

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SERIE
DIE GRÖSSTEN
RÄTSEL DER
ASTRONOMIE
Geburt und Tod
der Sterne

AUGUST 2013

TIERWANDERUNGEN

Minisender offenbaren
Überraschungen

NEUROWISSENSCHAFT

Wie Lust im
Gehirn entsteht

ARCHÄOLOGIE

Die Gottkönige
von Hawaii

Neue Strategien gegen Krebs

Physiker wollen
die Tumorthherapie
revolutionieren

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



UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Merktechniken: Wissen zuverlässig speichern • Starke Synapsen gegen ADHS • Gedächtnis: Lerne lieber unbewusst • Tagträumen: Hochbetrieb im Oberstübchen • € 8,90 • Ab 30.7. 2013



Evolution: Der Sinn der Allergie • Falsche Prägung: Fehlalarm im Darm • Nahrungsmittel: Wenn im Essen der Tod lauert • Atopisches Ekzem: Was tun gegen Neurodermitis? • € 8,90



Ein neuer Urahn? • Die Seitensprünge des *Homo sapiens* • Warum wir nackt sind • Die Geburt der Kreativität • Großeltern – Segen für die Gesellschaft • € 8,90



Die Wissenschaft vom Unendlichen • Von der Perspektive zur geometrischen Unendlichkeit • Das unendlich Kleine in der Physik • Braucht die Arithmetik das Unendliche? • € 8,90

AUSGEWÄHLTE SONDERHEFTE ALS PDF ODER APP ERHÄLTlich

www.spektrum.de/sonderhefte



Tel.: 06221 9126-743
 Fax: 06221 9126-751
 E-Mail: service@spektrum.com
 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
 Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
 DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Onkologie am Scheideweg?

Seit Richard Nixon 1971 den »Krieg gegen Krebs« ausrief, wurden allein in den USA mehr als 200 Milliarden Dollar in die Forschung investiert. Zwar sind das prinzipiell gut eingesetzte Mittel, denn nach wie vor ist Krebs die zweithäufigste Todesursache – auch bei uns in Deutschland. Doch genau diese Tatsache weist bereits auf ein Dilemma hin: Das viele Geld hat nicht genug bewirkt. Die Fünf-Jahre-Überlebensrate hat sich bei manchen Krebsarten erhöht, von einer wirklich wirksamen »Waffe« ist jedoch noch immer keine Spur zu erkennen. Kritiker monieren zudem, die derzeit mächtigste Strömung innerhalb der Krebsforschung, die Molekulargenetik, münde in eine Sackgasse. An ihrem Ende erheben sich unbezwingbare Datenberge; vor lauter Fixierung auf Details gerate das Ganze aus dem Blick.

In die Diskussion über neue Wege in der Krebsforschung bringen sich auch Physiker verstärkt ein. Sie interessieren sich für das Grundlegende. Im Fall von Krebs sind das zunächst einmal die Materialeigenschaften von Tumoren. So wollen Forscher anhand der mechanischen Verformbarkeit entarteter Zellen Prognosen über den Krankheitsverlauf anstellen. Eine offene Frage dabei lautet, ob die physikalischen Eigenschaften von Geschwulsten von der jeweiligen zellulären Umgebung abhängen. Die Antwort darauf dürfte sich stark auf künftige Behandlungen auswirken (S. 25). Indem sie Tumoren im Computer modellieren, wollen Physiker deren weiteres Wachstum berechnen – und alternative Entwicklungen simulieren, die etwa ein chirurgischer Eingriff oder eine Behandlung mit Medikamenten bewirken (S. 28). Ein großes Problem der Onkologie ist noch immer die Früherkennung; oft diagnostizieren Ärzte eine Erkrankung erst dann, wenn die Chancen auf eine erfolgreiche Behandlung bereits rapide sinken. Um wertvolle Zeit zu gewinnen, erproben Physiker daher eine ganze Reihe von alternativen Nachweisverfahren, messen zum Beispiel Dichteverteilungen und schießen 3-D-Fotos von einzelnen Zellen (S. 31).

Es wäre vermessen, zu erwarten, dass die Besinnung auf die grundlegenden Eigenschaften von Tumoren die Krebsforschung auf einmal umwälzen wird. Die Hoffnung besteht vielmehr darin, dass die Ideen aus der Physik der Onkologie neue Impulse geben, von denen letztlich wir alle profitieren. Ich bin davon überzeugt, Sie werden unseren Streifzug durch die aktuellen Ideenschmieden der physikalischen Krebsforschung mit Gewinn lesen!

Herzlich Ihr

Carl Hönig

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Kevin L. Campbell (links) interessiert sich für die Evolutionsgeschichte von rekonstruierten Proteinen ausgestorbener Arten. **Michael Hofreiter** untersucht an prähistorischen DNA-Sequenzen, wie Körperfunktionen auf Umweltveränderungen reagieren (S. 40).



Der Astrophysiker **Ralf Launhardt** geht am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg der Frage nach, wie Sterne entstehen. Ab S. 46 berichtet er vom wechselhaften Schicksal der strahlenden Himmelskörper.



Dem Bauingenieur und Umwelttechniker **Victor C. Li** gelingt schier Unmögliches: Er macht Beton biegsam (S. 84).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Planetenentstehung • Neuer Ansatz gegen multiple Sklerose • Aufbau von Schmetterlingsrüsseln • Plattentektonische Subduktion vor Europa • Krebsresistente Nacktmulle • Antiker Schmuck aus Meteoriten

11 Bild des Monats

Uralter Primat

12 Forschung aktuell

Simulation des menschlichen Stoffwechsels

Biochemische »Google Map« für Forscher

Navi im Rattenhirn

Nager spielen die Route zu einem Ziel im Geist durch

Goldbach-Variationen

Jede ungerade Zahl ≥ 7

lässt sich als Summe dreier Primzahlen schreiben

Der Feind meines Feindes

Bakteriophagen im Dienst des Immunsystems

SPRINGER'S EINWÜRFE

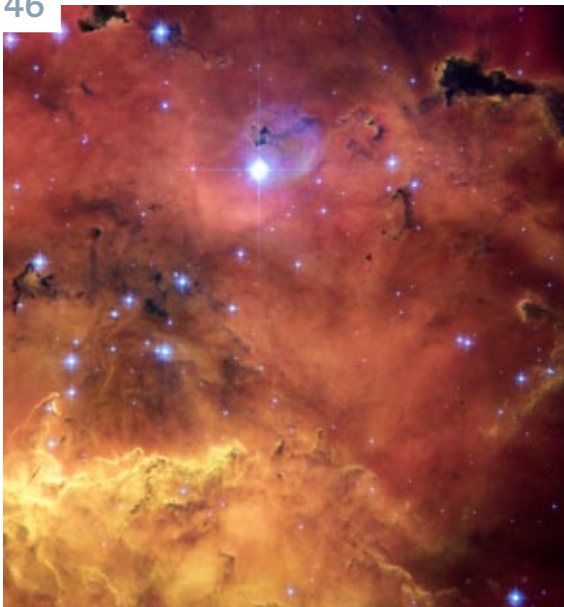
Sportliche Urahren

Frühe Menschen waren gut gebaute Athleten

34



46



..... BIOLOGIE & MEDIZIN

► **34 Freude, schöner Nervenfunken**

Morten L. Kringsbach und Kent C. Berridge

Laut neuen Befunden wurzeln Lust und Verlangen in unterschiedlichen Hirnregionen. Die überraschende Erkenntnis könnte der Behandlung von Sucht und Depression neue Impulse geben.

40 Angepasst an die Eiszeit

Kevin L. Campbell und Michael Hofreiter

Gene von Mammuts enthüllen: Ihr Hämoglobin funktionierte noch bei tiefen Temperaturen gut und versorgte selbst kalte Füße mit Sauerstoff.

..... PHYSIK & ASTRONOMIE

► **46 Das wechselhafte Leben der Sterne**

Ralf Launhardt

Der Nachthimmel erfüllt uns seit jeher mit Staunen. Allmählich verstehen die Astronomen, welche Prozesse die Lichtquellen und Elementfabriken des Alls antreiben.

SCHLICHTING!

58 Immer der Sonne entgegen

H. Joachim Schlichting

Ein scheinbar harmloses Wandervorhaben entwickelt sich zum komplexen geografisch-astronomischen Problem.

..... MENSCH & KULTUR

► **62 Gottkönige im Inselparadies**

Patrick Vinton Kirch

Auf dem Archipel von Hawaii könnten sich ab dem 14. Jahrhundert echte archaische Staaten entwickelt haben – die letzten in der Weltgeschichte.

► TITELTHEMA

Neue Strategien gegen Krebs

Physiker wollen die Tumorthherapie revolutionieren

22 Der Blick fürs Wesentliche

Robert Gatenby

Verzettelt sich die Krebsforschung in Details?

25 Krebszellen im Kräftespiel

Erika Jonietz

Die Rolle der Elastizität bei Tumorzellen.

28 Berechnung des Tumors

Neil Savage

Computermodelle bilden die Vorgänge im Gewebe ab.

31 Das Unheil kommen sehen

Cassandra Willyard

Physiker entwickeln neue Verfahren zur Früherkennung.

74



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

70 Räumliche Gleichdicke

Christoph Pöppe

Eine ebene Platte können sie wie Kugeln schwankungsfrei tragen – aber sie sind nicht kugelförmig. Mit minimalem Volumen gibt es sie sogar in doppelter Ausfertigung.

ERDE & UMWELT

► **74 Auf den Spuren der Tiere**

Roland Knauer

Mit neuen Technologien lassen sich die Wege von Zugvögeln, aber auch anderer Wirbeltiere oder sogar Insekten verfolgen. Dabei gibt es manche Überraschung.

TECHNIK & COMPUTER

84



84 Bigsamer Beton

Victor C. Li

Beton ist spröde und bricht deshalb schon bei relativ geringen Zug- oder Scherspannungen. Durch Zugabe von Kunststofffasern ist es nun gelungen, ihn verformbar zu machen.

93 Rezensionen

E. O. Wilson: Die soziale Eroberung der Erde • Benoit B. Mandelbrot: Schönes Chaos • Sächsische Carlowitz-Gesellschaft (Hg.): Die Erfindung der Nachhaltigkeit • Brian Clegg: Die Vermessung des Körpers • Michael Zimmermann et al.: Achtsamkeit • Martin Bleif: Krebs u. a.

105 Wissenschaft im Rückblick

Von der Dachstein-Eishöhle zum Assuan-Staudamm

106 Vorschau

Titelmotiv: fotolia / Juan Gärtner [M]
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

Auftragsstudien von Pharmaunternehmen

Laut dem Mediziner Klaus Lieb gefährden Auftragsstudien durch die Pharmaindustrie die Objektivität und Neutralität der Forschung (»Mein Essen bezahlt die ich selbst!«, Juni 2013, S. 36).

Martin Diefenbach, Edewecht: Die Hypothese ist plakativ und in dieser Form falsch. Keine Forschung ist unabhängig, es sei denn, sie kommt ohne Forscher, Geld und Geräte aus. Fließt weniger Geld aus der Industrie, wird weniger geforscht und nicht über andere Themen. Woher die Gelder stammen, bestimmt die Richtung der Forschung, kann aber die Ergebnisse nicht beeinflussen. Lediglich die Interpretation mag wohlwollend formuliert werden. Deshalb gibt es in jeder wissenschaftlichen Publikation neben der »Diskussion« auch »Material und Methoden« und »Ergebnisse«.

Zu Ihren drei Punkten. Erstens: Die Aussage, Themen beziehungsweise Forschung, für die kein Geld vorhanden ist, finden nicht statt, ist banal und keine manipulative Beeinflussung der Forschung. Dass andere Themen dadurch

vernachlässigt oder Kapazitäten gebunden werden, stimmt nicht, denn ein Forscher kann sich frei entscheiden, wie er seinen Lebensunterhalt bestreitet.

Zweitens: Nicht die Pharmaindustrie bestimmt die Forschungsmethoden. Das Ziel einer Arzneimittelprüfung ist der Nachweis der Überlegenheit gegenüber dem Placebo und nicht des eigenen Produkts gegenüber dem des Konkurrenten. Die Studien werden im Arzneimittelgesetz §§40-42b (AMG) geregelt. Jede davon in Deutschland wird nach Good Clinical Practice durchgeführt und muss vor Beginn geplant und durch das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte/Paul-Ehrlich-Institut und eine Ethikkommission genehmigt werden. Schon vor dem Start ist die Methodik im Prüfplan eindeutig festgelegt. Von jeder heute laufenden Studie muss das Ergebnis der zuständigen Bundesoberbehörde zur Eingabe in die allgemein verfügbare Datenbank nach §67a Absatz 2 AMG zur Verfügung gestellt werden. Damit hat sich auch Ihr dritter Punkt erledigt, denn die Daten sind inzwischen öffentlich.

Ein negatives Studienergebnis bedeutet, dass der Arzneistoff nicht bes-



Wie stark werden Ärzte durch Gefälligkeiten der Pharmaindustrie beeinflusst?

ser wirkt als ein Placebo. Deshalb ist er nicht unwirksam oder das Placebo besser, sondern vielleicht nur die Methodik nicht geeignet. Eine Fehleranalyse der Studie führt zu einem besseren Versuchsplan, der dann vielleicht ein positives Ergebnis liefert. Dadurch dass negative Studien nicht publiziert werden, wird die Wahrnehmung des Wirkstoffs in der wissenschaftlichen Welt nicht »manipuliert«. So wie Sie es schildern, kommt der falsche Eindruck auf, dass nicht publizierte Studien eine negative oder keine Wirkung belegen würden.

