die er mit dieser Welt macht. Nur diese Erfahrung wird durch eine Wellenfunktion beschrieben.

Wellenfunktion und bornsche Regel

Kürzlich brachte Fuchs ein theoretisches Argument vor, das den Anspruch des QBismus untermauern soll, er sei eine stichhaltige Interpretation von Wahrscheinlichkeit und Quantentheorie. Es geht um die so genannte bornsche Regel, benannt nach dem deutschen Quantenphysiker Max Born (1882–1970). Nach ihr erhalten wir die Wahrscheinlichkeit dafür, ein Quantensystem mit der Eigenschaft X vorzufinden, wenn wir den Absolutbetrag der zu X gehörigen Wellenfunktion zum Quadrat erheben. Fuchs zeigte nun einen mathematischen Weg, wie sich die bornsche Regel fast vollständig in der Sprache der Wahrscheinlichkeitstheorie ausdrücken lässt – ohne Bezugnahme auf eine der Beobachtung zu Grunde liegende Wellenfunktion. Die bornsche Regel galt bisher als Brücke zwischen Wellenfunktion und Experiment; gemäß Fuchs können wir Versuchsergebnisse allein mittels Wahrscheinlichkeiten vorhersagen.

Für Fuchs liefert die neue Formulierung der bornschen Regel ein weiteres Indiz dafür, dass die Wellenfunktion bloß ein Werkzeug ist, mit dem Beobachter ihre persönlichen Überzeugungen oder Wahrscheinlichkeiten bezüglich der sie umgebenden Quantenwelt berechnen können. »Die bornsche Regel ist so gesehen eine Ergänzung des Bayesianismus«, schreibt Fuchs. »Sie liefert nicht so etwas wie objektivere Wahrscheinlichkeiten, sondern stellt ein zusätzliches Regelwerk für das Verhalten des Akteurs bereit, wenn er mit der physikalischen Welt interagiert.« Die neue Gleichung ist verblüffend einfach. Bis auf ein winziges Detail gleicht sie

N Teilchen bewegen sich in einem abstrakten Raum mit $3N$ Dimensionen. Außerdem übt auch hier das Führungsfeld eine augenblickliche Fernwirkung über beliebige Distanzen aus.



Die Vielwelten-Deutung, die in den letzten Jahren starken Zulauf erfährt, verzichtet auf den Kollaps der Wellenfunktion. Man postuliert einen einzigen Quantenzustand der Welt, der sich kontinuierlich und deterministisch entwickelt. Stellt ein Experiment beispielsweise fest, welchen Teil eines Doppelspalts ein Elektron passiert hat, so kollabiert nicht der Quantenzustand auf einen Spalt, sondern die Welt spaltet sich in zwei Zweige auf. Wir, die Beobachter der realen Welt, existieren in dem einen Zweig und nehmen vom anderen nichts wahr. Somit spaltet sich das Universum wie ein Baum in ein riesiges Multiversum auf, in dem jedes mögliche Ergebnis

in einer unendlichen Vielfalt separater Universen real existiert. Der größte Nachteil dieser Deutung – neben ihrer Zumutung für unsere Vorstellungskraft – ist, dass es ihr schwerfällt, in der verzweigten Welt die Wahrscheinlichkeit eines Versuchsergebnisses zu definieren.



Theorien mit spontanem Kollaps: In solchen Modellen wird der Kollaps nicht durch die Beobachtung ausgelöst, sondern ist ein natürlicher Vorgang, der in jedem Quantensystem auftritt – insbesondere, wenn es mit einem makroskopischen Objekt wechselwirkt. Allerdings muss dafür ein völlig neuer Kollapsmechanismus erfunden werden. Solange sich dieser nicht experimentell beweisen lässt, bleibt er eine neue Annahme, die ebenso rätselhaft ist wie der vom Beobachter ausgelöste Kollaps in der Kopenhagener Deutung.

dem Gesetz der Gesamtwahrscheinlichkeit, welches logischerweise fordert, dass die Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ereignisse zusammen eins ergeben. Beispielsweise muss beim Münzwurf die Wahrscheinlichkeit für Kopf (0,5) plus derjenigen für Zahl (0,5) gleich eins sein. Der einzige Hinweis auf die Quantenmechanik in diesem Rezept zur Berechnung von quantentheoretischen Wahrscheinlichkeiten besteht darin, dass in der Formel die Quantendimension d des Systems auftaucht. Dimension bedeutet in dem Fall nicht Länge oder Breite, sondern die Anzahl der Zustände, die ein Quantensystem einnehmen kann. Zum Beispiel hat ein einzelnes Elektron, dessen Spin aufwärts oder abwärts weisen kann, die Dimension 2.

Wie Fuchs betont, ist die Quantendimension eine wesentliche, nicht weiter reduzierbare Eigenschaft, die den Quantencharakter eines Systems charakterisiert – so wie die Masse eines Objekts dessen Trägheit und Gewicht ausdrückt. Obgleich d in allen quantenmechanischen Rechnungen implizit enthalten ist, taucht es nun erstmals explizit in einer Grundgleichung auf. Mit dieser Fassung der bornschen Regel hofft Fuchs den Schlüssel zu einer neuen Deutung der Quantenmechanik zu besitzen. »Ich spiele mit der Idee«, gesteht er, »dass die bornsche Regel das bedeutsamste Axiom der gesamten Quantentheorie ist.«

Eine neue Wirklichkeit

Kritiker des QBismus wenden unter anderem ein, er sei unfähig, im Stil der herkömmlichen Quantenmechanik komplexe makroskopische Phänomene auf tiefer liegende mikroskopische Prozesse zurückzuführen. Dem kann der QBismus am besten begegnen, wenn es ihm gelingt, die Standardtheorie der Quantenmechanik aus neuen, zwingenden Grundannahmen herzuleiten.

Dieser entscheidende Erfolg steht zwar noch aus, doch schon jetzt bietet der QBismus eine neue Ansicht der physi-

kalischen Realität. Indem er die Wellenfunktion als persönlichen Überzeugungsgrad definiert, verleiht er Bohrs Aussage »Die Physik beschäftigt sich mit dem, was wir über die Natur sagen können« eine präzise, mathematische Bedeutung. Die Vertreter des QBismus stehen auf dem Standpunkt, dass das Ergebnis eines Experiments vor dessen Ausführung einfach nicht existiert.

Bevor jemand die Geschwindigkeit oder den Ort eines Elektrons misst, besitzt das Teilchen weder das eine noch das andere. Erst die Messung verhilft der gesuchten Eigenschaft zum Dasein. Mit den Worten von Fuchs: »Mit jeder vom freien Willen eines Experimentators bestimmten Messung wird die Welt ein klein wenig geformt; sie nimmt quasi an einem Geburtsmoment teil.« In dieser Weise tragen wir aktiv zur fortwährenden Erschaffung des Universums bei. ~

DER AUTOR



Hans Christian von Baeyer ist theoretischer Teilchenphysiker und emeritierter Professor am College of William and Mary, einer staatlichen Universität in Williamsburg (US-Bundesstaat Virginia). Er ist Mitglied der American Physical Society und hat sechs populärwissenschaftliche Bücher verfasst, für die er mehrfach ausgezeichnet wurde.

QUELLEN

- Fuchs, C. A.:** Interview with a Quantum Bayesian. <http://arxiv.org/abs/1207.2141>
- Fuchs, C. A.:** QBismus, the Perimeter of Quantum Bayesianism. <http://arxiv.org/abs/1003.5209>
- Mermin, N. D.:** Quantum Mechanics: Fixing the Shifty Split. In: Physics Today 6, S. 8, 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201696

Verräterische Tröpfchenmuster

Auf welchen Wegen fließt Luft an Fenstern entlang? Das lässt sich herausfinden, indem man die Tröpfchenmuster auf einer beschlagenen Scheibe analysiert.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Beschlagene Zimmerfenster haben wenig Überraschendes zu bieten – es sei denn, man schaut genauer hin. In bestimmten Fällen stellt man nämlich fest, dass sich die Tröpfchen meist nicht einfach gleichmäßig über die Scheibe verteilen, sondern einem bestimmten Muster folgen. Warum ist das so?

Die Lösung des Rätsels ist in den Luftströmungen entlang des Fensters zu suchen. Da sie sich aber nicht einfach fotografieren lassen, nähert man sich dem Problem erst einmal gedanklich. Die Ursache beschlagener Scheiben ist Luftfeuchtigkeit. Je nach Umgebungsbedingungen verdunstet oder kondensiert flüssiges Wasser ständig, der Wasserdampfdruck schwankt im gleichen Maß mit. Ihm entspricht eine bestimmte

Dichte des Wasserdampfs, die man als absolute Feuchte bezeichnet.

Gemessen wird allerdings meist etwas anderes: Hygrometer geben typischerweise die relative Feuchte an, also das Verhältnis der absoluten zur maximalen Feuchte. Maximale Feuchte herrscht dann, wenn genauso viel Wasser verdunstet wie kondensiert; der entsprechende Druck wird als Sättigungsdampfdruck bezeichnet. Die Temperatur spielt ebenfalls eine Rolle. Nimmt sie zu, wachsen auch Sättigungsdampfdruck und damit maximale Feuchte. Bei kochendem Wasser erreicht der Dampfdruck den Wert des Luftdrucks in der Umgebung. Dann ist keine weitere Steigerung mehr möglich.

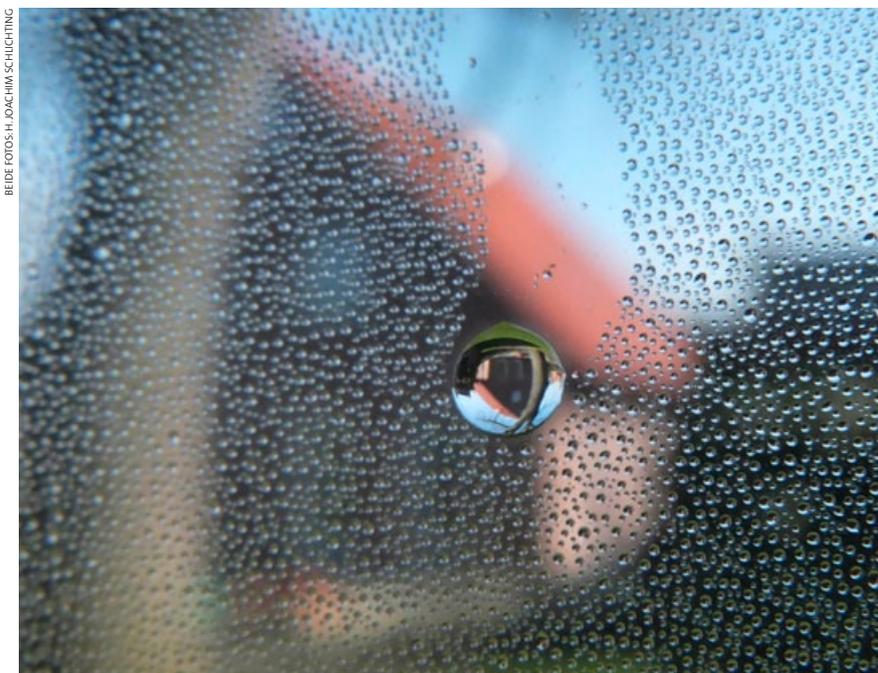
Was muss nun geschehen, damit in einem Haus die Scheiben beschlagen,

Unentwegt lösten sich Wassertropfen an der beschlagenen Fensterscheibe; wie langsam sich verzweigende Blitze leuchteten die klaren Farben des Wintertags in ihren Bahnen auf, ein zähes Durchdringen der Wirklichkeit.

*Thomas Lehr (*1957)*

wenn es innen geheizt und draußen kühl ist? Durch Atmen, Kochen und so weiter enthalten Innenräume typischerweise relativ viel Wasserdampf. Der fällt aber nicht ins Gewicht. Denn die maximale Feuchte wächst exponentiell mit der Temperatur. Entsprechend gering ist die relative Feuchte in geheizten Räumen.

Trotzdem beschlagen unter bestimmten Bedingungen die Scheiben. Denn in ihrer Nähe kühlen Luft und Wasserdampf so stark ab, dass die absolute Feuchte größer als die maximale werden kann, die relative Feuchte also den Wert von 100 Prozent überschreitet. Die Temperatur, bei der das passiert, nennt man Taupunkt. Dann kondensiert der überschüssige Wasserdampf und schlägt sich in Form kleiner Wasser-

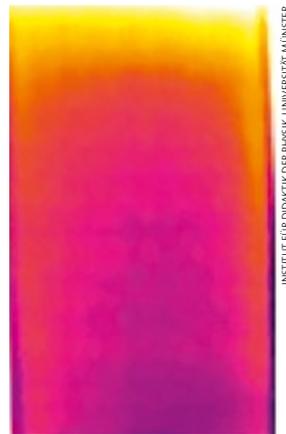
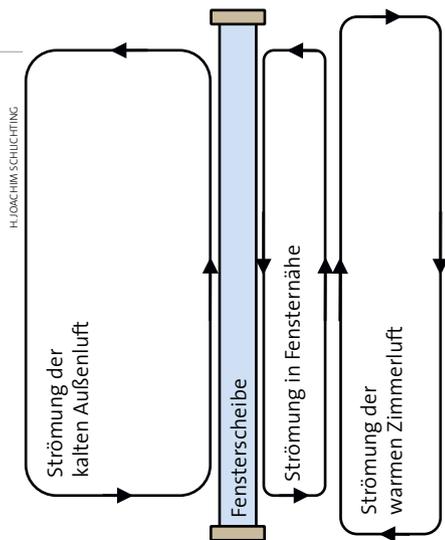


BILDE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING



Nach unten hin sind diese Scheiben stärker beschlagen, und auch entlang der Fensterkreuze ist es zu ausgeprägter Kondensation gekommen. Grund für die auffälligen Muster sind Luftströmungen.

Der Durchblick ist getrübt. Doch jeder einzelne Tropfen auf dieser beschlagenen Scheibe zeigt ein völlig ungetrübt, allerdings kopfstehendes Miniaturbild der Außenwelt.



Entlang der Innenseite einer Fensterscheibe strömt feuchte Luft entgegen der »globalen« Luftströmung im Zimmer (links). Das im Winter aufgenommene Infrarotbild (rechts) zeigt den Temperaturverlauf einer Scheibe. Höhere Temperaturen sind gelb, niedrigere violett dargestellt.

tröpfchen an Kondensationskeimen auf der Innenseite der Scheibe nieder.

Außen passiert in aller Regel nichts. Denn durch den Wärmeübertrag von innen liegt die Temperatur der Fens- teraußenseite stets höher als die übrige Außentemperatur. Selbst wenn in der Umgebung zu einem bestimmten Zeitpunkt der Taupunkt unterschritten wird – sich also zum Beispiel Tropfen an Grashalmen oder Nebel in der Luft bilden –, ist es dafür in Fensternähe zu warm.

Ein genauer Blick auf die Verteilung der Tröpfchen verrät noch einiges mehr (kleines Foto links). Zum einen beschlagen die Fenster eher unten als oben, zum anderen bevorzugen die Tröpfchen die Nähe der Sprossen. Wie kommt das?

Fließt warme Innenluft an einer kalten Scheibe vorbei, erwärmt sie diese und kühlt selbst dabei ab. Dadurch nehmen die Dichte der Luft und die des Wasserdampfes zu, beide werden also schwerer und sinken deshalb an der Scheibe entlang hinab. Nach unten zu gleichen sich die Temperaturen der sinkenden Luft und der Scheibe immer mehr an, denn die sich abkühlenden Gase übertragen allmählich immer weniger Wärme auf die Scheibe. Auf deren Außenseite ist es gerade umgekehrt. Hier gibt die Scheibe die von innen kommende Wärme an die Außenluft ab und lässt diese dadurch von unten nach oben aufsteigen. Die innere und die äußere Konvek-

tionsströmung laufen einander also entgegen. Gleichwohl haben sie denselben Effekt: Sie halten die Scheibe unten kalt und oben warm. Das kann man mit einer Infrarotkamera nachmessen (Foto oben) oder ganz einfach aus der Tröpfchenverteilung ablesen: In den oberen Fensterbereichen liegt die Temperatur oberhalb des Taupunkts, in den tiefer gelegenen aber darunter, weshalb dort auch das Wasser kondensiert.

Als Unterbrecher fungieren die waagerechten Streben des Fensterkreuzes. Weil die an der Fensterinnenseite nach unten gerichtete Strömung ihnen ausweicht, wird der Taupunkt in ihrer Nähe nicht überschritten. Dort, wo die Strömung wieder auf das Glas trifft, kann sie durch ihre Wärme die Kondensation gerade noch unterbinden. Ein weiteres Stück tiefer sind Luft und Wasserdampf aber bereits so weit abgekühlt, dass die Scheiben beschlagen bleiben.

Noch ein weiterer Effekt ist im Spiel. Weil das Fensterkreuz Wärmebrücken nach draußen bildet, sind die Temperaturen in seiner Nähe relativ niedrig und begünstigen die Kondensation. In den Fensterecken addieren sich die Effekte der waagerechten und der senkrechten Sprossen noch, so dass der Tröpfchenbelag nach unten hin immer breiter wird und rund ausläuft. Das abgebildete Fenster ist übrigens doppelt verglast, die Wärmebrücken fallen gegenüber

den gut isolierenden Scheiben also besonders stark ins Gewicht.

An dem Beschriebenen vermag nicht einmal die »globale« Zimmerströmung etwas zu verändern, zumindest bei den von mir untersuchten Fenstern. Luft und Wasserdampf steigen über der Heizung auf, die meist unter dem Fenster angebracht ist, und sinken am anderen Zimmerende wieder ab, ohne den schmalen Konvektionswirbel in der Nähe der Scheibe zu stören (Skizze links). Überprüfen lässt sich das mit einem einfachen Hilfsmittel. Geht man mit einer brennenden Kerze immer dichter an eine Fensterscheibe heran, beginnt sie in deren nächster Nähe plötzlich zu flackern und wird bald darauf nach unten gezogen. Man könnte auch sagen: Die absinkende kalte Luft fällt förmlich auf die Flamme und drückt sie nach unten.

Zu guter Letzt sei erwähnt, dass all dies nicht nur bei winterlichen Temperaturen geschieht. Zumindest bei einfach verglasten Fenstern kann schon ein Regenschauer ausreichen, damit sich innen Kondensationströpfchen bilden. Denn das kühle Wasser erhöht das Temperaturgefälle, verstärkt also die Wärmeleitung von der Innenseite zur Außenseite der Scheibe. Außerdem entziehen die Tropfen dem Glas Energie, sobald sie wieder verdunsten.

Und selbst Tropenreisende haben mit beschlagenen Scheiben zu kämpfen. Wollen sie das Problem auf altbewährte Weise lösen, nämlich durch Darüberwischen, werden sie allerdings überrascht sein. Denn in sehr warmen und feuchten Gefilden sitzen die Tropfen meist nicht innen auf der Scheibe, sondern außen. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1207571

Teilchenschleudern der Zukunft

Kaum liefert der Large Hadron Collider erste Ergebnisse, zerbrechen sich Physiker bereits den Kopf, welches Forschungsgerät den gigantischen Ringbeschleuniger demnächst ergänzen oder gar übertreffen könnte. Sie haben für dieses Ziel gleich mehrere Pfeile im Köcher.

Von Gerhard Samulat

Mit dem Nachweis des Higgs-Bosons hat der Large Hadron Collider (LHC) seinem Ruf als Entdeckungsmaschine alle Ehre gemacht. Nun soll die 27 Kilometer im Umfang messende Protonenschleuder am Forschungszentrum CERN in der Nähe von Genf weitere Geheimnisse der Materie enträtseln und Hinweise auf eine neue Physik liefern. Denn die Wissenschaftsgemeinde ist überzeugt: Das bislang überaus erfolgreiche Standardmodell der Teilchenphysik kann nicht der Weisheit letzter Schluss sein.

Für Präzisionsmessungen ist der LHC allerdings nur beschränkt geeignet. Das liegt an den Geschossen, die er nutzt: wahlweise Protonen oder Kerne von Bleiatomen. Bei beiden handelt es sich um zusammengesetzte Teilchen. Atomkerne bestehen aus Neutronen und Protonen, und auch einzelne Protonen offenbaren bei hohen Energien ihren inneren Aufbau aus drei Quarks, die über so genannte Gluonen fest miteinander verklebt sind. Die Klebeteilchen – die Quanten der starken Kernkraft – können ihrerseits aus dem Nichts heraus kurzlebige Quark-Antiquark-Paare bilden, die sofort wieder verschwinden. Daher gleicht das Proton einer klumpigen Suppe aus realen und virtuellen Teilchen und Antiteilchen sowie Gluonen. Wenn nun zwei dieser Suppenschüsseln heftig zusammenstoßen, kann niemand genau sagen, was passiert: Trifft ein Quark auf ein anderes Quark? Oder auf ein Gluon, das sich bei hohen Kollisionsenergien

AUF EINEN BLICK

LINEARE PARTIKELKANONEN

1 Experimentalphysiker konzipieren bereits **künftige Beschleunigergenerationen** – denn Planung, Konstruktion und Bau großer Forschungsgeräte dauern oft Jahrzehnte.

2 Die nächste gigantische Partikelschleuder wird höchstwahrscheinlich nicht ringförmig sein wie der Large Hadron Collider, sondern ein **Linearbeschleuniger**, in dem Teilchen geradeaus laufend auf höchste Energien gebracht werden.

3 Beispielsweise soll der geplante **International Linear Collider ILC** aus zwei gegeneinander gerichteten kilometerlangen Teilchenkanonen bestehen, die Elektronen und deren Antiteilchen – Positronen – zur Kollision bringen.

wie ein massives Teilchen verhält? Oder prallen zwei Gluonen aufeinander?

Da sich die Energie eines Protons auf all seine Bestandteile verteilt, setzt eine Kollision nur etwa ein Sechstel der maximal 14 Teraelektronenvolt (TeV) frei, für die der LHC derzeit aufgerüstet wird. Ein TeV entspricht der Energie eines einfach geladenen Teilchens, das eine elektrische Spannung von einer Billion (10^{12}) Volt durchlaufen hat. Den Löwenanteil der Kollisionsenergie nehmen die erzeugten Bruchstücke mit. Sie flitzen nach der Kollision durch die Nachweisgeräte und sorgen dort für viel Durcheinander. Die Experimentatoren sprechen lapidar von Untergrundereignissen, aus denen sie die gesuchten Vorgänge herausklauben müssen wie die berüchtigte Nadel im Heuhaufen. Die Suche ist besonders mühsam, weil die Kollisionspartikel der starken Kernkraft unterliegen, die sich nur näherungsweise mit aufwändigen Computersimulationen berechnen lässt.

Viel übersichtlicher verlaufen Begegnungen von Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen. Die beiden Partikel gehorchen der elektroschwachen Wechselwirkung und zerstrahlen durch Paarvernichtung vollständig. Aus der gesamten Masse und kinetischen Energie entsteht gemäß Ein-

DIE NEUE SERIE IM ÜBERBLICK

GROSSE FRAGEN DER PHYSIK

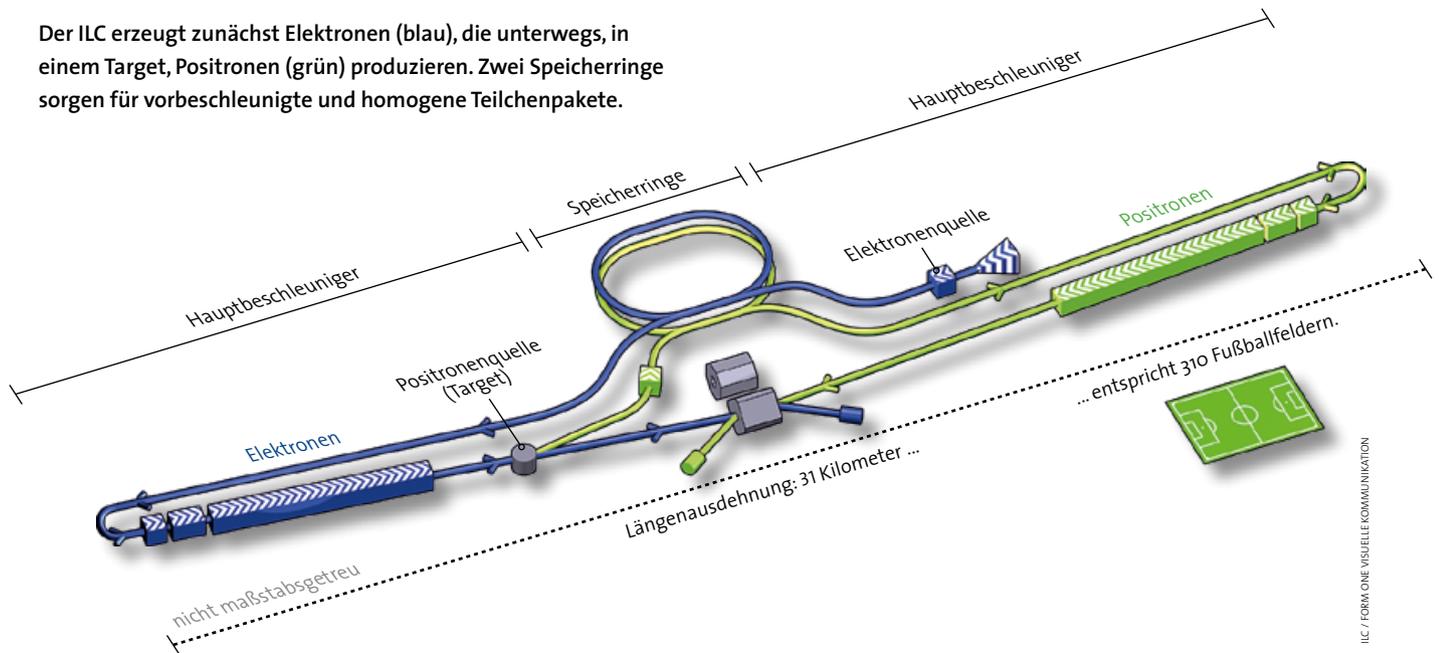
Teil 1	▶ Einstein im Quantentest <i>Domenico Giulini</i>	Oktober 2013
Teil 2	▶ Teilchenschleudern der Zukunft <i>Gerhard Samulat</i>	November 2013
Teil 3	▶ Das Innenleben der Quarks <i>Don Lincoln</i>	Dezember 2013



Im International Linear Collider (ILC) sollen künftig Elektronen und Positronen mit bislang unerreichter Energie gegeneinandergeschossen werden. Um die supraleitenden Beschleunigungseinheiten auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt zu kühlen, werden am Fermi National Accelerator Laboratory bei Chicago (US-Bundesstaat Illinois) groß dimensionierte Kühlgeräte entwickelt. Der offene Deckel gewährt einen Blick ins Innere eines solchen Kryostaten.

FERMI/AB VISUAL MEDIA SERVICES

Der ILC erzeugt zunächst Elektronen (blau), die unterwegs, in einem Target, Positronen (grün) produzieren. Zwei Speicherringe sorgen für vorbeschleunigte und homogene Teilchenpakete.



steins berühmter Formel $E = mc^2$ neue Materie. Solche Experimente sind daher verhältnismäßig leicht zu interpretieren. Damit würden sich offene Fragen zum Higgs-Boson viel einfacher klären lassen – beispielsweise, ob es elementar ist oder zusammengesetzt, und ob es eventuell unterschiedliche Arten davon gibt.

Dennoch handelt es sich um eine große Herausforderung. Die maximal mögliche Energie eines Protonenbeschleunigers wird nur durch die Gesamtstärke der Magnetfelder begrenzt, welche die Teilchen auf der Kreisbahn halten. Hingegen verlieren Elektron und Positron – im Vergleich zum Proton wahre Leichtgewichte – bei Geschwindigkeiten nahe der des Lichts in jeder Kurve gewaltig an Energie, und zwar in Form von Synchrotronstrahlung (siehe »Nanowelt im Röntgenlicht«, Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 86). Diese besteht aus elektromagnetischen Wellen, die vom Infrarot über das sichtbare Spektrum bis hin zur harten Röntgenstrahlung reichen. Das erhitzt den Beschleuniger insgesamt, und zusätzlich belastet die intensive Röntgenstrahlung einzelne Komponenten.

Um den Energieverlust auszugleichen, müssen die Physiker unentwegt Leistung nachliefern. Die Größenordnungen sind gewaltig. Weltmeister der Beschleunigung von Elektronen und Positronen war der Large Electron Positron Collider (LEP) am CERN, der bis Ende 2000 in dem Tunnel lief, den nun der LHC besetzt. Die Teilchen prallten mit Energien von über 200 GeV (Milliarden Elektronenvolt) aufeinander. Um den Strahlungsverlust auszugleichen, hielten supraleitende Radiofrequenz-Beschleunigungseinheiten mit zusammen fast 20 Megawatt Leistung die Teilchen auf Trab, die pro Umlauf – in rund einer zehntausendstel Sekunde – über drei Prozent ihrer Energie verloren. Dabei gilt: Je höher die Energie, desto größer der Verlust. Um die Elektronen im LEP auf 500 GeV zu beschleunigen, hätte man daher den Beschleuniger

auf einen kaum vorstellbaren Umfang von 200 Kilometern vergrößern müssen.

Aus diesem Grund werden künftige Elektron-Positron-Beschleuniger aller Voraussicht nach gerade verlaufen, das heißt Linearbeschleuniger sein. Damit geben die Konstrukteure jedoch einen wichtigen Vorteil kreisförmiger Teilchenschleudern auf: Die im Rund geführten, nahezu lichtschnellen Projektile tauchen – wenn sie sich nicht in einer Kollision vernichtet haben – nach jedem Umlauf wieder im Nachweisgerät auf. Mit einem Bündel von Teilchen können die Experimentatoren daher – je nach Umfang der Maschine – viele tausend Mal pro Sekunde Daten sammeln.

Baupläne für Teilchenkanonen

Zielen dagegen zwei Linearbeschleuniger aufeinander, dann geht das nur Schuss auf Schuss. Danach lassen sich die Projektile nicht mehr nutzen; ein neuer Beschleunigungsvorgang muss eingeleitet werden. Die Konsequenz: Die Trefferrate geht in den Keller, und die Experimentatoren müssen sich gedulden, bis sie die erhofften, sehr seltenen Ereignisse aus einer allmählich wachsenden Datenflut herausfischen können.

Um mit Linearbeschleunigern dennoch eine genügend hohe Trefferquote zu erreichen, nutzen die Konstrukteure supraleitende Beschleunigungsstrukturen, wie sie beispielsweise für den Röntgenlaser Flash am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg entwickelt wurden und demnächst im Europäischen Röntgenlaser XFEL zum Einsatz kommen werden.

Für zwei Typen von Linearbeschleunigern gibt es bereits durchdachte Konzepte. Die gewaltigen Maschinen sollen 30 bis 50 Kilometer lang sein. Ausschlaggebend dafür ist die Höhe der technisch erreichbaren Beschleunigungsspannung. Am weitesten gediehen sind die Pläne für den Internatio-

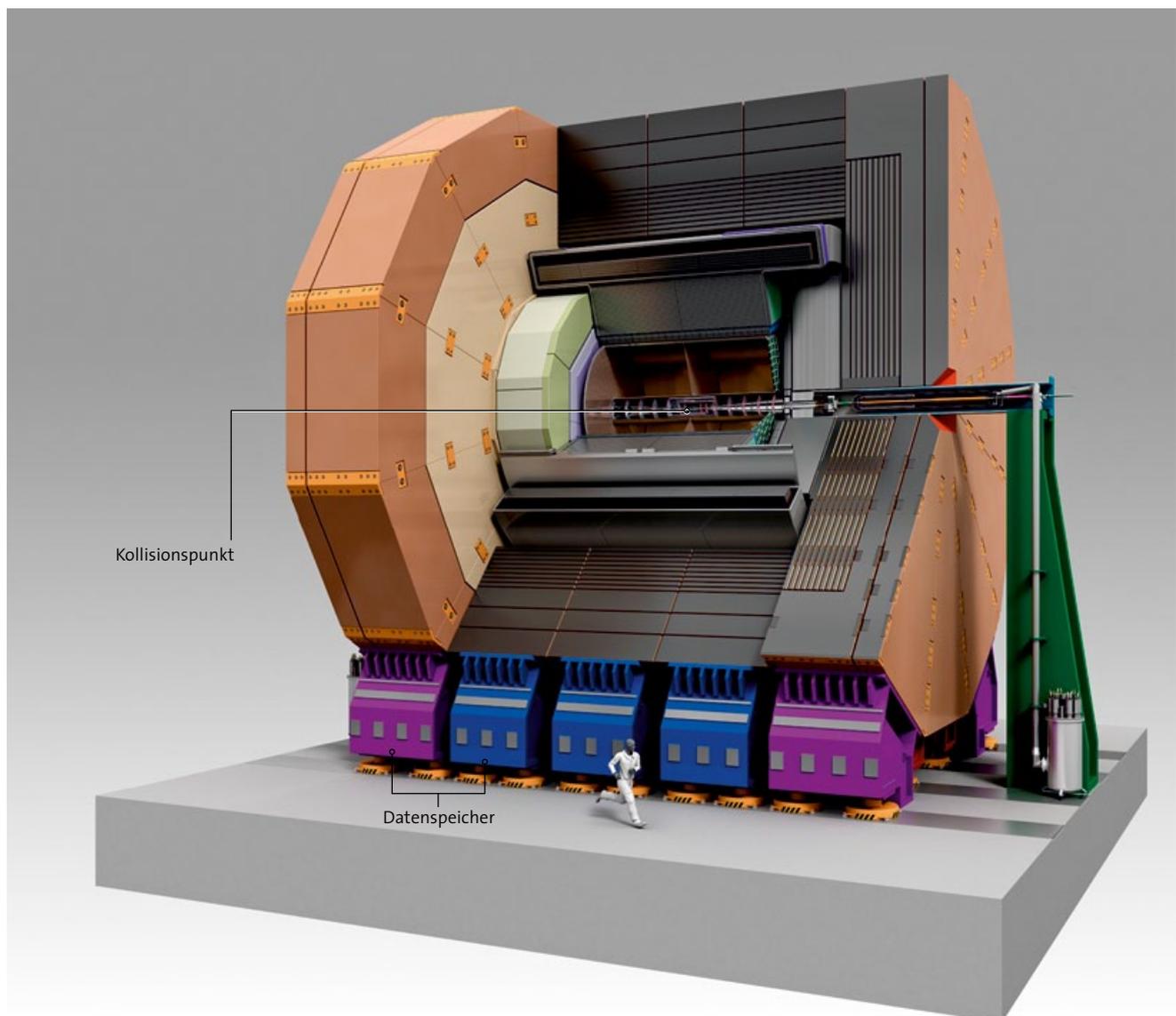
nenalen Linearbeschleuniger ILC, an dessen Entwurf seit mehr als 20 Jahren gearbeitet wird. »Die Technik ist nun ausgereift«, sagt Lyn Evans, der schon für den Bau des Large Hadron Colliders verantwortlich war und 2012 zum Chef der neu gegründeten Linear Collider Collaboration gewählt wurde: »Von uns aus könnte es jederzeit losgehen.«

Der ILC soll aus zwei aufeinander zielenden Linearbeschleunigern von insgesamt 31 Kilometern Länge bestehen. Über 16 000 Hochfrequenz-Hohlraumresonatoren aus dem seltenen Schwermetall Niob, das bei extrem tiefen Temperaturen supraleitend wird, sollen dort Elektronen und Positronen auf Trab bringen. Die Resonatoren erzeugen elektromagnetische Wellen einer Frequenz von 1,3 Gigahertz (Milliarden Schwingungen pro Sekunde), auf denen die zu beschleunigenden Teilchen reiten wie Surfer auf der Brandung.