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: Mike Beckers, 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: Dr. Michael Springer

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistenz: 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: Dr. Markus Fischer,

Dr. Andrea Pastor-Zacharias, Translations Engineering.

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 810680, 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 des Nationalen Instituts 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 Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. 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, Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

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 Zu-

gänglichmachung, 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.



Antwort des Autors Klaus Lieb: Dass »keine Forschung unabhängig ist«, dem stimme ich zu. Im Leserbrief kommt aber der Eindruck auf, alle (pharmafinanzierte) Forschung laufe nach klaren Regeln, unabhängig und frei. Das ist oft nicht der Fall. Mir geht es nicht um plakative Pauschalurteile, sondern um eine Sensibilisierung für wissenschaftlich nachgewiesene Einflüsse: Industrie und Forscher können sehr wohl die Methodik und damit auch die Ergebnisse von Studien zu ihren Gunsten beeinflussen, interessegeleitete Forschungsthemenplatzierung kann sehr wohl zur Vernachlässigung von Forschung mit Patientennutzen führen, und nicht publizierte Studien sind deutlich häufiger Studien mit negativem Ergebnis. Das heißt weder, dass jede Pharmastudie schlecht ist, noch, dass alle Forscher manipulieren. Es heißt nur, dass Interessenkonflikte Forschung beeinflussen können und wir dafür verstärkte Aufmerksamkeit brauchen.

Evolution versus Erfindungen

In Afrika gab es schon vor dem Homo sapiens die ersten kreativen Menschen, berichtete Heather Pringle (»Die Geburt der Kreativität«, Juni 2013, S. 22)

Peter Kosek, Gütersloh: Da hat nicht einer vor vielleicht 200 000 Jahren mal ein bisschen angefangen, Feuer zu machen und diese Anfangsfertigkeit weitergegeben, sondern er machte richtiges Feuer, stellte fest, wie das ging und wozu man es brauchte – und machte danach immer wieder Feuer. Eine Erfindung von heute auf morgen.

Das ist der Unterschied zwischen Evolution und Erfindung: Das eine braucht Weile, das andere kann durch den »Sperrklinkeneffekt« (SdW 6/2013, S. 28) mit einem Heureka gleichsam vom Himmel fallen, will heißen »geboren« werden. Somit ist die »Geburt der Kreativität« auf Grund der möglichen Plötzlichkeit, mit der etwas geschieht, durchaus als sinnvolle Bezeichnung anzusehen.

Sauerstoffkonzentration als Triebfeder

Die Biologen William Martin, Nick Lane und Valérie Schmitt erläuterten, wie höher entwickelte Zellen entstanden. (»Der Schritt zum komplexen Leben«, Juli 2013, S. 40)

Dietrich H. Nies, Halle: Zwei Anmerkungen seien mir als Mikrobiologen erlaubt: Erstens sind *Bacteria* und *Archaea*, eigenständige »Superkingdoms« neben dem der *Eukaryota*, nicht zu »tumb«, um komplexe intrazelluläre Strukturen zu bewältigen (siehe Endosporenbildung), sie folgen nur einer anderen grundsätzlichen Evolutionsstrategie, die auf möglichst schnelles Wachstum ausgerichtet ist. Die Geschwindigkeit hängt aber ab vom Verhältnis der Energieaufnahmeleistung, proportional zur Oberfläche, zur Wachstumsarbeit, proportional zu Masse und Volumen. Nach unten wird die Effizienzsteigerung durch Verkleinerung begrenzt durch die Notwendigkeit, bei sich ändernden Umweltbedingungen ausreichend viele Gene parallel zu aktivieren. Diese Grenzen definieren die Größe einzelner Bakterienarten. Der Evolutionsdruck der schnell wachsenden Bakterien auf die auf Überdauerung ausgerichteten Eukaryoten könnte diese zur Individualisierung gezwungen haben, also zur Sexualität mit dem ganzen Meiose- und Paarungsaufwand.

Zweitens konnten frühe Eukaryoten, die den Sauerstoff zu ihren Endosymbionten schaffen mussten, nur dann mit Bakterien, die direkten Zugriff haben, konkurrieren, nachdem die Sauerstoffkonzentration ausreichend hoch geworden war. Dies setzte die »Erfindung« der oxygenen Fotosynthese durch die Zyanobakterien sowie die Akkumulation dieser eigentlich hochgiftigen Substanz in der Umwelt voraus, und war erst möglich nach der ersten großen Oxygenierung der Erde vor etwa 2,4 Milliarden Jahren. Es könnte jedoch sein, dass Bakterien fressende Ureukaryoten sich schon vorher ein Bakterium zur Sauerstoffentgiftung verklärt hatten. Eukaryoten sind mit

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

großer Sicherheit Produkt einer »Hochzeit« von Bakterien mit Archaeen. Ob allerdings der Mitochondrienvorläufer der erste Partner war oder ob dieses Alphaproteobakterium bereits in das Produkt einer früheren Hochzeit einwanderte, sozusagen als »flotter Dreier«, ist noch offen. Weiterhin musste später der Sauerstoff auch effektiv zu den Zellen eines Vielzellers transportiert werden, was wiederum eine höhere Sauerstoffkonzentration erforderte und damit vermutlich erst nach der zweiten großen Oxygenierung vor rund 800 Millionen Jahren möglich war. Die steigende Sauerstoffkonzentration und die Nutzung dieses Gifts zur Energiekonservierung durch verklävte Bakterien könnte damit in der Tat die Triebfeder der Evolution von Komplexität auf unserem Planeten gewesen sein.

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

ASTRONOMIE

Staubwirbel als Geburtshelfer

Planeten bilden sich möglicherweise aus »Staubfallen« – lokalen Wirbeln in Gas- und Staubscheiben. Denn dort können kleine Körnchen zu größeren Brocken aggregieren. Forscher um Nienke van der Marel (Universität Leiden) haben jetzt Hinweise auf eine Staubfalle bei einem 400 Lichtjahre entfernten Stern gefunden.

Wie Planeten entstehen, ist nicht vollständig geklärt. Als gesichert gilt,

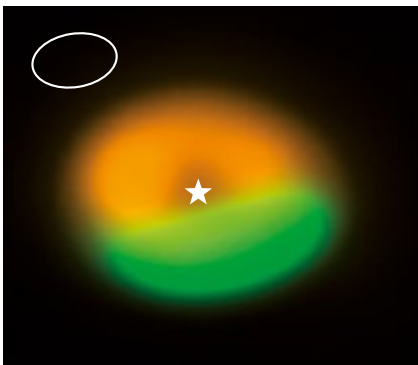
dass sie aus Staubscheiben hervorgehen, die junge Sterne umgeben. Bislang fällt es aber schwer, den Prozess nachzuvollziehen. Gängigen Modellen zufolge behindern die Zusammenstöße der Körnchen das Entstehen größerer Klumpen. Und sollte sich doch ein metergroßer Brocken bilden, droht er laut den Berechnungen in den Stern zu stürzen. Staubfallen bieten einen möglichen Ausweg aus dem Dilemma. Diese lokalen Verwirbelungen der protoplanetaren Scheibe haben eine Lebensdauer von einigen hunderttausend Jahren. Simulationen

zeigen, dass die Partikel dort zusammenklumpen können – und die daraus hervorgehenden Brocken auch nicht zwangsläufig in Richtung der jungen Sonne entweichen.

Mit dem Radioteleskop ALMA untersuchten die Forscher eine Staubscheibe um den Stern Oph IRS 48 im Sternbild Schlangenträger. Dabei erfassten sie die Strahlung von unterschiedlich großen Körnchen. Es zeigte sich, dass Partikel mit Abmessungen im Mikrometerbereich gleichmäßig um den Stern verteilt sind. Millimetergroße Teilchen hingegen finden sich gehäuft in einem Sektor der Scheibe. Offenbar konnten sie dort auf ihre Größe anwachsen, weil sie in einer Staubfalle gefangen sind. Verursacht werde der Wirbel eventuell von einem großen Himmelskörper, der den Stern umrundet, schreiben die Forscher.

Science 340, S. 1199–1201, 2013

Der Stern Oph IRS 48 (weißer Asterisk) ist von einer asymmetrischen Staubscheibe umgeben: Die größeren Körnchen sammeln sich in einem Sektor (grün). Oben links ist zum Vergleich der Durchmesser der Neptunbahn gezeigt.



Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Studien und Analysen lesen Sie jeden Donnerstag in

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

- Higgs-Boson: Ein bittersüßes Ende?
- Parasiten: Die heimliche Macht
- Masern: »Schon ein Infizierter im Zimmer reicht«

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

MEDIZIN

Neuer Ansatz gegen multiple Sklerose

Bei der multiplen Sklerose (MS) attackiert das Immunsystem die Myelinscheiden von Nervenzellfortsätzen. Lähmungen oder Erblindung können die Folge sein. Zu der Störung kommt es, weil die T-Zellen Peptide der Myelinscheide fälschlicherweise als »körperfremd« einordnen. Mediziner begegnen dem Angriff vor allem, indem sie die Immunantwort allgemein dämpfen. Das macht die Patienten aber anfälliger gegenüber Krankheitserregern. Besser wäre es, gezielt nur die Teile der Immunreaktion zu unterdrücken, die sich gegen die entsprechenden Peptide richten.

Eine Technik, die das leisten könnte, haben Roland Martin vom Universitätskrankenhaus Zürich und sein Team in einer klinischen Phase-I-Studie getestet. Die Forscher entnahmen MS-Patienten weiße Blutkörperchen

und koppelten daran sieben verschiedene Peptide der Myelinscheide. Anschließend injizierten sie den Patienten die veränderten Zellen wieder. Sie wollten damit einen natürlichen Körpermechanismus ausnutzen: Absterbende weiße Blutkörperchen werden in Milz und Leber aufgenommen, zerlegt und ihre Bestandteile den T-Zellen präsentiert, worauf diese nicht mehr dagegen vorgehen.

Die Patienten vertrugen die Behandlung gut und zeigten auch Monate später keine Unverträglichkeitsreaktionen. Bei denen, die eine besonders hohe Dosis veränderter Blutzellen erhalten hatten, fiel die schädliche Autoimmunreaktion schwächer aus. Als Nächstes wollen die Forscher ihren Ansatz in einer Phase-II-Studie testen.

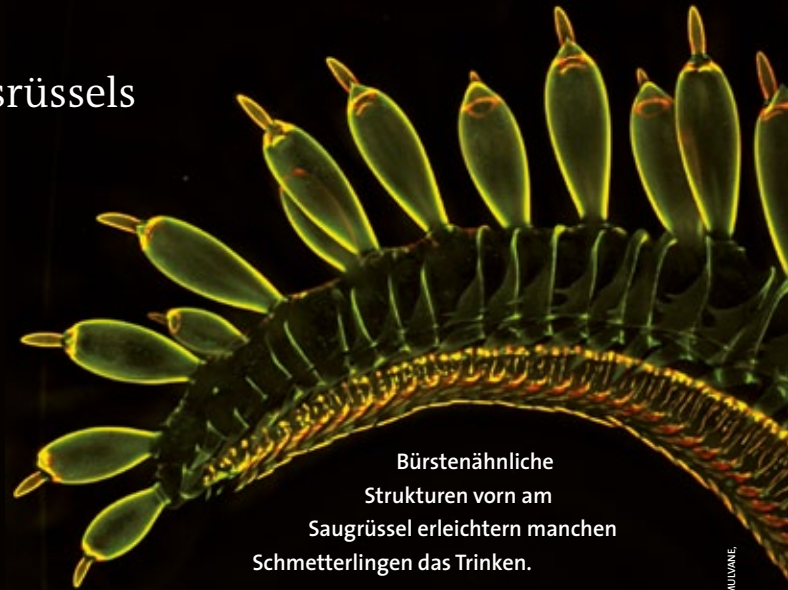
Science Translational Medicine 5, 188ra75, 2013

BIOLOGIE

Die zwei Seiten des Schmetterlingsrüssels

Schmetterlingsrüssel sind auf ihrer Außenseite in zwei Bereiche untergliedert: Das untere Rüsselende wirkt Wasser anziehend (hydrophil), das obere hingegen Wasser abweisend (hydrophob). Das erleichtert den Tieren einerseits, Flüssigkeiten aufzunehmen, und verhindert andererseits Verschmutzungen des oberen Rüssels.

Forscher um Konstantin Kornev von der Clemson University (USA) haben die Rüssel von fünf Schmetterlingsarten untersucht. Sie führten Befeuchtungstests daran durch und machten elektronenmikroskopische Aufnahmen. Jeder Rüssel setzt sich aus zwei Rinnen zusammen, die entlang ihrer gesamten Länge über feine Zähnchen verbunden sind, so dass sie eine Röhre bilden. Am unteren Rüsselende, das die Tiere zum Saugen eintauchen, sind diese Zähnchen vergrößert und liegen weit auseinander. Deshalb kann dort viel Flüssigkeit eindringen, zumal die Zähnchen Wasser anziehend wirken. Am oberen Rüsselende hingegen sind die Zähnchen kleiner und schließen sich eng zusammen, so dass sie nur wenig Kontaktfläche bieten.



Bürstenähnliche Strukturen vorn am Saugrüssel erleichtern manchen Schmetterlingen das Trinken.

Pflanzensaft saugende Schmetterlinge besitzen an der Rüsselspitze außerdem noch bürstenähnliche Strukturen, wie die Forscher herausfanden. Das macht die Spitze noch besser benetzbar und erleichtert so zusätzlich das Aufnehmen der Säfte.

Journal of the Royal Society Interface 10.1098/rsif.2013.0336, 2013

MATTHEW S. LEHRNER UND CATHERINE P. MULLIVANE
CLEMSON UNIVERSITY

GEOLOGIE

Bildet sich eine Subduktionszone vor Europa?

Geologen der Monash University in Melbourne (Australien) haben Anzeichen dafür entdeckt, dass vor der Westküste Portugals eine neue Subduktionszone entsteht. Sie kartierten den Meeresboden in dieser Region und stießen auf geologisch junge Brüche

und Verwerfungslinien. Möglicherweise geht die ozeanische Erdkruste dort dazu über, sich unter die kontinentale Erdkruste Europas zu schieben. Infolgedessen würden Nordamerika und Europa langsamer auseinanderdriften als bisher oder sich vielleicht sogar wieder annähern.

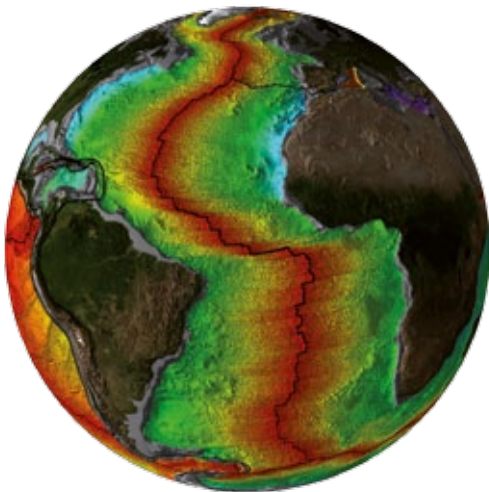
Gegenwärtig entfernen sich die Kontinente um zwei bis drei Zentimeter pro Jahr, weil entlang des Mittelatlantischen Rückens neue ozeanische Kruste entsteht. Sie drückt die beiden Kontinente voneinander weg. Die neue Subduktionszone könnte den Trend verlangsamen oder sogar umkehren, schreiben die Forscher. Bis sie voll

aktiv werde, würden aber noch viele Millionen Jahre vergehen.

Die Erkenntnisse könnten dazu beitragen, den so genannten Wilson-Zyklus besser zu verstehen, das fortwährende Öffnen und Schließen von Ozeanbecken. Dabei werden Superkontinente durch tektonische Kräfte auseinandergerissen, wodurch neue Ozeane entstehen. Nach einer gewissen Zeit, typischerweise mehrere 100 Millionen Jahre, lassen Subduktionszonen die Meere wieder verschwinden und ein neuer Superkontinent bildet sich. Verantwortlich dafür sind Konvektionsströme im heißen Erdmantel, die die Plattentektonik der Erdkruste antreiben. Mindestens dreimal in der Erdgeschichte brachten diese Kräfte einen Superkontinent hervor und ließen ihn wieder zerbrechen.

Geology, 10.1130/G34100.1, 2013

Der Atlantik (grün) wird jährlich um zwei Zentimeter breiter, weil am Mittelatlantischen Rücken (rot) neue Kruste entsteht.



ELLIOT LIM AND JESSE VARNER, CIRES & NOAA-NGDC

ONKOLOGIE

Riesenmolekül schützt Nacktmulle vor Krebs

Obwohl Nacktmulle ungewöhnlich lange leben, erkranken sie kaum jemals an Tumoren. Forscher um Vera Gorbunova von der University of Rochester (USA) glauben nun den Grund dafür gefunden zu haben: ein extrazelluläres Riesenmolekül in der Haut. Zuvor hatten sie bereits vermutet, dass die Zellen des Nacktmullgewebes sich gegenseitig besonders

effektiv überwachen und Entartungsprozesse früh unterbinden.

Den Forschern war aufgefallen, dass ein bestimmtes Zuckermolekül – das Hyaluronsäure-Glykosaminoglykan, ein wichtiger Bestandteil des Gewebes zwischen den Körperzellen – bei Nacktmullen rund fünfmal größer ausfällt als bei Menschen oder Mäusen. Der Grund: Bei diesen Tieren ist an der Herstellung der Hyaluronsäure (HA) ein verändertes Protein beteiligt, und HA-abbauende Enzyme sind weniger aktiv. Die riesenhaften Zuckerketten

sorgen offenbar für einen besonders intensiven Kontakt der Körperzellen zueinander. Dadurch löst die beginnende Entartung einer Zelle schon sehr früh Alarmsignale aus, so dass der gefährliche Prozess zeitig gestoppt werden kann.

Künstlich veränderte Nacktmulle mit kürzeren Hyaluronsäuremolekülen erwiesen sich im Experiment tatsächlich als tumoranfälliger. Als Schnittstelle zwischen den Zuckerketten und den Zellen dient offenbar der Rezeptor CD44. Wird er blockiert, so setzt die Alarmreaktion des Körpers auf eine gefährliche Gewebewucherung später ein. Zudem werden die Nacktmullzellen dann empfindlicher gegenüber Krebs erzeugenden Viren.

Nature 10.1038/nature12234, 2013

Die Haut der Nacktmulle ist nicht nur tumorresistent, sondern auch sehr elastisch. Das hilft den Tieren, sich durch enge unterirdische Gänge zu quetschen.



ROMAN KLEMENTSCHITZ / CC-BY-SA-3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0)

ARCHÄOLOGIE

Schmuckperlen aus Meteoriteneisen

Die alten Ägypter haben Metall aus Meteoriten verarbeitet – das belegen Untersuchungen an einem Schmuckgegenstand, der aus dem Land am Nil stammt und 5300 Jahre alt ist. Er besteht eindeutig aus meteoritischem Eisen und ist damit das früheste Zeugnis für Eisenverarbeitung in Ägypten.

seine Hersteller ihn nicht im Feuer, sondern hämmerten Meteoriteneisen kalt zu flachem Blech und bogen dieses zur gewünschten Form.

In dem stark korrodierten Metall lassen sich hohe Nickelgehalte von bis zu 30 Prozent nachweisen – typisch für Eisenmeteorite. Zudem beobachteten die Forscher feine Lamellen in dem Material: so genannte Widmannstätten-Strukturen, die nur in Meteoriten vorkommen. Sie entstehen, wenn Eisen-Nickel-Legierungen über Jahrmillionen hinweg abkühlen.

Gegenstände aus Meteoriten waren im alten Ägypten nur Personen der Oberschicht vorbehalten, da das Material sehr selten und schwer zu bearbeiten war und auf Grund seiner himmlischen Herkunft als Geschenk der Götter angesehen wurde. Der Grabschatz des Pharaos Tutanchamun beispielsweise enthielt einen Säbel und 16 Miniaturklingen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit aus meteoritischem Eisen bestehen.

Meteoritics & Planetary Science 48, S. 997–1006, 2013

Bei dem Gegenstand handelt es sich um eine »Metallperle«, einen kleinen metallischen Hohlzylinder. Er wurde zusammen mit acht ähnlichen Objekten vor mehr als 100 Jahren südlich von Kairo ausgegraben. 1928 hatten Untersuchungen erstmals darauf hingedeutet, dass die Stücke aus einem Material kosmischen Ursprungs bestehen. Nun haben Forscher um Diane Johnson von der Open University (England) den Gegenstand mittels Computertomografie und Rasterelektronenmikroskopie untersucht, um zu rekonstruieren, wie er gefertigt wurde. Den Ergebnissen zufolge schmiedeten



Die 5300 Jahre alte ägyptische Schmuckperle, aufgenommen im sichtbaren Licht (oben) und mit einem Computertomografen durchleuchtet (unten).

OPEN UNIVERSITY / UNIVERSITY OF MANCHESTER

URALTER PRIMAT



Das bislang älteste Fossil eines Primaten haben Forscher in der südchinesischen Yangxi-Formation entdeckt. Der etwa mausgroße, 20 bis 30 Gramm leichte und nach seinem außergewöhnlich gestalteten Fersenbein benannte *Archicebus achilles* lebte vor rund 55 Millionen Jahren als tagaktiver

Insektenfresser in Bäumen. Die bisher unbekannte Art gehört zur Gruppe der *Tarsiiformes*, die heute nur noch durch die nachtaktiven Koboldmakis in Südostasien vertreten ist.

Nature 498, S. 60–64, 2013

Der menschliche Stoffwechsel – im Computer simuliert

Ein komplexes Netzwerk biochemischer Reaktionen versorgt unsere Körperzellen mit Baustoffen und Energie. Es per Rechner nachzubilden, ist eine Herkulesaufgabe – die Forscher jetzt mit bislang unerreichter Genauigkeit gelöst haben.

VON SEBASTIAN ALERS

Eine internationale Gruppe von Forschern hat sich ein ehrgeiziges Ziel gesetzt: Sie wollen den gesamten menschlichen Stoffwechsel – das so genannte Metabolom – so genau simulieren, dass sich damit das Verhalten von Zellen präzise vorhersagen lässt. Das vorläufige Ergebnis dieser gemeinschaftlichen Anstrengung taufte sie Recon 2 (*Nature Biotechnology* 31, S. 419, 2013).

Es stellt eine umfassend überarbeitete und erweiterte Version seines Vorgängers Recon 1 dar, in die das Team zusätzlich vier weitere Datenbanken integriert hat. »Das Wissen aus ganz verschiedenen Bereichen wie Biochemie, Physiologie, Medizin, Systembiologie und Bioinformatik wurde in dieser Arbeit vereint, was sich nur durch einen Gemeinschaftsansatz erreichen ließ«, so Ines Thiele, Professorin für Systembiomedizin an der Universität Luxemburg und Erstautorin der Veröffentlichung.

Um etwas im Rechner simulieren zu können, muss man es zunächst genau kennen. So wie ein Kriminalkommissar erst Indizien sammelt, um sich ein exaktes Bild vom Tathergang zu machen, so steht für Bioinformatiker eines ganz am Anfang: die Rekonstruktion des biologischen Vorbilds. Je präziser diese ist, desto genauer wird das daraus abgeleitete mathematische Modell und damit dessen Vorhersagekraft. Für das menschliche Metabolom bedeutet dies, sämtliche Stoffwechselreaktionen und deren Zwischenprodukte (die so genannten Metabolite) zu kennen, sowie die genauen Eigenschaften der Protei-

ne, die diese Reaktionen katalysieren (*Nature Protocols* 5, S. 93, 2010).

Seit 2006 kennen wir die vollständige DNA-Sequenz unseres Erbguts und wissen inzwischen auch, dass es etwa 20 000 Gene enthält, die Proteine kodieren. Jedes Gen erhielt mittlerweile eine Identifikationsnummer, unter der alle dazu bekannten Informationen in einer Datenbank gespeichert sind (kostenlos zugänglich unter www.ncbi.nlm.nih.gov/gene).

Anhand dieser Einträge erstellten die Forscher per Computer eine erste, automatisch generierte Rohversion. Hierbei berücksichtigten sie nur solche Proteine, die Reaktionen im menschlichen Stoffwechsel katalysieren, also Enzyme. Stillgelegte Gene, die nicht abgelesen werden, oder Strukturproteine ohne Enzymfunktion blieben außer Acht.

Allerdings konnten sie nicht davon ausgehen, dass alle Einträge der Datenbank verlässlich und vollständig waren. Daher blieb ihnen nichts weiter übrig, als die Informationen noch einmal selbst zu überprüfen. Außerdem verglichen sie sie mit anderen experimentellen Ergebnissen und ergänzten zusätzliche Informationen. Dabei ließen sie sich von folgenden Fragen leiten:

- Basiert der Eintrag auf einem tatsächlich durchgeführten Experiment?
- Welche Moleküle kann das Enzym zudem noch umsetzen, und benötigt es weitere Substanzen für seine Funktion?
- Verläuft die katalysierte Reaktion nur in eine Richtung oder auch umgekehrt?
- Wo in der Zelle findet die Reaktion statt?

- Ist das Genprodukt Teil eines größeren Molekülkomplexes, funktioniert es also nur zusammen mit weiteren Proteinen?