Supraleitende Beschleunigungsstrukturen senken zwar den Energieaufwand, benötigen aber flüssiges Helium als Kühlmittel. Somit ist es im Inneren der leer gepumpten Ka-

vitäten bei 2 Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt) kälter als im Weltraum – und genauso luftleer. Gespeist werden die supraleitenden Hohlräume von gut 400 Hochfrequenzerzeugern, so genannten Klystrons. Für eine Anlage, die Teilchen auf 500 GeV beschleunigen soll, kalkulieren die Konstrukteure einen elektrischen Leistungsbedarf von 230 Megawatt. Prototypen solcher Resonatoren erreichen mittlerweile Beschleunigungsfelder von 35 Megavolt pro Meter. »Das haben unter anderem Experimente beim Freie-Elektronen-Laser Flash in Hamburg gezeigt«, sagt Joachim Mnich. Er ist Mitglied des International Committee for Future Accelerators (ICFA) und des DESY-Direktoriums (siehe Interview auf S. 60).

Zeitgleich mit dem ILC entwickeln internationale Teams zwei gewaltige Detektoren, die alternierend in den Kollisionspunkt geschoben werden können. Hier ist eine Computerstudie des International Large Detector (ILD) abgebildet.

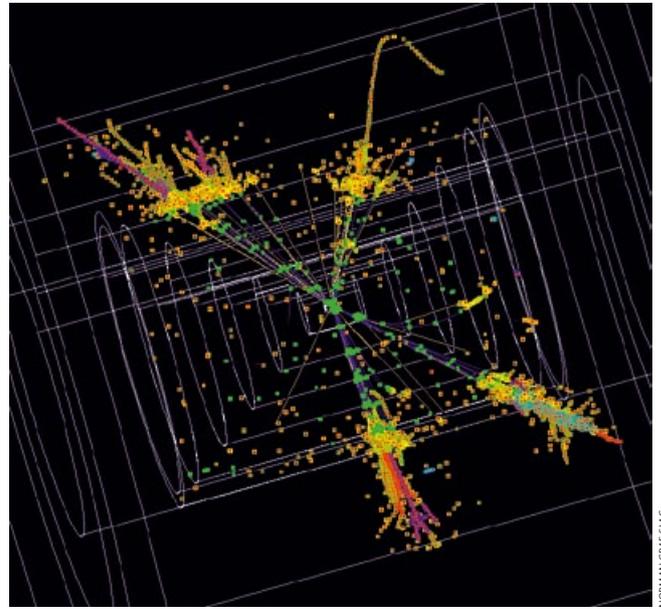


Um die Justierung des Strahls zu vereinfachen, werden die geladenen Teilchen zu kleinen Wolken – so genannten Bunchen, von englisch »bunch« für Bündel – zusammengefasst. Damit eine ausreichend hohe Kollisionsrate entsteht, müssen die Teilchenstrahlen extrem fein fokussiert werden: vertikal auf eine Höhe von bloß 70 Nanometern (Milliardstel Meter). Das geschieht mit starken Magnetlinsen vor dem Punkt, an dem sich die Strahlen kreuzen. Die Bunche aus Elektronen beziehungsweise Positronen sollen im ILC jeweils rund 20 Milliarden Teilchen enthalten und insgesamt etwa 14 000 Kollisionen pro Sekunde liefern.

Am ILC-Konzept arbeiten bereits gut 1000 Forscherinnen und Forscher aus aller Welt. Die Planungen sehen drei Etappen vor: Zunächst soll eine so genannte Higgs-Fabrik bei einer Kollisionsenergie von 250 GeV Präzisionsmessungen an dem neuen Teilchen durchführen. »Das ist ideal, um das bei rund 125 GeV am LHC entdeckte Boson genauer zu studieren«, sagt Mnich. In einer weiteren Ausbaustufe könnte der ILC mit 350 GeV Top-Antitop-Quarkpaare erzeugen. Damit ließe sich deren Masse zehnmal genauer bestimmen als heute. Das ist wichtig für Modelle der Supersymmetrie, die als Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik diskutiert werden. Die dritte Energiestufe des ILC liegt bei 500 GeV. Bei diesem Wert könnten Forscher Higgs-Paare erzeugen und deren Selbstkopplungen untersuchen. Die Planungen erlauben überdies eine Verlängerung des Beschleunigers auf insgesamt 50 Kilometer. Dann würde der ILC Kollisionsenergien von einem Teraelektronenvolt erreichen.

Das Konzept sieht darüber hinaus zwei Speicherringe mit einem Umfang von jeweils etwa drei Kilometern vor. Sie sorgen für eine gleichmäßige Energie- und Impulsverteilung der Elektronen und Positronen, bevor diese in die Linearbeschleuniger eingeschossen und auf ihre Endenergien beschleunigt werden. Die Teilchenpakete lassen sich dadurch besser bündeln, wodurch die Trefferrate steigt.

Zwei Nachweisgeräte sollen am ILC Daten sammeln: der International Large Detector (ILD) und der Silicon Detector (SiD). Beide werden bereits jetzt, zeitgleich mit dem Beschleuniger, von großen internationalen Teams geplant. »Der zeitliche Überlapp von ILC und LHC, dessen wissenschaftliches Programm bis 2030 läuft, ist relativ gering«, betont Mnich. Er hofft daher, dass die Diskussion über Standort und Finanzierung kurz ist. Derzeit scheint es auf einen Standort in der Nähe der japanischen Stadt Kitakami hinauszuläufen. Wenn man von einer Bauzeit von etwa zehn Jahren ausgeht, könnte der ILC gegen 2030 in Betrieb gehen.



Die Computersimulation zeigt eine mögliche Teilchenreaktion im ILC. Ein Z-Teilchen – das neutrale Austauscheteilchen der schwachen Kernkraft – und ein Higgs-Boson zerfallen in vier Partikeljets.

Die Kosten für die Linearbeschleuniger taxieren die Wissenschaftler auf fast acht Milliarden »ILC-Einheiten«, das heißt US-Dollars im Wert von Januar 2012. Hinzu kommen Löhne für geschätzte gut 23 Millionen Arbeitsstunden und Aufwendungen für Vorarbeiten auf dem noch zu findenden Gelände, für die Nachweisgeräte sowie für den Betrieb des Beschleunigers. Alles in allem gewiss kein billiges Unterfangen.

Am CERN macht es CLIC

Eine Alternative zum ILC entwickeln Wissenschaftler am CERN mit dem so genannten Treiberstrahlkonzept. Erste Pläne gab es bereits Ende der 1980er Jahre. Auch hier sollen Linearbeschleuniger Elektronen gegen Positronen schießen. Trotz des namengebenden Anspruchs, kompakt zu sein, soll der künftige Compact Linear Collider (CLIC) eine Länge von bis zu 50 Kilometern haben. Zunächst auf 3 TeV ausgelegt, soll er letztlich Energiebereiche bis zu 5 TeV erschließen. Als erste Ausbaustufe wäre aber auch eine kürzere Maschine mit 500 GeV Energie denkbar.

Der Grundgedanke des Treiberstrahlkonzepts: So genannte Power Extraction and Transfer Structures (PETS, Leistungsüberträger) übertragen die Dynamik eines niederenergetischen, aber intensiven Elektronenstrahls von etwa 100 Ampere Stromstärke auf einen zweiten Strahl, dessen Stromstärke 100-mal geringer ist. Dieser wird vom ersten Strahl sozusagen ins Schlepptau genommen und beschleunigt. Für das Verfahren hat sich der englische Begriff »two-beam-acceleration« (Zweistrahlsbeschleunigung) eingebürgert.

Zunächst bringen zwei rund 2,5 Kilometer lange Linearbeschleuniger mit jeweils rund 800 Klystrons die Elektronen des Treiberstrahls auf knapp 2,4 GeV. Zwei Kreisbeschleuni-



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier zum Thema
»Teilchenphysik« finden Sie unter
www.spektrum.de/teilchenphysik

ger sammeln die Elektronen, bevor die PETS sie auf 240 MeV abbremsen. Dieser Vorgang induziert leistungsstarke Hochfrequenzfelder, die über so genannte Wellenleiter – in der Regel Hohlprofile aus Metall – auf den rund einen halben Meter neben dem Treiberstrahl parallel laufenden Hauptbeschleuniger übertragen werden. Die Hochfrequenzfelder beschleunigen dann Elektronen und Positronen auf Energien von einigen Teraelektronenvolt. Testanlagen am CERN erreichen auf diese Weise bereits Beschleunigungsspannungen von 145 Megavolt pro Meter. Da supraleitende Elemente derart hohe Werte nicht schaffen, wird CLIC als »warme« Maschine konzipiert.

Um eine ähnlich leistungsstarke Maschine mit herkömmlichen Hohlraumresonatoren zu bauen, wären mindestens 35 000 Klystrons mit je 50 Megawatt Leistung nötig – zu unbezahlbaren Bau- und Stromkosten. Aber auch so lässt sich der immense Leistungsbedarf nicht lange aufrechterhalten. Nach Berechnung der Kollaboration frisst CLIC rund 9,2 Terawatt und muss darum gepulst arbeiten. Er soll pro Sekunde 50-mal anlaufen, wobei jeder Zyklus knapp 250 Nanosekunden dauert. In dieser Zeit wollen die Physiker jeweils 300 Teilchenpakete mit nur 0,5 Nanosekunden Abstand auf Trab

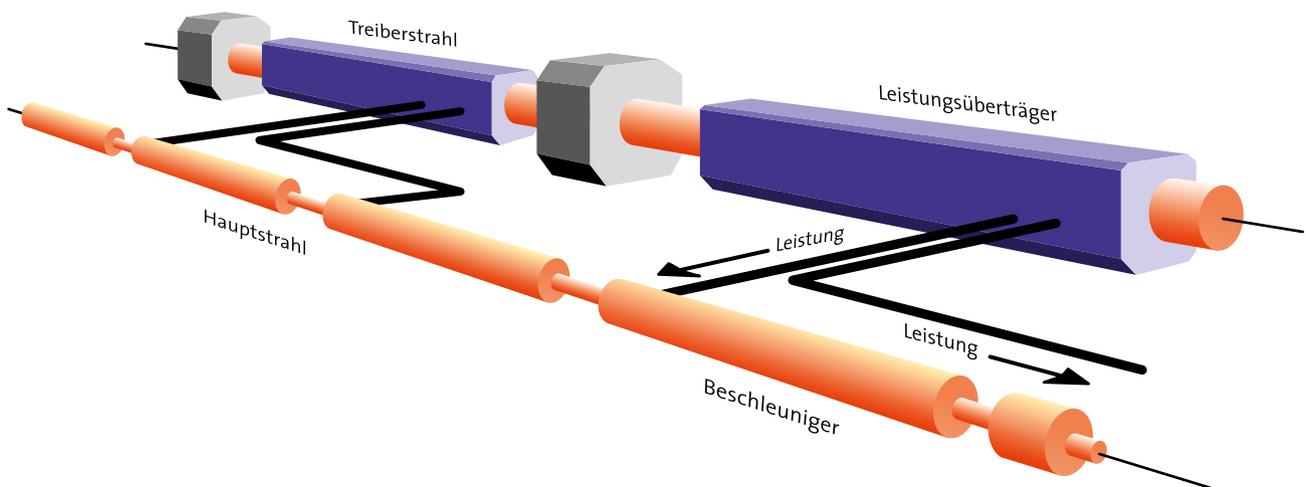
bringen – was wiederum die Hohlraumresonatoren aus dem Takt zu bringen und die Effizienz der Energieübertragung zu verringern droht. »Bis CLIC eine solche Reife hat wie der ILC, werden daher wohl noch 15 bis 20 Jahre ins Land gehen«, meint Joachim Mnich.

Die Trennung von Treiber- und Experimentierstrahl hat aber den Vorteil, dass sich beide Komponenten separat optimieren lassen. Zudem übertragen sich elektrische Instabilitäten, die bei einem Treiberstrahl so hoher Stromstärke zu erwarten sind, nicht auf den Hauptstrahl.

Um auf eine befriedigende Trefferrate zu kommen, dürfen die Strahlen am Wechselwirkungspunkt nicht höher und breiter als einige Nanometer sein. Diese Bedingung ist etwa 1000-mal anspruchsvoller als beim LHC. Da die Strahlen auf einige Nanometer genau justiert werden müssen, stören selbst die Vibrationen des Erdbodens gewaltig. Studien am japanischen Beschleunigerzentrum KEK zeigten jedoch, dass sich eine Folge von Teilchenpaketen rasch nachjustieren lässt. Steuerelektronik und Magnetführung reagieren flink genug, um nach Durchgang der ersten Teilchenpakete den nachfolgenden Strahl auf 30 bis 50 Nanometer genau auszurichten. Dennoch ist noch viel Feinarbeit nötig.



Der Lageplan führt die Ausmaße des bei CERN geplanten Compact Linear Collider (CLIC; rote und blaue Linie) vor Augen; sie übertreffen die des bislang größten Beschleunigers LHC (weißer Kreis) bei Weitem. Der CLIC arbeitet nach dem Treiberstrahlkonzept: Ein intensiver Elektronenstrahl überträgt hochfrequente Schwingungen auf den parallel laufenden Hauptstrahl (unten). Die gepunktete Linie markiert die schweizerisch-französische Grenze.



»Da muss noch mehr sein!«

Joachim Mnich erwartet wichtige Entdeckungen durch zukünftige Beschleunigergenerationen. Er ist Mitglied des International Committee for Future Accelerators (ICFA) und Direktoriumsmitglied des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY in Hamburg.

Spektrum der Wissenschaft: Nun, da das Higgs-Teilchen offensichtlich gefunden ist: Wofür brauchen wir noch neue Beschleuniger?

MNICH: Vorsicht! Noch wissen wir nicht, ob es sich bei dem im Large Hadron Collider (LHC) gefundenen Teilchen um dasjenige Higgs-Boson handelt, welches das Standardmodell vervollständigt, oder ob es nur eines von mehreren ist, wie sie die Supersymmetrie vorhersagt. Um das herauszufinden, müssen wir die Eigenschaften dieses Teilchens genauer studieren. Das jetzt gefundene Higgs hat uns immerhin den Gefallen getan, eine Masse zu haben, bei der wir viele verschiedene Zerfallskanäle studieren können. Leider ist die Interpretation der Daten außerordentlich schwierig. Zudem kann der LHC nicht alle Zerfallskanäle exakt vermessen. Der Fund ist jedoch eine starke Motivation für eine Anlage, die wir als Higgs-Fabrik bezeichnen. Das wird voraussichtlich ein Linearbeschleuniger sein, der Elektronen und Positronen aufeinanderschießt. Damit ließen sich Präzisionsmessungen durchführen.

Aber wenn sich herausstellen sollte, dass Sie tatsächlich das Standardmodell-Higgs gefunden haben, was wollen Sie dann noch erforschen?

MNICH: Mit der Entdeckung eines Higgs haben wir jetzt zwar einen Riesenschritt gemacht. Wir sind auf der richtigen Spur; aber noch lange nicht am Ziel. Denn das Higgs erklärt zwar, warum Teilchen eine Masse haben, aber nicht, weswegen es so unterschiedlich an die jeweiligen Elementarteilchen koppelt: Warum ist das Elektron so viel leichter als das Top-Quark? Das ist noch vollkommen unverstanden. Wir ersetzen jetzt lediglich eine Konstante – die Masse eines Teilchens – durch eine andere – dessen Kopplung ans Higgs –, ohne eine tiefere Erklärung dafür zu haben. Außerdem beschreibt das Standardmodell nur etwa fünf Prozent des Energieinhalts des Universums. 95 Prozent blendet es aus. Wir Physiker glauben daher fest daran, dass da noch mehr sein muss! Was genau, dazu gibt es sehr viele Theorien. Deswegen müssen wir weiter experimentieren – sowohl am LHC als auch an neuen Geräten.

Aber müssen das derart große Anlagen sein? Man liest doch immer öfter von so genannten Table-Top-Beschleunigern, die auf Labortischen Platz finden. Lohnt es sich überhaupt noch, so gewaltige Schleudern zu planen?

MNICH: Für die Teilchenphysik gibt es bislang noch keinen geeigneten Table-Top-Beschleuniger. Neue Ideen kommen allerdings von so genannten Plasma-Wakefield-Beschleunigern. Hier am DESY haben wir beispielsweise in Simulationen gezeigt, dass Elektronen in einem Plasma auf einer Länge von wenigen Zentimetern mehrere GeV (Gigaelektronenvolt, Milliarden Elektronenvolt) erreichen können. Wir hoffen, das bald durch Experimente zu bestätigen. Das würde reichen, um künftig einmal Freie-Elektronen-Laser oder Röntgenlaser wie Flash hier am DESY oder den European XFEL zu betreiben. Durch Plasmabeschleuniger könnten diese Maschinen deutlich kompakter gebaut werden. Aber bis sie einen präzisen Strahl liefern, dürften noch einige Jahre vergehen.

Teilchenphysiker sind besonders anspruchsvoll. Für ihre Experimente benötigen sie Teilchen, die eine eindeutig definierte Energie besitzen und möglichst eng gebündelt bleiben. Um Energien von einigen TeV (Teraelektronenvolt, Billionen Elektronenvolt) zu erreichen, muss man mehrere dieser Beschleunigungseinheiten hintereinandersetzen, ohne dass die Teilchen ihre Eigenschaften verlieren. Das ist bis heute noch niemandem gelungen und erfordert wohl noch viele Jahre konzentrierter Entwicklungsarbeit.

Dennoch sind Plasmabeschleuniger eine sehr positive Entwicklung. Schließlich müssen wir nicht nur an die Technologien von morgen denken, sondern auch an die von übermorgen. Plasmabeschleuniger lassen zumindest die Chance erkennen, einmal zu Energien vorzudringen, die uns deutliche Hinweise auf eine neue Physik liefern. Ich habe die Hoffnung, dass spätestens unsere Enkel vielleicht einmal mit Plasmabeschleunigern Experimente durchführen können.

Zukunftsmusik dürften wohl auch die so genannten Myonenbeschleuniger sein. Wenngleich die Idee besticht: Myonen sind ja rund 200-mal schwerer als Elektronen oder Positronen und verlören in Speicherringen drastisch weniger Energie durch Synchrotronstrahlung. Damit ließen sich sehr kompakte Kreisbeschleuniger bauen. Wann wird es die ersten Myonenschleudern geben?



Joachim Mnich ist Direktor für den Bereich Teilchen- und Astroteilchenphysik beim Deutschen Elektronensynchrotron DESY in Hamburg.

MNICH: Ich vermute, zwischen dem Plasma- und dem Myonenbeschleuniger ist das Rennen offen. Die Idee ist in der Tat verführerisch. Deswegen arbeitet unter anderem das Fermilab in den Vereinigten Staaten ernsthaft an entsprechenden Konzepten. Doch die Sache ist haarig: Myonen zerfallen nach 2,2 Mikrosekunden in Elektronen oder Positronen sowie Neutrinos. Zwar hilft uns Albert Einsteins Relativitätstheorie ein wenig, die ja besagt, dass nahezu lichtschnelle Teilchen deutlich länger leben. Dennoch schaffen die Myonen kaum 1000 Runden in einem mäßig großen Kreisbeschleuniger, während die Elektronen den Large-Electron-Positron-Collider LEP am CERN rund 11 000-mal je Sekunde umrundeten, und das viele Stunden lang.

Darüber hinaus ist das »Kühlen« der Myonen ein fundamentales Problem: Wenn Sie Myonen erzeugen, indem Sie Protonen auf ein Metall schießen – was allein schon wegen der hohen Intensität, die Sie benötigen, eine Herausforderung ist –, dann haben die Teilchen alle möglichen Energien sowie Flugrichtungen und sausen wild durcheinander. Daraus müssen Sie einen verwertbaren Teilchenstrahl machen, den Sie bündeln und beschleunigen können, damit Sie nachher in den Nachweisgeräten eine anständige Treffer rate erhalten. Da ist noch viel Entwicklungsarbeit nötig. Hinzu kommt die Strahlenbelastung durch die Neutrinos, die beim Zerfall der Myonen entstehen.

Strahlenbelastung durch Neutrinos? Pro Sekunde schießen doch ohnedies gut 60 Milliarden kosmische Neutrinos durch jeden Quadratzentimeter der Erdoberfläche. Von denen bekommen wir gar nichts mit.

MNICH: Ja, aber der Wirkungsquerschnitt der Neutrinos – ihre Reaktionsfreudigkeit sozusagen – steigt drastisch mit ihrer Energie. Bei einigen Teraelektronenvolt ist die schwache Wechselwirkung ebenso stark wie die elektromagnetische.

Ist die Energie der Neutrinos aus den Beschleunigern höher als die aus der kosmischen Strahlung?

MNICH: Natürlich gibt es in der kosmischen Strahlung Neutrinos, die noch sehr viel höhere Energien haben – aber das sind stets nur sehr, sehr wenige. Deswegen müssen Sie ja empfindliche Neutrinodetektoren wie den IceCube über einen Kilometer tief im Eis des Südpols vergraben und so vo-

luminös machen. Doch für Kollisionsexperimente mit Myonen brauchen Sie einen hoch intensiven Teilchenstrahl, und der erzeugt eben pro Myon zwei hochenergetische Neutrinos. Das führt zu einer deutlich höheren Belastung als durch die kosmische Strahlung. Neutrinos können Sie zudem kaum abschirmen. Es gibt daher Leute, die sagen, dass man einen Myon-Collider am besten auf der Rückseite des Mondes bauen sollte.

Lassen Sie uns auf der Erde bleiben: Wohin geht die Reise in den nächsten 20 bis 50 Jahren?

MNICH: 50 Jahre sind schwer überschaubar. Immerhin sehen wir durch die Entdeckung eines Higgs schon viel klarer. Sie rechtfertigt meines Erachtens einen Linearbeschleuniger wie den ILC. Das ist Technik, die wir beherrschen. Was darüber hinausgeht, ist heute schwer zu sagen. Auch dürfen wir nicht vergessen, dass wir mit dem LHC gerade erst am Anfang stehen. Er lief bisher nur mit halber Energie und lieferte erst etwa ein Prozent der angepeilten Anzahl an Kollisionen. Ein weiteres sinnvolles Projekt wäre daher, mit Proton-Proton-Kollisionen zu höheren Energien vorzudringen. Deswegen gibt es am CERN Ideen, einen Kreistunnel mit 80 Kilometern Umfang zu bauen. Mit neuen, starken Magneten könnte man damit vielleicht 100 TeV erreichen. Aber ob das der richtige Weg ist, lässt sich erst in fünf Jahren beantworten, wenn die ersten belastbaren Ergebnisse vom LHC bei 14 TeV Energie vorliegen.

Wir erwarten uns vom LHC noch einige Überraschungen. Beispielsweise haben wir noch keine Anzeichen für Supersymmetrie gesehen. Einige Theorien können wir schon ausschließen, und für andere wird die Luft langsam dünn. Vielleicht hilft die Auswertung der Datenflut, die der LHC bislang geliefert hat, neue Ideen zu entwickeln.

Was wir ebenfalls noch nicht gefunden haben, sind Hinweise auf die Dunkle Materie. Da müssen wir uns voraussichtlich noch etwas gedulden und schauen, was uns der Lauf bei 14 TeV bringt. Ich bin mir aber sicher, dass der LHC, wenn er 2015 wieder anläuft, noch einiges zu bieten hat. Und was zukünftige Beschleuniger angeht, haben wir jede Menge Pfeile im Köcher. ~

Die Fragen stellte **Gerhard Samulat**.

Auch das Erzeugen des Treiberstrahls ist eine Herausforderung. Die fast lichtschnellen geladenen Teilchen induzieren elektromagnetische Felder in den Wänden des Vakuumrohrs und der Hohlraumresonatoren. Diese Streufelder wirken auf den Strahl zurück und können ihn unbrauchbar machen. Zudem machen die starken Beschleunigungsfelder Probleme. An den Innenflächen dürfen keine Entladungen auftreten. Schon der kleinste Funke hätte fatale Folgen: Er würde die Beschleunigungseinheit ruinieren. Darum müssen die Wandungen extrem glatt sein.

Für den CLIC sind zwei Nachweisgeräte vorgesehen, die sich den Kollisionspunkt teilen. Die entsprechenden Entwicklergruppen arbeiten eng mit denen der ILC-Detektorentwicklung zusammen. Mittlerweile hat sich das Projekt zu einem internationalen Unterfangen gemausert, an dem über 20 Nationen beteiligt sind. Erste Kostenschätzungen liegen derzeit bei etwa acht Milliarden Euro für die 300-GeV-Version des CLIC.

Die Kraft des Plasmas

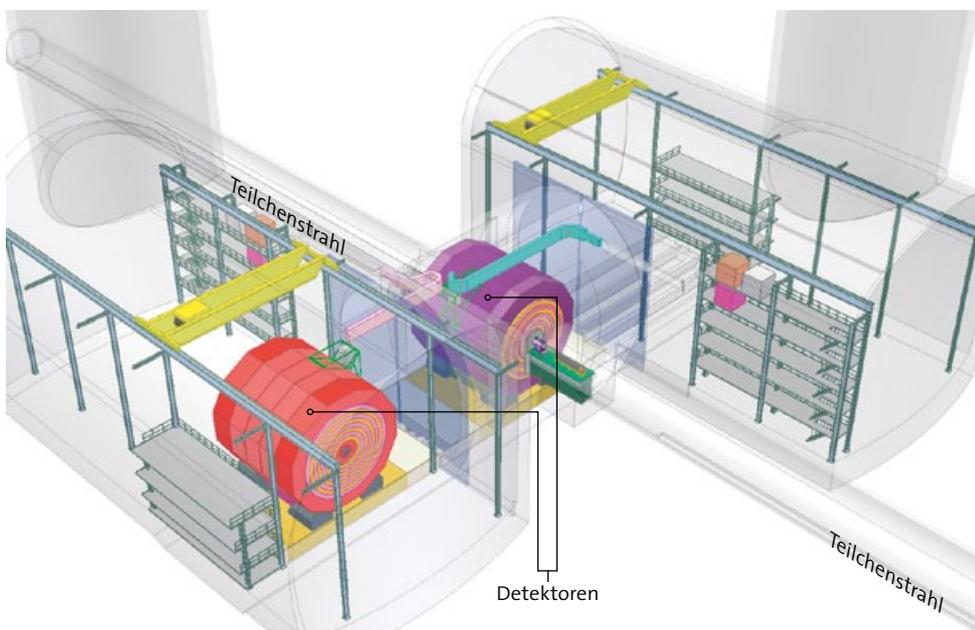
Auf dem so genannten Wakefieldprinzip beruhen die Plasmabeschleuniger. »Mit starken Lasern oder hochenergetischen Teilchen regen wir in einer Wolke aus Wasserstoffionen und Elektronen Dichtewellen an«, erläutert Jens Osterhoff, Leiter der Nachwuchsgruppe für Plasmabeschleunigung am DESY in Hamburg. Dabei entstehen im Plasma elektrische Feldunterschiede von mehr als 100 Gigavolt pro Meter, in deren Kielwasser (Wakefield) Elektronen rasch an Energie gewinnen. »Dadurch lassen sich Teilchen innerhalb von wenigen Zentimetern auf einige GeV beschleunigen«, sagt Osterhoff – zumindest theoretisch. Sein persönlicher Rekord liegt derzeit bei immerhin 800 MeV.

Solche Werte würden schon reichen, meint Osterhoff, um damit Vorbeschleuniger für die erwähnten Röntgenlaser

Flash oder European XFEL in Hamburg zu betreiben; die würden dadurch deutlich kompakter. Derzeit benötigt Flash eine Beschleunigungsstrecke von über 80 Metern, um Elektronen auf eine Energie von 1,25 GeV zu bringen. »So viel Energie schafft das hier auch«, sagt Osterhoff und zeigt ein drei Zentimeter langes Stück aus transparentem Saphir, in das winzige Kanäle eingebracht wurden. Allerdings ist die Qualität des aus dem Plasma herausschießenden Strahls noch unzureichend, schränkt der Physiker ein – unter anderem wegen der mangelnden Güte des Plasmas, die sich nur extrem schwer kontrollieren lässt.

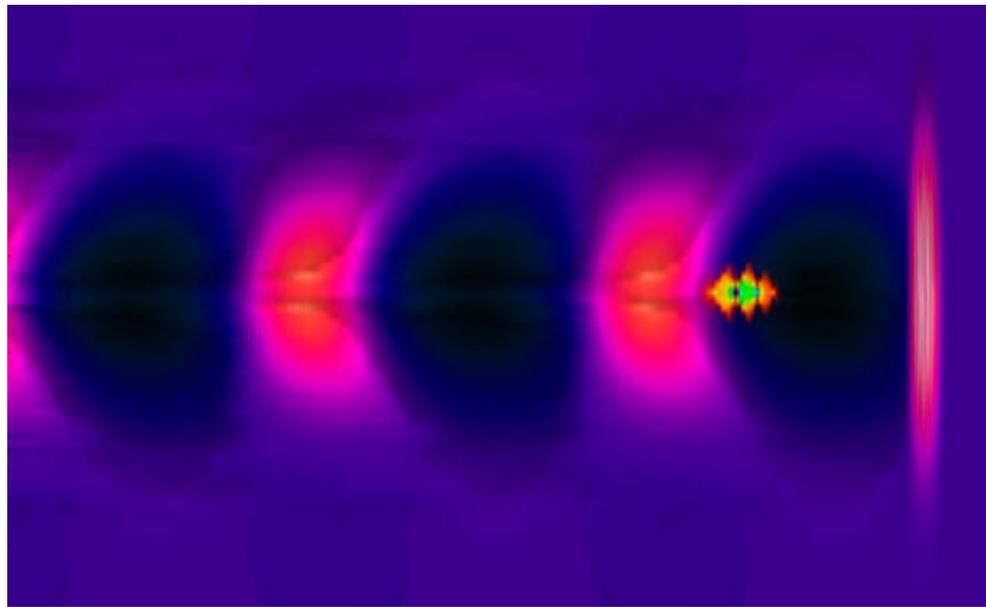
Ein heikles Problem ist das Timing: Die zu beschleunigenden Teilchen müssen sofort nach Anregung des Plasmas auf Femtosekunden (10^{-15} Sekunden) genau eingeschossen werden. Außerdem lassen sich die Beschleunigungseinheiten nicht einfach beliebig hintereinanderschalten wie herkömmliche Resonatoren, denn zwischen den Plasmaeinheiten müssen Spiegel immer wieder neue Laserimpulse einkoppeln. Einen Dauerbeschuss mit hochenergetischen Elektronen und den dafür nötigen Höchstleistungslasern hielte kein Material lange aus. Bis die Plasmabeschleuniger den Kinderschuhen entwachsen sind, gibt es also noch viel zu tun.

Muss es überhaupt ein Linearbeschleuniger sein? Nicht unbedingt – es gibt tatsächlich auch Konzepte für kompakte Kreisbeschleuniger, die bis in den TeV-Bereich vordringen könnten. Um das Problem der Energie fressenden Synchrotronstrahlung zu umgehen, schlug der sowjetische Physiker Gersch Izkowitsch Budker (1918–1977) schon 1969 einen Speicherring für Myonen vor. Die schweren Verwandten der Elektronen haben über 200-mal mehr Masse und verlieren daher auf Kreisbahnen um gut zehn Größenordnungen weniger Strahlungsenergie. Myonen lassen sich zudem relativ einfach mittels hochenergetischer Protonen erzeugen, die auf ein Ziel aus flüssigem Quecksilber geschossen werden



Die beiden Detektoren für den bei CERN geplanten Compact Linear Collider CLIC sollen – wie bei ILC – abwechselnd auf Schienen in den Kollisionsbereich gerollt und dort exakt justiert werden.

In der aufwändigen Computersimulation eines bei DESY konzipierten Plasmabeschleunigers erscheinen die durch einen Laser angeregten Plasmawellen abwechselnd rot, blau und schwarz. Ein winziges in das schwingende Plasma injiziertes Elektronenbündel (grün) wird im »Kielwasser« (wakefield) der Plasmawellen eingefangen und mitgerissen; es erreicht über kurze Distanzen hohe Beschleunigungswerte.



und dort Paare von Myonen und Antimyonen produzieren. Entsprechende Versuche finden derzeit in den Vereinigten Staaten am Fermi National Accelerator Laboratory bei Chicago (Illinois) statt, in Großbritannien am Rutherford Appleton Laboratory sowie am CERN.

Um experimentell brauchbare Myonenpakete zu erhalten, müssen die Physiker die Energien und Impulse der einzelnen Teilchen angleichen. Das bewerkstelligen normalerweise spezielle, dem Hauptbeschleuniger vorgeschaltete Speicherringe, in denen die Teilchen gezielt Synchrotronstrahlung abgeben – die schnellen mehr, die langsameren weniger. Da Myonen aber überhaupt nur sehr wenig abstrahlen, dauert dieser Vorgang entsprechend lange. Als aufwändige Alternative kommen enorm starke Magnete sowie Absorber aus flüchtigem Wasserstoff in Frage.

Viel Zeit haben die Experimentatoren dafür nicht, denn die Myonen sind instabil. Innerhalb von gut zwei Mikrosekunden zerfallen sie in Elektronen und Neutrinos. Letztere reagieren zwar nur äußerst schwach mit Materie, doch große Mengen hochenergetischer Neutrinos beeinflussen dennoch ihre Umgebung. Wegen der unzähligen Myonen, welche die Physiker für aussagekräftige Versuche benötigen, würden neben den drei bekannten radioaktiven Strahlensorten α , β und γ – für Heliumkerne, Elektronen und Photonen – Neutrinos zur vierten Gefahr. Die erwartete Strahlenbelastung wäre so hoch, dass die Physiker Myonenbeschleuniger – falls es sie jemals geben wird – tief unter der Erde vergraben müssten.

Solche Apparate würden dafür deutlich präzisere Ergebnisse liefern. Das ist der große Vorteil der geringen Synchrotronstrahlung von Myonen. Bei Elektronen und Positronen ist sie selbst am Wechselwirkungspunkt noch so stark, dass sich die Teilchenbündel dort gegenseitig stören – was die Trefferrate beeinträchtigt. Noch ist all das Zukunftsmusik. Nach Expertenmeinung wird man erst nach mindestens zehn Jahren Forschung und Entwicklung abschätzen

können, ob sich Myonenbeschleuniger überhaupt realisieren lassen. Bis die neuen Konzepte greifen, wird darum der Large Hadron Collider allein die gesamte Experimentierarbeit leisten. ~

DER AUTOR



Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und arbeitet als Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

QUELLEN

DESY Inform: ILC veröffentlicht Technical Design Report. Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation ist baureif.

www.desy.de/aktuelles/@@news-view?id=5501&lang=ger

Shiltsev, V.: When will we know a Muon Collider is Feasible? Status and Directions of Muon Accelerator R&D.

arxiv.org/pdf/1003.3051

LITERATURTIPP

Samulat, G.: Ring der Erkenntnis. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 80–87

Detaillierte Vorstellung des LHC in der Planungsphase

WEBLINKS

Compact Linear Collider (CLIC): <http://clic-study.org/>

DESY-Gruppe für Plasmabeschleunigung: <http://plasma.desy.de/>

International Linear Collider (ILC): www.linearcollider.org/

Die Webseiten zu den verschiedenen Projekten bieten umfangreiche weiterführende Informationen.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/1207574

SPIELE

Sudoku für Feinschmecker

KenKen ist ein japanisches Zahlenspiel, das auf den ersten Blick an die bekannten Sudoku-Rätsel erinnert, aber ungleich raffinierter ist.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Das Spiel kommt aus Japan zu uns; in die Felder eines quadratischen Schemas sind die Zahlen von 1 bis (zum Beispiel) 9 derart einzusetzen, dass in jeder Zeile und jeder Spalte jede Zahl genau einmal vorkommt ...