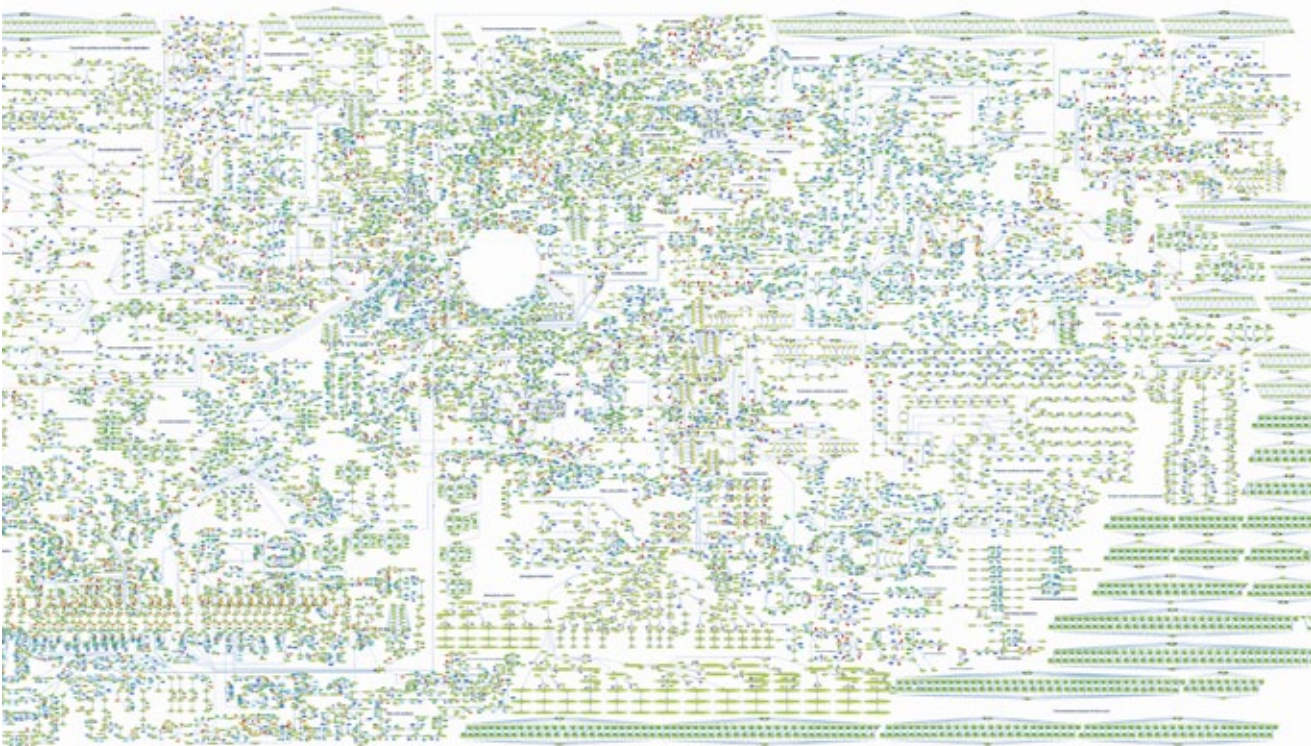
- Kann das Enzym mehr als eine Reaktion katalysieren?

- Gibt es weitere Enzyme, die dieselbe Reaktion katalysieren?

Darüber hinaus mussten die Forscher spontane Reaktionen berücksichtigen, die ohne Zuhilfenahme eines Enzyms ablaufen, sowie den Transport von Metaboliten sowohl innerhalb der Zelle als auch zwischen Innen- und Außenraum. Und schließlich galt es die gesamte molekulare Zusammensetzung der Zelle zu bestimmen und herauszufinden, welche Nährstoffe diese unbedingt zum Wachsen benötigt. Erst damit war die Rekonstruktion so weit abgeschlossen, dass die Forscher ein Computermodell erstellen konnten. Anschließend überprüften sie es noch einmal gründlich auf Lücken und Ungereimtheiten.

Der Härtestest jedes Modells besteht darin zu prüfen, wie getreu es die Realität abbildet. Hierzu verglichen die Forscher die Eigenschaften und das Verhalten der im Rechner simulierte Zelle mit jenen einer echten. Wächst erstere schneller oder langsamer als das Vorbild? Kann sie dieselben Zwischenprodukte herstellen und benötigt sie gleiche Nährstoffe? Falls nicht, muss das Modell entsprechend angepasst werden – wieder und wieder.

Das nun veröffentlichte Modell berücksichtigt 1789 Enzyme kodierende Gene. Deren Produkte katalysieren insgesamt 7440 Reaktionen, an denen



Das Computermodell »Recon 2« ist die bislang umfassendste virtuelle Rekonstruktion des menschlichen Stoffwechsels. Seine grafische Darstellung dient Forschern als eine Art von biochemischer »Google Map«.

2626 verschiedene Metaboliten beteiligt sind (online einsehbar unter <http://humanmetabolism.org>). »Recon 2 ist damit die bisher vollständigste Datenbank für den menschlichen Zellstoffwechsel«, so Ines Thiele.

Um die Vorhersagekraft des Modells zu testen, nahm das Team mehrere genetisch bedingte Krankheiten ins Visier, bei denen jeweils ein bestimmtes Stoffwechselenzym fehlerhaft ist. Diese Defekte lassen sich anhand der charakteristischen Veränderung eines oder mehrerer Metaboliten, genannt Biomarker, in den Körperflüssigkeiten diagnostizieren. Für den Qualitätscheck entfernten die Forscher einfach das entsprechende Genprodukt aus der Simulation und stellten so das Verhalten eines krankhaft veränderten Stoffwechselnetzwerks nach. Recon 2 sagte auf diese Weise die pathologische Veränderung bei insgesamt 54 Biomarkern für 49 verschiedene Erbkrankheiten vorher, und zwar mit einer Genauigkeit von immerhin 77 Prozent verglichen mit experimentell gewonnenen Daten.

Allerdings simulierte das Computermodell dafür eine in Wirklichkeit gar nicht existierende »Superzelle«, welche die Stoffwechsellösungen sämtlicher Typen von Körperzellen in sich vereint. »Eine Art Stoffwechselblaupause für Zelltypen«, wie Ines Thiele es nennt, »ähnlich, wie das menschliche Genom Informationen für alle Zelltypen im menschlichen Körper enthält.« Da ein bestimmtes Gewebe aber jeweils nur einen Teil der Stoffwechselgene in Proteine umsetzt, besitzt jedes sein eigenes charakteristisches Metabolom. Das ist der Grund, warum beispielsweise nur Leberzellen Harnstoff produzieren. Um hier die Realität besser abzubilden, erzeugten die Forscher zusätzlich 65 spezifischere Computermodelle, die jeweils den Stoffwechsel eines bestimmten Zelltyps simulieren. Tatsächlich war auch nur die simulierte Leberzelle als einziges von allen Modellen in der Lage, Harnstoff herzustellen.

Die Vorhersagekraft des Modells ist entscheidend für die Forscher, denn sie hoffen, auf diese Weise mögliche Nebenwirkungen von Medikamenten ab-

sehen zu können. Auch bislang unbekannte Angriffspunkte für neuartige Wirkstoffe und diagnostische Biomarker ließen sich so identifizieren – ohne ein einziges Experiment durchführen zu müssen.

Überhöhten Erwartungen erteilt Ines Thiele allerdings schnell einen Dämpfer: »Recon 2 ist immer noch nicht vollständig oder ganz korrekt, sondern spiegelt lediglich unseren heutigen Wissensstand über den menschlichen Zellstoffwechsel wider«, gibt sie zu bedenken. Der Weg zu einem annähernd perfekten Modell dürfte noch weit und mühsam sein. Aber die Forscher arbeiten stetig daran, die Datenbank Stück für Stück zu verbessern – kommen doch jeden Tag überall auf der Welt Hunderte neuer Detailinformationen hinzu, die in das Modell einfließen und damit seine Leistungsfähigkeit erhöhen können.

Sebastian Alers ist promovierter Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Routenplanung im Rattenhirn

Das Feuern bestimmter Nervenzellen im Hippocampus – einer Hirnregion, die mit dem Gedächtnis zu tun hat – kodiert Informationen über die räumliche Umgebung eines Tiers. Wie sich jetzt zeigte, nehmen diese »Ortszellen« zudem vorweg, welchen Weg eine Ratte als Nächstes laufen wird.

VON BRANDY SCHMIDT UND A. DAVID REDISH

Die meisten Menschen haben in ihrem Auto inzwischen ein Navigationssystem, das die günstigste Route zu einem gewünschten Ziel berechnet und den Fahrer entsprechend leitet. So etwas Ähnliches gibt es auch in unserem Gehirn. Es tritt in Aktion, wann immer wir einen Weg planen, also etwa die samstägliche Einkaufstour zu verschiedenen Geschäften vorab im Geist durchspielen.

Doch nicht nur wir Menschen können das. Wie sich nun erweist, haben offenbar Ratten diese Fähigkeit ebenfalls. Mit elektrischen Ableitungen fanden Wissenschaftler bei ihnen einen Zusammenhang zwischen dem Feuern so genannter Ortszellen und dem Weg, den das Tier anschließend nimmt. Die Untersuchung liefert somit direkte Belege für die Fähigkeit der Nager, im Voraus zu planen, wohin sie demnächst laufen werden.

Schon in den 1940er Jahren postulierte der Psychologe Edward Tolman, dass Säugetiere in ihrem Gehirn über eine Art kognitive Landkarte verfügen, die ihre räumliche Umgebung repräsentiert und unter anderem zur Routenplanung dient. In den 1970er Jahren machten die beiden Neurowissenschaftler John O'Keefe und Lynn Nadel bestimmte Nervenzellen im Hippocampus als mutmaßlichen Sitz dieser neuronal kodierten Karte aus: die Ortszellen. Seit damals mehren sich die Hinweise darauf, dass diese tatsächlich den Lebensraum eines Tiers abbilden, also Informationen zur Umgebung speichern, die beim Wachen und Schlafen gleichermaßen genutzt werden. Außerdem bieten sie, wie einige Untersu-

chungen nahelegten, mögliche Varianten einer Route an, bevor sich das Tier auf den Weg macht oder sich an einer Weggabelung für eine Richtung entscheidet.

In den bisherigen Studien zur neuronalen Navigation bewegten sich die Tiere allerdings auf simplen, eindimensionalen Pfaden. Daher ließ sich nicht ermitteln, ob der Hippocampus tatsächlich unterschiedliche Wegverläufe prüft und künftige Routen plant. In einer nun publizierten neuen Untersuchung überwand Brad E. Pfeiffer und David J. Foster von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) diese Begrenzung (*Nature* 497, S. 74, 2013). Das schafften sie mit einer eleganten Versuchsanordnung und durch das Einpflanzen eines so genannten microdrive arrays in das Gehirn der Versuchstiere: einer Anordnung von 40 einzeln steuerbaren, aus jeweils vier Elektroden bestehenden »Tetroden«. Auf diese

»Das zeitliche Muster der Extrapulse entsprach der Route zum nächsten Futterversteck«

Weise gelang es ihnen, das Aktivitätsmuster zahlreicher Ortszellen im Hippocampus abzuleiten und mit Positionen in der Umgebung der untersuchten Ratten in Verbindung zu bringen.

Die Messapparatur erlaubte, die neuroelektrischen Impulse von 250 Ortszellen gleichzeitig aufzuzeichnen. Die so erfassten Daten reichten aus, die räumlichen Positionen, die dieses Zellensemble abbildet, alle 20 Millisekunden zu bestimmen. Während des Experiments suchten die Ratten nach Futter.

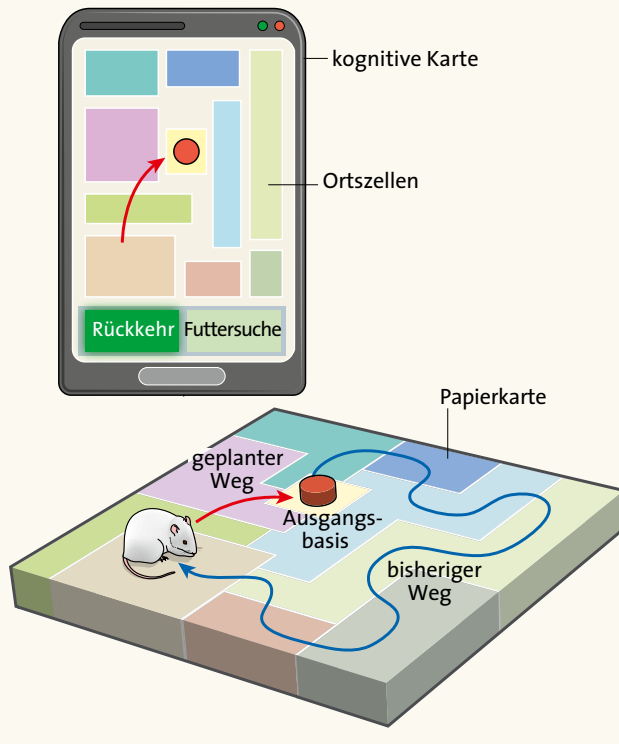
Dabei starteten sie von einer Ausgangsbasis, die allerdings jeden Tag an einen anderen Ort verlegt wurde. Sie mussten zunächst einen per Zufall in einem von 35 Verstecken platzierten Leckerbissen finden. Wenn sie danach zur Ausgangsbasis zurückkehrten, wartete dort wiederum eine Belohnung.

Durch die ganztägige Konstanz der Anordnung lernten die Tiere, sich zu orientieren, um die Aufgabe der wiederholten Futtersuche und Rückkehr zur Ausgangsbasis immer besser zu meistern. Da sich die Lage der Basis jedoch täglich veränderte, verfolgten sie jeden Tag andere Routen, die sich in zwei Dimensionen aufzeichnen und analysieren ließen.

Eine Ortszelle im Hippocampus feuert dann am stärksten, wenn sich die Ratte in dem zugehörigen Areal befindet – ihrem so genannten Ortsfeld. Allerdings produziert sie in der Regel auch einige »außerfeldliche« Aktions-

potenziale, während sich das Tier an einer anderen Stelle aufhält. Handelt es sich dabei um bloßes Hintergrundrauschen? Oder enthalten diese Extrapulse zusätzliche Informationen über die Position oder Absichten des Nagers?

Pfeiffer und Foster analysierten die Aktivitäten ihres umfangreichen Ensembles von Ortszellen mit raffinierten mathematischen Verfahren. Den Ergebnissen zufolge lieferte das Muster der außerfeldlichen Aktionspotenziale Anhaltspunkte dafür, wohin das Tier als



Was ist der beste Weg nach Hause? Bevor eine Ratte losläuft, zeigen Sequenzen von Aktionspotenzialen in bestimmten Zellen ihres Gehirns die vorgesehene Route an. Die Tiere verfügen also nicht nur über eine mentale Karte ihrer Umgebung, sondern auch über ein Navigationssystem, das sie zum gewünschten Ziel führt.

Nächstes laufen wird. Während die Ratte zum Beispiel vor dem Aufbrechen zur Futtersuche still saß, erzeugten die Ortszellen Sequenzen von Impulsen, mit denen sich die Route vorhersagen ließ, die sie gleich darauf nehmen würde (Bild).

Diese Sequenzen traten im Rahmen so genannter Sharp-Wave-Ripple-Episoden auf. Das sind unregelmäßige Ausbrüche neuronaler Aktivität im Hippocampus, die nur 100 bis 200 Millisekunden dauern und sich durch Entladungen hoher Amplitude und Frequenz (100 bis 200 Hertz) auszeichnen. Das zeitliche Muster der Extrapulse entsprach den Routen zu bedeutsamen Orten in der Umgebung der Ratte, etwa dem nächstgelegenen Futtermatze oder der Ausgangsbasis.

Die Aktivitätsmuster standen dagegen in keinerlei Zusammenhang mit dem zuvor zurückgelegten Weg, also zur Vergangenheit. Die von den Ortszellen vorgezeichneten künftigen Routen wiesen auch nicht einfach geradeaus von dem Tier weg. Sie stellten vielmehr die tatsächlichen verschlungenen Wege dar, die es nehmen würde – und zwar unabhängig von seiner momenta-

nen Orientierung im Raum. In den Sequenzen spiegelte sich demnach nicht etwa bloß die Sicht des Tiers auf seine Umgebung wider.

Ebenso wenig bestand die Routenplanung aus dem Rekapitulieren zuvor schon gegangener Wege; denn die dafür charakteristische Aktivität der Ortszellen trat vor der Rückkehr zu einer neuen Ausgangsbasis gleichfalls auf. Frühere Untersuchungen hatten bereits ergeben, dass die Ortszellen im Verlauf von Sharp-Wave-Ripple-Episoden im Wachzustand auch noch nicht gegangene Routen durchspielten. Dasselbe beobachteten Pfeiffer und Foster nun in Situationen, in denen die Tiere zwar den Grundriss ihres Lebensraums kannten – sie hatten ja schon reichlich Erfahrungen in der Versuchsumgebung gesammelt –, aber nicht die genaue Wegführung, da sich die Lage der Ausgangsbasis jeden Tag änderte. Unter derartigen Umständen erweisen sich Landkarten als besonders nützlich, weil sie es ermöglichen, bekannten Orten neue Bedeutungen zuzuweisen.

Ursprünglich wurden Aktionspotenzialsequenzen von Ortszellen in SWR-Episoden im Verlauf von Schlafphasen

beobachtet. Man verbindet sie deshalb gemeinhin mit der Festigung von Erinnerungen, bei der Informationen vom Hippocampus zur Hirnrinde übertragen werden. Tatsächlich ist dieser Vorgang beeinträchtigt, wenn man Testschläfer stets zu Beginn solcher Episoden aufweckt.

Im Wachzustand scheinen die SWR-Episoden laut aktuellen Studienergebnissen dagegen eine andere Funktion zu haben, die mit kognitiven Prozessen zusammenhängt. Ihre Störung beeinträchtigt zum Beispiel jene Navigation im Raum, die vom Hippocampus abhängt. Das war schon länger bekannt. Pfeiffer und Foster haben mit ihren Versuchen nun gezeigt, dass die Feuersequenzen von Ortszellen im Wachzustand die Planung zukünftiger Aktivitäten repräsentieren und nicht Erinnerungen oder Erfahrungen aus der Vergangenheit.

Brandy Schmidt und **A. David Redish** sind Neurowissenschaftler an der University of Minnesota in Minneapolis.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 497, S. 42–43, 2013

Goldbach-Variationen

Jede ungerade Zahl ist Summe dreier Primzahlen. Diese Aussage ist jüngst bewiesen worden – ein wesentlicher Schritt zum Beweis der berühmten goldbachschen Vermutung.

VON CHRISTOPH PÖPPE

»Jede gerade Zahl größer als 4 kann als Summe zweier Primzahlen ausgedrückt werden.« Diese Behauptung steht im Raum, seit Christian Goldbach sie 1742 in einem Brief an Leonhard Euler äußerte, und ist berühmt geworden, weil sie sich bis heute allen Beweisversuchen widersetzt (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 94, und Dossier 6/2009, S. 34).

Dass es nicht gelingen will, diese »klassische Goldbach-Vermutung« zu beweisen, stört die Mathematiker besonders, weil sie so offensichtlich zutrifft: Für kleine gerade Zahlen findet man mühelos Zerlegungen in zwei Primzahlen, und eigentlich müsste das Problem umso leichter werden, je größer die zu zerlegende gerade Zahl N wird: Die Primzahlen werden zwar immer seltener; zugleich wächst aber die Zahl der Möglichkeiten, N in zwei ungerade Zahlen zu zerlegen, und nur eine von ihnen muss ein Paar aus Primzahlen sein. Dieser Effekt ist weitaus stärker

als die Ausdünnung der Primzahlen. Rein statistisch gesehen könnte man hohe Summen auf die Gültigkeit der Goldbach-Vermutung wetten – aber die Verteilung der Primzahlen ist eben nicht vom Zufall bestimmt.

Es sieht aber ganz so aus, als wäre sie es. Deswegen lassen sich die Zahlentheoretiker gern von statistischen Überlegungen inspirieren; aber eine endgültige Klärung kann nur ein mathematischer Beweis der Vermutung schaffen.

Da diese Trauben zu hoch hängen, stürzen sich die Füchse ersatzweise auf leichter erreichbare Beute. Wenn die goldbachsche Vermutung richtig ist, überdecken alle Summen aus zwei Primzahlen zusammengenommen alle geraden Zahlen – die allermeisten von ihnen sogar mehrfach. Entsprechend müssten alle Summen aus drei Primzahlen (die Primzahl 2 muss man dabei nicht berücksichtigen) alle ungeraden Zahlen überdecken, und zwar jede von ihnen im Durchschnitt noch häufiger, als die Summen zweier Primzahlen die geraden Zahlen bedecken. Das ist die »ternäre Goldbach-Vermutung«; sie ist schwächer als die eigentliche (»binäre«) Goldbach-Vermutung, das heißt, aus der binären Vermutung folgt die ternäre, nicht aber umgekehrt.

Diese milde Variante hat der Zahlentheoretiker Harald Andrés Helfgott von der École Normale Supérieure in Paris nun bewiesen. Am 13. Mai dieses Jahres stellte er den Schlussstein seines Werks

ins Internet (»Major Arcs for Goldbach's Problem«, <http://arxiv.org/abs/1305.2897>) – und ganz gegen die üblichen Gepflogenheiten folgte die Anerkennung dieses Resultats auf dem Fuß. Während die Fachkollegen sonst über neuen Beweisen lange offener Vermutungen Monate oder Jahre zu brüten pflegen, fiel es ihnen diesmal offensichtlich nicht schwer, Helfgotts Gedankengänge nachzuvollziehen. Der Beweis bewegt sich entlang etablierter Pfade; erst vor einem Jahr war dem Fields-Medaillen-Preisträger Terence Tao (Spektrum der Wissenschaft 4/2005, S. 114) ein entsprechender Beweis für fünf statt drei Primzahlen gelungen. Neu sind nur ein paar überaus raffinierte Abschätzungen.

Am schönsten wäre natürlich eine Maschine, in die man oben eine ungerade Zahl hineinsteckt, und unten kommt sie in drei Primzahlen zerlegt wieder heraus. Aber einen solchen Algorithmus zu finden gelingt nicht. Stattdessen pflegt man, bildlich gesprochen, eine Maschine zu konstruieren, die sämtliche Primzahlen unterhalb der zu zerlegenden Zahl N intensiv durchmischt. Aus dem Brei, der sich dabei ergibt, versucht man dann geeignete Schlüsse zu ziehen.

Die Maschine heißt Fourier-Transformation und kommt aus einem Gebiet, das mit Primzahlen eigentlich gar nichts zu tun hat: der Analysis. Ihre ursprüngliche Heimat hat sie in der Theorie der Schwingungsvorgänge. Eine Saite kann nicht nur mit ihrer Grundfrequenz vibrieren, sondern mit allen ganzzahligen Vielfachen derselben, den Obertönen. Man rege nun die Saite so an, dass sie nicht mit ihrem



EDITH SEER, MIT FRIEDRICH VON HARALD HELFGOTT

Harald Andrés Helfgott, Jahrgang 1977, ist in Lima geboren und peruanischer Staatsbürger.

Grundton, sondern mit genau den Obertönen schwingt, deren Nummer eine Primzahl ist und unterhalb von N liegt. Diesem Schwingungsgewirr kann man mit bloßem Auge nichts ansehen. Aber wenn man die zugehörige Funktion zur dritten Potenz nimmt, ist genau dann eine N -te Oberschwingung darin zu hören (die Akustiker nennen das Phänomen »Schwebung«), wenn es eine Zerlegung von N in drei Primzahlen gibt.

Damit ist das ursprüngliche Problem in die Aufgabe umgesetzt, zu zeigen, dass das Integral einer überaus komplizierten Funktion positiv ist (siehe Kasten rechts). Die Funktion selbst ist an manchen Stellen positiv, an anderen negativ; zu beweisen ist, dass der positive Anteil überwiegt, genauer: dass die Fläche zwischen dem positiven Anteil und der x -Achse größer ist als die zwischen dem negativen Anteil und derselben Achse. Man muss, wohlge-merkt, diese Flächeninhalte nicht ausrechnen. Es ist sogar erlaubt, die Funktionswerte an manchen Stellen durch kleinere, aber besser beherrschbare zu ersetzen – wenn das Integral über die so verfälschte Funktion positiv ist, gilt das für die echte erst recht.

Für Integralabschätzungen steht der reichhaltige Werkzeugkasten der Analysis zur Verfügung. Der funktioniert allerdings umso besser, je glatter die beteiligten Funktionen sind, das heißt je häufiger man sie differenzieren kann. Deswegen wählt Helfgott nicht reine Primzahl-Oberschwingungen, sondern leicht unscharfe und modifiziert die Funktion noch an anderen Stellen. Die Einzelheiten dieser Modifikationen entscheiden am Ende über das Gelingen des Beweises.

Es stellt sich heraus, dass die Funktion sich in der Nähe rationaler x -Werte mit kleinen Nennern (auf den »major arcs«) deutlich anders verhält als auf dem Rest der gedachten Saite (den »minor arcs«). Man pflegt zu zeigen, dass die Funktion auf den »major arcs« um so viel größer als null ist, dass irgendwelche kleinen Abstecher unter die Null auf den »minor arcs« das Gesamtergebnis nicht ruinieren können.

Fourier-Transformationen oder die Kreismethode

Man biege in Gedanken eine schwingende Saite zum Kreis und verbinde ihre Enden. Dann ist sie zu denselben Schwingungen fähig wie zuvor; man könnte sogar auf die Befestigungen an beiden Enden, die ohnehin zu einem zusammenfallen, verzichten. Das ist mit einer echten Saite praktisch nicht realisierbar, vereinfacht aber das Rechnen. Daher der Name »Kreismethode« (circle method) für das Verfahren, das Hardy und Littlewood bereits 1917 entwickelten und mit dem man viele Sätze über Primzahlen beweist.

Die Saite mit allen Oberschwingungen mit Primzahlnummer anzulegen, läuft darauf hinaus, die Funktion

$$f(x) = e^{ip_1x} + e^{ip_2x} + \dots + e^{ip_nx}$$

zu berechnen, wobei $p_1=3, p_2=5 \dots$ der Reihe nach die Primzahlen bezeichnen. p_n ist die letzte Primzahl, die kleiner ist als N . Die komplexen Exponentialfunktionen $e^{ip_1x}, e^{ip_2x}, \dots$ beschreiben nach der Formel $e^{it} = \cos t + i \sin t$ in rechnerisch bequemer Form die entsprechenden harmonischen Schwingungen. Nimmt man f zur dritten Potenz, so muss man drei lange Summen in Klammern ausmultiplizieren. Es ergibt sich

$$(f(x))^3 = e^{i(p_1+p_1+p_1)x} + e^{i(p_1+p_1+p_2)x} + e^{i(p_1+p_1+p_3)x} + \dots ;$$

dabei kommen in den Exponenten alle denkbaren Summen dreier Primzahlen von p_1 bis p_n vor (einzelne Primzahlen dürfen mehrfach auftreten). Multipliziert man (sozusagen um zu testen, ob eine N -te Oberschwingung zu hören ist) die Funktion $(f(x))^3$ mit e^{-iNx} , so entsteht eine Summe aus Termen der Form $e^{i(p_j+p_k+p_m-N)x}$. Wenn N die Summe der drei Primzahlen p_j, p_k und p_m ist, steht im Exponenten eine Null, und der Term ist konstant gleich 1. In allen anderen Fällen ist er eine Schwingung mit irgendeiner Frequenz. Integriert man nun diese Funktion $(f(x))^3 e^{-iNx}$ über den ganzen Kreis, so ergibt sich 0 für alle Schwingungen, und nur die »Treffer« (die konstanten Terme) liefern einen Beitrag.