Na klar, das muss doch Sudoku sein? Falsch. Das Spielfeld ist nicht in die bekannten 3·3-Kästchen eingeteilt. Vielmehr bringt jedes Exemplar des Spiels seine eigene Einteilung mit. Ein Kästchen umfasst mehrere aneinandergrenzende Felder und enthält eine Aufgabe – genauer gesagt das Ergebnis einer Rechenaufgabe, die der Spieler erst noch zu finden hat. Zum Beispiel bedeutet »8+«, dass in die Felder des Kästchens Zahlen zu schreiben sind, die zusammenaddiert 8 ergeben. Die beiden Zahlen in einem Zweierkästchen namens »2-« müssen sich um 2 unterscheiden; auf die Reihenfolge kommt es nicht an. Zusätzlich darf wie beim Sudoku in keiner Zeile oder Spalte eine Zahl doppelt vorkommen.

Es geht nun darum, nur mit diesen Vorgaben allein durch logisches Denken die Zahlen in sämtlichen Feldern zu bestimmen. Das ist in einfach gebauten Spielen (Bild rechts oben) nicht allzu knifflig. Je größer allerdings das Quadrat, desto mehr Möglichkeiten muss man in Betracht ziehen; entsprechend steigt auch der Schwierigkeitsgrad.

Ein japanischer Mathematiklehrer namens Tetsuya Miyamoto hat 2004 das Spiel erfunden, um seinen Schülern das elementare Kopfrechnen schmackhaft zu machen. »Ken« ist das japanische Wort für »Weisheit«; der Name des Spiels »KenKen« ist also als »Weisheit

im Quadrat« zu verstehen. In der Tat hat ein KenKen-Spieler reichlich Gelegenheit, das Addieren kleiner Zahlen und das kleine Einmaleins zu üben. Es hilft auch, wenn man für die Faktorenzersetzung $252 = 7 \cdot 36 = 4 \cdot 7 \cdot 9$ nicht lange nachdenken muss.

Ein Sudoku ist wie die kleine Portion Kartoffelchips zwischendurch: Es geht ziemlich schnell, auf das Ambiente kommt es nicht besonders an, man kann es halb fertig liegen lassen und später wieder aufgreifen, und es schmeckt eigentlich immer ungefähr gleich, will sagen: Es genügt, ein relativ kleines Sortiment logischer Schlussverfahren immer wieder anzuwenden. Dagegen ist ein KenKen, vor allem ein großes, so etwas wie ein Feinschmeckermenü: Es dauert eine ganze Weile; um es richtig zu genießen, widmet man ihm zweckmäßig seine ganze Konzentration; und es ist überaus abwechslungsreich. Immer nötigt mich ein KenKen, für die Belegung eines Felds eine völlig neue Argumentationsform auszuarbeiten und anzuwenden.

Freundliche und unfreundliche Kästchen

Wie löst man ein KenKen? Das Bananensenverfahren namens »erschöpfende Suche« funktioniert natürlich immer: Man probiere systematisch alle Belegungen der Felder mit Zahlen durch. Dabei muss man nicht immer alle Felder probeweise vollschreiben, sondern immer nur, bis der erste Widerspruch auftaucht, das heißt die Zahlen in einem Kästchen die Rechenaufgabe nicht lösen oder zwei gleiche Zahlen in einer

2:	30x			4-
	8+			
9+	1-		5+	9+
	3+			
	2	15x		

MIT FELDERN VON WWW.KENKEN.COM

Ein leichtes KenKen der Größe 5·5. Wenn Sie beachten, dass in ein Kästchen namens »3+« nur die Zahlen 1 und 2 passen, dass die Differenz »4-« nur mit 1 und 5 zu realisieren ist und dass »30x« den Faktor 5 enthalten muss, haben Sie schon fast die Lösung (siehe übernächste Seite).

Zeile oder Spalte nicht zu vermeiden sind. Dann widerruft man die letzte gesetzte Zahl, ersetzt sie durch die nächste, und so weiter. Selbst mit dieser oder jener naheliegenden Verfeinerung wird kein Mensch sich selbst so eine stupide Prozedur antun – allenfalls seinem Computer. Vielmehr besteht die Kunst darin, Felder ausfindig zu machen, die nur eine oder sehr wenige Besetzungsmöglichkeiten zulassen.

Nennen wir ein Kästchen »freundlich« oder »entgegenkommend«, wenn es nur wenige Möglichkeiten gibt, es zu füllen, und »unfreundlich« im anderen Fall. Der Löser tut gut daran, mit den freundlichsten Kästchen anzufangen und sich allmählich zu den weniger freundlichen vorzuarbeiten.

Die freundlichsten überhaupt sind die »Freebies«; sie bestehen aus nur einem Feld mit einer Zahl darin. Unter den aus zwei Feldern bestehenden Kästchen ist das unfreundlichste 1-, denn es lässt das Maximum an Möglichkeiten offen. Bei drei oder mehr Feldern wächst die Zahl der Kombinationen rapide an. Denken Sie lieber nicht darüber nach, mit welchen Summen Sie ein Dreierkästchen namens »13+« füllen könnten! Warten Sie lieber ab, bis sich aus Gründen, die außerhalb dieses

Kästchens liegen, die Auswahl hinreichend einengt.

Kästchen dürfen auch L-förmig oder noch bizarrer aussehen, was dem Menü eine pikante Note verleiht. Jetzt kann man sich nämlich nicht mehr darauf verlassen, dass alle Einträge eines Kästchens verschieden sein müssen. Die beiden Enden eines L-förmigen Kästchens liegen weder in derselben Zeile noch in derselben Spalte und dürfen deshalb dieselbe Zahl enthalten.

Ein paar Standardrezepte gibt es allerdings schon (siehe auch Kasten auf S. 66/67). Halten Sie Ausschau nach Produkten, die möglichst nur eine Faktorenerlegung zulassen. In diesem Zusammenhang ist hilfreich, dass die Faktoren 5 und 7 stets nur allein auftreten: In einem Kästchen wie »240« muss eine 5 vorkommen. Für die kleineren Primzahlen 2 und 3 gilt das leider nicht. Dass Zahlen wie 24, 48 oder 72 den Faktor 3 enthalten, erlaubt nicht den Schluss, dass im Kästchen eine 3 stehen muss; diesen Faktor kann auch eine 6 oder 9 miterledigen.

Wenn Sie wissen, welche Zahlen ein Kästchen enthalten muss: Tragen Sie sie vorläufig ein, vorsichtig mit Bleistift, auch wenn die Reihenfolge noch nicht klar ist. Diese Zahlen können anderswo in der Zeile beziehungsweise Spalte, in der das Kästchen liegt, nicht mehr vorkommen.

Über die Belegung quer zur Kästchenrichtung wissen Sie damit noch nicht viel. Aber manchmal kann man auch aus derart unvollständiger Information noch Nutzen ziehen. Nehmen wir zum Beispiel an, zwei waagrecht orientierte Zweierkästchen liegen in denselben Spalten, also »in Reih und Glied« übereinander, und wir wissen schon, dass eines von ihnen 2 und 4, das andere 2 und 5 enthalten muss. Selbst wenn die genaue Anordnung dieser Zahlen noch unklar ist, wissen wir schon, dass in beiden Spalten keine weitere 2 mehr stehen kann.

Übrigens: Wenn in diesem Beispiel die Belegung des einen Kästchens mit 2 und 4 feststeht, kann das andere nicht auch 2 und 4 enthalten. Wäre dem so, könnte man nämlich die Zweien auf

zwei verschiedene Arten in die beiden Kästchen einschreiben, ohne dass das auf den Rest des Rätsels irgendeinen Einfluss hätte. Also hätte das Rätsel zwei verschiedene zulässige Lösungen, der Rätselersteller hat aber eindeutige Lösbarkeit zugesichert! Dieses Argument ist zwar unfein, weil es auf Information zurückgreift, die nicht im Rätsel selbst steckt, hat mir aber schon in einigen Fällen weitergeholfen.

Die Summe aller Zahlen in einer Zeile oder Spalte ist vorab bekannt: Für ein 7·7-KenKen etwa ist sie $1+2+3+4+5+6+7=28$. Das hilft, wenn in der entsprechenden Zeile oder Spalte zum Beispiel neben Addierkästchen und bereits gesicherten Zahlen noch genau ein Subtrahierkästchen offen ist. Dann kann man nämlich die Summe der Zahlen in diesem Kästchen berechnen, und aus einer Gleichung für $x+y$ und einer für $x-y$ kann man bekanntlich sowohl x als auch y bestimmen.

Manchmal lohnt es sich, zwei benachbarte Zeilen oder Spalten gemeinsam zu betrachten, vor allem wenn sie mehrere L-förmige oder gar komplizierter geknickte Kästchen gemeinsam haben. Man nutzt dann die Tatsache, dass die Summe über beide Zeilen/Spalten das Doppelte der oben genannten Summe ist. Oder man notiert die Zahlen, die überhaupt noch für beide zur Verfügung stehen, und gewinnt daraus die Information, wie sie zu verteilen sind.

Irgendwann kommt unweigerlich der Fall, dass alle derartigen Überlegungen nicht mehr helfen. Man hat die Belegung eines Kästchens vielleicht auf zwei Möglichkeiten eingengt, kommt aber nicht weiter. Dann hilft nichts, als beide Alternativen so lange weiterzuverfolgen, bis sich bei einer ein Widerspruch auftut.

An dieser Stelle verzweigt sich also der Lösungsweg, und wenn es ganz schlimm kommt, folgt auf die Verzweigung noch eine, und so weiter, bis alle Lösungswege zusammen einen Baum mit vielen Zweiglein ergeben. Nur an einem von ihnen hängt ein Blatt, das heißt die richtige Lösung. Aber bis man das gefunden hat, muss man vielleicht

in einem langen Weg von Astgabel zu Astgabel toben. Da kommt die Denkarbeit der oben erwähnten erschöpfenden Suche schon gefährlich nahe. Umso größer ist dann die Erleichterung, wenn man nach langer Mühe alle Äste bis auf einen endlich abgesägt und damit für sehr viele Felder zugleich ihre richtige Belegung gefunden hat.

Dem KenKen-Meister in den Kochtopf geschaut

Wie werden nun diese sehr unterschiedlichen Rätsel verfertigt? Ein Programm zur Erzeugung von Sudokus bietet keine großen konzeptuellen Schwierigkeiten. Man beginnt mit dem gelösten Rätsel, das heißt mit einer Belegung des 9·9-Quadrats, die in keiner Zeile oder Spalte zwei gleiche Ziffern aufweist, ebenso in keinem der sudokutypischen 3·3-Kästchen. Dann löscht man so lange Ziffern, bis die verbleibenden zwar noch eine eindeutige Rekonstruktion erlauben, diese aber hinreichend schwierig machen.

Im Gegensatz dazu verlangt ein Feinschmeckermenü einen entsprechend begabten Koch. Der ist im Fall von KenKen namentlich bekannt: Es handelt sich um den schottischen Schachgroßmeister und Computerexperten David Levy. In der Fachwelt erregte er Aufsehen, weil er 1968 eine Wette einging, dass die nächsten zehn Jahre kein Computerprogramm ihn in einem Schachturnier besiegen würde – und die Wette nur mit Mühe und Not gewann. Der Fortschritt in der Computertechnik verlief dann doch schneller als erwartet.

Nachdem der Spieleerfinder Robert Fuhrer 2007 KenKen in Japan entdeckt hatte, bat er Levy, sich der Sache anzunehmen. Der entwarf ein Programm zur Erzeugung von KenKen-Rätseln, den »Kenerator«. Inzwischen verfügt Fuhrers Firma Nextoys über die Rechte an dem Namen »KenKen«, weswegen andere Anbieter ihre (nach denselben Regeln zu spielenden) Rätsel umbenannt haben. Die Produkte von Levys Programm werden über die Website www.kenken.com angeboten; wer die bisweilen etwas lärmende Werbung in

Lösungsweg für ein KenKen

9	2-	5-	4:	3-		504x		2-	
8				2-	8x			10+	1-
7	3-		1-			3-	1-		
6	10+	3-		54x				30x	126x
5			54x		30+	28x			
4			4:		2:				
3		60x				3-		20+	
2	13+		1-			3-	2:		
1		1-		24x				4:	
	a	b	c	d	e	f	g	h	j

Dies ist Rätsel Nummer 43208 von der offiziellen Website www.kenken.com, klassifiziert als »hard« (höchster Schwierigkeitsgrad).

Häufig weiß man, mit welchen Zahlen ein Kästchen zu füllen ist, aber es ist noch nicht klar, welche Zahl in welches Feld kommt. Für diese Fälle verwende ich im folgenden Text fett gedruckte Ziffern. So gilt für das Kästchen d5/d6 im vorliegenden Beispielrätsel $54x = 69$, was nicht die Zahl 69 bedeutet, sondern dass in diesem Kästchen die Ziffern 6 und 9 (in noch unbekannter Anordnung) stehen müssen. In das Rätselschema selbst trage ich die Kandidatenziffern vorläufig ein – umringelt, um sie zusammenzufassen und damit man sie nicht aus Versehen für bereits sichere Ziffern hält.

Freundlichkeiten dieser Art findet man am ehesten in Multiplizierkästchen. $28x$

im Zweierkästchen ist **47**, denn es gibt wie im ersten Beispiel keine andere Zerlegung in zwei Faktoren, $28x$ im Dreierkästchen ist **147** oder **227**; da das Kästchen f5/g5/g4 über Eck geht, kann man die letzte Möglichkeit nicht ausschließen. Aber das gerade Dreierkästchen $8x$ (e6/e7/e8) muss **124** sein; eine andere Zerlegung in verschiedene Faktoren gibt es nicht.

Addier- und Subtrahierkästchen sind im Allgemeinen weniger freundlich, mit einer wesentlichen Ausnahme: Wenn unter allen noch verfügbaren Ziffern die größten oder auch die kleinsten gerade gut genug sind, um die Aufgabe zu erfüllen, sind sie die einzig mögliche Lösung. $8-$ ist **19**, $3+$ ist **12**, $10+$ im Viererkästchen ist **1234**, und $30+$ im Viererkästchen ist **6789**.

Damit bleiben in Spalte e nur noch die Ziffern 3 und 5 zu vergeben. Da 5 kein Teiler von 24 ist, ergeben sich die Belegungen **83** für d1/e1 und **25** für d9/e9.

Die bisherigen Erkenntnisse stimmen die beiden Divisionskästchen d3/d4 und 1h/1j freundlicher (ab jetzt grüne Kennzeichnung). Da 4: nur die Belegungen **14** und **28** zulässt und Letztere in beiden Fällen ausgeschlossen ist, darf ich **14** eintragen. $13+$ in a1/a2 ist eingeschränkt auf **58** und **67**; da aber im zweiten Fall mit den verbleibenden Ziffern 589 das Kästchen 2- in a8/a9 nicht zu füllen ist, kann ich Spalte a weit gehend festlegen.

Damit bleibt dem eigentlich unfreundlichen 1- in 1b/1c nichts übrig, als **67** zu

sein. Nur 2 und 9 sind in Zeile 1 noch zu vergeben, und 9 kann nicht Bestandteil eines 2: sein, womit der Rest auch geklärt wäre.

9	2-	5-	4:	3-		504x		2-	
8				2-	8x			10+	1-
7	3-		1-			3-	1-		
6	10+	3-		54x				30x	126x
5			54x		30+	28x			
4			4:		2:				
3		60x				3-		20+	
2	13+		1-			3-	2:		
1		1-		24x				4:	
	a	b	c	d	e	f	g	h	j

In Spalte d müssen noch 3, 5 und 7 Platz finden. $2-$ oben ist also **35** oder **57**, für d2 bleibt 7 beziehungsweise 3 übrig (blaue Kennzeichnung im nächsten Bild). Die erste Möglichkeit scheidet aus, weil $1-$ in c2/d2 eine 6 oder 8 erfordern würde.

Da die einfachen Möglichkeiten vorläufig erschöpft sind, lohnt es sich, Zeile 2 genauer anzusehen. Die 1 hat nur noch Platz in Spalte g, denn als Summand von 20 oder Faktor von 60 ist sie zu klein. Die 2 in g1 schließt **272** für das Übereckkästchen f5/g5/g4 aus; es bleibt **147**, wobei die 1 nach links gezwungen wird.

Es ist zuweilen zweckmäßig, Plätze für die Primzahlen 5 und 7 zu suchen, denn die sind häufig knapp. So passt die 5 in Spalte f nur in das Kästchen $3-$ und

2:	30x			4-
4	3	5	2	1
	8+			
2	4	1	3	5
9+	1-		5+	9+
3	5	4	1	2
	3+			
5	1	2	4	3
	2	15x		
1	2	3	5	4

Die Lösung des einfachen KenKens von S. 64.

Kauf nimmt, darf sich beliebig viele Rätsel kostenfrei herunterladen.

Auch der »Kenerator« füllt zunächst nach dem Zufallsprinzip das Spielbrett mit den Zahlen, die der Spieler am Ende finden soll. Ebenfalls per Zufall, aber mit mehr oder weniger Symmetrie grenzt er die Kästchen ab und entscheidet, welche unter mehreren denkbaren Aufgaben für jedes Kästchen gestellt werden sollen. Über entsprechende Parameter kann man festlegen, wie symmetrisch die Kästchen angeordnet sein sollen, wie groß sie maximal sein dürfen, wie vie-

le Einserkästchen das Rätsel seinem Spieler vorab »schenken« soll und einige mehr.

Damit ist das Rätsel eigentlich fertig. Aber der »Kenerator« vergewissert sich noch (durch Abarbeiten ganzer Lösungsbäume), dass es eindeutig lösbar ist, und schätzt seinen Schwierigkeitsgrad ein. Hierfür bestimmt er zu jedem Kästchen dessen »Unfreundlichkeit«, das heißt die Anzahl der verschiedenen möglichen Belegungen, und multipliziert die Unfreundlichkeiten aller Kästchen zusammen. Das Produkt ist eines von mehreren Maßen für die Schwie-

braucht 2 oder 8 als Partnerin; andererseits geht für 2: in f3/f4 nur noch **24** oder **48**, so dass in jedem Fall nur **37** für die linke Hälfte von 504x bleibt. Die rechte Hälfte ergibt demnach $504:21=24$; das muss **38** sein, da die einzige andere Möglichkeit **46** schon ausgeschlossen ist. Damit ist die Verteilung der restlichen drei Zahlen auf Spalte g klar.

Die 5 in g7 verdrängt andere Fünfen aus Zeile 7 (ab jetzt rote Kennzeichnung). Das Kästchen 30x in h4/h5/h6 ist inzwischen freundlich (**235**), weil ihm für die einzige Alternative **156** die 6 abhandengekommen ist. Das zwingt das Kästchen unmittelbar über ihm zu der Freundlichkeit **19**. Damit sind die Verhältnisse in h1/j1 klar, und die 8 in Spalte h hat nur noch oben Platz.

Kästchen 126x in Spalte j muss **279** sein (**367** entfällt), was die restliche Belegung von Spalte j festlegt.

9	2- 9	5- 1	4: 4	3- 2	5 5	504x 7	2- 3	8 8	6 6
8			2- 7	8x 1	2- 5	8x 2	3 3	10+ 9	1- 4
7	3- 6		1- 8	1- 7	3- 4	3- 5	1- 1	3 3	4 4
6	10+ 2	3- 3	54x 9	4: 4	5 5	30x 6	126x 2		
5			54x 9	30+ 6	28x 1	4: 4	3 3	7 7	
4	3 3		4: 4	7 7	2: 2	7 7	5 5	9 9	
3	4 4	60x 6		4: 4	7 7	3- 9	6 6	20+ 8	
2	13+ 8		1- 3	3 3	9 9	3- 6	2: 1	7 7	5 5
1	5 5	1- 6	24x 8	3 3	9 9	2 2	4: 4	1 1	
	a	b	c	d	e	f	g	h	j

Mit dem bisher Erreichten lassen sich etliche Unklarheiten auflösen (grün). Die Vieren in Zeilen 3 und 4 verdrängen, auch wenn wir ihre Standorte noch nicht kennen, die 4 in Spalte g nach oben.

5- oben in Spalte b ist **16** oder **49**; die erste Möglichkeit trifft zu, denn die 6 findet keinen anderen Platz in Zeile 8. Das zwingt **41** für c8/c9.

Weiter geht das Aufräumen (rot). Zeile 2 klärt sich, da die restlichen Faktoren der 60 in b2/b3/c3 **35** sein müssen. Die Suche nach einem Platz für die 7 in Spalte c führt auf c6 und zieht c7=8 nach sich.

9	2- 9	5- 1	4: 4	3- 2	5 5	504x 7	2- 3	8 8	6 6
8	7 7	6 6	1 1	5 5	2 2	3 3	8 8	9 9	4 4
7	3- 6		1- 8	1- 7	3- 4	3- 5	1- 1	3 3	4 4
6	10+ 2	3- 3	7 7	54x 9	1 1	5 5	6 6	30x 2	126x 7
5			54x 9	30+ 6	28x 1	4: 4	3 3	7 7	
4	3 3		4: 4	6 6	2: 2	7 7	5 5	9 9	
3	4 4	60x 6		4: 4	7 7	3- 9	6 6	20+ 8	
2	13+ 8		1- 3	3 3	9 9	3- 6	2: 1	7 7	5 5
1	5 5	1- 6	24x 8	3 3	9 9	2 2	4: 4	1 1	
	a	b	c	d	e	f	g	h	j

Der Rest ist nicht mehr schwer (blau): Die Belegung der Felder f7, f4, f3 ist (in dieser Reihenfolge) erzwungen, die Unsicherheit in d3/d4 löst sich auf, der einzige Platz für die 5 in Spalte c ist c3, daraus folgt **39** für c4/c5, daraus 2 für b4, daraus **85** für b5/b6.

9	2- 9	5- 1	4: 4	3- 2	5 5	504x 7	2- 3	8 8	6 6
8	7 7	6 6	1 1	5 5	2 2	3 3	8 8	9 9	4 4
7	3- 6		1- 8	1- 7	3- 4	3- 5	1- 1	3 3	4 4
6	10+ 2	3- 3	7 7	54x 9	1 1	5 5	6 6	30x 2	126x 7
5			54x 9	30+ 6	28x 1	4: 4	3 3	7 7	
4	3 3		4: 4	6 6	2: 2	7 7	5 5	9 9	
3	4 4	60x 6		4: 4	7 7	3- 9	6 6	20+ 8	
2	13+ 8		1- 3	3 3	9 9	3- 6	2: 1	7 7	5 5
1	5 5	1- 6	24x 8	3 3	9 9	2 2	4: 4	1 1	
	a	b	c	d	e	f	g	h	j

Die verbleibenden Unklarheiten lösen sich der Reihe nach auf. So bleibt für j6 nur noch die 2, denn 7 und 9 sind schon in Zeile 6 vertreten. Die 7 hat in j4 keinen Platz mehr und muss deshalb nach j5 wandern, das zwingt die 9 nach j4, das klärt c4/c5, und so weiter bis zum Endergebnis.

9	2- 9	5- 1	4: 4	3- 2	5 5	504x 7	2- 3	8 8	6 6
8	7 7	6 6	1 1	5 5	2 2	3 3	8 8	9 9	4 4
7	3- 6		1- 8	1- 7	3- 4	3- 5	1- 1	3 3	4 4
6	10+ 4	3- 3	8 8	7 7	54x 9	1 1	5 5	6 6	30x 3
5			54x 9	30+ 6	28x 1	4: 4	2 2	7 7	
4	1 1	2 2	3 3	4: 4	6 6	2: 2	8 8	7 7	5 5
3	2 2	60x 3	5 5	1 1	7 7	4 4	3- 9	6 6	20+ 8
2	13+ 8		1- 3	3 3	9 9	3- 6	2: 1	7 7	5 5
1	5 5	1- 6	24x 8	3 3	9 9	2 2	4: 4	1 1	
	a	b	c	d	e	f	g	h	j

rigkeit des Rätsels. Ein anderes ist die Anzahl der Astgabeln, die auf dem Weg zur richtigen Lösung liegen; mehr als drei sollten das im Allgemeinen nicht sein, um den Spieler nicht zu sehr zu frustrieren. Was den Eindeutigkeitstest nicht besteht oder nicht den geforderten Schwierigkeitsgrad aufweist, wird weggeworfen. Keine Bange, der Kenerator produziert rasch neue Rätselkandidaten nach.

Verschärfte Formen von KenKen lassen bei der Aufgabenstellung die Rechenzeichen weg. Statt zum Beispiel »10+« steht in dem entsprechenden

Kästchen nur noch »10«; der Spieler muss herausfinden, ob dieses Endergebnis durch Multiplikation (»2, 5«) oder durch Addition (etwa »4, 6«) zu erreichen ist. Und prompt gehen einige spielerisch gesinnte Leute, darunter Brian Hayes, der Verfasser mehrerer »Mathematischer Unterhaltungen«, eine Abstraktionsstufe weiter. Sie denken darüber nach, welches Ziffernsortiment (»KenKen-friendly numbers«) man wählen müsste, damit aus einer Ergebniszahl im Kästchen bereits die Rechenart, mit der man sie erreicht, hervorgeht. ~

DER AUTOR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Nach Vorübungen mit Rätseln der Kantenlängen 7 und 8 genießt er mittlerweile zur Mittagspause gerne ein schweres KenKen der Größe 9.

WEBLINK

Dieser Artikel sowie Hinweise auf weitere Webseiten im Internet: www.spektrum.de/artikel/1207587



ARCHÄOLOGIE

Klischees mit Tradition

Seit dem 19. Jahrhundert verbreiten Schulbücher wie auch Comics das Bild eines rustikalen Gallien – das den Erkenntnissen der Archäologen und Historiker jedoch längst nicht mehr standhält.

Von Christian Goudineau



Das südgallische Dorf beim heutigen Martigues war gut organisiert. Klischees ländlich-rustikaler Romantik können die Ausgräber nicht bestätigen.

ILLUSTRATION: MIT FRDL. GEN. VON DENIS DELPALILLO. EBER: ANTOINE MAILLIER, BIBRACTE; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON BIBRACTE

DIE ARTIKEL IM ÜBERBLICK

SCHWERPUNKT:
UNBEKANNTES GALLIEN

- | | |
|----------------------------------|-------|
| ▶ Klischees mit Tradition | S. 68 |
| ▶ Basisdemokratie gallischer Art | S. 74 |
| ▶ Anatomie einer Keltenstadt | S. 76 |

»Was ist ein barbarisches Volk? – Ein barbarisches Volk ist ein Volk, das weder weiß, wie man den Boden kultiviert, noch wie man die Metalle verarbeitet, das keine Schulen hat und das sehr ungebildet ist. In einem barbarischen Volk wissen die Menschen nicht, wie man sich gut ernährt, wie man sich gut kleidet, wie man gut wohnt; sie bekämpfen sich ständig gegeneinander, der Stärkere misshandelt den Schwächeren, denn es gibt kaum Gerechtigkeit.«

(Aus der Einführung des »Petit Lavissee«,
einem Schulbuch von 1885)

Gallien, das Land der dichten Eichenwälder voller Wildschweine, der Misteln schneidenden Druiden, der putzigen Dörfer mit ihren tapferen, geistig allerdings eher schlichten Bewohnern. Dieses gängige – und nach heutigem Wissen grundfalsche – Klischee Galliens verdankt sich nicht allein den Comics über die sympathischen Figuren Asterix und Obelix, vielmehr basiert die von ihren Schöpfern René Goscinny und Albert Uderzo kreierte Antike auf den Geschichtswerken ihrer Zeit. Allen voran der »Petite Lavissee«, der 1885 in die Schulen kam und bis Ende der 1950er Jahre in Gebrauch war – eine um die Jahre 1934 bis heute erweiterte Neuauflage kam im September 2009 auf den Markt.

Sein Schöpfer Ernest Lavissee gehörte zu den einflussreichsten Intellektuellen der Dritten Republik (1871–1940). Als Professor an der Université Paris-Sorbonne und Mitglied der Académie française bestimmte der Historiker über aka-

demische Laufbahnen und beeinflusste maßgeblich die Lehre in seinem Fachbereich. Um 1900 hatten bereits Millionen Schüler durch den »Petite Lavissee« gelernt, welches Glück Gallien im Grunde gehabt hatte!

Denn bis zur Niederlage des Vercingetorix in der Schlacht von Alesia 52 v. Chr. war es ein barbarisches Land gewesen. »Unsere gallischen Vorfahren wurden dann gezwungen, sich in das Römische Reich zu integrieren. Für die verlorene Freiheit gewannen sie Frieden und technischen Fortschritt, mit anderen Worten: Sie wurden zivilisiert.« Diese offizielle Version der französischen Antike reflektiert den Kenntnisstand um das Jahr 1890, aber auch die Ideologie jener Epoche. Die Kolonialmacht Frankreich identifizierte sich eher mit dem römischen Imperium, das den Wilden mit Hilfe militärischer Stärke die Segnungen der Zivilisation brachte. Allenfalls bedauerte man, dass die Republik »kleiner als Gallien« war, da sie Elsass und Lothringen im Krieg von 1870 verloren hatte (war das gallisch?) – was nicht von Dauer sein sollte.

Entgegen der Vorstellung einer primitiven Kultur waren die Gallier nach heutigem Wissen schon lange vor der Invasion wohlhabende Nachbarn und Handelspartner der Mittelmeervölker, deren Wirtschaftsstrukturen sie teilweise übernommen hatten. Lavissee zufolge wurden beispielsweise die potenziellen Anbauflächen kaum landwirtschaftlich genutzt, dichter Wald soll weite Teile des Landes bedeckt haben. Dabei berichtete schon der griechische Geograf Strabon um die Zeitenwende: »Das Land erzeugt reichlich Weizen, Hirse, Eicheln und jede Sorte von Vieh. Kein Stückchen liegt brach, solange es sich nicht in den sumpfigen oder bewaldeten Gebieten befindet. Und selbst diese Regionen werden auf Grund der hohen Bevölkerungszahl besiedelt, denn die Frauen sind fruchtbar und gut genährt.«

Dass er keine Fantasien wiedergab, bestätigen Luftbildarchäologen seit Anfang der 1970er Jahre. Auf ihren Fotos, von kleinen Flugzeugen aus aufgenommen, entdeckten sie helle Streifen in den Feldern – Spuren alter Mauern aus der Zeit der römischen Besetzung. Dann lernten sie, dunklere Strukturen als Gräben zu deuten, in denen sich durch Wind und Regen fruchtbarer Humus angesammelt hatte. Große, rechteckige, oft doppelte Grabenstrukturen entpuppten sich als Gehöfte – doch nicht aus gallorömischer Zeit. Die kannte man schon seit gut 100 Jahren, mit ihren Steinmauern und den mit Steinplatten, manchmal sogar mit Mosaiken beleg-

AUF EINEN BLICK

HOCH ENTWICKELTE BARBAREN

1 In Gallien war die **Landwirtschaft** schon vor der römischen Eroberung weit entwickelt. Seine **Handwerker** genossen bei den Nachbarn hohes Ansehen.

2 Es existierten **stadtähnliche Siedlungen**, die durch ein gut ausgebautes **Wegenetz** verbunden waren, das auch die römischen Legionen nutzten.

3 **Cäsar** eroberte ein Land, dessen Stämme teilweise eng mit Rom liiert waren und sich zu Hochkulturen entwickelten. Möglicherweise lieferte ihm der **Aufstand des Vercingetorix**, an dem auch Cäsars Verbündete beteiligt waren, die moralische Rechtfertigung.



Fliegende Archäologen spüren seit den 1970er Jahren Gehöfte auf, die in vorrömischer Zeit bewirtschaftet wurden. Dunkle Linien in der Landschaft markieren ehemalige Gräben, in die fruchtbarer Humus eingeschwemmt wurde. Die Grundstruktur im Foto oben zeigt eine zentrale Hofanlage mit Gebäuden sowie abgegrenzte Weideflächen und eine schützende Palisade.



Was dem Menschen schmeckt, das mögen auch die Götter: In dieser Opfergrube des gallischen Dorfs Acy-Romance in den Ardennen entdeckte der Archäologe Patrice Méniel vom Centre nationale de la recherche scientifique die Überreste eines Hundes, der einer unbekanntem Gottheit dargebracht worden war. Abfallgruben verraten, was damals an Fleisch auf den Tisch kam: Schwein, Rind und Pferd waren hier am häufigsten vertreten, gefolgt von Geflügel, Schafen, Ziegen und Fischen. Gelegentlich kam Hund auf den Teller, selten größeres Wild, bei Bauern aber auch mal ein Hase.

ten Fußböden. Diese neuen Funde waren älter! In der Mitte einer solchen Hofanlage umschloss eine erste Umfriedung das Wohngebäude, einige Nebengebäude und einen Gemüsegarten. Ein zweiter Zaun umgab Weiden für das Vieh. Eine Palisade mit nur einem Tor schloss die gesamte Anlage nach außen ab. Außerhalb erstreckten sich Felder und weitere Weiden. Inzwischen wurden so viele dieser Gehöfte entdeckt sowie Niederlassungen aus dem 2. und 3. Jahrhundert v. Chr. in heutigen Waldgebieten, dass die Lehrmeinung ins Wanken gerät, wonach Galliens Wälder erst ab dem 12. Jahrhundert großflächig gerodet worden seien.

Kein Wildschwein für Obelix und seine Freunde

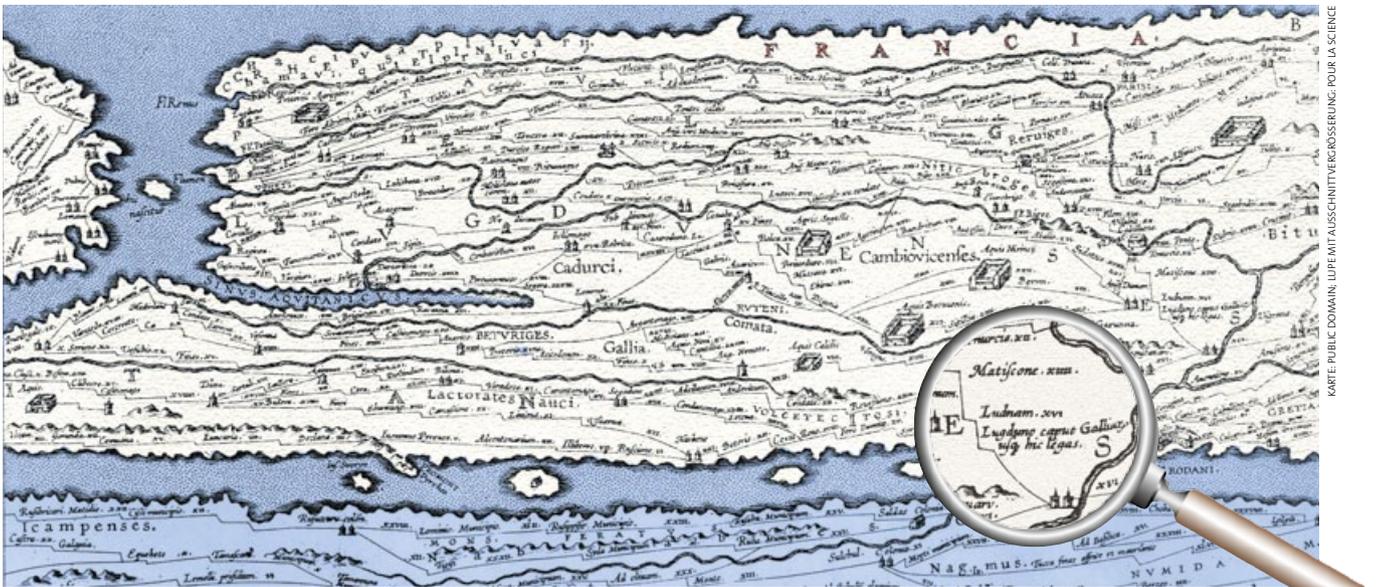
Samenkörner und Reste von Früchten im Aushub der Grabungen sowie Pollen in den Sedimenten der Gewässer verraten, dass hauptsächlich die Getreide Emmer, Gerste, Hafer und Hirse sowie die Hülsenfrüchte Erbse, Linse und Wicke angebaut wurden. Als einzigen Obstbaum kultivierten die Gallier die Pflaume.

Weil jede Ausgrabung unzählige Tierknochen ans Licht bringt, können Paläozoologen Statistiken über die Fleischsorten erstellen, die auf dem Speiseplan standen. Die Gallier aus dem kleinen, uns von der »Asterix«-Lektüre wohlbekannten Dorf gehörten offenbar einer kleinen Minderheit an: Im Allgemeinen deckte die Jagd weniger als fünf Prozent des Fleischkonsums. Vor allem aß man Schwein, Rind und Geflügel, in manchen Regionen auch Ziege und Schaf, mitunter Hund und Pferd (siehe Bild links). Jagdwild stellte eher eine Abwechslung für die »Aristokraten« dar – doch Wildschwein kam nicht auf den Tisch!

Wie verhält es sich mit anderen Aspekten des Gallienklichs? Waren die Römer wirklich die großen Kulturbringer? Stimmt es denn nicht, dass beispielsweise ein großer Teil des französischen Straßennetzes im 19. Jahrhundert auf die Arbeit römischer Pioniere zurückgeht? Das ist zwar richtig, doch nur die halbe Wahrheit, wie eine einfache Überlegung zeigt: Laut Cäsars Kriegsbericht legten seine Legionen 15 bis 20 Kilometer pro Tag zurück. Das war nur auf befestigten Wegen und Straßen möglich.

Dafür spricht auch, dass Entfernungen im römischen Gallien nicht in den sonst im Imperium üblichen Meilen (lateinisch: milia) von je 1480 Metern, sondern in »Leugen« (leugae) gemessen wurden. Das kann nichts anderes bedeuten als die Fortführung einer entsprechenden gallischen Tradition. Wer aber dies behauptete, dem hielten die Experten zwei antike Texte unter die Nase, denen zufolge zwei Leugen drei Meilen entsprächen, die Leuge also 2220 Metern. Dazu passten jedoch die in anderen Texten gefundenen Angaben zu Streckenlängen nicht. Dass französische Ingenieure bereits im 18. Jahrhundert etwa 2400 Meter als Einheit bestimmt hatten, wurde ignoriert. Erst seit wenigen Jahren wissen wir, dass sie Recht hatten.

Gallien war nämlich schon vor der Eroberung von Verbindungsstraßen durchzogen. Ein solches Wegenetz machte



KARTE: PUBLIC DOMAIN, LUPE: MIT AUSSCHNITTVERGRÖßERUNG FÜR JA.SCIENCE

Die große Gallische Leuge maß ungefähr 2400 Meter. Wir verdanken diese Kenntnis insbesondere der »Tabula Peutingeriana«, der Umsetzung eines altrömischen Straßenverzeichnisses in eine Art Karte durch den deutschen Humanisten Konrad Peutinger (1465–1547). Die Beschriftung »Lugduno, caput Galliarum, usque hic leugas« (unter der Lupe) steht für »Lyon, Hauptstadt Galliens, bis hier in Leugen«. Offenbar wurde in der Provinz nicht die römische Meile (1480 Meter), sondern die dort traditionelle Leuge verwendet. Demnach existierte wohl schon vor der Eroberung ein entwickeltes Straßennetz, das Cäsars Legionen ein schnelles Marschtempo ermöglichte.

freilich nur dann Sinn, wenn es entsprechend viele Siedlungen zu verbinden galt. Cäsar selbst berichtete, das Land bestehe aus »aedificia«, »vici« und »oppida«, also Gehöften, Weilern beziehungsweise Dörfern und größeren Niederlassungen, von denen einige Hauptorte waren. Cäsar schrieb zudem: »Mercur ist der Gott, den sie am meisten verehren; er wird am häufigsten repräsentiert, und er gilt als Erfinder der Künste und als Geleiter auf Wegen und Reisen.« Obgleich der Feldherr wohl den keltischen Stammesgott Teutates mit dem römischen Merkur verwechselte, bezeugt seine Notiz doch, wie wichtig den Galliern ihre Infrastruktur war.

Stadtmauern – Symbole der Macht

Man mag noch verstehen, dass Lavisse Bauernhöfe und Dörfer überhaupt nicht erwähnt hat. Als er 1884 sein Lehrbuch verfasste, gruben Wissenschaftler aber schon seit fast 20 Jahren auf dem Mont Beuvray und legten die Überreste des antiken Bibracte frei: des Hauptorts der Häduer, die den größten gallischen Stamm darstellten (siehe den Beitrag ab S. 76). Wie konnte er die Existenz solcher fast stadtähnlicher Siedlungen ignorieren? Spielte Frankreichs Kolonialpolitik eine Rolle, in deren Ideologie entsprechende Kulturleistungen der indigenen Bevölkerung keinesfalls gepasst hätten?

Tatsächlich errichteten die Gallier seit der Mitte des 2. Jahrhunderts v. Chr. Siedlungen, die zum Teil 100 bis 300 Hektar bedeckten und von einer Mauer umschlossen wurden. In deren Schutz lebten Handwerker und Händler, Vornehme und Priester, dort fanden Volksversammlungen, reli-

giöse Feste und Märkte statt. Bei Gefahr suchten die Menschen der Umgebung Zuflucht. Die Befestigungsmauern von Bibracte, Gergovia und von vielen anderen Städten waren im Umkreis vieler Kilometer weithin sichtbar und symbolisierten die Macht der Stämme, die sie erbaut hatten. Cäsar bewunderte diese gallischen Mauern, die Feuer ebenso wie dem Sturmbock von Angreifern widerstanden.

Nicht weniger weit entwickelt waren die technischen Gerätschaften. Abgesehen vom Streichbrett, das beim Pflug die Erde wendet, gab es im Frankreich des 18. Jahrhunderts kein metallenes Werkzeug, das nicht auch gallische Handwerker schon gefertigt hatten, vom Hammer bis zum Hohlmeißel. Das erklärt wohl, warum Gallier rege Handelsbeziehungen mit ihren Nachbarn unterhielten, obwohl der »Petit Lavisse« auch davon nichts weiß. Die Belege dafür bargen Forscher in den Tiefen des Mittelmeers.

Wie den Luftbildarchäologen gelangen ebenso den Unterwasserarchäologen seit den 1960er Jahren viele neue Entdeckungen. Dank immer besserer Tauchausrüstungen wurden aus einigen zehn bald einige hundert Schiffswracks, die anhand von Hölzern und Ladung datiert und oft einem Herkunftsort zugewiesen werden konnten.

An der Zahl der gesunkenen Frachter gemessen erreichte der Transport italienischer Waren Richtung Gallien, der etwa im 8. Jahrhundert v. Chr. einsetzte, zwischen 150 und 50 v. Chr. einen Höhepunkt. Geladen hatten die Schiffe vor allem ein Luxusprodukt: Wein. Der Unterwasserarchäologe Pierre Tchernia schätzt, dass Roms Winzer Jahr für Jahr 500 000 bis

Bronzeguss für den Export

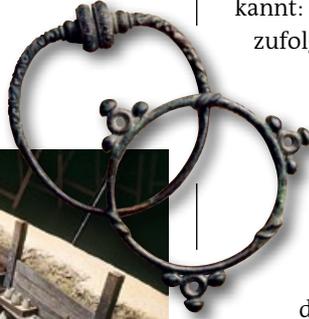


Gallisches Handwerk genoss griechischen und römischen Autoren zufolge in der antiken Welt ein hohes Ansehen. Was sie fertigten, zeigen Ausgrabungen ihrer Werkstätten (im Bild die Rekonstruktion einer Bronzegießerei aus Bibracte).

Insbesondere gelang es Schmiedern, Bleche zu treiben, die maximal einen Zentimeter dick waren.



ALLE FOTOS: ANTOINE MAILLIER, BIBRACTE; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON BIBRACTE



1000000 Amphoren exportierten; jede davon fasste etwa 25 Liter! Die Amphoren selbst wurden in Gallien als Baumaterial weiterverwendet. Die große Straße von Bibracte etwa ruht auf einem Damm, in dem zerstoßene Amphorenscherben für Festigkeit und Entwässerung sorgten.

Im Gegenzug lieferten die gallischen Handwerker unter anderem Waffen und Werkzeuge – ihre Eisenverarbeitung wurde bei den Römern sehr geschätzt. Wie weit der Handel schon zu Beginn des 3. Jahrhunderts v. Chr. entwickelt war, verdeutlicht die Einführung des Münzwesens. Zunächst imitierte man die Vorbilder des Mittelmeerraums, insbesondere den goldenen »Stater« Philipps II. von Makedonien. Dessen griechische Bildmotive wurden durch eigene ersetzt, die möglicherweise Bezug auf die Mythen jener Volksgruppen nahmen, die diese Stücke prägten. Um 150 v. Chr. ersetzten die Häduer, aber auch die Lingonen, Sequaner und Helvetier das Gold durch Silber. Damit war der so genannte gallische Denar hinsichtlich Metall und Gewicht einer Drachme in der griechischen Hafenkolonie Massalia (dem heutigen Marseille) gleichwertig und genau doppelt so schwer wie ein römischer Quinar. Zudem verschwanden die gallischen Bildmotive. Stattdessen zierten Magistrate oder Tiere die Münzen; Legenden in griechischer und lateinischer Sprache nannten Prägeherrn oder Stammesführer.

Rund 70 Jahre vor dem Gallischen Krieg waren die wirtschaftlichen Beziehungen zwischen Italien und dem von

Griechen und Römern beeinflussten Süden Galliens – seit 118 v. Chr. bereits die Provinz »Gallia transalpina« – sowie dem keltischen Zentralgallien derart intensiv, dass eine Art Währungsunion aufkam. Eine solche Angleichung des Geldes konnte nicht ohne politisches Zutun, nicht ohne Verhandlungen und Absprachen zwischen den Stämmen geschehen. Das wiederum setzt voraus, dass zuvor bereits gute Beziehungen existierten, sowohl innerhalb Galliens als auch mit den Geschäftspartnern.

Eines der wichtigen politischen Bündnisse ist gut bekannt: Es verband Rom mit den Häduern. Antiken Texten zufolge wurde es um die Mitte des 2. Jahrhunderts v. Chr. geschlossen; Historiker vermuten aber, dass dies bereits einige Jahrzehnte früher geschah. Dabei handelte es sich um eine außergewöhnliche Konstruktion, denn laut Cäsar galten die Häduer dem römischen Senat als »fratres consanguineique«, also als Blutsbrüder. Rom erkannte diesen Titel sonst nur noch den Einwohnern Ilios zu, also des mythischen Troja und damit Verwandten des Äneas, den die Römer als ihren Stammvater ansahen.

Wie anders war das Gallien, das Cäsar eroberte, als es der »Petit Lavis« und die »Asterix«-Comics darstellten! Längst verbanden wirtschaftliche und politische Zusammenarbeit die Römer mit den großen gallischen Stämmen in Zentralgallien. Allerdings wirft das die Frage auf, warum der Feldherr 58 v. Chr. ein befreundetes Land mit Krieg überzog.

Mit Anfang 40 hatte Cäsar in diesem Jahr einen weiteren Schritt auf der Karriereleiter genommen und war zum Prokonsul der Provinzen Illyrien sowie »Gallia cisalpina« und »Gallia Narbonensis« ernannt worden. Das heißt in heutigen geografischen Begriffen: Roms Statthalter an der dalmatischen und kroatischen Küste, in der Poebene und in einem Teil Südfrankreichs. Um dorthin zu gelangen, hatte es Verbündeter bedurft – und Geld. Der Prokonsul war hoch verschuldet und wollte sein Amt, wie andere vor ihm, auch dazu



Der internationale Handel

Wein war das Getränk der Aristokraten und spielte insbesondere bei Festmahlen eine große Rolle, mit denen die Elite ihr Prestige festigte. Als rituelles Getränk wurde Wein feierlich genossen, gelegentlich aus einem luxuriösen Service aus italienischer Keramik, Bronze oder Silber. Weinamphoren italienischer Herkunft (Bild) gehören zur häufigsten Fundkategorie. Archäologen können keinen städtischen Fundplatz ergraben, ohne Tonnen ihrer Scherben zu bergen! Bezahlt wurde auch mit Tauschwaren wie Getreide, Vieh, Fellen und Sklaven (siehe rechts: gallische Fußfesseln für Sklaven).



GERARD REVELLAC / PHOTOÉQUIPE CENTRE CAMILLE JULIAN / CNRS-AMU 1982. ABRUCK MIT FROLDGEN DES CENTRE CAMILLE JULIAN



nutzen, seine Finanzen zu sanieren. Welche besseren Mittel gab es dafür als einen erfolgreichen Feldzug?

Doch das war wohl nicht der Anlass, in Gallien einzumarschieren. Der griechische Historiker Strabon erklärte später, Cäsars Ziel sei es gewesen, einen Stammesführer namens Burebista zu bekämpfen, der Gebiete nördlich seines Amtsbereichs destabilisierte. Sicher ist, dass einige Verbündete Roms darum baten, die »Völkerwanderung« der Helvetier zu unterbinden. Dieser gallische Stamm war aus dem heutigen Mittelland der Schweiz aufgebrochen, um sich im Gebiet der Santonen an der Atlantikküste niederzulassen. Zweifellos waren diesem Umzug langjährige Verhandlungen mit allen betroffenen Stämmen vorausgegangen, doch der Durchzug von hunderten Tausenden Menschen mag das politische Gleichgewicht ins Wanken gebracht haben. Cäsar setzte seine Armee in Marsch und schlug die Helvetier nahe Bibracte zurück.

Invasion unter Freunden

Seinem eigenen Bericht zufolge baten ihn seine gallischen Verbündeten anschließend, sie noch gegen Ariovist zu verteidigen, einen Fürsten der germanischen Sueben, der über ein großes Gebiet im heutigen Nordfrankreich wie ein Tyrann herrschte, Geiseln und Tribute forderte. Cäsar besiegte auch ihn und vertrieb die Sueben wieder auf die andere Seite des Rheins.

Damit hätte er Ende des Jahres in seine Provinzen zurückkehren müssen, doch er blieb. Gallien erlebte einen wirtschaftlichen Aufschwung, an dem er vermutlich teilhaben wollte. Überdies lag jenseits seiner Küste Britannien, das als reich galt und somit eine Option auf künftige Beutezüge bot. Und dann waren da noch die Stämme im Norden Galliens, Angrenzer des sagenumwobenen Rheins. Wäre Cäsar in der Lage gewesen, diese riesigen Gebiete unter römische Herrschaft zu bringen? Allenfalls mit Hilfe seiner Verbündeten in Zentralgallien! Ich vermute, dass der erfahrene Strategie genau dies im Sinn hatte.

Jene Stämme lieferten ihm Nachschub, stellten Hilfstruppen und Scouts, die Land und Leute kannten. Römische und gallische Krieger überfielen gemeinsam die Bewohner der

Peripherie Galliens, überquerten sowohl den Rhein als auch den Ärmelkanal.

Doch die »kleineren Völker« ergaben sich nicht und führten einen Guerillakrieg.

Die Feldzüge nach Britannien und Germanien brachten weit weniger Gewinn als erwartet. Zudem mischte sich Cäsar wohl immer stärker in die inneren Angelegenheiten seiner Verbündeten ein, bis sich diese 52 v. Chr., vom Fürsten Vercingetorix vereint, gegen ihn stellten. Damit waren freilich die Würfel gefallen: Roms Legionen besiegten die gallische Allianz vor Alesia. Obgleich es gar nicht seine ursprüngliche Absicht gewesen sein mochte, fiel dem Feldherrn damit ganz Gallien in die Hände, das bis zum Rhein römische Provinz wurde. Ohne die vorangehende Kollaboration der gut organisierten und kampfstarken Verbündeten wäre die Geschichte wohl anders verlaufen. Und ohne Dörfer, Städte sowie ein verbindendes Wegenetz, ohne kundige Bauern, Handwerker und Händler wäre Gallien nicht zu solch einem Schmuckkästchen des Imperiums geworden. ~

DER AUTOR



Christian Goudineau ist Archäologe und Professor am Collège de France in Paris, wo er einen Lehrstuhl für nationale Altertumswissenschaften innehat.

QUELLEN

Archäologisches Landesmuseum Baden-Württemberg, Landesmuseum Württemberg, Landesamt für Denkmalpflege Stuttgart (Hg.): Die Welt der Kelten. Zentren der Macht – Kostbarkeiten der Kunst. Jan Thorbecke, Ostfildern 2012
Cunliffe, B.: Les Celtes. Éditions Errance, Paris 2001
Fichtl, S.: La ville celtique. Éditions Errance, Paris 2000
Goudineau, C.: César et la Gaule. Point-Seuil, Paris 2000
Goudineau, C.: Regard sur la Gaule. Éditions Errance, Paris 2000

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1207582



INTERVIEW

»Viele gallische Stämme hatten eine Art Basisdemokratie etabliert!«

Jean-Louis Brunaux, einer der führenden Experten für das Gallien vor der römischen Eroberung, vertritt Thesen, die manchen Forscher provozieren: Gallien sei zum Beispiel keine Erfindung Cäsars gewesen, sondern ein Gebilde, in dem sich bereits ein »Nationalgefühl« entwickelt hatte – und sogar eine antike Form von Demokratie.

Spektrum der Wissenschaft: Wie hätte ein Bewohner in der Gegend des heutigen Paris reagiert, wenn man ihn als Gallier angesprochen hätte? Wäre ihm »Kelte« lieber gewesen?

JEAN-LOUIS BRUNAUX: Ihre Frage berührt eine Diskussion unter Fachleuten. Viele ziehen den offeneren Begriff »Kelten« dem der Gallier vor und halten Gallien für eine Erfindung Cäsars. Dieser Meinung bin ich ganz und gar nicht. Im 2. Jahrhundert v. Chr. bereiste der griechische Geograf Poseidonios von Apameia das Languedoc und das Tal der Garonne. Er beschrieb dann ein Gallien, das von Alpen, Mittelmeer, Pyrenäen, Atlantik und Rhein begrenzt wurde, und zählte die verschiedenen Volksgruppen auf. Zentralgallien sei Keltika, also Keltenland, es gebe aber auch nichtkeltische Stämme wie die Belgen und Aquitanier. Diese Vielfalt war den Bewohnern Galliens bewusst. Doch ich bin überzeugt: Wer innerhalb der geografischen Grenzen ein Recht auf Grund und Boden besaß, war nach seinem Verständnis ein Gallier.

Wie hätte sich ein solches »Nationalbewusstsein« praktisch geäußert?

BRUNAUX: Laut Cäsar fand jedes Jahr im Wald der Karnuten eine stammesübergreifende Versammlung aller Druiden statt. Die einzelnen Volksgruppen trugen Unstimmigkeiten vor und akzeptierten die Entscheidungen dieser Versammlung. Sie repräsentierte also Gallien als Nation, zumindest im

juristischen Bereich. Für ein gemeinsames Verständnis spricht auch, dass die Hilfstruppen für den in Alesia eingeschlossenen Rebellionsführer Vercingetorix fast gallienweit ausgehoben wurden.

Dennoch waren die verschiedenen Stämme autonome politische Einheiten, die beispielsweise mit den Römern jeweils eigene Verträge abschlossen. Manche waren deren Verbündete, andere nicht.

BRUNAUX: Ein Gallier fühlte sich tatsächlich erst einmal mit seiner jeweiligen Volksgruppe verbunden, war Häduer,

Piktone und so weiter. Ein solcher Stamm umfasste einige hunderttausend Menschen, die ein Gebiet besiedelten, dessen Fläche einem durchschnittlichen heutigen französischen Département entsprach. Man kann diese

Die Häduer verfügten bereits über eine richtige Verfassung und eine Sammlung von Gesetzen. Sie wählten zwei Magistrate

Gebilde mit griechischen Stadtstaaten vergleichen, die ja auch aus einem urbanen Zentrum und dem Umland bestanden. Was die Römer wohl ebenfalls so sahen, denn sie sprachen von »civitates«, also Bürgergemeinschaften.

Das impliziert aber auch eine Beteiligung der Stammesmitglieder an politischen Entscheidungen.

BRUNAUX: Tatsächlich berieten die »Bürger« gemeinsam über wichtige Themen. Der griechische Geograf Polybios überlieferte zum Beispiel, dass Hannibal auf seinem Zug gegen Rom Ende des 3. Jahrhunderts v. Chr. die Versammlungen aller Gebiete, die er durchqueren wollte, dafür um



JEAN-LOUIS BRUNAUX ist Forschungsdirektor am französischen CNRS (nationales wissenschaftliches Forschungszentrum) und Mitarbeiter der Abteilung »Archäologie des Orients und Okzidents« an der Pariser Hochschule ENS.

Erlaubnis bat. Viele gallische Stämme hatten also eine Art Basisdemokratie etabliert!

Es fällt allerdings schwer, sich eine Versammlung mit mehreren hunderttausend Menschen vorzustellen!

BRUNAUX: So viele waren es in der Praxis sicher nicht. Sklaven galten ohnehin nicht als Bürger, und Frauen waren nicht zugelassen. Vielleicht war das Recht auf politische Teilhabe zudem an einen gewissen Mindestbesitz gebunden wie in Rom. Außerdem wurde das Territorium einer Volksgruppe in bis zu fünf »Länder« untergliedert. Die hatten wieder eigene Versammlungen mit maximal 30 000 Menschen. Archäologen haben vor einigen Jahren einen elf Hektar großen, umzäunten Platz entdeckt, der mutmaßlich solchen »Meetings« diente. Zum Vergleich: Die Saeptra Julia auf dem Marsfeld in Rom fasste 70 000 Personen, die dort zwei oder drei Tage lang Wahlen abhielten.

Gab es bei manchen Stämmen nicht auch eine Art Senat wie in Rom?

BRUNAUX: Das ist richtig, die Häduer gehörten laut Cäsar dazu. Deren Senat setzte sich aus Repräsentanten der aristokratischen Familien zusammen. Die Bürgerversammlung kam um das 4. Jahrhundert v. Chr. als zweite Institution dazu, wobei dieser Zeitpunkt je nach Volksstamm variiert. Sie ging vermutlich aus einer Versammlung der Krieger hervor und betraf daher zunächst rein militärische Fragen. Da die Gallier den Kampf auch untereinander nicht scheuten, wurde diese Kompetenz auf zivile Streitigkeiten ausgedehnt. Ab dem 3. Jahrhundert v. Chr. oblagen juristische Angelegenheiten dann weitgehend den Druiden.

Laut Cäsar gab es aber auch noch Könige, insgesamt bot Gallien also kein einheitliches politisches Bild?

BRUNAUX: Der Wahrheitsgehalt dieser Behauptung lässt sich schwer einschätzen, schließlich brauchte der römische Feldherr gute Argumente, um Vertreter seiner Verbündeten an die Spitze unterworfenen Stämme zu setzen. Meines Erachtens handelte es sich aber nicht um Tyrannen, sondern um Aristokraten, die von ihren Standesgenossen gewählt und mit einer eingeschränkten Macht ausgestattet wurden. Was die Demokratie nach griechischem Vorbild angeht, waren manche Stämme eben weiter als andere. So verfügten die Häduer sogar über eine richtige Verfassung und eine Sammlung von Gesetzen. Sie wählten zwei Magistrate. Der eine war mit allen zivilen, der andere mit allen militärischen Aufgaben betraut. Und vorbeugend gegen Machtmissbrauch waren die Ämter auf ein Jahr befristet.

Ohne die römische Eroberung hätte sich Gallien also vielleicht zu einem demokratischen Staat entwickelt?

BRUNAUX: Es ist müßig, über solche Fragen zu spekulieren. Ich glaube aber: Der Grund, warum sich Cäsar nicht ein bereits geschlossener Verband präsentierte, war gerade die dort etablierte Form der Demokratie. Weil die Bürger ihre Verantwortung nicht gewählten Repräsentanten übertrugen, sondern in wichtigen Angelegenheiten selbst abstimmten, fokussierte sich alle politische Macht in den Versammlungen – und deren Größe war zwangsläufig begrenzt ~

Das Gespräch führte **Guillaume Jacquemont**, Wissenschaftsjournalist bei der französischen Zeitschrift »Pour la Science«.



SIEDLUNGSFORSCHUNG

Anatomie einer Keltenstadt

Festungsmauern und eine städtisch anmutende Aufteilung der umschlossenen Siedlungsfläche kennzeichnen die auf Anhöhen gelegenen spätkeltischen »oppida«. Laut den Ausgrabungen in Bibracte, dem Hauptort der Häduer, waren die gipfelnahen Bereiche dem Kult vorbehalten.

Von Fabrice Bessière

Napoleon III. war ein Bewunderer Gaius Julius Cäsars. Dessen Bericht »De Bello Gallico« veranlasste den französischen Kaiser, Ausgrabungen auf dem Mont Beuvray zu veranlassen. Dort vermutete man das vom römischen Feldherrn als »oppidum« beschriebene Bibracte, den Hauptort der Häduer. Die erste Grabungsphase dauerte von 1864 bis zum Ersten Weltkrieg. In den 1970er Jahren wurde die Arbeit von verschiedenen internationalen Teams in Zusammenarbeit mit dem Europäischen Zentrum für Archäologie wieder aufgenommen, bald ergänzt durch die Erforschung weiterer urbaner Siedlungen im gallischen Raum.

Heute ergibt sich für den keltischen Raum das Bild einer in der zweiten Hälfte des 2. Jahrhunderts v. Chr. gewachsenen Bevölkerung, aber auch tief greifender Veränderungen in der politischen, wirtschaftlichen und sozialen Organisation der Stämme. Anders lässt sich nicht verstehen, dass bis zu meh-

rere hundert Hektar große Siedlungen mit einer Festungsmauer umgeben wurden. Einige dieser von den Römern als »oppida« bezeichneten Orte existierten dort schon seit der Bronzezeit, andere waren Neugründungen – und wurden nur wenige Jahrzehnte später wieder aufgegeben. Manche »oppida« waren offensichtlich dicht besiedelt, darunter Bibracte, während andere nur wenige Einwohner besaßen wie die Festung auf dem Mont Vully in der Schweiz.

Bibracte profitierte von seiner Lage nahe den Flüssen Rhone, Loire und Allier. Es war eine Drehscheibe für Händler, die von Italien über die Saône zu Loire, Seine oder zum Rhein zogen. Das Gebiet der Häduer lag zudem inmitten des Einflusssbereichs eines Stammesbunds, der sich von Lyon bis nach Belgien erstreckte. Er verpflichtete Segusiaven, Ambarer, Biturigen, Senonen, Parisier, Bellovaker und branovicische Aulerker durch Verträge zu gegenseitigem Schutz und Hilfeleistungen. So entstand nicht nur ein komplexes politisches und diplomatisches System, sondern auch eine Art Wirtschaftszone, die es den Mitgliedern ermöglichte, mit mächtigen Stämmen wie den Avernern in Konkurrenz zu treten. »Oppida« wie Bibracte waren Zentralorte, welche die gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Landschaft Galliens strukturierten.

Auch mit den Römern unterhielten die Häduer enge Beziehungen. Cäsar, der »De Bello Gallico« in Bibracte niederschrieb, bezeichnete sie als »fratres consanguineique«, also als Blutsbrüder. Den Titel durften sonst nur die Einwohner Ilions führen, da die Römer sich auf den trojanischen Prinzen Äneas zurückführten. Cäsar überlieferte auch eine detaillierte Beschreibung der »gallischen Mauern« am Beispiel des von ihm belagerten Avaricum (des heutigen Bourges). »Murus gallicus« ist im Archäologenjargon ein bestimmter Typus von Festungsanlage, den sie auf zahlreichen Fundplätzen nachweisen können, etwa in Murcens im Département

AUF EINEN BLICK

ZENTREN MIT URBANEM CHARAKTER

1 Im 2. Jahrhundert v. Chr. entstehen in der keltischen Welt **befestigte Siedlungen**, so genannte »oppida«. Meist wurden sie in geschützter Lage gegründet, mitunter am Ort eines bereits bestehenden Heiligtums.

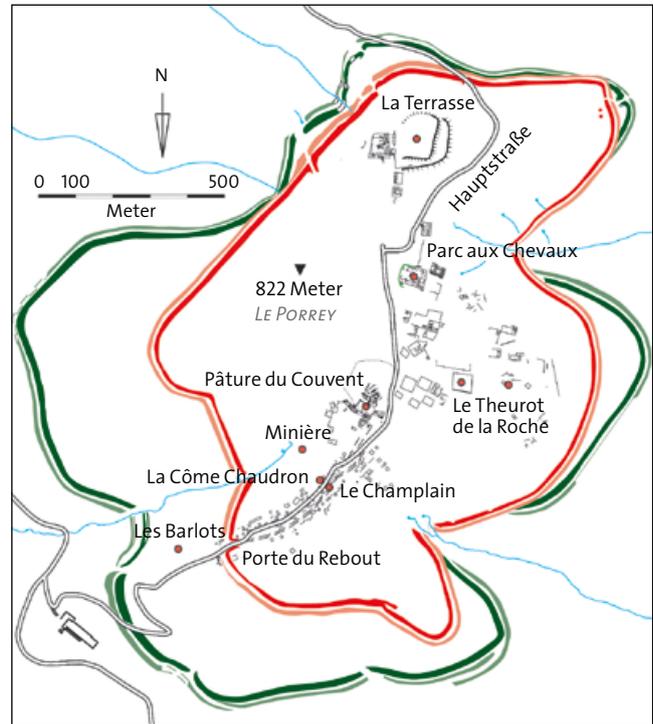
2 Der Volksstamm der Häduer errichtete **Bibracte** als seinen **Zentralort** auf dem Mont Beuvray. Schon im 19. Jahrhundert begannen erste archäologische Grabungen; seit gut 40 Jahren arbeiten dort internationale Teams.

3 Bibracte zeichnet sich durch seine **mächtige Befestigungsanlage** aus, die den Beschreibungen Julius Cäsars entspricht. Die Forscher entdecken zudem eine städtische Planung, welche das »oppidum« in Versammlungsorte, Kultplätze, Handwerker- und Wohnviertel unterteilt.

Lot, in »Camp de la Bure« in den Vogesen und im süddeutschen Manching. Die Bautechniken variierten je nach Region; Cäsar beschrieb offenbar einen speziellen Typ, der vor allem in Westeuropa vorkam.

Die in Bibracte frei gelegten Mauerstrukturen bestehen aus senkrechten und horizontalen, miteinander vernagelten Balken (siehe Bild). Solche Gitter überlagern einander in regelmäßigen Abständen. An der mit Steinen verblendeten Außenfassade blieben die Balkenköpfe sichtbar. Auf der Innenseite schütteten die Gallier eine Erdrampe auf. Cäsar schrieb dazu: »Durch das abwechselnde Anbringen von Hölzern und Felsgestein, die in geraden Reihen geschichtet sind, wirkt das Bauwerk nicht hässlich und besitzt für die Verteidi-

Wie die meisten »oppida« lag Bibracte strategisch günstig auf einer Anhöhe und wurde zudem von mindestens zwei Mauerungen umfasst (rot und grün im Plan). Auf einer Länge von mehr als fünf Kilometern haben Archäologen die Konstruktionstechnik nachgewiesen: ein Gitternetz aus Balken, mit Steinen verfüllt. Grabungen haben zudem einige Siedlungsbereiche zu Tage gebracht und ihre Funktion geklärt.



gung höchste Eignung, weil die Steine Schutz vor dem Feuer gewähren und das Holzwerk gegen den Rammbock Widerstand leistet und weil zudem noch Querhölzer das Werk nach innen verstärken, so dass es weder durchbrochen noch auseinandergezerrt werden kann.«

Die Grabungen belegen, dass die mindestens fünf Meter hohe Festungsanlage mehrfach verändert wurde. So umschloss die ältere, vermutlich mehr als sieben Kilometer lange Mauer eine Fläche von ungefähr 200 Hektar. Ihr Verlauf passte sich der Geländeform an und wurde nur durch Wasserläufe unterbrochen, die an den Hängen des Mont Beuvray hinabflossen. Im 2. Jahrhundert v. Chr. schrumpfte das »oppidum« wohl, denn die Umfriedung schützte nur noch 135 Hektar. Tore sicherten den Zugang, darunter das Haupttor »Porte du Rebout« mit einer Breite von 20 Metern. Zudem gab es geheime Pforten für eine schnelle Flucht.

Korridore für die Wähler

Cäsar zufolge waren Bürgerversammlungen das Fundament des gallischen politischen Systems (siehe den Beitrag ab S. 74). Sie fanden nach strikten Regeln und unter der Leitung von Druiden regelmäßig oder zu einem außerordentlichen Anlass in den Zentralorten statt. Auch stammesübergreifende Angelegenheiten wurden bei solchen Zusammenkünften verhandelt und Wahlen abgehalten. Bei Grabungen auf dem Titelberg in Luxemburg kam ein geeigneter Platz zum Vorschein. Er war durch einen Graben vom »oppidum« abgetrennt. Wie man es aus dem mediterranen Raum kennt, bildeten Palisaden Korridore, um den Durchgang bei der Stimmabgabe zu kanalisieren. Der Fundplatz von Gournay-sur-Arondes im Département Oise zeigt ähnliche Strukturen.

In Bibracte fehlen derart eindeutige Hinweise auf Versammlungsorte, aber die so genannte Terrasse (»La Terrasse«), eine unbebaute Fläche von ungefähr einem Hektar, die durch einen Abhang und einen Graben begrenzt wurde, könnte ein solcher Platz gewesen sein. Eine weitere unbebaute Fläche enthielt der »Parc aux Chevaux«; sie war einst von einer Mauer umschlossen, die sich zumindest auf einer Seite über 100 Meter zurückverfolgen lässt. Bislang fehlen aber noch Funde, die auf Wahlen, politische oder administrative Handlungen hinweisen.