Damit ist die Aussage »Jede ungerade Zahl N ist Summe dreier Primzahlen« übersetzt in die Behauptung »Für alle ungeraden Zahlen N ist das oben beschriebene Integral positiv«.

Außerdem müssen in den Beweis natürlich auch Eigenschaften der Primzahlen eingehen, vor allem dass ihre Verteilung einer zufälligen so ähnelt. Die schönste Ausdrucksform für diese Gesetzmäßigkeit ist die riemannsche Vermutung (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86). Leider ist sie ebenfalls noch unbewiesen. Aber unter der Voraussetzung, dass eine Verallgemeinerung der riemannschen Vermutung gilt, konnten Godfrey H. Hardy und John E. Littlewood schon 1923 die ternäre Goldbach-Vermutung für alle N oberhalb einer gewissen Grenze C be-

weisen. Das Problem wird tatsächlich leichter, je größer N wird. Mehr noch: Mit bereits bewiesenen Gleichmäßigkeitsaussagen konnte 1937 der russische Zahlentheoretiker Iwan Matwejewitsch Winogradow (1891–1983) dieselbe Aussage treffen, ohne auf die verallgemeinerte riemannsche Vermutung zurückgreifen zu müssen. Seinen Fachkollegen gelang es, explizite und immer kleinere Werte für C anzugeben. Der letzte Wert von 2002 ist $2 \cdot 10^{1346}$.

Helfgott hat nun dreierlei geleistet: Schon vor einem Jahr lieferte er auf 77 Seiten die Abschätzung für die »minor

arcs«. Das jüngst veröffentlichte Ergebnis bezieht sich auf die »major arcs« und besteht aus 133 Seiten voller Formeln. Beide zusammen drücken den Wert von C auf 10^{30} .

Und die N , die kleiner als 10^{30} sind? Die hat er gemeinsam mit seinem Kol-

legen David J. Platt von der University of Bristol einzeln auf Zerlegbarkeit geprüft – mit dem Computer. Anscheinend war das der einfachste Teil der Übung. Die Tricks, mit denen Helfgott und Platt die Aufgabe in den Bereich des Machbaren brachten, gehen mühe-

los auf vier Seiten, und die Rechenzeit betrug 40 000 Prozessorstunden – kaum zwei Tage Arbeit für einen Parallelrechner mit 1000 Prozessoren.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

BAKTERIOPHAGEN

Der Feind meines Feindes ...

Manche Viren arbeiten im Dienst unseres Immunsystems: So genannte Phagen sind auf Bakterien spezialisiert und können damit Infektionen verhindern.

VON JULIA HEYMANN

Die meisten mehrzelligen Lebewesen besitzen mit Schleim überzogene innere oder äußere Oberflächen. Solche Schleimhäute bedecken manche Organe und kleiden Hohlräume wie Mund, Darm und Lunge aus. Sie ermöglichen den Stoffaustausch zwischen Organismus und Umwelt, indem sie im Darm zum Beispiel Nährstoffe absorbieren und Verdauungsenzyme in ihn abgeben. Der zähflüssige Schleim, auch Mukus genannt, fängt Schmutz und Krankheitserreger ab und verringert Reibung zwischen benachbarten Flächen.

Doch wie jede warme und feuchte Umgebung ist der Mukus zugleich Lebensraum verschiedener Mikroorganismen. Die meisten dieser Mitbewohner sind harmlos oder sogar nützlich – jedenfalls solange sie sich nicht zu stark vermehren. Aber auch krankheitserregende Bakterien sind dort zu finden. Sie nutzen die Schleimhäute als Haupteintrittsstelle in ihren Wirt.

Vielzeller haben gegen solche Bakterieninvasionen Abwehrmechanismen entwickelt: Antimikrobielle Hemmstoffe im Mukus oder eine verstärkte oder veränderte Schleimschicht hindern die Erreger daran, sich festzusetzen. Wie Jeremy Barr und sein Team von der San Diego State University jetzt

herausfanden, bekommen Mensch und Tier dabei zusätzliche Unterstützung aus dem Reich der Viren: Im Schleim tummeln sich besonders viele Bakteriophagen, kurz Phagen genannt, die wiederum die Bakterien befallen. Auf diese Weise können sie Infektionen verhindern helfen (*Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 1305923110, 2013).

Phagen gegen Eindringlinge

Die Wissenschaftler sammelten zunächst Schleimproben verschiedenster mehrzelliger Tiere – von der Seeanemone über Fisch und Maus bis hin zum Menschen – und bestimmten darin die Menge der Phagen und Bakterien. Sowohl die einfach konstruierten Viren als auch ihre Wirte findet man fast überall; doch Barr stellte fest, dass das Verhältnis von Phagen zu Bakterien im Schleim aller untersuchten Tiere vier- bis fünfmal höher war als im angrenzenden Medium.

Laut Barr diente bei Anemonen, Korallen und Fischen die Konzentration im direkt benachbarten Meerwasser als Referenzwert. Die menschliche Mundschleimhaut verglichen die Forscher mit dem Speichel, und die Schleimhaut des Mäusedarms mit dem Darminhalt. Meerestiere interessierten sie dabei be-

sonders, weil diese ihre komplette äußere Oberfläche in eine Schleimschicht einhüllen, die ständig der Umgebung ausgesetzt ist.

Im Labor zeigte sich, dass erst diese die Phagenbesiedelung von Hautflächen ermöglicht. Von Zellen ohne Mukus konnten die Phagen leicht wieder abgespült werden, während sie auf Schleim produzierenden Zellen haften blieben. Was die Häufung von Phagen für dort lebende Bakterien bedeutet, untersuchte das Team anschließend am Beispiel des Bakteriophagen T4 und seines Wirts, dem Bakterium *E. coli*. Das gehört zu den häufigsten menschlichen Darmbakterien und ist normalerweise harmlos. Einige Stämme rufen jedoch schwere Durchfallerkrankungen hervor. Bevor Barr menschliche Schleimhautzellen mit *E. coli* infizierte, überschichtete er sie mit einer Lösung aus T4-Phagen. Auf solchen Kulturen überlebten deutlich weniger Bakterien als auf Zellen ohne die Viren.

Letztere reduzierten zugleich den angerichteten Schaden: Durch die Vorbehandlung überlebten nahezu alle Zellen die Infektion mit dem Darmbakterium, während ohne Bakteriophagen rund die Hälfte von ihnen zerstört wurde. Den Effekt beobachteten die Wissenschaftler allerdings nur bei Schleim

produzierenden Zellen – der entscheidende Faktor für die Phagenabwehr musste sich also im Mukus befinden.

Der Hauptbestandteil der – je nach Spezies bis zu 0,7 Millimeter dicken – Schleimschicht stellen die Muzine. Das sind Glykoproteine mit negativ geladenen Seitenketten, die Wasser binden und so die gelartige Konsistenz des Schleims erzeugen. Daneben enthält der Schleim weitere Proteine, DNA und Überreste abgestorbener Zellen. Tests ergaben, dass die Muzine für die Bindung der Phagen an den Schleim verantwortlich sind.

Bei den Viren identifizierte das Team als Interaktionspartner eine Gruppe von Oberflächenproteinen, deren Funktion bisher unbekannt war: Die so genannten Immunglobulinähnlichen Proteine (Ig-like proteins) besitzen mehrere variable Abschnitte, so dass ein Phage eine von vielen möglichen Versionen auf seiner Hülle tragen kann. In dieser Formenvielfalt ähneln die Moleküle ihren Namensvettern, den Antikörpern oder Immunglobulinen.

Bakteriophagen (griechisch für: Bakterienfresser) sind die am häufigsten vorkommenden biologischen Einheiten der Erde. Bei einer Infektion injiziert ein Phage sein Erbgut in eine Bakterienzelle, die daraufhin neue Vi-

ruspartikel produziert. Sobald das Bakterium diese freisetzt, stirbt es. Phagen besitzen eine sehr hohe Wirtsspezifität, das heißt jeder Phagentyp ist genau auf »sein« Bakterium zugeschnitten. Mehrzelligen Organismen wie Menschen und Tieren können Bakteriophagen deshalb nicht gefährlich werden. Dass sie ihnen sogar nützen können, war jedoch bisher nicht bekannt. Die kalifornischen Forscher gaben dem Abwehrmechanismus den Namen BAM (Bacteriophage Adherence to Mucus) und betrachten ihn als einen körperfremden Baustein des Immunsystems, der offensichtlich im gesamten Tierreich vorkommt.

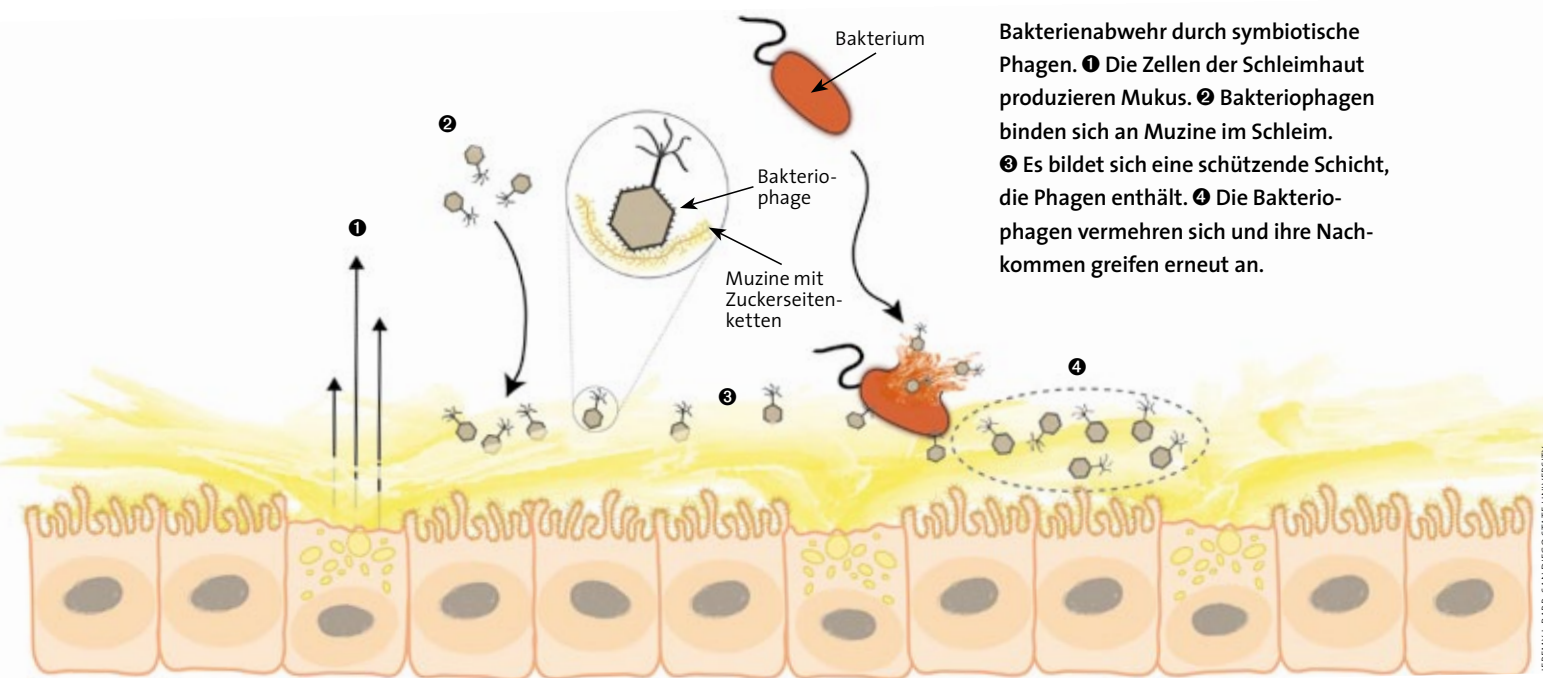
Gute Zusammenarbeit

Für solche symbiotischen Beziehungen mit Bakterien gibt es dagegen einige Beispiele. Als Teil der menschlichen Darmflora zerlegen etwa Bacteroidesarten unverdauliche Zuckerverbindungen, und Zwergtintenfischen verhelfen Bakterien der Gattung *Aliivibrio* zur Farbenpracht ihrer Leuchtorgane. Im Gegenzug erhalten die Mikroben Nährstoffe, Lebensraum und die Möglichkeit zur Weiterverbreitung. Der Mensch beherbergt sogar zehnmal mehr Mikroorganismen, als er selbst Zellen besitzt (siehe »Tausend Billionen Freun-

de«, Spektrum der Wissenschaft, 11/2012, S. 26).

Bereits in den 1930er Jahren gab es Bestrebungen, Phagen zur Krankheitsbekämpfung einzusetzen. Als kurz darauf chemische Antibiotika aufkamen, verfolgte man diesen Ansatz aber nicht weiter. Interessant wurde die Phagentherapie erst wieder, nachdem immer mehr Bakterien – vor allem durch übermäßigen Antibiotikaeinsatz – Resistenzen entwickelt hatten. Noch ist sie nicht zulassungsfähig, doch werden die nützlichen Viren bereits häufig zur Dekontamination von Lebensmitteln wie Eiern, Käse oder Fleisch eingesetzt.