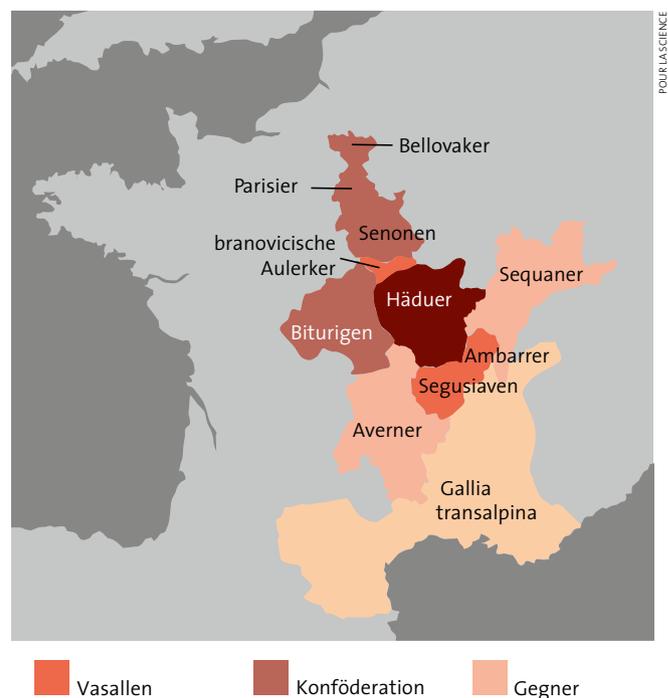
Öffentliche Bereiche gingen in der Antike gern mit Kultplätzen einher. So markiert ein Tempel auf dem Titelberg aus der Zeit, da Gallien römische Provinz war, den Standort eines größeren Heiligtums, das mit dem erwähnten Versammlungsort verbunden war. Das ist verständlich, denn

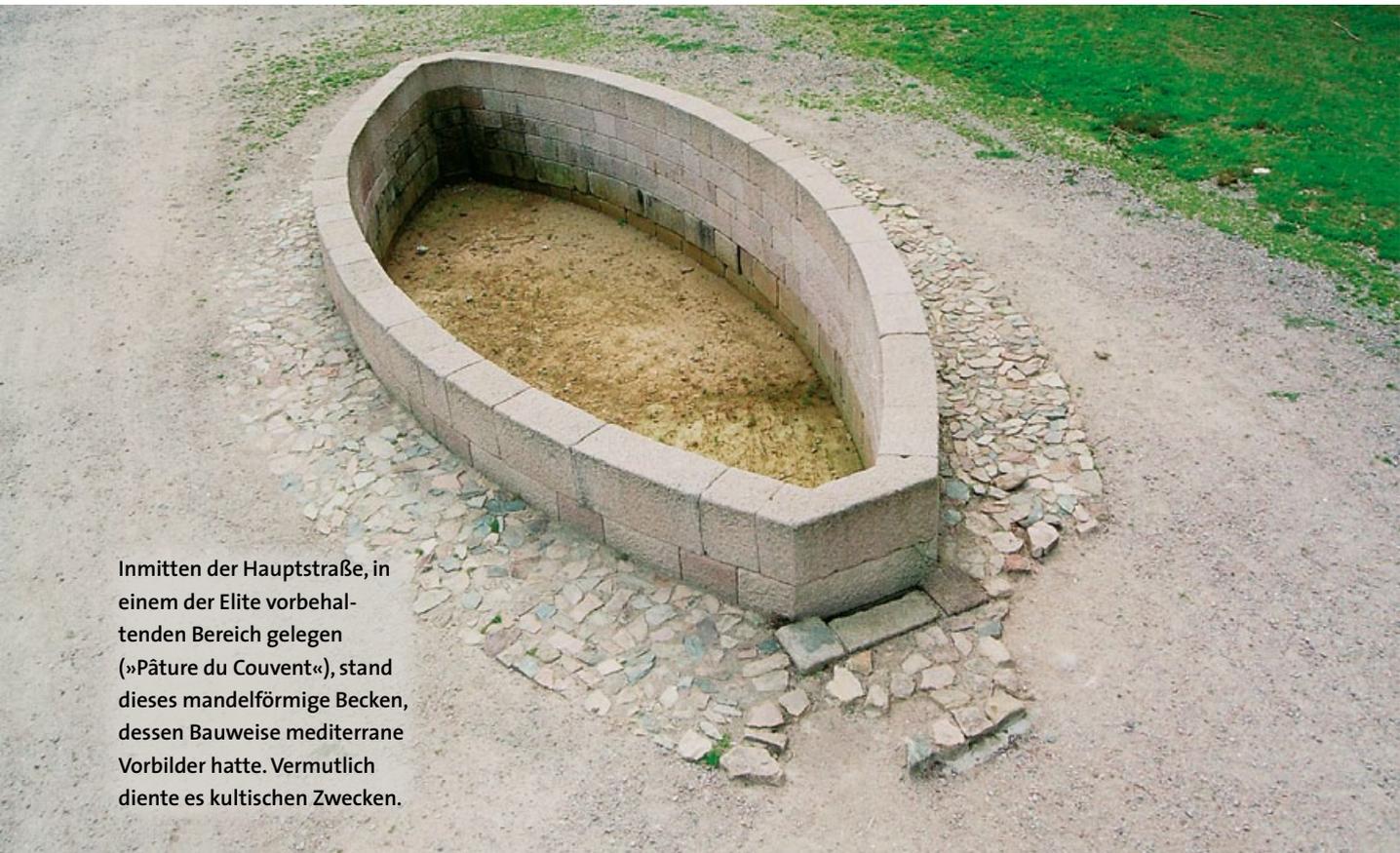
Der Volksstamm der Häduer, der Bibracte im 2. Jahrhundert v. Chr. erbaute, war Teil eines komplexen politischen Netzwerks. So befanden sich einige kleinere Nachbarvölker in einem Abhängigkeitsverhältnis, mit anderen bildeten die Häduer eine Konföderation. Die angrenzenden Gebiete der Sequaner und Averner waren Feindesland.

kultische Aktivitäten hatten gesellschaftliche Funktionen. In Manching etwa lassen sich in vier heiligen Bezirken Riten nachweisen, denen man sich im täglichen Leben unterzog. Sie unterstreichen die enge Verbindung zwischen Religion, privatem und gesellschaftlichem Leben. Die Errichtung eines Kultplatzes war zumindest in manchen Fällen Teil des Gründungsakts eines »oppidum«. Die Bedeutung der Religion macht Závist deutlich, eine keltische Siedlung in der heutigen Tschechischen Republik: Sie entstand den archäologischen Befunden nach auf dem Boden eines bereits existierenden großen Heiligtums.

In Bibracte konnte bislang noch kein Kultplatz nachgewiesen werden. Doch in der Nähe der Terrasse stand ein gallorömischer Tempel, später eine christliche Kapelle – was die Vermutung bestätigt, dass der Ort eine sakrale Bedeutung hatte, denn eine solche »Umnutzung« entsprach der frühmittelalterlichen Praxis. Auch im Bereich des Gipfels dürften religiöse Aktivitäten stattgefunden haben.

Ein großes Becken aus rotem Granit auf der »Pâtüre du Couvent« (siehe das Foto rechts) und Säulengänge unterstreichen die Bedeutung des nördlichen Bereichs. Die Funktion des Beckens ist noch unklar, seine Ausrichtung weist aber auf den Horizontpunkt des Sonnenaufgangs zur Wintersonnenwende und auf den ihres Untergangs zur Sommersonnenwende, was wieder eine kultische Bedeutung nahelegt. In römischer Zeit um 50 bis 20 v. Chr. stand in diesem Stadtteil eine Basilika, wie Grundriss und Säulenfragmente belegen. Vor diesem repräsentativen Gebäude lag ein Platz. Sondagen ergaben, dass er von einem Säulengang gesäumt wurde, zu dem sich kleinere Straßengeschäfte öffneten. Insgesamt dürfte es sich also bei der gesamten Anlage um ein römisches Forum gehandelt haben – es wäre das älteste nördlich der Alpen.





Inmitten der Hauptstraße, in einem der Elite vorbehaltenen Bereich gelegen (»Pâtüre du Couvent«), stand dieses mandelförmige Becken, dessen Bauweise mediterrane Vorbilder hatte. Vermutlich diente es kultischen Zwecken.

ANTOINETTE MAILLIER, BIBRACTE. ABDRUCK MIT FREI. GEN. VON BIBRACTE

Freilich interessieren sich Archäologen nicht nur für die Lebenswelt der keltischen Elite, sondern auch für die des einfachen Volks. Sie haben in den letzten Jahren gewisse Muster erkannt, die zweifellos schon beim Entstehen der Orte zu Grunde lagen. Zum Beispiel grenzten in Variscourt im Département Aisne parallele Straßen die einzelnen Wohnviertel ein und führten auf einen Platz zu. Auch in Manching bildeten Wege ein Raster, in dem Häuserblöcke errichtet wurden, vergleichbar dem Schachbrettmuster der »insulae« in römischen Städten. Allerdings war dies nicht überall Praxis: Auf dem Titelberg entwickelte sich die Siedlung auf beiden Seiten der Hauptstraße.

Auch Bibracte wurde wohl durch eine Hauptstraße geteilt, an deren Ende die zwei große Tore standen (siehe Grabungsplan S. 77). Einige Häuserblöcke wurden aber quer dazu durch Nebenstraßen gegliedert (in den Siedlungsbereichen »Le Champlain« und »La Côme Chaudron«).

Das städtische Gefüge verdichtete sich auf mindestens drei Terrassen südlich der Hauptstraße, von der »Porte du Rebut« bis zum Gebiet »Pâtüre du Couvent«. Dicht an dicht lebten dort spezialisierte Handwerker, in dem Viertel »La Côme Chaudron« beispielsweise Bronzegießer, Emailleure und Schmiede. Nicht von ungefähr: Eine Erzlagerstätte erreichte dort die Oberfläche und wurde ausgebeutet. Noch weiter südlich standen wahrscheinlich Wohnhäuser. Die südlichste Terrasse diente zweifellos gesellschaftlichen Aktivitäten.

Jedes Jahr liefern archäologische Teams neue Informationen zu Bibracte, den Häduern und der gallischen Zivilisation. Auch nach der Eroberung Galliens 52 v. Chr. blieb die Siedlung bestehen – ein Indiz für ihre Bedeutung als Zentralort für die Provinzverwaltung. Sie entwickelte sich bis in augusteische Zeit weiter, wie zahlreiche römische Gebäude und ein Forum belegen. Erst 150 Jahre später gaben die Bewohner ihre Stadt auf und gründeten Augustodunum, das heutige Autun. ~

DER AUTOR

Fabrice Bessièr ist Koordinator des Forschungsprogramms von Bibracte und stellvertretender Direktor des Europäischen Zentrums für Archäologie in Glux-en-Glenne.

QUELLEN

Goudineau, C. (Hg.): Religion et société en Gaule. Édition Errance, collection »Pôle Archéologique du Département du Rhône«, Paris 2006

von Nicolai, C.: Die keltische Version der antiken Stadt. Die Oppida. In: Archäologisches Landesmuseum Baden-Württemberg, Landesmuseum Württemberg und Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hg.): Die Welt der Kelten. Zentren der Macht – Kostbarkeiten der Kunst. Jan Thorbecke, Ostfildern 2012, S. 357–371

Romero, A.M.: Bibracte: archéologie d'une ville gauloise, Centre Archéologique Européen, Glux-en-Glenne 2006

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1207585

Warum Katzen Delfine umbringen

Krankheitserreger des Menschen und seiner Tiere gefährden in erschreckendem Maß das Leben im Meer. Vor allem Wale, Robben und Otter erliegen den ungewohnten Infektionen – oft sogar in großer Zahl.

Von Christopher Solomon

Für die Tierärztin und Wildtierpathologin Melissa A. Miller vom kalifornischen Marine Wildlife Veterinary Care and Research Center in Santa Cruz begann das Drama mit dem Anruf eines Biologen: Er hatte einen toten Seeotter gefunden. Wenige Tage später meldete er den nächsten Otter. Bald häuften sich solche Anrufe. »In der heißesten Phase erhielten wir davon vier am Tag«, erinnert sich Miller an den April 2004. Schließlich waren es über 40 tote und sterbende Kalifornische Seeotter, die damals an der Küste angespült wurden. Jene Unterart des Meer- oder Seeotters, *Emhydra lutris nereis*, ist ohnehin stark gefährdet. Obwohl die Population seit Jahrzehnten unter Schutz steht, erholt sie sich nicht und umfasst weniger als 2800 Individuen.

Aber woran waren all die aufgefundenen Tiere verendet? Erst akribische Untersuchungen brachten die Wahrheit ans Licht. Das erste Indiz: Viele der Otter litten kurz vor dem Tod an heftigen Krampfanfällen. Die Autopsien offenbarten dann tatsächlich große Hirnschäden. Bei genauerem Hinsehen wies alles auf schwere Hirnentzündungen hin – bloß weswegen?

AUF EINEN BLICK

UNGEAHNTE MEERESVERSCHMUTZUNG

1 Erst seit wenigen Jahren wird klar: **Pathogene Keime des Menschen**, von Haustieren und Kulturfolgern erobert die Meere. Zahlreiche Meeressäuger erliegen den »**Pollutagenen**« oder werden durch sie geschwächt.

2 Viele der bei Meerestieren gefundenen Erreger weisen **Antibiotikaresistenzen** auf, oft auch mehrfache und gefürchtete, die auf gebräuchliche Medikamente zurückgehen. Zudem sind Robben oder Wale Brutstätten für **neue gefährliche Erreger**.

3 Nur eine gute Reinigung und **Filterung von Abwässern**, die in Kanäle, Flüsse und ins Meer geleitet werden, – auch mittels Grünstreifen und Feuchtgebieten als Pufferzonen, etwa zu Weideflächen – kann die Bedrohung verringern.



In weiteren aufwändigen Untersuchungen erkannten Miller und ihre Kollegen endlich den Schuldigen: den parasitischen Einzeller *Sarcocystis neurona*, ein ferner Verwandter des Malariaerregers. Sein Haupt- und so genannter Endwirt ist das Opossum (siehe Bild S. 83), das selbst nicht daran erkrankt, die Keime aber mit dem Kot ausscheidet, und zwar als sehr widerstandsfähige Sporozysten. Genauer gesagt handelt es sich um das Virginia- oder Nordopossum (*Didelphis virginiana*), die einzige in Nordamerika verbreitete Beutelratte. Früher lebte die Art nur im Osten der USA und in Mittelamerika. Sie dehnte aber ihr Verbreitungsgebiet im Gefolge der Besiedlung durch Europäer weit aus und kommt heute selbst an der Pazifikküste vor. Normalerweise nehmen kleinere Säugetiere den Erreger auf, der dann in ihr Muskel- und Nervengewebe gelangt. In Nordamerika sind es allerdings oft auch Pferde. Indem Opossums infizierte Tiere fressen, schließt sich der Kreis.

Wie die Sporozysten überhaupt ins Meer und zu den Ottern gelangten, können die Forscher nur vermuten. Im Spätwinter 2004 hatte es in der Gegend ein schweres Unwetter mit Starkregen gegeben. Wahrscheinlich wurde der Parasit dabei massenhaft in die Flüsse und schließlich ins Meer verfrachtet, wo filtrierende Scheidenmuscheln ihn aufnahmen, eine Lieblingsspeise der Seeotter.

Erstmals hatten Wissenschaftler als Ursache eines Massensterbens von Meeressäugtieren einen Parasiten ausgemacht, der nicht in ihren Lebensraum gehört. Denn dass krankheitserregende Viren vom Land ins Meer gelangen und dort Tiere infizieren können, war bereits bekannt. Zum Bei-

Delfine und viele andere Meeressäuger leiden erheblich unter Krankheitskeimen, die vom Land in Gewässer gelangen. Auch der Toxoplasmoseeerreger von Katzen gehört dazu.



DREAMSTIME / VITALYS-SOKOL



DREAMSTIME / RICHARD GOODRICH

Im Mittelmeer gestrandete Delfine trugen den einzelligen Erreger *Toxoplasma gondii* in sich, den Hauskatzen durch Kot übertragen. Er übersteht harte Umweltbedingungen jahrelang.



NASA, KSC

spiel gingen nachweislich tausende verendete Robben in den USA auf das Konto des Erregers der Hundestaupe. Das Seehundsterben an den norddeutschen Küsten in den Jahren 1988 und 2002 war allerdings von einem klassischen Seehundvirus verursacht.

Dass Tiere Menschen infizieren können, ist bekannt, man denke nur an Tollwut. Wir müssen uns aber klarmachen, dass Keime leicht auch umgekehrt weitergegeben werden. Hier verzeichnen Meeresforscher seit ungefähr zehn Jahren einen alarmierenden Trend: Zunehmend erkrankt die marine Tierwelt an Erregern des Menschen sowie seiner Haus- und Nutztiere, jedoch auch von Kulturfolgerarten wie dem Virginiaopossum. Für die Verseuchung der Umwelt mit unpassenden Erregern, Chemikalien und anderem prägen Experten vor Kurzem den englischen Begriff »Pollutagene« (polluting pathogens, umweltverschmutzende Pathogene). Als solche bezeichnen sie somit unter anderem Bakterien, Pilze und Parasiten, die eigentlich vom Land stammen, aber vertrackerweise in die Meere gelangen. Dergleichen geschieht nach neueren Erkenntnissen weltweit – zum Schaden zahlreicher Meeressäuger, von Seelöwen bis zu Schweinswalen.

Viele der Vorkommnisse sind schwer zu glauben. Da ließen Wissenschaftler 2010 verlauten, ein neugeborener Schwertwal oder Orca, der in Kalifornien tot antrieb, sei höchstwahrscheinlich einem besonderen Stamm von *Salmonella* Newport (einer Version von *S. enterica*) erlegen – obwohl solche Salmonellen normalerweise Vögel und Nutztiere infizieren und diese Wale meist Abstand zur Küste halten. Noch merkwürdiger klingt, dass Große Tümmler im Atlantik vor South Carolina mit einem gegen das Antibiotikum Methicillin resistenten Stamm von *Staphylococcus aureus* infiziert sind.

Anscheinend gefährden unsere Erreger zudem nicht nur die Säugetiere im Meer. *Serratia marcescens* ist ein für den Menschen meist harmloser Keim, der allerdings bei immunschwachen Personen schwere Krankheiten wie Meningitis hervorrufen kann. Als in der Karibik 90 Prozent der Elchgeweihkorallen, der dort vorherrschenden Steinkorallenart, abstarben, ging dies auf das Konto jenes Bakteriums. Nachweislich stammte es aus menschlichen Abwässern. Genetische

Studien von 2011 zeigten zum ersten Mal, dass sogar wirbellose Meeresorganismen vor Pathogenen des Menschen nicht sicher sind.

Für die meisten Forscher waren diese Zusammenhänge völlig neu. Unklar ist weiterhin, wie lange solche Einträge von Pathogenen ins Meer wohl schon existieren, welches Ausmaß sie haben und wie ernst man die Auswirkungen nehmen muss. Nach Ansicht mancher Fachleute gibt es beim angeschlagenen Zustand der Ozeane Dringlicheres zu beachten und zu bekämpfen, zum Beispiel ihre Versauerung.

Dagegen steht aber die Befürchtung, dass die ungewohnten Pathogene die verschiedenartigsten Organismen bedrohen könnten, je mehr die Barriere zum Land hin schwindet. Sogar uns selbst könnte diese Entwicklung schaden, wenn die Erreger nämlich in der neuen Umgebung Mutationen hervorbringen und dann auf uns zurückschlagen. Gelegenheiten dazu gibt es genug: Viele Menschen leben am und vom Meer, verbringen Urlaube an Küsten oder verzehren Meeresfrüchte.

Toxoplasmosekeime allgegenwärtig

Der wohl bestuntersuchte Erreger bei Landtieren, der im Meer Schaden anrichtet, dürfte der Einzeller *Toxoplasma gondii* sein, ein mit dem eingangs erwähnten *Sarcocystis neurona* verwandter Parasit. Er ist weltweit verbreitet. Katzen fungieren als Endwirte, als Zwischenwirte dienen alle möglichen Wirbeltiere. Ein Großteil der Menschen macht irgendwann eine meist nicht oder kaum bemerkte Infektion durch, Kinder im Mutterleib kann eine Toxoplasmose jedoch schwer schädigen. Dieses vertrackte Pathogen findet sich heute auch im Meer überall, ob bei den Seeottern Kaliforniens, bei tot angespülten Delfinen im Mittelmeer oder bei den extrem bedrohten Mönchsrobben Hawaiis. Der Veterinär Stephen Raverty vom Animal Health Center der University of British Columbia, einer der führenden Forscher über Pollutagene im Meer, spricht von einer geradezu kosmopolitischen Erscheinung.

Wieso aber können ausgerechnet Hauskatzen daran Schuld sein, dass es etwa den heute seltenen Seebären von

Als vor einigen Jahren viele Kalifornische Seeotter (unten) eingingen, war der Einzeller *Sarcocystis neurona* Schuld. Endwirt und Ausscheider dieses Erregers sind Virginiaopossums, die sich im Gefolge des Menschen stark ausgebreitet haben.



GETTY IMAGES / FLICKR / MARC SHANDRO



GETTY IMAGES / PHOTO RESEARCHERS / STEVE UND DAVE MASLOWSKI

Guadalupe schlecht geht? Schließlich liegt die kleine Vulkaninsel des mexikanischen Bundesstaates Baja California weit draußen im Pazifik. Nun: Die Oozysten von *T. gondii*, die Katzen mit ihrem Kot ausscheiden und in denen Sporen stecken, sind enorm widerstandsfähig. Wie der Parasitologe Michael Grigg vom National Institute of Allergy and Infectious Diseases in Bethesda (Maryland) hervorhebt, können bei einem frisch infizierten Tier in nur zehn Tagen 100 Millionen Oozysten ins Freie gelangen. Im Boden oder Abwasser bleiben sie jahrelang am Leben; Salzwasser macht ihnen nichts aus. »Im Labor heben wir die Biester in verdünnter Schwefelsäure auf«, so Grigg. »Da bleiben sie bis zu zehn Jahre lang infektiös.« Im Prinzip genügt zur Infektion eines Meeressäugertiers eine einzige Oozyste, die es mit einer Muschel frisst.

Allerdings sterben befallene Tiere nach Griggs Erfahrung in der Regel nicht sofort an einer Toxoplasmose. Eher entwickelt sich eine chronische schleichende Infektion, die sie schwächt. Kommt dann eine weitere Belastung hinzu, zum Beispiel eine andere Erkrankung oder verunreinigte Abwasser, kann die Toxoplasmose wieder durchbrechen. Über die Hälfte der an Nordamerikas Westküste tot aufgefundenen räuberischen Säugetiere und gut zwei Drittel der Raubvögel sind laut Untersuchungen mit *Toxoplasma gondii* verseucht. Derart hohe Raten hatten die Forscher keinesfalls erwartet.

Augenscheinlich trifft es die Tiere schlimmer, wenn mehrere Pathogene zusammenkommen. Im Jahr 2011 ergab eine Studie an 161 kranken oder toten Meeressäugern von der nordamerikanischen Pazifikküste, dass 42 Prozent von ihnen sowohl mit *T. gondii* als auch mit *S. neurona* infiziert gewesen waren, darunter auch Schweins- und sogar Pottwale.

So dramatisch das alles klingt, lässt es sich doch nur schwer untermauern, ob die Bedrohung tatsächlich aktuell zunimmt, räumt Gibbs ein. Denn Vergleichsdaten stehen nicht zur Verfügung. Sind die Forscher womöglich erst jetzt auf ein schon länger vorhandenes Phänomen aufmerksam geworden? Noch vor gut zehn Jahren wäre es keinem von ihnen eingefallen, bei Meerestieren nach solchen Keimen zu suchen. Seit sie darauf achten, scheinen die Erreger allgegenwärtig. Melissa Miller findet *Toxoplasma gondii* bei 70 Pro-

zent der verendeten Seeotter, und dieser Parasit kann nur von Katzenkot herrühren. Die Forscherin ist davon überzeugt, dass die Verseuchung mit solchen Pollutagen ansteigt. Kürzlich fand sich sogar in der Arktis ein mit *T. gondii* infizierter Belugawal.

In den letzten Jahrzehnten war aufgefallen, wie viele verendete Schwertwale Atemwegserkrankungen gehabt hatten. Daraufhin untersuchten vor einigen Jahren Forscher um den Veterinär J. Pete Schroeder, der heute bei der National Marine Mammal Foundation in San Diego arbeitet, den dünnen Schaumfilm auf dem Wasser im Puget Sound, einer verzweigten, inselreichen Bucht im Norden des US-Bundesstaates Washington bei Seattle. Wenn ein Orca zum Atmen auftaucht und die Luft ausbläst, versprüht er diese Schicht mit seinem so genannten Blas zu einem feinen Nebel – den er anschließend einatmet.

Stressfaktoren zuhauf – und obendrein verdreckte Abwässer

Es gelang den Wissenschaftlern, etwas von dem Blas aufzufangen. Zusätzlich sammelten sie von der Wasseroberfläche Proben ein. Als sie die darin enthaltenen Mikroorganismen im Labor untersuchten, stießen sie auf über 60 Pathogene, die laut Schroeder alle vom Land zu stammen scheinen, darunter wichtige Erreger des Menschen. Die 2009 erschienene Studie listet unter anderem mehrere *Salmonella*-Stämme auf sowie ein seltenes Bakterium, das normalerweise in Jauche und Abwässern vorkommt und bei Menschen Lungenentzündung verursacht; daneben das Bakterium *Clostridium perfringens*, das Lebensmittelvergiftungen hervorruft. »Manches von dem Zeug hatte ich in meiner 40-jährigen Laufbahn als Veterinär noch nie gesehen, nicht einmal davon gehört«, meint Schroeder. Allerdings geben die Forscher den Keimen im Schaumfilm nicht allein die Schuld am Tod der Wale. Denn an der amerikanischen Pazifikküste sind Orcas mittlerweile so vielen Stressfaktoren ausgesetzt, dass ihre Abwehrkraft massiv leidet – angefangen beim Motorenlärm von Kreuzfahrtschiffen bis hin zum Rückgang der Königslachse, ihrer bevorzugten Nahrung.

Aber nicht nur als solche deklarierte Schadstoffe sind für die Tierwelt in den Meeren vielerorts inzwischen bedenklich, sondern auch in erheblichem Maß mit Abwässern eingespülte Pharmaka – darunter häufig Östrogene aus Antibabypillen – und ganz gewöhnliche Aufputzmittel wie Koffein. So beobachteten kürzlich Forscher der Umeå-Universität in Schweden, dass Flussbarsche den Schwarm verlassen und für sich allein herumschwimmen, wenn dem Wasser der angstlösende Wirkstoff Oxazepam zugesetzt wird, ein gebräuchliches Beruhigungs- und Schlafmittel. Letztlich liefern sich die auch in der Ostsee lebenden Fische damit Räubern aus, vor denen sie im Schwarm viel sicherer sind, so das Fazit der im Februar 2013 erschienenen Studie.

Ein besonderes Problem sind gegen Antibiotika resistente Keime. Bei Meerestieren haben sie ein erschreckendes Ausmaß erreicht und könnten darum auf Menschen zurück schlagen. Beispielweise hatten vor einigen Jahren Wissenschaftler der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts zusammen mit anderen Forschern in einer umfangreichen Studie 370 Tiere, die an der ostamerikanischen Küste gestrandet oder tot angetrieben worden waren, auf Bakterien untersucht. Das Einzugsgebiet reichte von Virginia bis hoch nach Kanada. Bei drei von vier der Kadaver fand sich mindestens ein Erreger mit einer Antibiotikaresistenz. 27 Prozent der Tiere wiesen sogar Bakterien auf, die gegen wenigstens fünf Antibiotika gefeit waren.

Nachdenklich sollte machen, dass die meisten dieser Keime auch bei Menschen auftreten. Eine Sattelrobbe, erzählt die Leiterin der Studie Andrea Bogomolni, beherbergte Erreger, die gegen 13 von 16 getesteten Antibiotika resistent waren, darunter auch häufig bei Nutz- und Haustieren eingesetzte Wirkstoffe wie Gentamicin und Enrofloxacin. Selbst Haie vor den Küsten von Belize und Louisiana enthalten resistente Bakterien. Und Stephen Raverty entdeckte im Darmtrakt toter Seehunde, die weit vor der amerikanischen Pazifikküste gelebt hatten, *Escherichia-coli*- und *Enterococcus*-Bakterien mit Resistenzen gegen alle acht häufig bei Nutztieren eingesetzten Antibiotika, die sein Team prüfte. »Dieses Ausmaß findet sich bei den Bakterien in Nutztieren nicht«, ist Raverty's Kommentar dazu.

Solche Befunde zu bewerten, fällt nicht leicht, denn es gibt auch Mikroben mit natürlichen Resistenzen. Zudem fehlen ältere Vergleichsdaten zu den neuen Untersuchungen, also Anhaltspunkte für einen »Normalzustand«, wie Bogomolni sich ausdrückt. Trotzdem haben die Forscher den Verdacht, dass etwas ganz und gar nicht mehr stimmt. Vielleicht kom-

men die Meerestiere in Berührung mit ungenügend gereinigten Abwässern aus Klärwerken und von großen Tierfarmen, die Antibiotika und dagegen resistente Bakterien enthalten. Wie Raverty als Beispiel erläutert, scheidet ein Mensch das häufig verordnete Antibiotikum Tetracyclin zu 65 bis 75 Prozent unverändert wieder aus. Eine Recherche der US-Nachrichtenagentur Associated Press im Jahr 2008 ergab, dass in den USA tonnenweise Pharmazeutika von Privathaushalten, Krankenhäusern, Pflegeeinrichtungen und so weiter ins Abwasser gelangen. Wegen ungenügender Aufbereitung weist das Trinkwasser von wenigstens 46 Millionen US-Bürgern, also rund 15 Prozent der Bevölkerung, Hormon- und Medikamentenspuren auf, die von Geschlechtshormonen bis zu Antiepileptika reichen. Da braucht man sich nicht zu wundern, wenn Rückstände in die Ozeane gelangen. Gefährlich kann das werden, falls jemand mit einer Wunde im Meer badet oder beim Schwimmen Wasser schluckt und sich dabei mit einem resistenten Erreger infiziert.

Wale und Robben als Brutstätten für neue Erreger

Meeressäuger stellen sogar regelrechte Brut- und Zuchtstätten für Erreger dar. Insbesondere Viren könnten sich in ihnen vermehren. Sie mutieren dabei oft rasant, was sie mitunter gefährlich verändert. Im Jahr 2010 entdeckten Forscher vom Hubbs-SeaWorld Research Institute in San Diego bei verschiedenen Meeressäugern eine besondere Form so genannter Astroviren. Die sternförmigen Viren sind für viele Durchfallerkrankungen vor allem bei kleineren Kindern und schwachen Erwachsenen verantwortlich. In diesem Fall spricht manches dafür, dass aus Genen von menschlichen und marinen Viren ein neuartiger Erreger entstanden ist.

Zwar möchte Rebecca Rivera, die an den Forschungen teilnahm, die Gefahr für den Menschen nicht dramatisieren, denn das Virus macht gegenwärtig offenbar keine Anstalten, an Land zu gehen. Aber sie betont doch, dass angesichts solcher Vorgänge unliebsame Überraschungen von Seiten der Meeresbewohner nicht völlig auszuschließen sind. Beispielsweise starben 2011 bei Neuengland 162 Seehunde an Lungenentzündung. Die Robben hatten sich ein verändertes Vogelgrippevirus mit Mutationen zugezogen, die bekanntermaßen die Ansteckung und Virulenz bei Säugern steigern.

Manche Experten fürchten, dass pathogene Viren des Menschen sozusagen eine Zeit lang im Tierreich untertauchen und dann überraschend mit geballter Kraft zurückkehren. Zu ihnen gehört der niederländische Veterinärmediziner und Virologe Albert Osterhaus von den Universitäten Utrecht und Rotterdam, einer der führenden Grippevirenforscher. Im Jahr 2000 entdeckte er mit seinen Mitarbeitern bei heimischen Seehunden das gleiche Influenza-B-Virus, das ein paar Jahre zuvor unter Menschen zirkuliert war.

Doch es gibt Fachleute, die so viel Besorgnis nicht teilen, wie der Walforscher Michael Moore von der Woods Hole Oceanographic Institution. Für Moore, der an verschiedenen der angesprochenen Studien beteiligt war, sind derzeit ande-



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Artenvielfalt und
Artensterben« finden Sie unter

www.spektrum.de/artenvielfalt



GETTY IMAGES / OLD IMAGES / ANTHONY LEE

An der nordwestlichen Pazifikküste der USA und Kanadas starben mit *Neospora caninum* infizierte Seehunde. Dieser Einzeller, der von Hunden stammt, gelangte vermutlich über Weidevieh ins Meer.



DREAMSTIME / HOTSHOTSWORLDWIDE

re Umweltgefahren viel bedeutsamer. Die Versauerung der Meere etwa mache ihren Bewohnern wesentlich mehr zu schaffen als neue Erreger, und vor allem existiere »das Riesenproblem« der ungewollten Beifänge der Fischerei, wobei unzählige Meeressäuger in Netzen verenden. Auch eine umgekehrte Bedrohung des Menschen durch zurückkehrende Keime sieht er zumindest als Großereignis nicht kommen, und im Übrigen sei das Immunsystem der meisten Leute ziemlich schlagkräftig. Andernfalls, meint Moore, wäre er längst tot – so viele kranke und tote Wale und Robben wie er schon untersucht habe.

Vorerst lässt sich wohl nicht klären, ob marine Pollutagene in letzter Zeit wirklich dramatisch zunehmen oder schon früher häufig waren. Aber es erscheint auf jeden Fall möglich, den Eintrag ins Meer zu verringern, indem man ihnen den Weg dorthin abschneidet. Denn die Zugänge fördern wir, indem wir Pufferzonen beseitigen, also zum Beispiel Feuchtgebiete trockenlegen, die Miller als natürliche Nieren bezeichnet, welche viele unerwünschte Komponenten zurückhalten. Obendrein gelangt über die immer dichter gelegten Straßen, Dränagen und Abwassersysteme vieles direkt in die Flüsse oder sogar gleich ins Meer. Dagegen wird verschmutztes Wasser, das zunächst im Küstengebiet einsickern kann, in natürlichen Prozessen gefiltert und gereinigt, bevor es wieder ins Freie gelangt. So aber nehmen die Erreger ihre Chance wahr und suchen sich im Meer neue Wirtstiere, sagt Grigg.

Indem wir überallhin Tiere mitschleppen, manche wie das Opossum sogar unabsichtlich, beschleunigen wir diese Entwicklung noch. Erst vor ein paar Jahren gerieten Hausrinder ins Visier, als an der nordamerikanischen Westküste von British Columbia und Washington sterbenskranke Seeotter, Seelöwen und Seehunde strandeten. Raverty und Grigg erkannten als Schuldigen den einzelligen Parasiten *Neospora caninum*, den Hunde auf Kühe übertragen und der in der kanadischen Provinz British Columbia als Hauptursache für infektiöse Aborte bei Milchvieh gilt.