In der ersten kontrollierten klinischen Studie an Menschen verwendete Anthony Wright vom University College London erfolgreich Phagen zur Bekämpfung chronischer Ohrenentzündungen (*Clinical Otolaryngology* 34, S. 349, 2009). Mit einem Cocktail aus sechs verschiedenen Phagen ließen sich zuvor nicht behandelbare Infektionen antibiotikaresistenter Pseudomonaserreger kurieren, und zwar ohne nennenswerte Nebenwirkungen und bei manchen Patienten schon nach einer Gabe. Eine aktuelle Studie zeigt die Wirksamkeit von Phagen bei einem großflächigen Hautinfekt mit *Mykobakterium ulcerans*, der sonst zwangs-



Bakterienabwehr durch symbiotische Phagen. 1 Die Zellen der Schleimhaut produzieren Mukus. 2 Bakteriophagen binden sich an Muzine im Schleim. 3 Es bildet sich eine schützende Schicht, die Phagen enthält. 4 Die Bakteriophagen vermehren sich und ihre Nachkommen greifen erneut an.

Unsere sportlichen Urahnen

Die ersten Menschen waren gut gebaute Athleten.

Was macht uns zu Menschen? Was unterscheidet uns von Tieren? Um solche Fragen prinzipiell zu klären, etablierte sich zu Beginn des vorigen Jahrhunderts an Deutschlands Universitäten die philosophische Anthropologie. Sie kam im Wesentlichen zu dem Ergebnis, der Mensch sei – mit den Worten des Philosophen Friedrich Nietzsche – »das nicht festgestellte Tier«. Dadurch sei unsereins zwar welt-offen und flexibel, sozusagen wenig vorprogrammiert, aber dafür von Natur aus mit schwachen Sinnen und Instinkten ausgestattet und insofern den Tieren unterlegen. Der konservative, seinerzeit mit den Nazis sympathisierende Denker Arnold Gehlen (1904–1976) definierte den Menschen darum als »Mängelwesen«, das einzeln nicht überlebensfähig sei, sondern nur durch strenge Zucht und Ordnung bestehen könne, geschützt im Panzer starker Institutionen.

Die Biologie der Menschwerdung erscheint so geradezu als Rückentwicklung. Für Kulturpessimisten setzte sich der Dekadenzprozess im Lauf der Menschheitsgeschichte fort. Zum Beispiel beklagte der österreichische Verhaltensforscher Konrad Lorenz (1903–1989) die »Verhausschweinung des Menschen«: Im Schoß der ihn verweichlichenden Kultur büße er die natürlichen Gaben des Wildtyps vollends ein.

Damit verfestigte sich der Eindruck, unsere Vorfahren seien einst als eine kopflastige und körperlich schwächliche Abart der Menschenaffen von den Bäumen geklettert – als wäre unser afrikanischer Urahn buchstäblich ein heruntergekommene Tier gewesen.

In jüngerer Zeit mehren sich freilich Befunde, die für das Gegenteil sprechen. Zum Beispiel waren die ersten Menschen so gute Dauerläufer, dass kein Affe mit ihnen mithalten konnte. Das schlossen Biologen schon vor Jahren aus der Anatomie von Bein und Becken sowie aus entsprechenden fossilen Spuren. Demnach fing der *Homo erectus* schon vor zwei Millionen Jahren an, den äffischen Konkurrenten davonzulaufen, wenn es darum ging, Raubtieren zu entkommen oder Aasfressern Nahrung abzujagen (*Nature* 432, S. 345, 2004).

Nun hat ein Team um den Evolutionsbiologen Neil T. Roach von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) ein weiteres Indiz für die sportlichen Fähigkeiten der Gattung *Homo* gefunden. Die Forscher wiesen nach, dass die Anatomie der menschlichen Schulter beim Schleudern eines Baseballs Wurfgeschwindigkeiten ermöglicht, die ein Schimpanse nicht im Entferntesten erreichen kann (*Nature* 498, S. 483, 2013). Die Fähigkeit, Steine oder Speere wuchtig und weit zu werfen, ist den ersten Menschen sicher nicht nur bei der Jagd, sondern auch bei der Abwehr sich nähernder Räuber sehr zugute gekommen.

Selbst hartnäckige Anhänger kulturpessimistischer Dekadenzmodelle sollten sich also endlich von veralteten Szenarien verabschieden. Der Mensch kam nicht als tapsiger Affe auf die Welt, der sich mit schwerem Kopf nur mühsam aufrichtete, schlecht sah und hörte und sich mit seinesgleichen schleunigst in die nächstbeste Höhle verkroch, um im Rudel auf einen starken Führer zu warten. Ich male mir meine Vorfahren eher als athletische Gestalten aus. Beim Gehen wackeln sie nicht wie Schimpansen o-beinig und weit vorgebeugt mit dem Oberkörper, damit sie beim mühseligen Fortbewegen jederzeit ihre langen Arme zu Hilfe nehmen können. Vielmehr laufen sie flott durch die Savanne und halten sich elegant aufrecht. Dabei umschließt ihre Hand einen Stein oder einen Speer, vor dem sogar Raubkatzen Reißaus nehmen – zumindest solange sie nicht allzu hungrig sind.



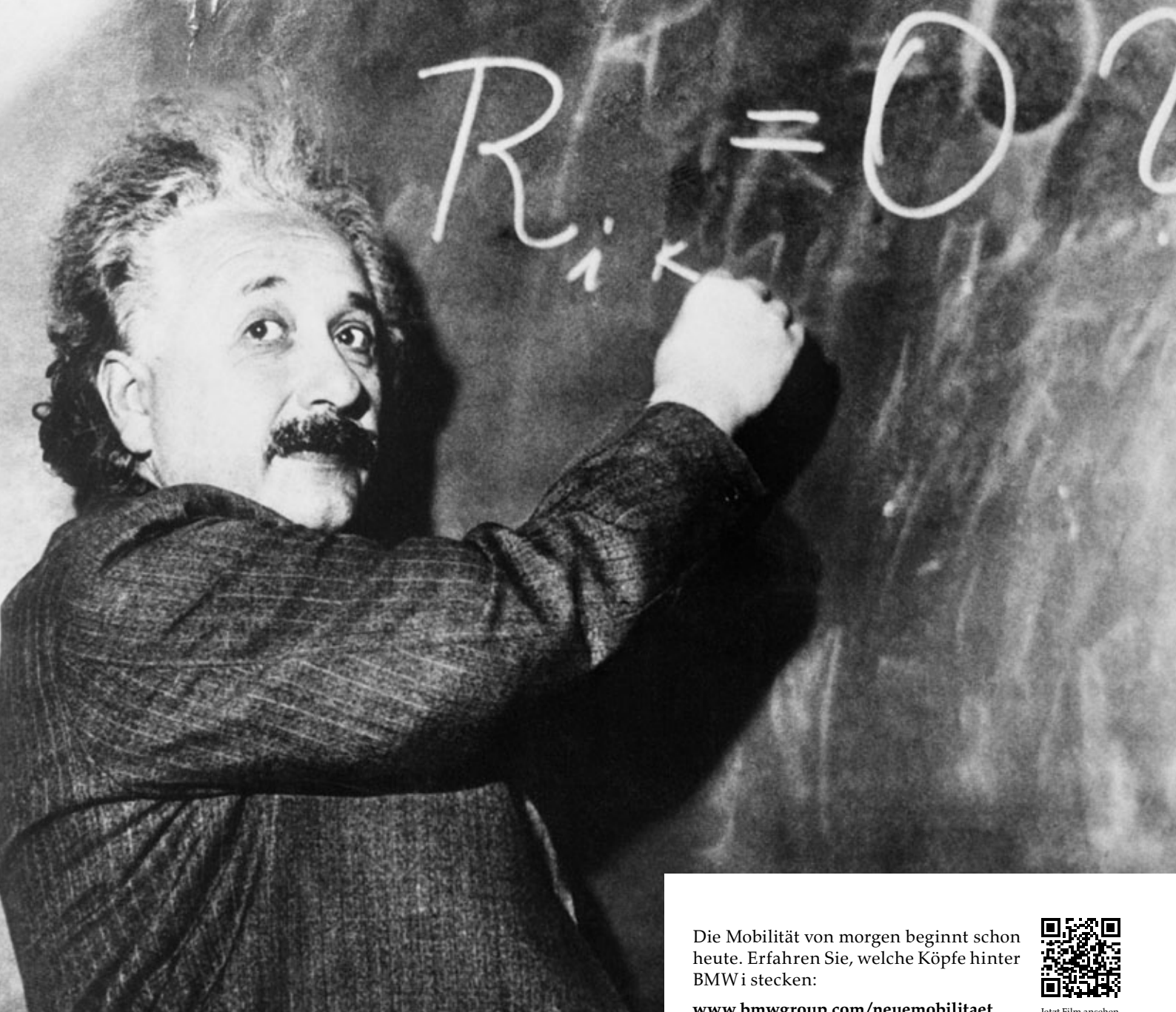
Michael Springer

läufig eine operative Gewebeentfernung nach sich zog (*PLoS Neglected Tropical Diseases* 7, e2183, 2013).

Auch Biofilmen lässt sich mit Hilfe von Phagen vorbeugen, wie Fu Weiling vom Centers for Disease Control and Prevention in Atlanta, Georgia, demonstrierte (*Antimicrobial Agents and Chemotherapy* 54, S. 397, 2010). Mitunter verursachen diese hartnäckigen Beläge aus Bakterienrasen, vor allem in medizinischer Gerätschaft wie Schläuchen oder Prothesen, lebensbedrohliche Infektionen. Die Krankenhausumgebung begünstigt zusätzlich die Bildung von Resistenzen. Die Beschichtung von Kathetern mit einem Phagen gel verhindert, dass sich ein Biofilm resistenter *Pseudomonas*-Bakterien bildet. Ein großer Fortschritt, denn einmal entstanden, sind die Erreger innerhalb des Films für Chemikalien schwer erreichbar.

Im Gegenzug haben Bakterien ihrerseits eine Strategie entwickelt, um einer Phageninfektion zu entgehen: Ein bakterielles Immunsystem namens CRISPR/Cas, das bei gut der Hälfte der Mikroben vorkommt, eliminiert die fremde DNA. Die Cas-Proteine (CRISPR-associated proteins) schneiden kleine Stücke aus der Phagen-DNA und bauen sie in eine spezielle Genregion des Bakteriums ein, die CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) heißt. Hier reihen sich mehrere der kurzen Abschnitte hintereinander. Nach dem Ablesen und Umschreiben in RNA dienen sie als Schablone, um weiteres fremdes Genmaterial zu erkennen. Die Cas-Proteine bauen dieses anschließend ab, und das Bakterium ist die fremde DNA los. Aber selbst damit ist der Rüstungswettlauf noch nicht beendet: Manche Phagen haben sich das CRISPR/Cas-System ihres Wirts selbst angeeignet und so den Spieß umgedreht (*Nature* 494, S. 489, 2013). Vermutlich setzen die Viren es auf gleiche Weise ein, um bestimmte Abwehrgene der Bakterien abzubauen.

Julia Heymann ist promovierte Molekularbiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.



Die Mobilität von morgen beginnt schon heute. Erfahren Sie, welche Köpfe hinter BMW i stecken:

www.bmwgroup.com/neuemobilitaet



Jetzt Film ansehen.

**MANCHE REVOLUTIONEN ENTSTEHEN
IN DEN KÖPFEN EINZELNER.
UNSERE IN DEN KÖPFEN VIELER.**

MOTOR EINER NEUEN MOBILITÄT.

**BMW
GROUP**



Rolls-Royce
Motor Cars Limited

Der Blick fürs Wesentliche

Molekularbiologische Analysen von Tumorzellen liefern eine gigantische, kaum noch zu überblickende Datenflut. Ist das der richtige Weg zu einer besseren Medizin, oder verlieren wir uns in Details?

Von Robert Gatenby

In den zurückliegenden Jahren haben wir atemberaubende Fortschritte in der Genetik und Molekularbiologie erlebt. Technische Verfahren, etwa zur DNA-Sequenzierung oder zur Proteincharakterisierung, besitzen mittlerweile eine Leistungsfähigkeit, die noch vor 20 Jahren undenkbar schien. Diese Entwicklung hat viele Bereiche der Lebenswissenschaften revolutioniert, darunter die Tumorbio- logie. Tausende Forschungsarbeiten aus den aufstrebenden Gebieten der Genomik, Proteomik und Metabolomik zum Thema Krebs zeugen davon.

Die neuen Analysemethoden haben allerdings auch gezeigt, wie enorm komplex Krebserkrankungen sind. Jede Tumorart zeichnet sich durch spezifische Merkmale aus, sowohl was ihre Physiologie als auch was ihre Genetik und Epigenetik betrifft. Ja, selbst Zellen innerhalb ein und des- selben Tumors können sich erheblich voneinander unter- scheiden. Die Antwort darauf lautete bisher: noch mehr Geld in molekulartechnologische Verfahren investieren, um noch mehr Tumorproben zu analysieren. Doch führt das unauf- hörliche Sammeln von Detailinformationen wirklich zu besseren Krebstherapien? Welchen Nutzen können wir aus dem gewaltigen Datenberg ziehen, den all die Sequenzierer, Microarrays und Massenspektrometer unablässig weiter aufhäufen?