Um die Meerestiere zu retten, müsse man nun nicht gleich sämtliche Hauskatzen abschaffen, beschwichtigt Melissa Miller. Eine Studie zeigte, dass es schon genügt, zwi-

schen dem Weideland und dem Uferbereich von Bächen und Flüssen einen Grasstreifen unberührt zu lassen, um die Menge eingespülter Schadstoffe deutlich zu reduzieren. Abwasser sollten zunächst in Feuchtgebieten gefiltert werden, bevor sie in freies Wasser gelangen. Und es gilt unbedingt zu verhindern, dass Jauche Gewässer verschmutzt, die ins Meer führen. Dennoch klingen Millers Forderungen rigoros. Sie findet, Katzen dürften nicht frei herumlaufen und draußen ihren Kot vergraben, solange ein Impfstoff gegen Toxoplasmose fehlt. Wir alle sind gehalten, mit Antibiotika vorsichtiger umzugehen und Restmedikamente keinesfalls über die Toilette zu entsorgen. Leicht sarkastisch meint die Forscherin: »Wen sterbende Seeotter nicht groß kümmern, den alarmiert es vielleicht doch, dass solche Meerestiere neue Erreger heranzüchten, die uns gefährlich werden könnten.«

DER AUTOR



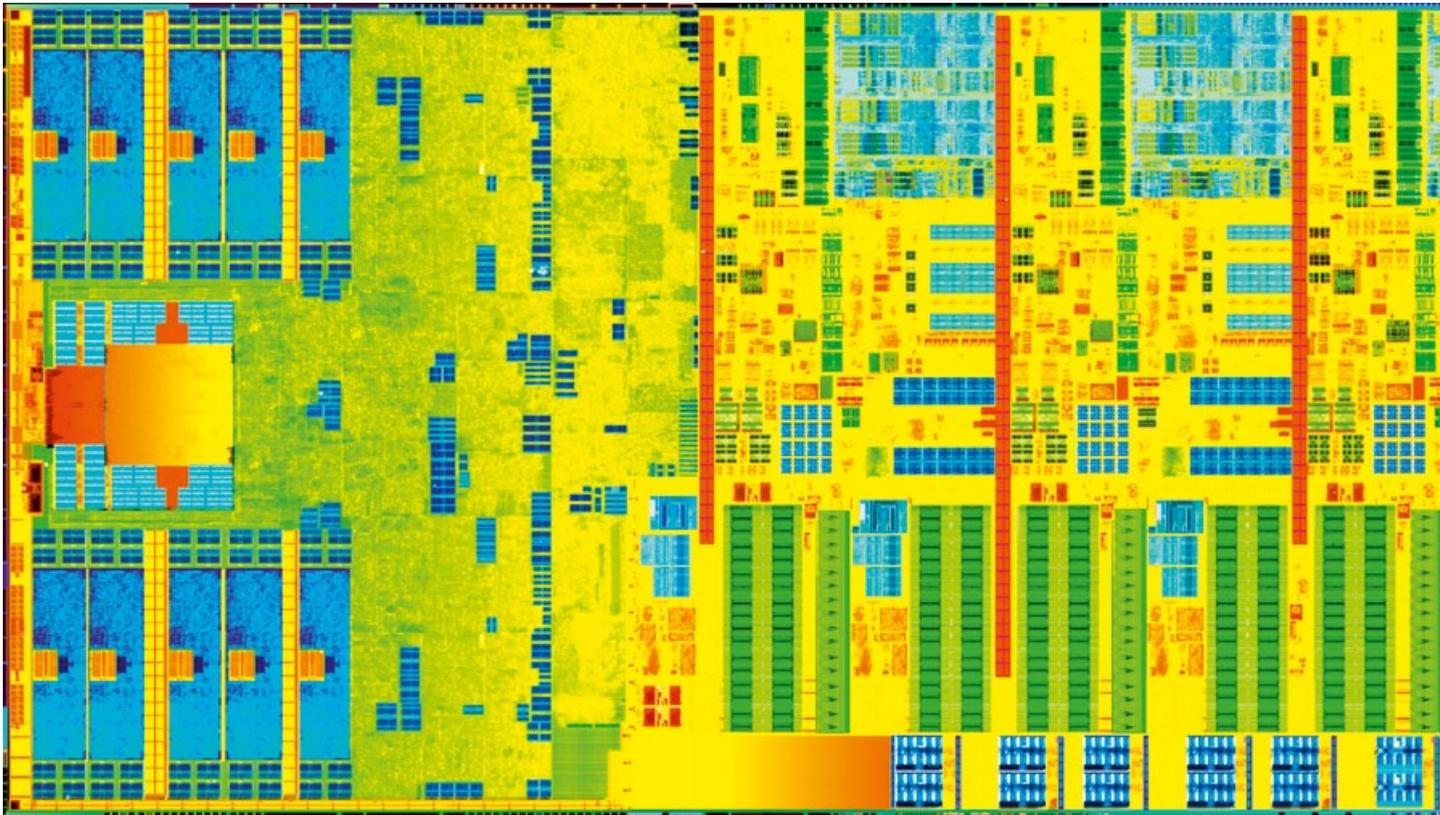
Christopher Solomon schreibt als freiberuflicher Journalist über Umwelt- und Naturthemen.

QUELLEN

- Gibson, A.K. et al.:** Polyparasitism is Associated with Increased Disease Severity in *Toxoplasma gondii*-Infected Marine Sentinel Species. Online in: PLoS Neglected Tropical Diseases 5, e1142, 2011
- Miller, M.A. et al.:** A Protozoal-Associated Epizootic Impacting Marine Wildlife: Mass-Mortality of Southern Sea Otters (*Enhydra lutris nereis*) Due to *Sarcocystis neurona* Infection. In: Veterinary Parasitology 172, S. 183–194, 2010
- Sutherland, K.P. et al.:** Human Pathogen Shown to Cause Disease in the Threatened Elkhorn Coral *Acropora palmata*. Online in: PLoS One 6, e23468, 2011

WEBLINK

Dieser Artikel sowie weiterführende Webseiten im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1207589



COMPUTERTECHNIK

Der Mikroprozessor als Alleskönner

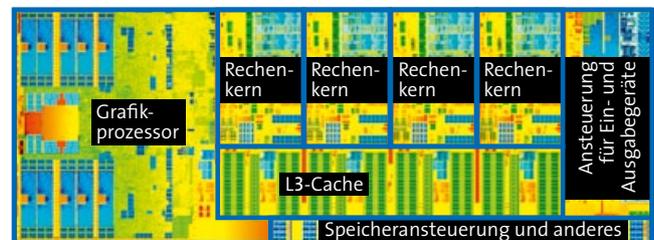
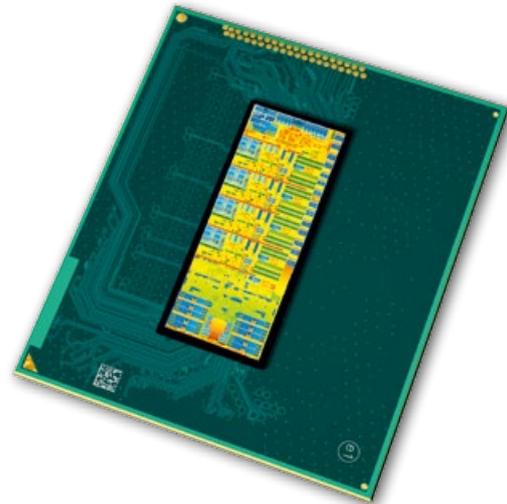
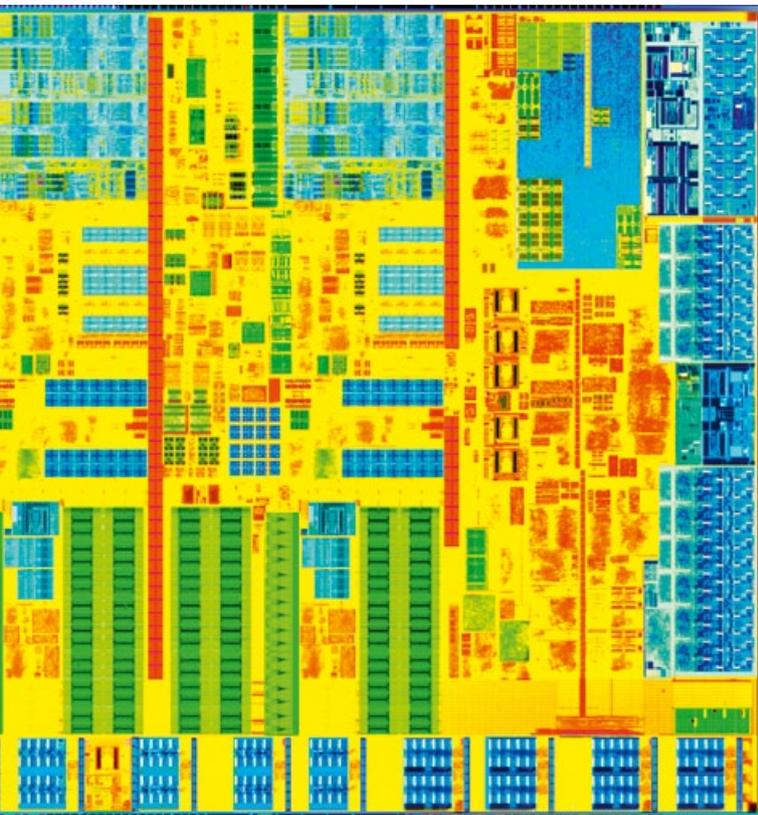
Die Miniaturisierung der Computerchips ist so weit fortgeschritten, dass es schwierig wird, die Milliarden Bauteile mit ihrem Kerngeschäft Rechnen auszulasten. Daher übernimmt der Mikroprozessor Aufgaben anderer Komponenten mit – bis in naher Zukunft ein kompletter Rechner samt Speicher und Ansteuerung der Peripheriegeräte aus einem einzigen Chip bestehen wird.

Von Arndt Bode und Herbert Cornelius

Unter allen Industriezweigen sticht die Mikroprozessorindustrie durch ein einzigartiges Merkmal hervor: Der technische Fortschritt folgt in vorhersehbarer Weise einer empirischen Regel, und das seit nunmehr fast 50 Jahren.

Gordon Moore, einer der Gründer des Mikroprozessor-Herstellers Intel, hatte 1965 in der Zeitschrift »Electronics« die Prognose geäußert, dass sich die Anzahl der Transistoren

auf einem Prozessor dank der Verbesserungen in der Halbleitertechnologie alle zwei Jahre verdoppeln werde. Wenig später stellte sich heraus, dass Moores ursprüngliche Schätzung noch zu vorsichtig war: Ein Verdopplungszeitraum von 18 Monaten statt zwei Jahren kommt der Realität näher. Aber dass die Regel, die inzwischen als mooresches Gesetz bekannt ist, ein halbes Jahrhundert lang gültig bleiben würde, hätte selbst Gordon Moore sich nicht träumen lassen.



Dieser frühe Vertreter der neuen Prozessorfamilie »Haswell« von Intel (offizielle Bezeichnung: »Intel Core Prozessoren der vierten Generation«) nimmt im verkaufsfertigen Bauteil nur eine Teilfläche der Größe 8 mal 22 Millimeter ein (rechts oben). Das hier gezeigte Exemplar wurde an der Oberfläche abgeschliffen und eingefärbt, um die einzelnen Strukturen hervorzuheben. Da es für wenig rechenintensive Anwendungen ausgelegt ist, verfügt es über nur vier Rechenkern (Schema rechts unten). Jeder von ihnen hat die beiden ersten Hierarchiestufen L1 und L2 des schnellen Zwischenspeichers (Cache) exklusiv für sich; die dritte Stufe L3 teilen sich die Kerne mit dem Grafikprozessor. Dieses in bisherigen Computern eigenständige Bauteil ist inzwischen in den Chip integriert, ebenso wie die Ansteuerung für den Arbeitsspeicher und die Ein- und Ausgabegeräte.

Mittlerweile stehen auf dem daumennagelgroßen Plättchen (dem »Mikrochip«) mehrere Milliarden Transistoren zur Verfügung. Damit stehen die Chipdesigner vor einem ungewöhnlichen Problem: dem Überfluss an »Maschinenkapazität«. Um aus dem Material die theoretische Maximalleistung herauszuholen oder diesem Ziel zumindest näherzukommen, will man möglichst alle Bauteile zugleich sinnvoll beschäftigen.

Das aber erweist sich als keineswegs einfach. Nach dem klassischen, auf John von Neumann (1903–1957) zurückgehenden Programmier- und Bauprinzip ist nämlich das Herzstück eines Computers sehr zentralistisch organisiert: Ein einziges Leitwerk holt Daten aus dem Arbeitsspeicher, übergibt sie einem von mehreren Rechenwerken zum Verarbeiten, zum Beispiel zwei Zahlen zum Multiplizieren, legt das Ergebnis im Arbeitsspeicher ab, und so weiter. Da ist es sinnlos, den Chip mit einer Million Multiplizierwerken auszustatten, wenn das Leitwerk zu jedem Zeitpunkt nur eines von ihnen beauftragen kann.

Die Firmen bewältigen diese Herausforderung auf verschiedenen Wegen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 90, nachgedruckt in Spektrum Spezial PMT 3/2013 »Die neue Computer-Ära«):

- Auf einem Chip sitzen mehrere parallel und eigenständig arbeitende Prozessoren (»Rechenkern« oder »Cores«) – und dazu Bauteile, die verhindern, dass sie einander beim Rechnen ins Gehege kommen (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 90).
- Mehr und größere Zwischenspeicher für Daten (Register und Caches) auf dem Chip beschleunigen die Arbeit, da sie schneller ansprechbar sind als ein räumlich entfernter Arbeitsspeicher.
- Der Chip übernimmt zunehmend Aufgaben, die bisher anderen Bauteilen vorbehalten waren, insbesondere die Ansteuerung des Bildschirms (bisher über eine Grafikkarte), die Kommunikation mit Peripheriegeräten, lokalen Netzen und dem Internet sowie die dafür erforderliche Ver- und Entschlüsselung der Daten.

► Um den Energieverbrauch und die damit drohende Überhitzung in Grenzen zu halten, werden Teile des Mikroprozessors, die für die aktuelle Aufgabe gar nicht oder nur geringfügig beschäftigt sind, abgeschaltet beziehungsweise mit verminderter Geschwindigkeit betrieben.

► Mit der Anzahl der Transistoren steigt auch der Aufwand für den Entwurf neuer Prozessorarchitekturen. Daher entwickeln die Hersteller nicht mehr für jede Geräteklasse – vom mobilen Kleingerät bis hin zum Hochleistungsprozessor für Supercomputer – einen eigenen Chip, sondern einen »generischen Kern«, der in einem zweiten Schritt auf die spezielle Anwendung hin optimiert wird.

Rasante Schrumpfkur

Das Mooresche Gesetz erfreut sich vor allem deshalb seiner langen Gültigkeit, weil es nach wie vor gelingt, die einzelnen Komponenten eines Mikroprozessors beständig weiter zu verkleinern. So lag 2011 bei den Produkten von Intel die Breite der kleinsten Bauteile (die »Strukturbreite«) bei 32 Nanometern, ein Jahr später bei 22 Nanometern. Der Hersteller plant weitere Verkleinerungen im Zweijahresrhythmus auf 14, 10 und nur noch 7 Nanometer für 2018. Die Herstellungstechnologien für die letztgenannten Größen befinden sich noch im Forschungsstadium, und die Herausforderungen sind erheblich: In 7 Nanometer passen nur noch etwas mehr als zwölf Elementarzellen eines Siliziumkristalls. In naher Zukunft wird also eine Komponente aus einer recht überschaubaren Anzahl an Atomen bestehen.

Schon die aktuelle Strukturverkleinerung erfordert einige technologische Neuerungen. So wird das bisher als elektrischer Isolator verwendete Siliziumdioxid zunehmend durch

AUF EINEN BLICK

DAUMENNAGELGROSSE COMPUTER

1 Die **Miniaturisierung der Mikrochips** schreitet in unvermindertem Tempo voran. Moderne Bausteine enthalten etliche Milliarden Transistoren.

2 Das Konzept, **mehrere Einzelprozessoren** parallel an derselben Aufgabe arbeiten zu lassen, stößt wegen der Abhängigkeit der Teilaufgaben voneinander an seine Grenzen.

3 Daher übernehmen Mikrochips zunehmend Jobs, die bisher andere Bauteile wie **Speicher** und **Grafikkarte** erledigten.

4 Zum **Stromsparen** kann ein moderner Mikrochip Teile seiner selbst vorübergehend in einen Schlafzustand versetzen.

das besser isolierende Hafniumoxid ersetzt werden, da sonst ungeplante elektrische Ströme zwischen Bauteilen (»Leckströme«) nicht mehr beherrschbar wären. Darüber hinaus hat Intel bereits für die Strukturbreite 22 Nanometer einen neuen Transistortyp namens »3D Tri-Gate-Transistor« eingeführt (Bilder rechts). Gegenüber der bisher üblichen flächigen Anordnung benötigt dieser dreidimensionale Transistor noch weniger Chipfläche und zugleich weniger Schaltstrom. Andere Hersteller versuchen denselben Effekt mit einer Struktur namens »Fin-Fet« (»Flossen-Feldeffekttransistor« wegen der haifischflossenförmig abstehenden Bestandteile) zu erreichen.

Außerdem versucht man derzeit, mehrere Chips nebeneinander auf einen gemeinsamen Grundträger zu packen oder sogar aufeinanderzustapeln, um die Leitungswege zu verkürzen und dadurch eine abermals erhöhte Rechenleistung zu erzielen. Allerdings ist es viel schwieriger, die innen liegenden Ebenen eines Stapels zu kühlen, und ein Stapel muss komplett verworfen werden, wenn nur eine seiner Ebenen defekt ist – ein ernsthaftes Problem, wenn man bedenkt, dass bei der Massenproduktion eines neuen Chips die Ausschussraten bei 90 Prozent liegen und erst mit zunehmender Erfahrung auf etwa 10 Prozent absinken. Hier gibt es noch viel zu tun.

Wenn Intel seine Planungen verwirklichen kann, werden in fünf Jahren auf jedem Millimeter Mikrochip gut dreimal so viele Bauteile aufgereiht sein wie heute; das macht auf der Gesamtfläche des Chips die zehnfache Anzahl an Komponenten, wie es dem Mooreschen Gesetz entspricht – reichlich Raum für die Chipdesigner, um neue Funktionen auf einen Chip unveränderter Größe zu packen.

Nur können die Anwender die neuen Funktionen gar nicht so schnell nutzen, wie die Hardwarehersteller sie bereitstellen; denn Softwareentwicklung ist ein langwieriger Prozess. Deswegen müssen sie darauf bestehen, dass die neuen Prozessoren bereits vorhandene Programme genau so ausführen wie das Vorgängermodell. Die Architektur eines Mikroprozessors muss »abwärtskompatibel« sein, das heißt, die Prozessordesigner dürfen die Menge der Maschinenbefehle (instruction set architecture, ISA) zwar erweitern,

Gleitkommaarithmetik

Zahlen, deren Größenordnung man nicht im Voraus sehr genau eingrenzen kann – also für wissenschaftliche Berechnungen praktisch alle Zahlen –, stellt man gerne in der Schreibweise mit Exponenten dar: $7,946138 \cdot 10^3$ statt 7946,138. Man verschiebt also das Komma (daher »Gleitkommazahl«) stets so, dass genau eine Ziffer ungleich Null vor dem Komma steht (»Normalisierung«). Innerhalb des Computers arbeitet man wegen des Binärsystems mit der Basis 2 oder $2^4=16$ an Stelle von 10, was aber für das Prinzip keinen Unterschied macht.

Mit Gleitkommazahlen kann man sehr große ebenso wie sehr kleine Zahlen mit stets gleicher Genauigkeit (Anzahl gültiger Stellen) bearbeiten. Allerdings erfordert das Rechnen mit ihnen einen erhöhten Aufwand. So muss man zur Addition zweier Gleitkommazahlen erst beide Summanden auf den gleichen Exponenten bringen, dann die Mantissen (die Ziffernfolgen ohne den Exponentenfaktor) addieren und zuletzt das Ergebnis normalisieren – drei Einzelaktionen statt einer bei der gewöhnlichen Ganzzahladdition.

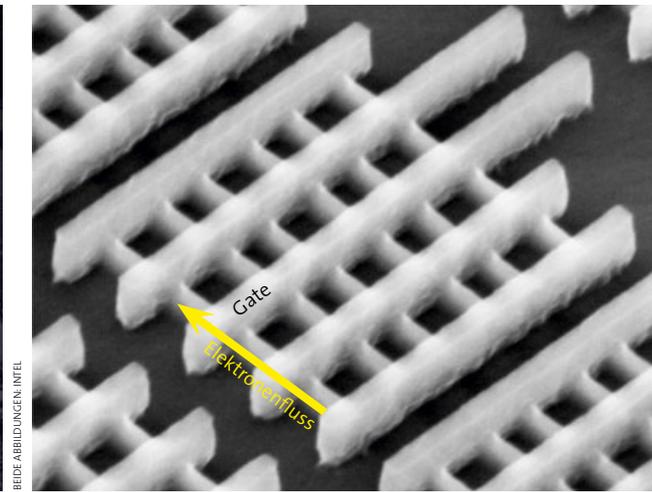
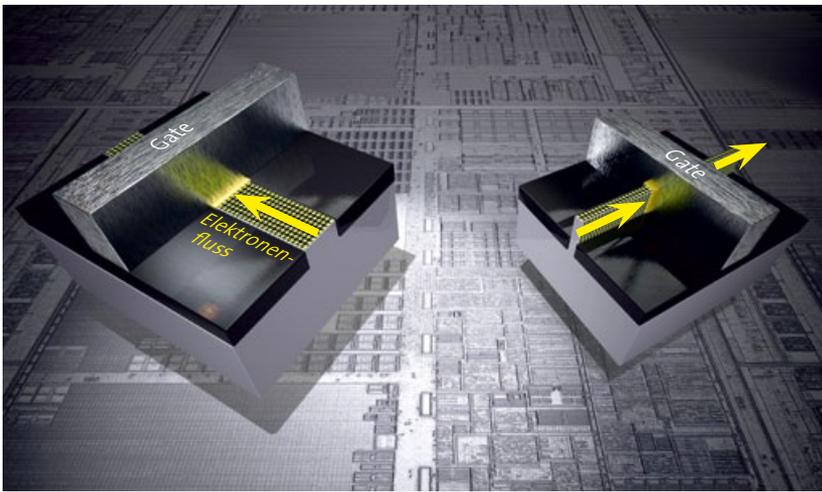


BILD: ABBILDUNGEN INTEL

Bisher besteht ein Transistor in einem Mikroprozessor aus einer flachen Leiterbahn, die unter einer Elektrode, dem Gate, hindurch verläuft (links, linkes Teilbild). Das Gate lässt abhängig von seinem eigenen Zustand den Elektronenstrom passieren oder auch nicht. In den neuen Tri-Gate-Transistoren steht die Halbleiterbahn hochkant (rechtes Teilbild). Das spart nicht nur Platz, sondern vergrößert auch die Grenzfläche zum Gate auf mehr als das Doppelte, was man entweder zu weiterer Verkleinerung oder zur Verminderung der benötigten elektrischen Schaltleistung (und damit des Stromverbrauchs) nutzen kann. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (rechts) zeigt mehrere Tri-Gate-Transistoren, die zum Teil verbunden sind.

aber keinen Befehl abschaffen, selbst wenn eine Kombination neuer Befehle die Arbeit des alten viel schneller erledigen würde und man den Platz für die Ausführung des alten Befehls besser verwenden könnte. Wegen dieses Zwangs entstehen ganze Familien von Mikroprozessoren, in denen die Kinder alle Eigenschaften ihrer Eltern erben und obendrein jeder Generation viele verschiedene Kinder angehören.

Das Verkleinern der Strukturbreite und das Entwerfen einer neuen Architektur sind jeweils für sich so anspruchsvolle Aufgaben, dass Intel von Jahr zu Jahr im Wechsel immer nur eine von ihnen auf einmal in Angriff nimmt. Man nennt es in Anspielung auf das Ticktock einer alten Pendeluhr das »Tick-Tock-Prinzip«. Im ersten Jahr reduziert der Hersteller das Vorgängermodell auf die verringerte Strukturbreite (Tick), im zweiten Jahr bietet er bei gleicher Strukturbreite eine erweiterte und leistungsfähigere Architektur an (Tock). Die Prozessorgeneration des Jahres 2012 heißt »Ivy Bridge« und ist im Wesentlichen eine von 32 auf 22 Nanometer geschrumpfte Version des 2011er Modells »Sandy Bridge«. Dagegen bietet die diesjährige Generation »Haswell« bei unveränderter Strukturbreite eine neue, verbesserte Prozessorarchitektur.

Schneller oder sparsamer – das ist hier die Frage

Je kleiner eine Komponente ist, desto kürzere Wege müssen die Elektronen zurücklegen, um sie zu schalten, das heißt von einem elektrischen Zustand in den entgegengesetzten zu versetzen. Man kann diesen Gewinn an »Beweglichkeit« nutzen, um entweder bei gleichem Stromverbrauch schneller zu schalten oder bei gleicher Schaltleistung weniger Strom zu verbrauchen. Je nach Anwendungsgebiet werden

neue Prozessoren auf das eine Ziel, das andere oder eine Mischung aus beiden hin optimiert.

Während lange Zeit die Erhöhung der Taktrate und damit der Leistung im Vordergrund stand, stößt diese Strategie wegen zunehmenden Stromverbrauchs und zugehöriger Wärmeentwicklung mittlerweile an ihre Grenzen. Seit einigen Jahren steigen daher die Taktraten nicht mehr wesentlich an, im Gegenteil: Vor allem um batteriebetriebenen Geräten möglichst lange Stand- und Laufzeiten zu ermöglichen, wurden die Taktfrequenzen teilweise wieder reduziert oder programmierbar gemacht.

Die Steigerung der Rechenleistung wird deshalb heute im Wesentlichen durch verschiedenste Formen der Parallelarbeit erzielt (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 26). Mehrere Rechenkerne auf einem Chip (Stand der Technik sind 8 bis 64) lassen die Gesamtleistung entsprechend ihrer Anzahl steigen – theoretisch. In der Praxis müssen sie häufig aufeinander warten, da sie sich untereinander verständigen und/oder auf dieselben Speicherinhalte zugreifen müssen. Damit die Wartezeit den Leistungsgewinn nicht wieder aufzehrt, muss ein Prozessor sie mit sinnvollen Tätigkeiten füllen. (Das Wort »Prozessor« wird in zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet. Je nach Kontext meint es entweder den kompletten Mikrochip oder, wie hier, einen Rechenkern mitsamt dessen exklusivem Zubehör.) Bei der derzeit gängigen Technik, dem »Multithreading«, legt er den aktuellen Auftrag, mit dem er nicht weiterkommt, beiseite und greift aus einem Vorrat von vielen Aufträgen einen anderen auf, der seine Daten schon beisammen hat.

Die Leistungsfähigkeit des einzelnen Prozessors wird durch ein buntes Sortiment an Maßnahmen gesteigert. Für



häufig vorkommende Aufgaben – typisches Beispiel: zwei Zahlen multiplizieren und das Produkt zu einer dritten addieren – stehen eigens konstruierte Rechenwerke bereit, die vor allem für Gleitkommazahlen (Kasten S. 88) besonders effizient arbeiten. Andere spezialisierte Rechenwerke erledigen dieselbe Aufgabe für mehrere verschiedene Eingangsdaten auf einmal; diese Art der Beschleunigung nutzen vor allem Programme zur Bildverarbeitung. So kann ein einziger Befehl 512 Bit entsprechend 32 Pixeln zu je 16 Bit zugleich verarbeiten.

Das Prinzip »Pipelining« wird weiter ausgebaut: Ein einzelner Rechenbefehl wird mittlerweile in bis zu 30 Teilschrit-

te zerlegt. Jeder von diesen beschäftigt nur ein Bauteil innerhalb des Prozessors, so dass eine Reihe von 30 Bauteilen Befehle »am Fließband« abarbeiten kann. Das ergibt gegenüber dem »handwerklichen« Verfahren, bei dem der Prozessor erst einen Befehl vollständig erledigt und dann mit dem nächsten beginnt, den 30-fachen Durchsatz.

Dieser Leistungsgewinn gerät noch nicht unbedingt in Gefahr, wenn ein Befehl die Ergebnisse des unmittelbar vorhergehenden verwendet. Der Prozessor muss nur dafür sorgen, dass dieses Ergebnis dem zweiten Befehl rechtzeitig zur Verfügung steht, das heißt insbesondere bevor der erste fertig ausgeführt ist. Dafür stehen spezielle abkürzende

Transaktionsorientierter Speicher: Erst rechnen, dann fragen

Eine typische Aufgabe für einen Parallelrechner lautet: Berechne eine Summe aus vielen Summanden, die ihrerseits aufwändig zu bestimmen sind. Zuerst rechnet jeder der vielen Prozessoren unabhängig von den anderen einen Summanden aus. Aber dann wollen alle diese Zahlen zusammenaddiert werden.

Dazu wird auf einen bestimmten Speicherplatz – nennen wir ihn »Zwischensumme« – zunächst eine Null geschrieben. Sowie ein Prozessor seine Arbeit erledigt hat, liest er die Zwischensumme (genauer: den Inhalt des Speicherplatzes »Zwischensumme«), addiert seine Zahl dazu und speichert das Ergebnis wieder in »Zwischensumme« ab. Wenn jeder Prozessor das getan hat, steht die Endsumme in »Zwischensumme«, und es kommt nicht darauf an, in welcher Reihenfolge die Prozessoren ihre Einzelergebnisse angeliefert haben.

Allerdings vergeht zwischen Lesen und Wiederabspeichern eine gewisse Zeit. Wenn in diesem Zeitraum Prozessor *B* auf die

Zwischensumme zugreifen will, muss er warten, bis Kollege *A* fertig ist. Sonst liest *B* die Zwischensumme ohne den Beitrag von *A* und überschreibt hinterher das, was *A* soeben geschrieben hat, mit dem Ergebnis, dass in der Endsumme der Beitrag von *A* fehlt.

Um Fehler dieser Art zu verhüten, wird bisher der gesamte Programmabschnitt aus Lesen, Addieren und Schreiben zur »Transaktion« erklärt, das heißt zu einem geschützten Vorgang, in den kein anderer Prozessor eingreifen darf. Insbesondere sperrt eine Transaktion sämtliche Speicherplätze, auf die sie zugreift, für alle anderen Prozessoren und gibt sie erst wieder frei, wenn sie abgeschlossen ist.

Transaktionen sind auch und vor allem im Datenfernverkehr von Bedeutung. Ein Kunde will am Geldautomaten etwas von seinem Konto abheben. Der Geldautomat fragt bei der Bank nach, ob das Konto gedeckt ist; von diesem Zeitpunkt an darf

Organisiertes Chaos im Computer

Das Bild vom Fließband gibt die Arbeitsweise eines Rechenkerns der neuesten Generation nur unvollkommen wieder. Die einzelnen Fließbandarbeiter reichen einander die Werkstücke nicht schön der Reihe nach, sondern sitzen gleichsam hinter Postschaltern (»Ports«), wie sie früher in großen Postämtern üblich waren: Jeder Schalter ist mehr oder weniger auf einen bestimmten Aufgabenbereich spezialisiert, und gewisse häufig nachgefragte Bereiche sind mehrfach vertreten. Die »Kunden« (ausführbare Teilbefehle) stehen Schlange in einem gemeinsamen Wartebereich (»Unified Reservation Station«); jeder wird von dem nächsten Schalterbeamten bedient, der verfügbar und zu der geforderten Tätigkeit fähig ist.

Diese Erweiterung des Fließbandprinzips realisiert auch die »out-of-order architecture«. Ein Befehl stellt sich nicht erst dann in die Schlange, wenn er laut Programm an der Reihe ist, sondern wenn er alle seine Unterlagen beisammen hat. Wenn er Glück hat, wird er vor der Zeit abgefertigt.

Unified Reservation Station	Port 0 →	Ganzzahlarithmetik, Gleitkommamultiplikation und -division, Verzweigung, logische Funktionen
	Port 1 →	Ganzzahlarithmetik, Gleitkommaaddition und -multiplikation, logische Funktionen u. a.
	Port 2 →	Adresse zum Datenlesen oder -speichern erzeugen
	Port 3 →	Adresse zum Datenlesen oder -speichern erzeugen
	Port 4 →	Daten speichern
	Port 5 →	Ganzzahlarithmetik, logische Funktionen
	Port 6 →	Ganzzahlarithmetik, Verzweigung
	Port 7 →	Adresse zum Datenspeichern erzeugen

»Postamt« mit acht Schaltern (Ports) zur Abfertigung elementarer Befehle. Die Ports 6 und 7 sind in der »Haswell«-Architektur neu hinzugekommen.

Datenpfade und sehr schnelle Zwischenspeicher (Caches) zu Verfügung. Allgemein dauert ein Speicherzugriff – Zahlen aus dem Arbeitsspeicher holen und das Ergebnis abspeichern – wesentlich länger als das Rechnen selbst; damit dieser Zeitaufwand die Leistung nicht beeinträchtigt, werden die zu verarbeitenden Daten beizeiten »einbestellt« und durch eine Hierarchie von bis zu vier »Wartezimmern« (Caches) geschleust, die zunehmend kleiner und näher am Ort des Geschehens sind. Nach der Abfertigung wandern die Ergebnisse durch dieselben Wartezimmer zurück – und stehen bei geschickter Organisation schon zur Verfügung, wenn sie gleich wieder an der Reihe sind.

Alternativ kann sich der Prozessor – unter geeigneten Voraussetzungen – die Freiheit nehmen, Befehle in einer anderen als der durch das Programm vorgegebenen Reihenfolge auszuführen (out-of-order architecture, siehe Kasten oben). Nach einem solchen kleinen Abstecher hat der Befehl, der eigentlich an der Reihe war, seine Daten beisammen und kann ohne Verzug erledigt werden.

Dagegen droht das Fließband ins Stocken zu geraten, wenn nicht klar ist, welche Befehle als nächste auszuführen sind, weil das vom Ergebnis der letzten Berechnung abhängt. Eigentlich müsste der Prozessor das Fließband anhalten, bis die Entscheidung vorliegt. Um diesen Zeitverlust zu vermei-

die Bank keinen weiteren Zugriff auf das Konto akzeptieren, bis der Betrag ausgezahlt und gebucht ist.

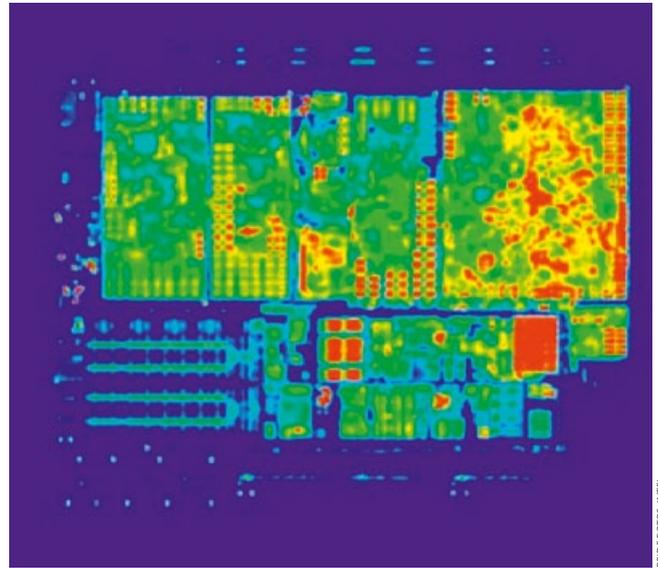
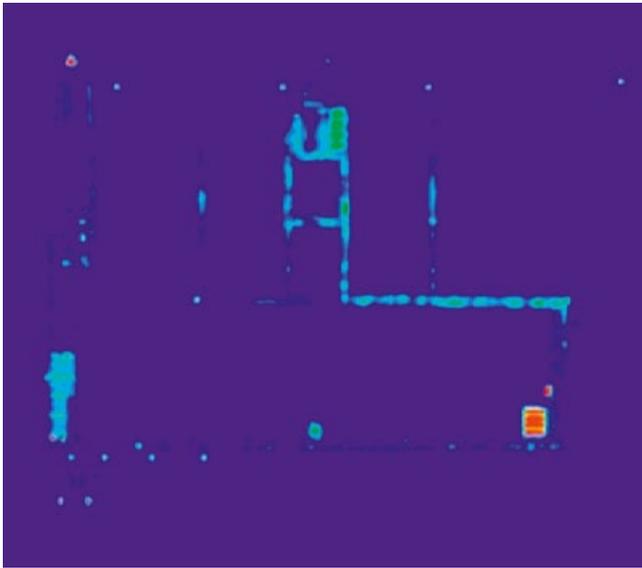
Das Verfahren gleicht im Prinzip der Signalschaltung bei der Eisenbahn: Vor einer Weiche, die mehrere verschiedene Gleise zu einem zusammenführt, sperrt der erste ankommende Zug alle anderen Gleise und gibt sie erst wieder frei, wenn er das gemeinsame Gleis verlassen hat. Die anderen Züge müssen so lange warten, was den Betrieb aufhält.

Neuere Prozessoren, darunter der aktuelle Haswell von Intel, eliminieren diese Wartezeiten – zumindest zum Teil –, indem sie Speicherplätze nicht sperren, sondern gewissermaßen nachträglich nachsehen, ob ein Konflikt aufgetreten ist. Im Beispiel: *A* liest Zwischensumme; *B* liest Zwischensumme; *A* hat fertig addiert und überschreibt Zwischensumme; *B* hat fertig addiert, will überschreiben – und stellt fest, dass nach seinem letzten

Zugriff Zwischensumme von anderer Seite überschrieben worden ist. Daraufhin bricht *B* die ganze Transaktion ab und fängt von vorne an – oder fährt ersatzweise an einer anderen, vom Programmierer vorzusehenden Stelle des Programms fort. Damit das funktioniert, muss jeder Speicherplatz mit einem Zusatzfeld ausgestattet sein, auf dem die Prozessoren Spuren ihrer Zugriffe hinterlassen können.

Wenn kein Konflikt entsteht, geht gar keine Zeit verloren, und im Konfliktfall nur so viel, wie *B* anderenfalls mit Warten zugebracht hätte.

Auf den Eisenbahnbetrieb übertragen wirkt das Konzept wenig überzeugend: Stelle alle Signale permanent auf Grün. Wenn ein späterer Zug mit einem früheren zusammenstößt, wirf ihn weg und schicke einen neuen auf die Reise. Im Inneren eines Parallelrechners erhöht genau dieses Verfahren jedoch die Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit.



BILD/FOTOS: INTEL

Energiesparen für Mikroprozessoren: Diese Aufnahmen einer Wärmebildkamera zeigen links einen Chip im Tiefschlaf. Der rechts abgebildete Mikroprozessor rechnet zwar fleißig, hat aber keine nennenswerte Kommunikation mit der Außenwelt, weswegen die dafür zuständigen Bauteile in den Randbereichen vorübergehend stillgelegt sind.

den, führt er eine der beiden Alternativen aus und verwirft deren Ergebnisse, wenn sich später herausstellt, dass er falsch geraten hat. Damit diese »spekulative Ausführung« etwas einbringt, sollte er möglichst in der Mehrheit der Fälle richtig raten. Manche Prozessoren lernen aus Erfahrung: Sie spekulieren auf denjenigen Programmzweig, der in der unmittelbaren Vergangenheit in der Mehrheit der Fälle gewählt wurde (»Sprungvorhersage«).

Schließlich können viele Prozessoren in den so genannten »Turbo Mode« umschalten. Wenn ein Programm sich dafür eignet, erhöht der ausführende Kern die Taktfrequenz. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn der Speicher mit dem erhöhten Tempo Schritt halten kann, weil das Programm nicht allzu viele Daten pro Zeiteinheit anfordert, oder wenn der Überhitzungsschutz nicht anspricht, weil die Nachbarprozessoren gerade untätig sind und daher nichts zur Wärmebelastung beitragen.

Der Weg zum Mikrorechner

Es bleibt das prinzipielle Problem, dass ein Prozessorkern auf Daten von anderen oder – für die Kommunikation mit der Außenwelt – auf eine freie Leitung warten muss. Zwar sind durch geschickte Organisation mit Hilfe der geschilderten Maßnahmen manche Wartezeiten vermeidbar, aber eben nicht alle, was die Wirksamkeit dieser Maßnahmen beschränkt. Statt Prozessoren Schlange stehen zu lassen, ist es sinnvoll, für die verfügbaren zusätzlichen Transistoren völlig neue Aufgaben zu suchen.

Manche von ihnen finden sich in einem herkömmlichen Rechner nur wenige Zentimeter vom zentralen Prozessor entfernt: Es gibt eigene Bauteile für den Arbeitsspeicher und

dessen Ansteuerung (memory controller oder memory management unit, MMU) sowie für die Ein- und Ausgabe, also die Kommunikation mit Tastatur und Maus, dem Bildschirm, externen Festplatten und anderen Peripheriegeräten sowie lokalen Netzwerken und dem Internet. Moderne Mikroprozessoren verleihen sich eine dieser Funktionen nach der anderen ein, vom Koprozessor für Gleitkommarechnungen, der bis Ende der 1980er Jahre noch ein eigenständiges Bauteil war, über die Grafikkarte für den Bildschirm bis hin zu der kompletten Hierarchie der Caches und der Ansteuerung des Arbeitsspeichers. Dieser sitzt in einigen Systemen bereits huckepack auf dem Prozessor, was den Daten kurze Wege beschert. Zusätzlich werden Teile der Ein- und Ausgabe sowie gegebenenfalls die Arbeitsteilung unter mehreren Prozessoren auf dem Chip integriert. Man spricht von kompletten Mikrorechnern (system on a chip, SoC).

Darüber hinaus stellen die neuen Mikrorechner in Erweiterung der klassischen Befehlssätze neue Maschinenbefehle mit zugehörigen Rechenwerken bereit; diese erledigen häufig vorkommende Aufgaben, für die bisher ganze Programme mit vielen Einzelbefehlen ablaufen mussten. Das betrifft

- das Hochfahren eines Computers nach dem Einschalten und die Absicherung dieses sicherheitskritischen Vorgangs gegen Manipulationen von außen,
- Datenverschlüsselung einschließlich spezieller Zufallszahlengeneratoren zur Erzeugung sicherer Schlüssel,
- Maschinenbefehle mit sehr langer Wortlänge (Vektor- oder Feldrechnung),
- Befehle, mit denen der Prozessor das Verhalten eines anderen Prozessors mit einem anderen Befehlssatz getreulich nachmachen kann (»Virtualisierung«),

► und spezielle Synchronisationsunterstützung für parallele Programme, den transaktionsorientierten Speicher (transactional memory, siehe Kasten S. 90/91). Dieser »kollisionsgesicherte Speicher« erlaubt mehreren Prozessoren, so ungehemmt auf einen Speicherplatz zuzugreifen wie die Kunden auf einen Wühltisch im Textilkaufhaus, und greift erst nachträglich bei Konflikten ein.

Schlaf, Chiplein, schlaf!

Drei Gründe motivieren die Suche nach technischen Lösungen, die den Stromverbrauch eines Rechners senken. Batteriebetriebene Geräte halten länger durch, Großrechner lassen sich bei Leistungsaufnahmen oberhalb von 50 Megawatt und entsprechender Wärmeentwicklung kaum noch kühlen, und schließlich ist Elektrizität überall so teuer geworden, dass der Betreiber eines Computers in fünf Jahren Dauerbetrieb ungefähr so viel für den Strom bezahlt wie für das Gerät selbst, Software eingeschlossen. Die Hersteller von Mikroprozessoren konkurrieren inzwischen auch ganz wesentlich über die Stromsparsamkeit ihrer Produkte.

Eine Senkung der Taktrate mindert zwar den Stromverbrauch, geht jedoch auf Kosten der Leistung. Das ist nur dann sinnvoll, wenn die hohe Leistung ohnehin nicht gebraucht wird oder wenn die unmittelbaren Ansprechpartner wie Speicher, Peripheriegeräte oder Datenetze mit dem erhöhten Tempo nicht mithalten können. Dasselbe Ziel ohne Leistungsminderung erreicht man, indem man unbeschäftigte Teile des Mikroprozessors oder sogar den ganzen Chip gezielt schlafen legt.

Die Metapher ist durchaus wörtlich zu verstehen. Im Schlaf verbraucht eine Komponente keine oder nur sehr wenig Energie und strahlt entsprechend weniger Wärme ab; und nach dem Aufwecken dauert es eine Weile, bis sie wieder aktionsfähig ist. Die Hersteller unterscheiden sogar »Schlaf« und »Tiefschlaf« je nachdem, ob einzelne Prozessorkerne oder zusätzlich auch Caches und Ein-/Ausgabekomponenten stillgelegt werden. Je tiefer der Schlaf, desto größer ist die Energieersparnis, allerdings auch die Aufweckzeit.

Diese liegt zurzeit in der Größenordnung von Mikro- bis sogar Millisekunden – eine Ewigkeit für ein Bauteil, das im Wachzustand in derselben Zeit ein paar Millionen Multiplikationen erledigt. Daher bemühen sich die Hersteller eifrig darum, die Aufweckzeit zu verkürzen und außerdem die Stromversorgung innerhalb des Chips so auszulegen, dass man viele kleine Komponenten unabhängig voneinander abschalten kann. Der Sinn der Kleinteiligkeit leuchtet unmittelbar ein: In einer großen Firma finden einzelne Mitarbeiter durchaus ab und zu Gelegenheit zu einem Nickerchen, ganze Abteilungen dagegen eher selten.

Manche Teile eines Mikrochips können auch im Halbschlaf arbeiten. Es hält den Betrieb nicht auf, wenn ein Bauteil, das nur alle 100 Takte das Ergebnis einer sehr umfangreichen Rechnung nach außen zu melden hat, mit verminderter Taktrate läuft. Natürlich erfordert die feinteilige Steuerung der verschiedenen Wachtheitsgrade spezielle

Komponenten, die mit in den Chip eingebaut werden müssen, und neue Befehle, mit denen der Programmierer den Schlaf-wach-Rhythmus den Anforderungen entsprechend steuern kann.

Wer »grüne«, das heißt den Energieverbrauch minimierende Software schreiben will, muss nicht nur die neuen Gelegenheiten zum Schlafenlegen möglichst ausgiebig nutzen, sondern auch wie bisher die Möglichkeiten, die der Prozessor zur Massenverarbeitung (»Vektorrechnen«) und zur Verteilung der Arbeit auf mehrere Kerne (»Parallelrechnen«) anbietet. Um den Programmierer mit dieser überaus anspruchsvollen Aufgabe nicht allein zu lassen, stellen die Hersteller geeignete Software-Entwicklungswerkzeuge bereit.

Das mooresche Gesetz erfreut sich bester Gesundheit

Während zu Beginn der Entwicklung zahlreiche Hersteller mit sehr verschiedenen, der jeweiligen Anwendung angepassten Architekturen konkurrierten, beherrschen heute wenige Hersteller, an ihrer Spitze Intel, das Feld. Die Vielfalt findet sich nun in den verschiedenen Modellen ein und derselben Generation innerhalb einer Prozessorfamilie. Stromverbrauch, Preise und Rechenleistung können sich dabei durchaus um mehr als eine Größenordnung unterscheiden.

Schon mehrfach wurde dem mooreschen Gesetz das Sterbeglöcklein geläutet, mit dem zutreffenden Argument, dass ein elementares Bauteil nicht wesentlich kleiner werden kann als wenigstens ein paar Atome. Bis jetzt hat das Gesetz überlebt, und dank neuer Materialien, verbesserter Herstellungsprozesse und innovativer Prozessorarchitekturen wird diese Entwicklung voraussichtlich noch einige Jahre anhalten. ~

DIE AUTOREN



Arndt Bode (links) promovierte 1975 in Informatik an der Technischen Universität Karlsruhe (heute KIT) und habilitierte sich 1984 an der Universität Erlangen-Nürnberg mit dem Thema Mikroarchitekturen. Seit 1987 hat er den Lehrstuhl

für Rechnerorganisation und Rechnertechnik an der Technischen Universität München inne; seit 2008 leitet er das Direktorium des Leibniz-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Seine Arbeitsgebiete sind Rechnerarchitektur, Supercomputing und IT-Dienstleistungen für die Wissenschaft.

Herbert Cornelius promovierte 1981 an der Technischen Universität Berlin über ein Thema aus der Intervallarithmetik. Seit 1993 arbeitet er bei Intel Europe in München, heute als Technical Director Advanced Computing mit dem Schwerpunkt Hochleistungsrechnen und parallele Programmierung auf Mehrkern-Mikroprozessoren.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Webseiten finden Sie im Internet: www.spektrum.de/1207591



Hakan Baykal

Der erste Reporter**Herodots Berichte aus aller Welt**

Primus, Darmstadt 2013.

160 S., € 19,90

ANTIKE

Vater der Geschichte

Eine kulturhistorisch aufschlussreiche Studie würdigt Leben und Wirken des antiken Weltreisenden Herodot und seinen Einfluss auf die abendländische Geschichtsschreibung.

Geschichte vollzieht sich in den Kategorien von Raum und Zeit. Diese für uns heute selbstverständliche Einsicht hat im 5. Jahrhundert v. Chr. der griechische Historiker Herodot als Erster zum Prinzip erhoben. Seine »Historien« dokumentieren das Wirken von Menschen in einer datierbaren Zeit und in einem geografisch fixierten Raum. Dank dieses Geschichtswerks über die große Auseinandersetzung zwischen Griechen und Persern, zwischen Orient und Okzident, gilt der antike Autor als »Vater der Geschichte«. Hakan Baykal,

fen Hekataios von Milet (5./6. Jahrhundert v. Chr.) zu widerlegen, der den Nil als Grenze zwischen Libyen beziehungsweise Afrika einerseits und Asien andererseits bestimmt hatte.

Nie erlahmende Abenteuerlust, kontaktfreudige Aufgeschlossenheit, unerschöpfliche Wissbegierde und intensiver Forscherdrang kennzeichnen diesen »Wanderer zwischen den Welten«, der bis in die entlegensten Gebiete reist, um persönlich in Augenschein zu nehmen, worüber er berichtet. Herodots Interesse gilt der Geografie sowie

Herodots Erzählungen sind mitunter fantastisch, doch Archäologen haben wiederholt ihren wahren Kern offengelegt

freier Autor und Journalist, zeichnet in unterhaltsamen Miniaturen das Leben und Wirken dieses »ersten Reporters der Weltgeschichte« nach.

Geboren wird Herodot im kleinasiatischen Halikarnassos, heute Bodrum. Er wächst an der Schwelle zwischen Orient und Okzident auf und fängt um die Mitte des 5. Jahrhunderts v. Chr. damit an, die Welt zu erkunden. Als Kaufmann bereist er die Schwarzmeerküste, macht sich von dort aus auf den Weg in die nördlich angrenzenden Steppengebiete Eurasiens, den Lebensraum der Skythen, und besichtigt das Zweistromland. In Ägypten zieht er 800 Kilometer nilaufwärts bis zur Flussinsel Elephantine – er sucht nach Hinweisen, um die Kontinentaltheorie des Geogra-

phien Menschen und ihren Sitten. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen fließen als ethnografische und naturkundliche Exkurse (»logoi«) in sein Werk ein und geben diesem ein unvergleichliches Kolorit.

In Athen trägt Herodot seine Reiseberichte einem begeisterten Publikum vor. Der Staatsmann Perikles (490–429 v. Chr.) und der Tragödiendichter Sophokles (zirka 497–406 v. Chr.) werden zu guten Bekannten. Diese Nähe zur attischen Demokratie, die sich gegen die Angriffe der Perser behauptet hat, inspiriert den Weitgereisten zu seiner großen Abhandlung über den Konflikt zwischen Griechen und »Barbaren«.

Herodot schreibt sein Werk in einer Zeit des Umbruchs. Er steht am Über-

gang von einer mythisch bestimmten zu einer rational geprägten Sicht auf die Welt. Das Besondere an seiner Darstellung ist nicht allein die Tatsache, dass Menschen hier erstmals neben Göttern die Geschichte beeinflussen. Sondern auch, dass Herodot, Sohn eines nichtgriechischen Vaters, die »Barbaren« in seine Betrachtungen einbezieht. Diese neue Perspektive, welche die Leistungen nicht nur eines Volkes in den Blick nimmt, macht Herodot – mit den Worten des Berliner Altphilologen Ulrich von Wilamowitz-Moellendorff (1848–1931) – zum Erfinder der »universalen Geschichtsschreibung«.

Bemerkenswert ist, dass der Grieche aus Kleinasien die Perser wohlthuend sachlich, objektiv und ohne jeden Chauvinismus schildert. Eine weltoffene Toleranz scheint hier durch, derentwegen er von seinen Landsleuten als »Philobarbaros« (Barbarenfreund) gescholten wurde. Doch das war beileibe nicht die einzige Kritik. Viele von Herodots Zeitgenossen und Nachgeborenen zweifelten an der Glaubwürdigkeit seiner Darstellungen, verspotteten ihn als Märchenonkel und Geschichtenerzähler, der sich bei seinen Recherchen nur aufs Hörensagen verlasse und Informationen unreflektiert wiedergebe. Diese Missbilligung entzündete sich an mitunter fantastischen Erzählungen über kiffende Nomaden, fliegende Schamanen, hundsgröße Riesenameisen und geflügelte Schlangen, die der Weitgereiste von sich gab.

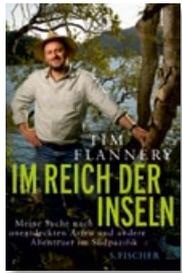
War Herodot also nicht der Vater der Geschichte, sondern eher ein Münchhausen der Antike? Mitnichten, schreibt Baykal. Dagegen spräche, dass zahlreiche Berichte des griechischen Geschichtsschreibers eine Detailtiefe erreicht hätten, die in der Antike ihresgleichen suche: etwa über die Mumifizierungspraktiken der Ägypter, den Verlauf der persischen Königsstraße oder die Einteilung des persischen Reichs in Satrapien. Zudem hätten archäologische Funde wiederholt den wahren Kern in Herodots Geschichten offengelegt. Kupferne Gefäße beispielsweise, die Rückstände von verbranntem Hanf enthalten, bestätigen seine

Schilderungen über berauschte Rituale, die Reiternomaden in Zelten abgehalten haben sollen. Nur handelte es sich dabei nicht um Dampfbäder, wie Herodot mangels besseren Wissens und aus griechischer Sicht annahm, sondern um eine zeremonielle Hand-

lung, bei der Schlafmohn verbrannt wurde, was die Teilnehmer in einen ekstatischen Zustand versetzte.

Stück für Stück stellt die moderne Forschung die Glaubwürdigkeit Herodots als Historiker wieder her – knapp 2500 Jahre, nachdem dieser seine Be-

richte aufzeichnete. Baykals lesenswertes Buch trägt seinen Teil dazu bei.



Tim Flannery

Im Reich der Inseln

Meine Suche nach unentdeckten Arten und andere Abenteuer im Südpazifik

Aus dem Englischen von Jürgen Neubauer

S. Fischer, Frankfurt 2013.

268 S., € 19,99

TIERKUNDE

Ein Zoologe im pazifischen Inselparadies

Manchmal müssen Forscher, die nach Säugetieren suchen, an Revolutionsarmeen vorbei.

Tim Flannery, australischer Zoologe und Umweltaktivist, hat den Säugetierbestand auf Melanesien aufgenommen – jener pazifischen Inselgruppe nordöstlich von Australien. Davon erzählt der umtriebige Buchautor in seinem neuesten Werk. Wer befürchtet, einen spröden Katalog vorzufinden, im Sinne von »Fledermausart X auf Neukaledonien vorhanden, nicht aber auf Guadalcanal«, wird positiv überrascht. Flannery ist ein äußerst unterhaltsamer Reisebericht gelungen.

Der Autor und sein Team bereisten Melanesien in den 1980er und 1990er Jahren. Ihr Ziel lautete, sich einen Überblick über den regionalen Bestand an Beuteltieren, Ratten und Fledermäusen zu verschaffen. Dies sollte unter anderem dem Naturschutz zugutekommen, denn einige Inseln waren jahrhundertlang nicht mehr von Biologen betreten worden, andere sogar noch nie. Entsprechend wenig war und ist über die dortigen Tierpopulationen bekannt.

Den Enthusiasmus, den Flannery auf seinen Forschungsreisen spürte,

weiß er in seinem Buch gekonnt zu vermitteln. Wenn er etwa die Überseefahrt mit einem Katamaran wiedergibt und dabei den Nachthimmel beschreibt, der vor Sternen glüht, und von grün phosphoreszierenden Bugwellen erzählt, hat man den Eindruck, neben dem Wissenschaftler an der Reling zu stehen. Seine Schilderungen der tropischen Inselparadiese sind ebenso packend und nehmen den Leser mit auf die Suche nach einheimischen Tieren. Flannery wurde dabei von schillernden Kollegen und Mitstreitern begleitet, etwa dem Schlangenspezialisten und ehemaligen olympischen Ringer Greg Mengden oder dem autodidaktischen Feldbiologen und Fotografen Pavel German, der einst aus der Sowjetunion floh und sich ausgezeichnet aufs Boxen versteht.

Das allein ist schon reichlich faszinierender Stoff, aber noch mehr davon gibt es, wenn Flannery auf die Geschichte und die politischen Verhältnisse der Region eingeht. Die Suche nach einer Höhlen bewohnenden Riesenratte etwa kann schwierig werden, wenn sich die

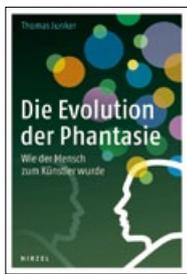
Revolutionsarmee von Bougainville im Dschungel verschanzt hat. Derlei Widrigkeiten gehören zum Alltag der Biologen, und an Strapazen – oder manchmal gar Drogentrips – führt kein Weg vorbei, wenn man ein unzugängliches Stück Urwald erreichen will. Oft sind die Einheimischen durchaus hilfsbereit und gewähren Zutritt, erwarten dafür jedoch eine angemessene Gegenleistung. Das können kleinere oder größere Gefallen sein oder auch die Teilnahme an örtlichen Ritualen.

Flannerys Erzählungen sind spannend, witzig und charmant. Bei alledem versteht er es zudem, seine Forschungstätigkeit detailliert zu beschreiben. Sachliche und narrative Elemente verwebt er zu einer gelungenen Einheit. Selbst als wenig versierter Kenner der melanesischen Fauna fragt man sich nie, welcher Ratte oder welchem Beuteltier er denn jetzt gerade wieder auf der Fährte ist.

Ein Manko gibt es dennoch. Es liegt im Wesen einer Bestandsaufnahme, die immer gleichen Tätigkeiten an diversen Orten des zu untersuchenden Ökosystems zu wiederholen: anreisen, Basis aufbauen, Gebiet begehen, jagen, erfassen, nachbereiten und resümieren. Dieses ständig sich Wiederholende beginnt nach einiger Zeit zu stören. Ein Buch, das die Leser am Stück verschlingen, ist Flannerys Werk daher eher nicht. Doch als einzigartige Zustandsbeschreibung der melanesischen Säugetiere, ergänzt um Ausflüge in die regionale Kultur und Politik und gegossen in einen unnachahmlichen Sprachwitz, stellt Flannerys Werk eine wertvolle Rarität dar.

Arne Baudach

Der Rezensent ist Doktorand der Biologie in Gießen.



Thomas Junker

Die Evolution der Phantasie

Wie der Mensch zum Künstler wurde

S. Hirzel, Stuttgart 2013.

235 S., € 24,90

KUNST UND WISSENSCHAFT

Vom Selektionsvorteil zum Luxusgut

Wie ist die Kunst entstanden, welche Funktion erfüllt sie, und wie könnte sie sich künftig verändern? Diesen Fragen geht hier kein Geistes-, sondern ein Naturwissenschaftler nach.

»Nichts in der Biologie ergibt einen Sinn – es sei denn, man betrachtet es im Licht der Evolution.« Diese Worte des russischen Evolutionsbiologen Theodosius Dobzhansky überträgt der Tübinger Bioethikprofessor Thomas Junker auf die Kunst. Ein gewagtes Experiment! Denn sowohl die Definition von Kunst als auch das Verständnis von Evolution sind heftig umstritten – selbst unter Wissenschaftlern aus diesen Gebieten. Kann eine Mischehe zwi-

perschmuck – stärke das Zusammengehörigkeitsgefühl von Gruppen, postuliert der Autor. Auf diese Weise könne sie menschliche Gesellschaften zu einem Superorganismus verbinden und ihnen einen Selektionsvorteil verschaffen. Mit der Fähigkeit, sich künstlerisch auszudrücken, beweise ein Mensch zudem, dass er über Talent und Ressourcen verfüge, was bei der Partnerwahl einen Vorteil bringe. Diese These untermauert Junker mit dem Argument, die

Kunst, schreibt Junker, verbinde Gesellschaften zu einem Superorganismus und verschaffe ihnen einen Selektionsvorteil

schenden Natur- und den Kulturwissenschaften überhaupt funktionieren, wenn diese beiden Begriffe deren Zentrum bilden?

Junker begegnet der Herausforderung, indem er sein Werk »Die Evolution der Phantasie« so stark strukturiert, dass es fast wie ein Lehrbuch anmutet. Zu Beginn erklärt der Autor, was er unter Kunst versteht: Demnach dienen Musik, Tanz und Malerei als Mittel der Verständigung über unbewusste Gefühle und Wünsche. In diesem Sinn tritt die Kunst in allen menschlichen Kulturen in irgendeiner Form zu Tage, so Junker.

Ein gemeinschaftliches Verständnis von Kunst sowie ihr kollektiver Ausdruck – etwa in Form von rituellem Kör-

ersten Formen von Kunst seien etwa zu der Zeit aufgetreten, als die Größenunterschiede zwischen männlichen und weiblichen Individuen allmählich an Bedeutung verloren. Haben Frauen vor zwei Millionen Jahren also damit begonnen, sich nicht mehr nach besonders stattlichen Männern umzuschauen, sondern nach solchen, die besonders eindrucksvolle Faustkeile herstellten? Die Idee wirkt zumindest originell.

Wenn der Autor die Prinzipien vergleicht, die der Kunst beziehungsweise der Evolution zu Grunde liegen, verlangt er seinen Lesern einiges ab. Für beide Phänomene spielt die Vielfalt eine zentrale Rolle – das lässt sich noch gut nachvollziehen. Doch das Gegen-

überstellen von geistigen Innovationen und genetischen Mutationen als Ursachen von Veränderung ist nicht immer sofort eingängig.

Am Ende geht Junker sogar so weit, zu postulieren, dass ein Ende der Kunst zwangsläufig mit dem Ende der Menschheit einhergehen würde. Umso eindrücklicher warnt er vor der Gefahr, die Kunst könne verschwinden, weil die Bedingungen, unter denen sie entstanden sei, nicht mehr existierten. Denn der Einsatz von Technik verstärkte visuelle, auditive und andere Reize so sehr, dass sich aus einem Kunstobjekt heraus keine direkten Rückschlüsse mehr auf die Ausdruckskraft seines Urhebers ziehen ließen. Entsprechend schließt das Buch mit dem Appell, alles zu versuchen, um die Kunst zu erhalten – ohne jedoch einen klaren Weg vorzugeben, wie sich dieses Ziel erreichen lässt. Vielleicht ist es nicht an der Zeit, den Niedergang der Kunst zu beklagen, sondern sie neu zu definieren?

Trotz des unklaren Endes gelingt es Thomas Junker, eine Brücke zwischen Kultur- und Naturwissenschaften zu schlagen. Eine komplette Synthese erreicht er aber nicht – sie würde auf Grund der unterschiedlichen Denkmuster wohl auch erzwungen wirken. Deutlich herauszulesen ist Junkers Prägnanz durch Ernst Mayr, einen der Gründerväter der synthetischen Evolutionstheorie, mit dem der Autor jahrelang eng zusammengearbeitet hat.

»Die Evolution der Phantasie« wirft durchgängig überraschende Gedanken auf. Einige wirken auf den ersten Blick abwegig, werden dann aber so gut erklärt, dass sie schließlich nachvollziehbar erscheinen. Andere hingegen bedürfen einer ausführlicheren Erläuterung, als sie das Buch liefert. Glossar und Literaturliste helfen bei der vertiefenden Lektüre. Insgesamt ist das Werk gut verständlich und sowohl Kunst- als auch Wissenschaftsinteressierten zu empfehlen, die Gefallen an herausforderndem Lesestoff finden.

Maren Emmerich

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Uppsala.

AUS UNSEREM LESERSHOP

BILDKALENDER »HIMMEL UND ERDE 2014«

Sterne und Weltraum präsentiert 13 überragende astronomische Motive von Wissenschaftlern und von Amateurastronomen: Vom Polarlicht über die ISS und den Asteroiden Vesta geht es zu Gasnebeln, dem Milchstraßenband, einem Kugelsternhaufen bis hin zu fernen Galaxien. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2014 und erläutert ausführlich alle abgebildeten Objekte. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm.

Blättern Sie im Internet schon jetzt durch die Seiten.

€ 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,-
inkl. Inlandsversand.



JAHRGANGS-CD-ROM SDW 2012

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 Spektrum.de-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. Spektrum.de und das Suchregister laufen nur unter Windows.

Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-943702-22-4



KALENDER FÜR STERNFREUNDE 2014

Ahnerts Astronomisches Jahrbuch erscheint nun als **Kalender für Sternfreunde** mit überarbeiteter Struktur im DIN-A-4-Format.

Die Herausgeber und Autoren liefern alle grundlegenden Informationen über das Himmelsjahr 2014 und geben eine Fülle von praktischen Tipps für die Beobachtung astronomischer Phänomene. Wer die vielfältigen Erscheinungen am Sternenhimmel selbstständig erkunden möchte, wird auf dieses Standardwerk nicht verzichten wollen.

220 Seiten mit zahlreichen Abbildungen und Tabellen.

Preis € 12,90 (zzgl. Versand); als Standing Order € 10,- (inkl. Inlandsversand)



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.wwww.spektrum.de/jahr

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!

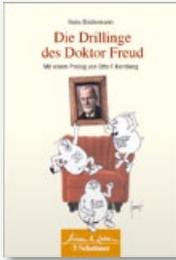


Waltraud Sperlich

Alles Mythos! 20 populäre Irrtümer über die Steinzeit

Theiss, Stuttgart 2013. 216 S., € 16,95

Steinzeitler waren durchweg Nomaden? Höhlenmalerei diente dem Jagdzauber? Steinzeitliche Venusfiguren verkörpern das damalige Schönheitsideal? Mit solchen Legenden räumt die Archäologin und Journalistin Waltraud Sperlich in ihrem Buch auf. Sie knöpft sich verbreitete Irrtümer über die Urgeschichte vor und hält ihnen Forschungsergebnisse und Einschätzungen von Wissenschaftlern entgegen. Heraus kommt ein interessantes, flott geschriebenes Werk. Obgleich manche Irrtümer ein wenig konstruiert wirken, erfährt man eine Menge über die Steinzeit und die Arbeit von Archäologen – sowie über die Zankereien zwischen ihnen, die manchmal seltsam kleinlich anmuten. FRANK SCHUBERT



Hans Biedermann

Die Drillinge des Doktor Freud

Schattauer, Stuttgart 2013. 168 S., € 19,95

Nach Sigmund Freud bestimmt der innere Dialog zwischen dem triebhaften »Es«, dem moralischen »Über-Ich« sowie dem »Ich« unser Seelenleben. Über diese drei Instanzen der Psychoanalyse wurde viel geschrieben – doch auch gezeichnet? Mit flottem Strich interpretiert Cartoonist und Psychologe Hans Biedermann das tägliche Drama unserer seelischen Ménage-à-trois. Pointiert und tiefsinnig zeigt er die Dreier-WG unserer Psyche dabei, wie sie hadert und rangelt, sich beschwätzt und austrickst. Umrahmt werden die Comics von einer Einführung in das freudsche Instanzenmodell und einem Glossar mit wichtigen Begriffen. Biedermann überrascht mit vielen Wortspielen (»Keine Neurose ohne Dornen«) und lässt das Dreiergespann sich auch mit dem berühmten Psychoanalytiker persönlich anlegen. Die klugen Zeichnungen machen Freuds Theorie selbst Laien verständlich und halten uns mit einem Augenzwinkern den Spiegel vor. Sigmund Freud hätte das sicher witzig gefunden. KERSTIN PASEMANN



Green Science

Sauberes Wasser

HCM Kinzel, Zaberfeld. 404 Gramm inkl. Verpackung, € 12,95

Mit diesem Experimentierset können Kinder verschiedene Methoden ausprobieren, um verschmutztes Wasser zu reinigen: Filtration, Destillation und Pasteurisierung. Neben drei Hauptexperimenten lassen sich weitere Versuche durchführen, etwa der Bau einer Entsalzungsanlage. Der Experimentierkasten ist empfohlen für Kinder ab acht Jahren; ein Erwachsener sollte jedoch die Anleitung lesen und beim Zusammenbau helfen. Manche Schritte sind knifflig und erfordern den Umgang mit Kleinteilen. Dank der guten Erklärungen kann nicht viel schiefgehen. Allerdings muss man auf das Ergebnis eines Versuchs oft lange warten. Falls etwas nicht funktionieren sollte, gibt die Anleitung nützliche Hinweise zur Fehlerbehebung. Auch erfährt der Leser vieles zum Thema Wasseraufbereitung – schade, dass der Text einige Schreib- und Kommafehler enthält. Kinder, die sich für Umweltthemen interessieren und Dinge gern selbst testen, werden an dem Experimentierset ihre Freude haben. Sie sollten aber Fingerfertigkeit und Geduld mitbringen. FENJA SCHMIDT

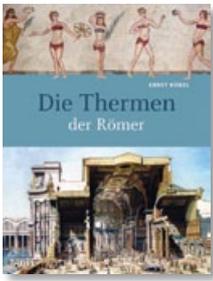


Coralie Colmez, Leila Schneps

Wahrscheinlich Mord – Mathematik im Zeugenstand

Aus dem Englischen von Klaus Fritz. Hanser, München 2013. 276 S., € 19,90

Das Buch beschreibt acht Kriminalfälle, die sich wirklich zugetragen haben, vor Gericht verhandelt wurden und in denen Mathematik eine entscheidende Rolle spielte. In allen Fällen zogen Ermittler, gestützt auf mathematische Überlegungen, falsche Schlussfolgerungen. Colmez und Schneps, beide Mathematikerinnen, erklären diese Fehler und geben Hinweise, wie sie hätten vermieden werden können. Geht es den Autorinnen anfangs noch um die Unabhängigkeit von Ereignissen, bemühen sie später den Satz von Bayes, der von der Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten handelt, und befassen sich schließlich mit komplexen statistischen Fehlern. Die mathematischen Aspekte haben von Fall zu Fall ein unterschiedliches Gewicht und wirken an manchen Stellen weit hergeholt. Der Sprachstil ist oft sperrig. Insgesamt ist das Buch aber ausgezeichnet recherchiert, fachlich gut nachvollziehbar und stellenweise sehr unterhaltsam. LARS JESCHIO



Ernst Künzl
Die Thermen der Römer
Theiss, Stuttgart 2013.
160 S., € 34,95

GESCHICHTE

Wellness-Oasen der Antike

Ernst Künzl bietet eine eindrucksvolle Darstellung der römischen Badeanlagen und ihrer kulturhistorischen Bedeutung.

Die Römer waren ausgesprochene Utilitaristen. Ein öffentliches Bauwerk musste nicht in erster Linie schön, sondern für die Allgemeinheit nützlich sein. Dieses Prinzip prägte die Architektur des römischen Weltreichs – noch Jahrhunderte nach seinem Untergang. Das gilt auch für die Thermen. Jene dem Gemeinwohl dienenden Badeanlagen seien allemal nützlicher als die überflüssigen Pyramiden Ägyptens, die einzig der törichten Zurschaustellung des Reichtums der Pharaonen dienten, urteilte Mitte des 1. Jahrhunderts n. Chr. Frontinus, ein römischer Fachschrift-

der in Rom wie überall im Imperium seit dem 1. Jahrhundert n. Chr. gepflegt wurde. Öfter als unsereins heute besuchten die Römer öffentliche Badeanlagen, nicht nur, um ihren Körper zu waschen, sondern auch, um ihn zu trainieren und durch Wechselbäder – Schwitzen im Heißbad und Erfrischung im Kaltbad – zu stärken. Nachgehen konnte man diesem Freizeitvergnügen nahezu überall. Die »Notitia regionum urbis Romae«, ein aus dem 4. Jahrhundert stammendes Verzeichnis der Stadtbezirke Roms, zählt allein in der Tibermetropole zehn große und 856

Der Betrieb antiker Thermen erforderte Unmengen von Brennholz – 200 Tonnen jährlich für eine einzige Anlage

steller für Wassertechnik und Militärgeschichte.

Vielleicht war es diese Praxisbezogenheit, welche die unterworfenen Völker Roms so an den Machthabern bewunderten. Ganz sicher aber trug die Attraktivität der römischen Lebensart dazu bei, dass sie bereitwillig ihre alten Lebensformen den Annehmlichkeiten der römischen Zivilisation opferten. Thermen spielten bei dem »Prozess der Selbstromanisierung« eine nicht unerhebliche Rolle, zumal die Römer ein begründetes Interesse daran hatten, den Untertanen auch ohne Lanze und Schwert die Verlockungen ihrer Zivilisation schmackhaft zu machen.

Die römische Badekultur war Ausdruck eines verfeinerten Lebensstils,

kleinere Bäder auf. Hinzu kommen reichsweit mehr als 600 archäologisch nachgewiesene öffentliche Bäder, während die Zahl der Privatbäder in die Tausende gehen dürfte. Selbst in den entlegensten Winkeln des Imperiums verfügten die römischen Militärlager über eigene Badeanlagen.

Fachkundig und anschaulich führt der Mainzer Archäologe Ernst Künzl dem Leser vor Augen, welch hohen gesellschaftlichen und kulturellen Stellenwert die Thermen in der Antike hatten, wie sie betrieben und genutzt wurden und welche Spuren sie bis heute im gesamten Gebiet des Imperium Romanum hinterlassen haben. Der Autor erzählt von der Entwicklung der Thermen und stellt diese in ihren kultur-

geschichtlichen Zusammenhang, erläutert deren technische und architektonische Grundlagen – zum Beispiel Aufbau und Funktionsweise der berühmten Caracalla-Thermen in Rom –, beschreibt ihre meist prachtvolle Ausstattung und taucht ein in das pulsierende Innenleben dieser antiken Wellness-Center.

Dabei weiß der vormalige Direktor der römischen Abteilung am Römisch-Germanischen Zentralmuseum in Mainz allerlei Wissenswertes und Kurioses über den alltäglichen Badebetrieb in den meist zu kunstvollen Architekturen ausgestalteten Anlagen zu vermitteln. Neben dem reichhaltigen Wellness-Angebot (Kalt- und Warmwasserbäder, Sauna, Massage) gab es weitere Möglichkeiten der Zerstreung, etwa in Gestalt von Bibliotheken, Gärten, Sportanlagen und Restaurants. Als Kontakt- und Nachrichtenbörsen hatten die Thermen auch politische Bedeutung. Männer und Frauen badeten bis auf wenige Ausnahmen getrennt. In den zu den Badeanstalten gehörenden Toiletten gab es zwar keine Privatsphäre, aber eine dank technischer Raffinesse äußerst hygienische Form der Exkremententsorgung: Man saß, ohne per Sichtschutz von seinem Nebenmann getrennt zu sein, auf einer langen, sauberen Marmorbank, und was man hinter sich ließ, plumpste in einen Kanal, in dem fließendes Wasser sofort alles wegpülte. Römische Badeanlagen standen selbst rechtlosen Sklaven offen. Chirurgen führten in Nebenräumen sogar Operationen durch.

Nur Seife kannten die Römer nicht. Der Körper wurde mit parfümiertem Öl eingerieben, anschließend mit heißem Wasser übergossen. Dann schabte ein Sklave mit einem flachen Eisen die Schmutz- und Ölschicht von der Haut. Das Waschen war vermutlich der unangenehmste Teil eines Thermenbesuchs.

Für wohlige Wärme in den Bädern sorgte die Unterbodenheizung (Hypokaustum), eine Technik, die man von den Griechen übernahm und fortlaufend perfektionierte. Dabei wurde in einer unterirdischen Feuerstelle Holz verbrannt und die heiße Luft durch ein

System von Hohlziegeln und Tonröhren in Böden und Wände geleitet. Das war selbst nach heutigen Kriterien ein Energie sparendes Heizsystem, welches die Wärme optimal an die Innenräume abgab. Eine gute Isolierung sorgte dafür, dass es dort auch dauerhaft behaglich blieb. Ein Nachteil war allerdings der immense Verbrauch an Brennstoffmaterial. Wie aktuelle Brennstoffberechnungen verdeutlichen, benötigte

man allein für den Betrieb der 65 mal 42,5 Meter großen Thermenanlage im bayerischen Weißenburg (Biriciana) jedes Jahr reichlich 200 Tonnen Holz – das entspricht einem Waldstück von 75 mal 100 Metern.

Ernst Künzl hat mit dem vorliegenden Sachbildband eine Studie verfasst, die auf dem aktuellen Forschungsstand und auf neuesten archäologischen Erkenntnissen basiert und laienfreundli-

che Geschichtsvermittlung mit seriöser Darstellung der Fakten zu verbinden vermag. Wer sich über die Geschichte der römischen Thermen eingehend informieren will, dem sei dieses Buch wärmstens empfohlen.

Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist; er lebt in der Nähe von Mainz.



Bruno P. Kremer

Blütengeheimnisse

Wie Blumen werben, locken und verführen

Haupt, Bern 2013.

248 S., € 39,90

BOTANIK

Vom Zauber der Blumen

Ein Biologiedidaktiker gewährt Einblicke in die Blütenbiologie – und überzeugt dabei nicht immer.

Bruno P. Kremer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität zu Köln. Das merkt man seinem Buch an. Er überblickt sein Gebiet nicht nur, sondern kann es auch didaktisch geschickt vermitteln. Sein Thema, die Blütenbiologie (auch Blütenökologie), beschäftigt sich mit den Wechselbeziehungen zwischen den Blütenpflanzen und ihrer Umwelt zum Zweck einer er-

Blütenbiologie einigermaßen vollständig darzustellen. Um ihm zu folgen, benötigt man zunächst Grundkenntnisse in Botanik: Blütenbau, Sexualität bei Pflanzen, phylogenetische Ableitung der Blüte von den Sporenpflanzen, die dazugehörigen Generationswechsel und so weiter. Erst im zweiten Teil seines Buchs kommt er zum eigentlichen Thema. Dort erläutert er dann, wie Blüten und ihre Bestäuber aus dem Tier-

Manche Blüten locken ihre Besucher mit einer Mogelpackung an, indem sie außer Duft nichts bieten

folgreichen Bestäubung. Diese Beziehungen können zur unbelebten Natur bestehen, etwa zur Luft bei Windbestäubung. Interessanter sind aber meist die Abhängigkeiten von Tieren, vor allem von Insekten, aber auch Vögeln und Säugetieren. Der Untertitel des Werks kündigt ja einige Teilgebiete bereits an.

In sieben Kapiteln versucht der Autor, den heutigen Wissensstand in der

reich (vor allem Insekten) ihre in einer Koevolution erworbene Passung nutzen, allerdings fast nur aus Sicht der Pflanzen.

Es folgen sowohl klassische als auch moderne »Blütengeheimnisse«: wie Pollen gebildet werden und auf Rasterelektronenmikroskopaufnahmen aussehen, wie die Bestäubung bei der Wasserpest abläuft, was man über Windbe-

stäubung bei der Hasel und bei Gräsern weiß sowie über die Insektenbestäubung bei zahlreichen – meist einheimischen – Pflanzen. Dabei geht Kremer durchaus ins Detail. So schildert er, wie manche Blüten ihren Bestäubern den Weg zum Nektar oder zum Blütenstaub mit Hilfe von auffälligen Farben (so genannten Saftmalen) weisen oder wie andere ihre Besucher mit Duft anlocken, ohne etwas dafür zu bieten – eine Art Betrug also. Bebildert ist das Ganze mit beeindruckenden Nahaufnahmen, die meisten vom Autor selbst. Sogar mit einer zehnfach vergrößerten Lupe bekommt man nicht so viele Einzelheiten zu sehen, allenfalls im Labor am Binokular. Zum Vertiefen des Stoffs führt der Verlag auf seiner Website www.haupt.ch 20 weiterführende Experimente auf, die sich für den Unterricht als äußerst nützlich erweisen können. Das Spektrum der ausgewählten Beispiele, die Qualität der Bilder und die verständliche Aufbereitung des Stoffs machen Kremers Buch lesenswert, und zwar sowohl für interessierte Laien als auch für Fachleute. Ein umfangreiches Literaturverzeichnis komplettiert das Werk.

Leider enthält es aber auch zahlreiche ärgerliche Schnitzer, die nicht alle zu Lasten des Autors gehen. So ist eine Blüte des Wiesenstorchschnabels gleich dreimal abgebildet, eine (überbelichtete) Aufnahme vom Lungenkraut taucht zweimal auf, und der Blütenstand eines Grases ist im Querformat gedruckt. Manchmal beschreibt der Text Pflanzen, die nicht abgebildet sind – wohingegen Fotos von Gewächsen erscheinen, die an den entsprechenden Stellen

überhaupt nicht erwähnt werden. Mehrfach verweist der Text auf eine nicht auffindbare nummerierte Grafik. Noch schlimmer wird es, wenn der Autor auf den Seiten 82 und 83 erklärt, warum wir Blüten als ästhetische Gebilde sehen: weil ihre Proportionen in bestimmten Fällen dem goldenen Schnitt gehorchen. Kremer versucht dann offenbar, die Konstruktion des goldenen Schnitts aufzuzeigen, wobei das Buch aber die hierfür angekündigte Zeichnung schuldig bleibt. Dann sind zwei Zeichnungen auch noch vertauscht und unvollständig, und der Text enthält in einem missglückten Rückgriff auf Pythagoras die unsinnige Aussage » $32 + 42 = 52$ « statt » $3^2 + 4^2 = 5^2$ «.

Auch die Sprache erscheint dem Thema manchmal unangemessen. So beruht ein großer Teil des Zaubers, der von den Blumen ausgeht, auf der Formästhetik von Blüten, Pollen, Samen und Blättern. Kremer weiß, dass diese Ästhetik in keiner Weise auf das menschliche Empfinden abgestimmt ist, dennoch erliegt er immer wieder der Versuchung, anthropozentrische For-

mulierungen wie »erschütternde Szenen« (für eine bestimmte Form der Pollenaufnahme durch Hummeln) oder »Ausflugslokal mit Tankstelle« (für Nektarien) zu verwenden. An anderen Stellen verleiht er Blüten Attribute wie »visuelle Knalleffekte«, »Blickfang in der Parade aufgedonnerter pflanzlicher Mannequins«, »aufgemotzte Gartenschöne« oder bezeichnet Ameisen als »Skinheads unter den Insekten«.

Dafür entschädigen zahlreiche Anekdoten aus dem Leben bedeutender Forscher wie Carl von Linné (1707–1778; er ordnete die Pflanzen nach dem Bau der Blüten), Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832; er erkannte, dass Blüten nur umgewandelte Blätter sind) oder Christian Konrad Sprengel (1740–1816; er begründete die Blütenbiologie, was ihn letztlich seinen Beruf kostete). Solche Kenntnisse in Kultur- und Wissenschaftsgeschichte sind dann wieder eine große Bereicherung für das Buch.

Jürgen Alberti

Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.



Thomas de Padova

Leibniz, Newton und die Erfindung der Zeit

Piper, München 2013.

352 S., € 22,99

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Großer Streit um die Zeit

Als Leibniz und Newton sich über die Infinitesimalrechnung entzweiten, ging es nicht bloß darum, wer als Erster mit unendlich kleinen Größen zu rechnen verstand. Hinter dem Gelehrtenzank steckte ein fundamental unterschiedliches Zeitverständnis.

Am Beispiel der Zeitmessung demonstriert Thomas de Padova überzeugend, dass physikalische Theorien keine Ausgeburt reinen Denkens sind, sondern mathematisch zusammengefasste Erfahrungen mit Appara-

ten. In seinem Buch schreibt er: »Die Gelehrten überprüfen mit Pendeluhrn die Gleichmäßigkeit der Erdrotation, bestimmen die Beschleunigung freifallender Körper oder die Geschwindigkeit des Schalls. Ohne die vorherige Er-

WWW.SPEKTRUM.DE



Christiane Gelitz (Hrsg.)

Profiler & Co

Kriminalpsychologen auf den Spuren des Verbrechens

Ein Ehemann, der seine Frau erwürgt. Eine Krankenschwester, die ihre Patienten ermordet. Kriegsverbrecher, die Lust am Töten haben.

Im Dienste der Wahrheit arbeiten Polizei und Gerichte mit Psychologen und Hirnforschern zusammen. Wissenschaftler und Journalisten schildern, welche Methoden den Strafverfolgern beim Ermitteln helfen – Profiling, Computerprogramme, Verhörtechniken, Aussageanalyse, Lügendetektoren.

Fundiert und eindrücklich ergründen die Autoren Motive und Hintergründe von Verbrechen, erstellen psychologische Täterprofile und analysieren die Ursachen von Gewalt.

Auch die Bedeutung psychologischer und neurobiologischer Befunde für die Rechtsprechung wird beleuchtet. Wissenschaftler und Journalisten erzählen dazu wahre Geschichten aus der kriminologischen Forschung und Praxis.

2013. 172 Seiten, 16 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)
ISBN 978-3-7945-2962-9

Jetzt bestellen!

Internet: www.schattauer.de/shop
E-Mail: order@schattauer-shop.de



 **Schattauer**
www.schattauer.de

findung dieser Zeitmesser [...] wäre auch jene allgemeine Bewegungs- und Schwerkrafttheorie nicht vorstellbar, die Isaac Newton gegen Ende des Jahrhunderts aufstellte.«

Gemeint ist das 17. Jahrhundert, in dem nicht nur der große englische Naturforscher Isaac Newton (1642–1727) mit seinen »Principia mathematica«

Newton postulierte eine absolute Zeit, die vollkommen unabhängig und gleichmäßig dahinfließt. Leibniz hingegen hielt die Zeit für eine Eigenschaft der Bewegung von Objekten

den Grundstein der klassischen Physik legte, sondern auch einige weniger prominente Handwerker erstmals auf die Sekunde genaue Pendeluhr schufen. Im selben Jahrhundert wirkte auch der deutsche Philosoph und Universalgelehrte Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716), der aus der Bekanntschaft mit verlässlichen Messgeräten einen ganz anderen Zeitbegriff herleitete als sein englischer Kollege und Konkurrent (siehe etwa Spektrum der Wissenschaft 9/2011, S. 48).

Newton postulierte: Das, was zeitgenössische Uhren sukzessive immer genauer messen, ist eine absolute Zeit, die völlig unabhängig von allen physikalischen Zusammenhängen gleichmäßig dahinfließt, sozusagen der Pendelschlag einer vollkommenen Uhr. Die absolute Zeit bildet – zusammen mit dem ebenso absoluten Raum als vollkommenem Metermaß – gewissermaßen die physikalische Bühne, auf der sich alle Vorgänge des Universums abspielen. Newtons absolute Zeit beherrschte die Physik unangefochten 200 Jahre lang, bis Albert Einstein (1879–1955) sie mit der Relativierung der Zeitmessung entthronte. Seither wissen wir: Bewegte Uhren gehen langsamer.

Wie de Padova zeigen will, mutet darum das, was Leibniz unter »Zeit« verstand, aus heutiger Perspektive durchaus modern an. Leibniz hielt eine absolute, von allem unabhängige Zeit für Unfug; sie sei vielmehr eine Eigenschaft der Bewegung von Objekten. In einem Weltall ohne ein einziges veränderliches Ding wäre es dem deutschen

Universalgelehrten zufolge sinnlos, von Zeit zu sprechen.

Ganz in diesem Sinn sollte Einstein zu Beginn des 20. Jahrhunderts definieren: Zeit ist das, was Uhren messen. Insofern sind heutige Physiker eher Leibnizianer als Newtonianer.

Eingehend schildert de Padova den ersten großen Prioritätsstreit der Wis-

senschaftsgeschichte und seine Hintergründe. Darin ging es nicht nur um die Zeit, sondern um die Mathematik kleinster Unterschiede in Zeit und Raum. Newton und Leibniz entwickelten etwa gleichzeitig und unabhängig voneinander das Rechnen mit Differenzialen und Integralen, das man braucht, um Volumina von Körpern oder ihre Bahnkurven im Gravitationsfeld exakt

zu berechnen. Beide wussten, dass ihnen die Entdeckung eines mathematischen Formalismus für unendlich kleine Raum- und Zeitunterschiede einen Platz im Ehrentempel der Naturforscher sichern würde – und keiner gönnte diesen Platz dem ebenbürtigen Konkurrenten.

Das alles wird nicht trocken referiert. Der Autor zeichnet ein buntes Panorama der Zeitumstände, vor deren Hintergrund sich die Auseinandersetzung um das Wesen der Zeit und ihre immer feiner messbaren Unterschiede abspielte. Thomas de Padova versteht es, abwechslungsreich und spannend zu erzählen. Seit Langem hat mich kein Sachbuch so angenehm belehrt und vergnügt.

Michael Springer

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



Christian Tapp

An den Grenzen des Endlichen

Das Hilbertprogramm

im Kontext von Formalismus und Finitismus

Springer Spektrum, Berlin 2013.

376 S., € 34,95

MATHEMATIK

Die Wissenschaft vom Unendlichen

Über den Versuch des Mathematikers David Hilbert, die Widerspruchsfreiheit der Mathematik aufzuzeigen.

Die Mathematik genießt von jeher den Ruf, besonders sichere Erkenntnisse hervorzubringen, und hat in dieser Rolle anderen Wissenschaften oft als Vorbild gedient. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts geriet sie jedoch in eine Krise, ausgelöst von Widersprüchen, die sich aus dem problematischen Umgang mit dem Unendlichen ergaben. Hiervon fühlte sich der deut-

sche Mathematiker David Hilbert (1862–1943) herausgefordert. Sein ehrgeiziges Ziel lautete, die Grundlagen der Mathematik zu sichern. Er entwickelte das so genannte Hilbertprogramm, ein Konzept, um die Widerspruchsfreiheit der Mathematik und ihrer Methoden zu zeigen.

Was für Ziele und Mittel hat Hilbert in seinem Programm verfolgt? Welche

Ideen kamen dabei auf? Welche philosophischen Positionen hat Hilbert im Bezug auf die Mathematik vertreten? Und: Ist das Programm gescheitert, wie es viele auf Grund des so genannten gödelschen Unvollständigkeitssatzes (siehe etwa SdW 9/1999, S. 74) behaupten? Diese und weitere Fragen behandelt Christian Tapp, Professor für philosophisch-theologische Grenzfragen an der Ruhr-Universität Bochum, in seiner nun auch bei Springer erschienenen Dissertation »An den Grenzen des Endlichen«.

Zunächst setzt er sich mit den einflussreichsten Bestrebungen auseinander, die zu Hilberts Zeiten darauf abzielten, die Mathematik gegen Widersprüche abzusichern. Da gab es etwa den – laut Tapp eher gescheiterten – Versuch, die Mathematik auf die Logik

Der Autor kommt zu dem Schluss, das Hilbertprogramm habe sein Ziel nicht erreicht, die Probleme mit dem Unendlichen aufzulösen

zurückzuführen (logizistisches Programm). Einen anderen Ansatz verfolgte der Intuitionismus, dem zufolge die Mathematik überhaupt kein logisches Gebäude von Sätzen ist. Außerdem besagt er, man müsse die Mathematik radikal beschränken: zum Beispiel, indem man nur konstruktive Beweise zulässt und dem sonst in der Mathematik gängigen Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten (entweder ist eine Aussage oder ihre Negation wahr) keine Rolle mehr zumisst.

Für Hilbert begründen diese Beschränkungen eine abzulehnende »Verbotsdiktatur«, weshalb er sein eigenes Programm entwickelte. Es besteht aus zwei Schritten. Erstens soll die gesamte »eigentliche Mathematik« formalisiert werden, so dass aus ihr Systeme beweisbarer Formeln werden. Diese Forderung hat wohl dazu beigetragen, dass Hilbert in der Philosophie der Mathematik dem Formalismus zugerechnet wird – was nicht angemessen ist, wie Tapp darlegt. Zugespitzt formuliert, besteht das Wesen der Mathematik dem Formalismus zufolge in der Manipulation bedeutungsloser Formeln nach bestimm-

ten Regeln. Hilbert hingegen sei es viel eher um einen methodischen und axiomatischen Formalismus gegangen: Er habe die Mathematik nur im ersten Schritt formalisiert betrachten wollen, um die Widerspruchsfreiheit zu zeigen, und nicht als Ersatz für die »eigentliche Mathematik«. Die umfangreichen Ausführungen des Autors zur Axiomatik und zum mathematischen Wahrheitsbegriff sind positiv hervorzuheben, da sie Hilberts Auffassungen und dem damit verbundenen neuen Mathematikverständnis sehr aufschlussreich nachgehen.

Im zweiten Schritt des Programms, erläutert Tapp, soll zur eigentlichen formalisierten Mathematik eine nicht formalisierte, inhaltliche Metamathematik hinzutreten, mit der die Widerspruchsfreiheit der ersteren gezeigt

werden kann. Es ist klar, dass die metamathematischen Beweismittel stark genug sein müssen, um dies zu leisten. Andererseits sollen die Probleme der eigentlichen Mathematik hier nicht auftauchen, und die Beweismittel müssen besonders gerechtfertigt sein. Hilbert hat sich bei den Überlegungen zu dieser Metamathematik vom Intuitionismus inspirieren lassen: Die Metatheorie, auf die alles zurückgeführt werden soll, muss ihm zufolge auch ohne Widerspruchsfreiheitsbeweis als sicher gelten und daher »anschaulich überblickbar, handgreiflich sicher und auf jeden Fall endlich« sein.

Tapp behandelt auch die verschiedenen praktischen Umsetzungen des Hilbertprogramms. Er analysiert sowohl die Arbeiten des Mathematikers selbst als auch die seiner Kollegen Wilhelm Ackermann (1896–1962) und Gerhard Gentzen (1909–1945). Zudem geht er in philosophisch-kritischen Reflexionen der Frage nach, ob das Programm letztlich gescheitert sei. Hilbert war überzeugt davon, dass »seine Beweistheorie einen entscheidenden Beitrag dazu leisten würde, die Probleme mit dem

Unendlichen« radikal aufzulösen. Die Rede vom Unendlichen sei in der Mathematik demnach eine Sprechweise und durch die finite (das heißt endliche) Metamathematik »eliminierbar«. Tapp kommt nach differenzierten Betrachtungen zu dem Ergebnis, dass das Hilbertprogramm in diesem Sinn tatsächlich kaum durchführbar ist und das Ziel, »die Grundlagenfragen in der Mathematik als solche endgültig aus der Welt zu schaffen« (mit den Worten von Hilbert selbst), nicht erreicht wurde. Dies deutet der Autor als Bestätigung der Aussage des Mathematikers und Philosophen Hermann Weyls (1885–1955), wonach die »Mathematik die Lehre vom Unendlichen« sei. Allerdings zeigt er, dass aus den gödelschen Sätzen nicht prinzipiell das Scheitern gefolgert werden kann. Und erfolgreich war das Programm insofern, als es eine neue und Früchte tragende mathematische Disziplin begründete, die Beweistheorie.

Dem Anspruch, neue Deutungen auf der Grundlage historischer Forschung zu präsentieren und fehlerhafte Interpretationen in Bezug auf das Hilbertprogramm auszuräumen, wird Tapp gerecht. Seine historischen, mathematischen und philosophischen Analysen sind wissenschaftlich fundiert und überzeugend. Tapp versteht es, auch in komplexen Zusammenhängen äußerst klare, gut strukturierte Darstellungen zu liefern. Ursprünglich als wissenschaftliche Arbeit konzipiert, ist das Werk allerdings für Leser ohne solide mathematische und grundlegende philosophische Kenntnisse nur schwer verständlich. Der Autor setzt zahlreiche Fachtermini, formale Schreibweisen und das Wissen um mathematische Aussagen beim Publikum voraus. Sein Buch richtet sich daher am ehesten an Studierende der entsprechenden Fächer, Mathematiker beziehungsweise fortgeschrittene Interessierte.

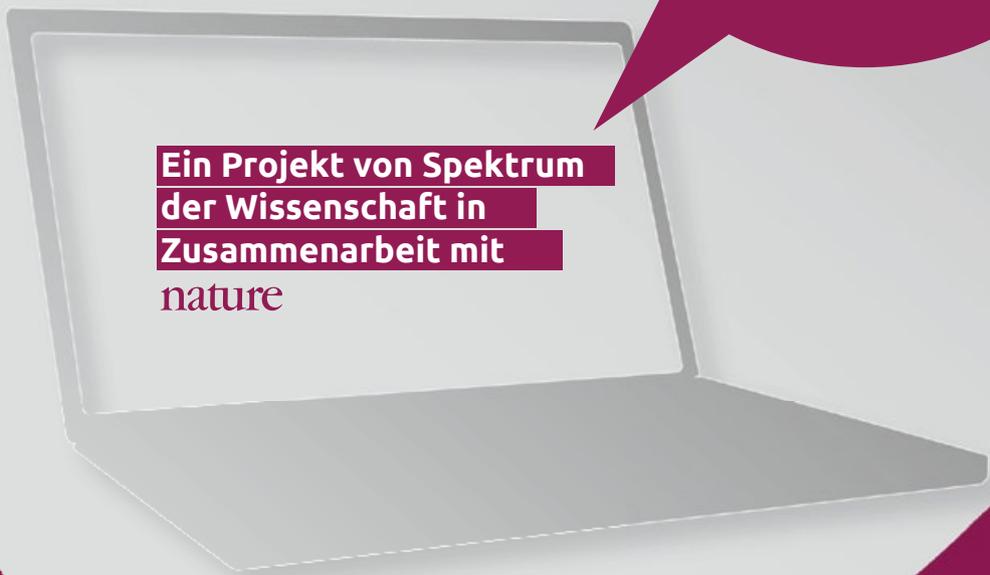
Roland Pilous

Der Rezensent arbeitet als Dozent für Mathematik an der Leibniz Universität Hannover.



SciLogs

*Diskutieren Sie mit –
auf unserem Portal für
Wissenschaftsblogs!*



**Ein Projekt von Spektrum
der Wissenschaft in
Zusammenarbeit mit
nature**

*Jetzt auch
auf Englisch!*

**www.SciLogs.com
www.SciLogs.de**

Auf SciLogs bloggen mehr als 100 Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachgebieten sowie mehrere Wissenschaftsjournalisten. Ihr Anliegen ist der interdisziplinäre Dialog über Wissenschaft in all ihren Facetten: Forschung, Anwendung, Politik, Ethik, Werte.

1913

Blitzlichtgewitter

»Die wiedergegebene Aufnahme wurde von Hans Schinzinger-Hohenheim in Rottweil aufgenommen. Bei dieser Aufnahme ist besonders der Ausgleich der elektrischen Luftspannung mit der Erdspannung interessant, was an dem Aufwärtsschlagen der Ausgleichblitze an dem Turmgeländer deutlich wahrnehmbar ist. Erforderlich sind für solche Aufnahmen empfindliche Meßinstrumente und Magnetnadeln, mit deren Hilfe man die Zu- und Abnahme der

Entladungskapazität deutlich verfolgen kann. Es muß ebenso (das Objektiv) wie der ganze Apparat besonders wasserdicht gebaut sein.« Die Welt der Technik 21, S. 415, 1913



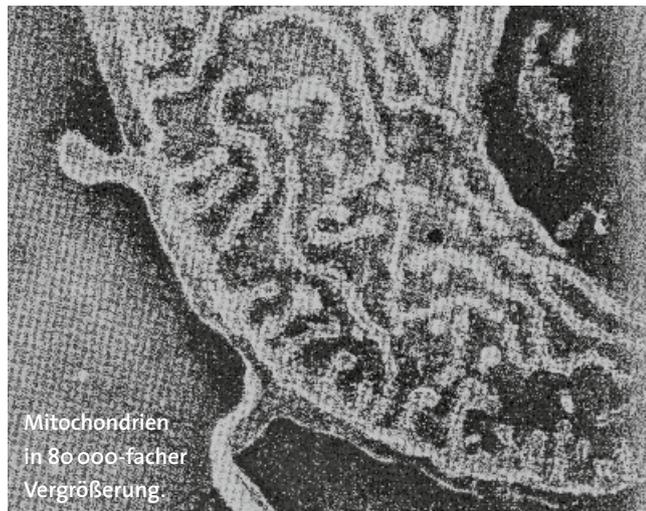
Einschlag im »Hohen Turm« in Rottweil.

Heiß und fleckig

»Messungen haben ergeben, daß die Wärmestrahlung der Sonne zur Zeit der Fleckenmaxima geringer ist als zur Zeit der Minima. J. Liznar zeigt an einem über 33 Jahre sich erstreckenden Beobachtungsmaterial, daß nicht nur die Temperatur, sondern auch die Bewölkung in direkter Abhängigkeit von der Fleckenperiode der Sonne stehen. Liznar knüpft daran die Hoffnung, eine Prognose für die Temperaturverhältnisse künftiger Jahre zu geben.« Die Umschau 46, S. 969, 1913

Färbendes Gefieder

»Vögel, die abfärben, sind den Zoologen längst bekannt. Sie gehören zu drei Gattungen der afrikanischen Familie der Pisangfresser. Nach verschiedenen Berichten färben Turakos, die in der Gefangenschaft gehalten werden, das ihnen gereichte Trink- oder Badewasser rot. Chemische Untersuchungen über den Farbstoff hat zuerst Sir Arthur H. Church ausgeführt. Die chemische Zusammensetzung des Farbstoffs ist insofern bemerkenswert, als er neben den vier organischen Hauptelementen 7% Kupfer enthält. In der vorläufigen Formel kommt ein Atom Kupfer auf vier Atome Stickstoff. Das ist dasselbe Verhältnis, wie es im Blutfarbstoff zwischen Eisen und Stickstoff besteht.« Die Umschau 46, S. 946, 1913



Mitochondrien
in 80 000-facher
Vergrößerung.

Kraftwerke der Zellen

»Die Feinstruktur der Mitochondrien wurde im Elektronenmikroskop sichtbar gemacht. Zu diesem Zwecke wurden einzelne Zellen so auf die Oberfläche einer Lösung gebracht, daß ihr Inhalt auf der Flüssigkeitsoberfläche schwimmt. Es ergab sich, daß der äußeren Membran der Mitochondrien und deren Ausstülpungen kleine Gebilde aufgelagert sind. Diese Gebilde wurden von Fernandez-Moran isoliert, der nachwies, daß sie die kleinste Einheit darstellen, in der noch die gesamte Enzymkette des Elektronentransportes vorhanden ist.« Naturwissenschaftliche Rundschau 11, S. 444, 1963

Taggenau mit der Korallenuhr

»Korallen als geologische Uhr schlägt J.W. Wells vor, um die Gültigkeit der weitgehend axiomatischen Voraussetzungen zu überprüfen, auf denen die in den letzten Jahren erarbeitete Zeitskala ruht, deren Grundlage der Zerfall radioaktiver Isotope ist. Im Gegensatz zur Geologie kann die Astronomie rechnerisch nachweisen, daß die Tageslänge im Laufe von Jahrtausenden infolge der Bremsung durch die Ge-

1963

zeiten abgenommen hat, so daß im Cambrium das Jahr noch 424 Tage gehabt haben soll. Wells konnte nun Tagesschwankungen der Kalkablagerung in der Epitheka einiger Korallen nachweisen. An mehreren Korallen aus dem mittleren Devon (kommen) tatsächlich 385 bis 410 Tagesringe auf einen Jahresring.« Naturwissenschaftliche Rundschau 11, S. 452, 1963

Spieglein, Spieglein an der Wand

»Eine französische Schule hat versuchsweise eine neuartige Wandtafel eingeführt, die nicht aus schwarz gestrichenem Holz, sondern aus Spiegelglas besteht. Sie hat

den Vorteil, dass der Lehrer, während er an der Tafel schreibt, seine Schüler im Spiegel im Auge behalten kann. Das Beschreiben erfolgt mit einer besonderen Kreideart.« Neuheiten und Erfindungen 334, S. 208, 1963

Das Innenleben der Quarks

Quarks und Leptonen besitzen weder Ausdehnung noch Struktur – so lehrt es das Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Doch es gibt Hinweise, dass es auch anders sein könnte. Vielleicht stößt der Beschleuniger LHC schon bald in eine verborgene Welt noch kleinerer Partikel vor.

CRAIG CUTLER



Rückkehr der Pockenviren

Die Pocken sind seit mehr als 30 Jahren Geschichte, doch ihre Verwandten – die Affenpocken und die Kuhpocken – erleben derzeit ein Comeback. Die Zahl infizierter Menschen steigt. Das Fatale: Diese Viren könnten wegen der komplizierteren Übertragungswege ungleich schwieriger auszurotten sein.

Autonome Autos

Ein »Taxi ohne Fahrer« kommt auf Zuruf und macht sich nach erfolgter Fahrt selbsttätig wieder davon: Bis dieser Traum Realität wird, muss das Gerät allerdings noch elementare Dinge lernen – zum Beispiel erkennen, wo genau der Straßenrand verläuft.



SMARITISCHE MUSEEN ZU BERLIN, VORDERASIATISCHES MUSEUM; FOTO: CLAF M. TESSIER

Die Keilschrift: Wissen für die Elite

Leicht zu beschaffende Materialien, lange Haltbarkeit und viele Freiheiten in der Zeichensetzung: Die Keilschrift, das erste bekannte Schriftsystem der Welt, hatte viele Vorzüge und war jahrtausendlang in Gebrauch. Heute verrät sie Forschern sogar, wie das Sumerische einst klang.



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

Mars im Wandel

Die Oberfläche des Roten Planeten verändert sich permanent. Die spannende Frage lautet: Gehört auch Wasser zu den Ursachen? Neu entdeckte linienartige Strukturen liefern die bislang besten Indizien für die Existenz von flüssigem Wasser auf dem Mars.

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

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO***



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv! *Für Printabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* kostenlos!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hochqualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

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

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.org