Nehmen wir einmal an, es hätte diese technologischen Entwicklungen nicht gegeben und wir wären insbesondere

nicht in der Lage, die Genome von tausenden Tumorzellen zu sequenzieren. Natürlich hätten wir dann viel weniger In- formationen darüber, welche genetischen Merkmale dieser oder jener Tumor hat. Aber wüssten wir auch weniger über die Biologie von Krebserkrankungen? Meines Erachtens lau- tet die Antwort »nicht unbedingt«.

Viele Forscherkollegen werden mir hier heftig wider- sprechen. Die meisten Biologen und Onkologen halten es für selbstverständlich, dass die grundlegenden Mechanismen von Krebserkrankungen genetischer Natur sind. Viele ein- schlägige Artikel beginnen mit dem Satz: »Krebs ist eine Krankheit der Gene.« Medizinstudenten lernen heute die typischen Mutationen der verschiedenen Krebsarten aus- wendig – und nehmen implizit an, damit würden sie ein um- fassendes Verständnis erlangen. Es ist an der Zeit, diese Annahme in Zweifel zu ziehen.

Fragwürdige Zuversicht

Es herrscht der optimistische Glaube, immer detailliertere molekulardiologische Analysen von immer mehr Tumorpro- ben müssten letztlich zu Durchbrüchen in der Krebsmedizin führen – vornehmlich in Form von zielgerichteten Thera- pien, die entartete Zellen hochspezifisch angreifen und we- nig Nebenwirkungen haben. Doch die bisherigen Erfahrun- gen mit solchen »Targeted Therapies« lehren, dass diese im Allgemeinen nur vorübergehend wirken und die Krebszellen mit ihrer unerbittlich fortschreitenden Evolution letztlich die Oberhand gewinnen. Wir sollten uns also vielleicht nicht länger darauf verlassen, die steigende Raffinesse unserer mo- lekulartechnologischen Verfahren führe mehr oder weniger zwangsläufig zu wirksameren Behandlungen.

Eine Alternative könnten Projekte bieten, die eine Brücke von der Tumorbiologie zur physikalischen Forschung schla- gen. Von den Physikern können wir etwas Wichtiges lernen, nämlich die klare Trennung der experimentellen Beobach- tungen von den Prinzipien des untersuchten Systems. Egal ob es um die Beschreibung von Planetenbewegungen, die Analyse atomarer Spektren oder die Suche nach subatoma- ren Teilchen geht: Physiker definieren ein System nicht an- hand empirischer Daten. Vielmehr nutzen sie experimentel-

DIE ARTIKEL IM ÜBERBLICK

KREBSERKRANKUNGEN IM VISIER DER PHYSIKER

Teil 1	▶ Der Blick fürs Wesentliche	August 2013
	▶ Krebszellen im Kräftespiel	
	▶ Berechnung des Tumors	
	▶ Das Unheil kommen sehen	
Teil 2	▶ Nanopartikel als Arzneitransporter	September 2013
	▶ Evolution von Krebszellen im Modell	

Physiker entwickeln neue Ansätze, um Tumorerkrankungen zu untersuchen und zu behandeln. Beispielsweise lässt sich mit Laserstrahlen messen, wie verformbar entartete Zellen sind (siehe Kasten S. 27). Das erlaubt Rückschlüsse auf den weiteren Krankheitsverlauf.

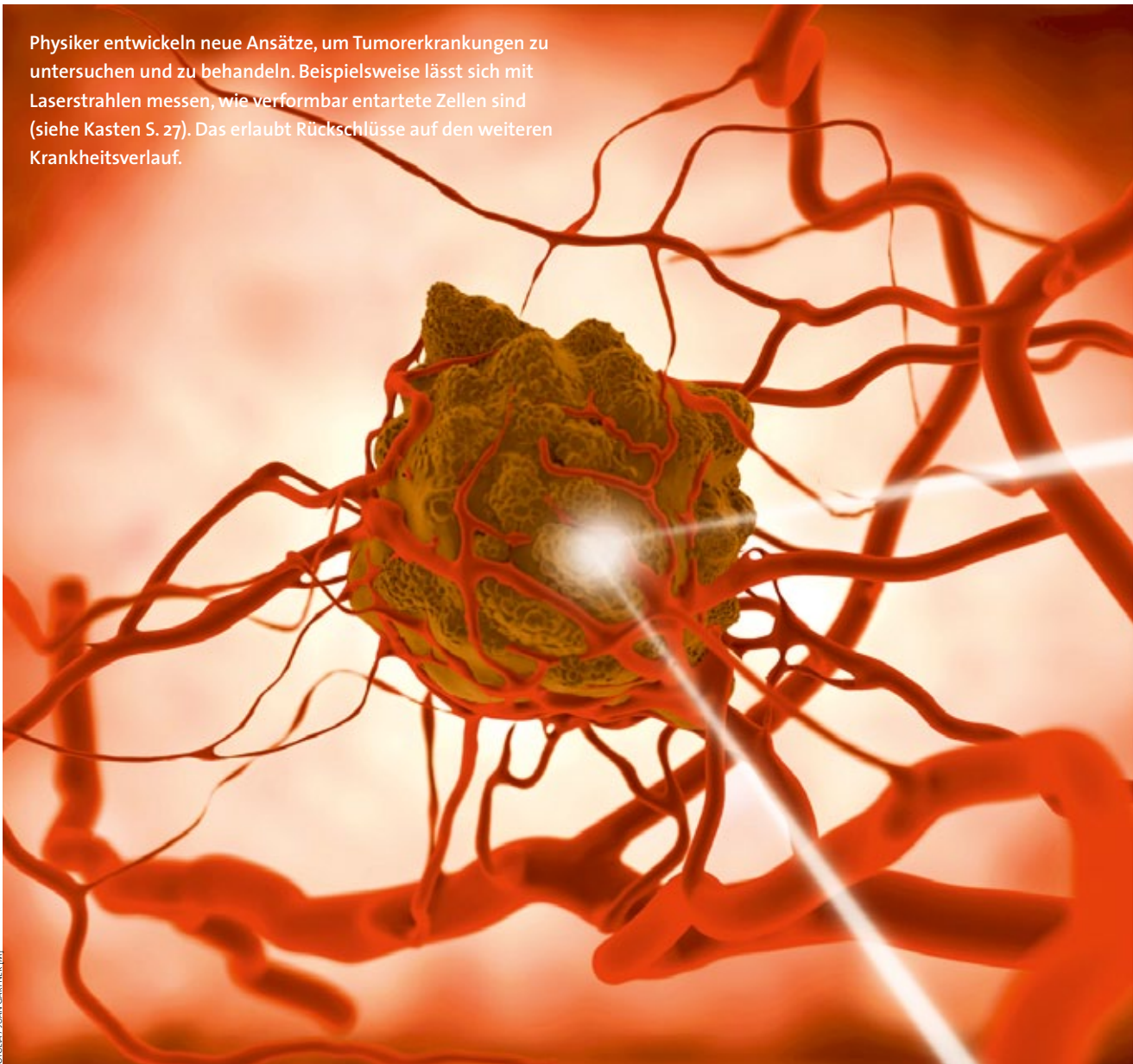


FOTO: ILLA / JUAN GÄRTNER / IMI

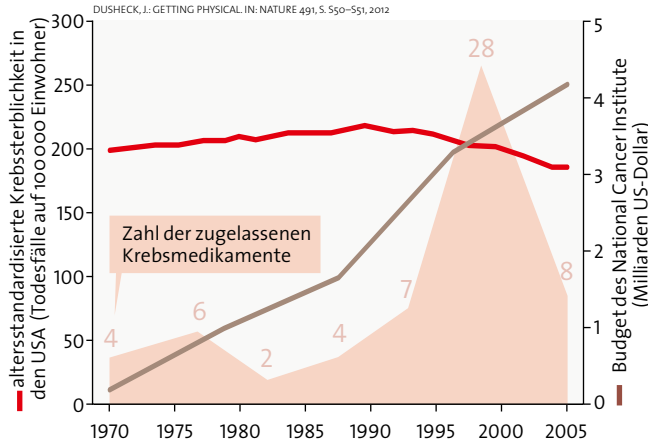
le Befunde, um theoretische Modelle zu prüfen, welche die grundlegenden Prinzipien des Systems abbilden. Mir scheint, wenn wir auch für die Tumorbiologie einen theoretischen Rahmen entwickeln wollen, sollten wir uns an ein Postulat des Evolutionsbiologen Theodosius Dobzhansky halten: dass nämlich Krebserkrankungen nur im Licht der Evolution sinnvoll erklärbar sind.

Daher frage ich mich, ob das Sequenzieren von immer mehr Krebsgenomen ausreicht oder überhaupt notwendig ist, um die evolutionäre Dynamik von Tumoren und ihre Reaktion auf therapeutische Eingriffe zu verstehen. Darwin wusste nichts über Molekulargenetik. Sein Modell der biologischen Evolution setzte lediglich einen nicht näher definierten »Mechanismus der Vererbung« voraus. Fast 100 Jahre lang führten Evolutionsbiologen und Ökologen ihre Untersuchungen durch, ohne etwas von Genetik zu wissen – und

AUF EINEN BLICK

WENIGER IST MANCHMAL MEHR

- 1 Die technischen **Verfahren der Molekularbiologie** sind mittlerweile enorm leistungsfähig. Beispielsweise lässt sich ein komplettes menschliches Genom binnen weniger Tage sequenzieren.
- 2 Krebsforscher nutzen die neuen Möglichkeiten, um tausende Tumorproben auf ihre **molekularen Details** zu untersuchen. Das führt zu einer enormen Datenflut.
- 3 Immer mehr Wissenschaftler befürchten, dass diese **riesige Informationsmenge** den Blick auf die wesentlichen Prinzipien von Krebserkrankungen verstellt.
- 4 Physiker versuchen daher, **reduktionistische Ansätze für die Krebsmedizin** zu entwickeln. Sie charakterisieren Tumorzellen etwa anhand weniger mechanischer Eigenschaften oder entwickeln theoretische Modelle des Tumorwachstums.



Viele Wissenschaftler möchten neue Wege in der Krebsforschung beschreiten, etwa über eine verstärkt physikalische Herangehensweise. Denn die bisherigen Fortschritte im Kampf gegen Krebs sind oft enttäuschend. 1971 rief der damalige US-Präsident Richard Nixon den »War on Cancer« (Krieg gegen Krebs) aus. Die finanziellen Zuwendungen ans amerikanische National Cancer Institute stiegen in den Folgejahren dramatisch an (braune Linie) – verbunden mit dem Auftrag, ein Heilmittel gegen Tumorerkrankungen zu finden. Tatsächlich hat die US-Arzneimittelbehörde FDA seither zahlreiche Krebsmedikamente zugelassen. Trotz alledem ist die altersstandardisierte Krebssterblichkeit in den USA seit den 1950er Jahren nur um elf Prozent gesunken (rote Linie).

erkannten dennoch die fundamentalen Prinzipien, nach denen komplexe biologische Gemeinschaften funktionieren. Dies war möglich, weil die evolutionäre Entwicklung sowohl einzelner Arten als auch die von Artengemeinschaften davon abhängt, wie ihre äußeren, phänotypischen Merkmale – und nicht ihre Genome – mit den Selektionsfaktoren der Umwelt zusammenwirken. Mit anderen Worten: Um die grundlegenden Funktionsprinzipien von Lebensgemeinschaften zu erkennen, braucht man nicht unbedingt die Genetik. Im Gegenteil, die exzessive Beschäftigung mit genetischen Merkmalen kann sogar den Blick für das Wesentliche verstellen.

Vom Wesen der Fische lernen

Dies lässt sich gut am Beispiel der Höhlenfische zeigen. Überall auf der Welt gibt es Unterwasserhöhlen, in denen diverse Fischarten leben. All diese Tiere haben sich an die ewige Dunkelheit angepasst, indem sie leistungsfähigere taktile Organe ausbildeten und ihre Sehfähigkeit und Hautpigmentierung verloren. Die heutigen höhlenbewohnenden Fische stammen von mehr als 80 verschiedenen Arten ab – ein beeindruckendes Beispiel konvergenter Evolution. Würde man ihre Genome sequenzieren, erhielte man eine riesige Menge von äußerst heterogenen Informationen. Diese Daten würden nicht nur Unterschiede zwischen den Arten widerspiegeln, sondern auch die genetische Variabilität innerhalb der Spezies. Sicher könnte man daraus interessante Erkenntnisse gewinnen, doch die grundlegenden Charakteristika dieser Fische – größere taktile Organe, Verlust des Sehsinns und der Pigmentierung – erschließen sich bereits durch simples Betrachten der Tiere.

Es gibt den sprichwörtlichen Mann, der seinen Schlüssel unter einer Straßenlaterne sucht, obwohl er ihn ganz woanders verloren hat – und zwar, weil er unter der Laterne mehr sieht. Ganz ähnlich fühlen auch wir Forscher uns zu Arbeitsfeldern hingezogen, die einen hohen Informationsertrag versprechen. Doch Datenfülle ist keine Garantie für wissenschaftlichen Erfolg. Dobzhansky schrieb einmal: »Viele Wissenschaftler hegen den naiven Glauben, sobald sie nur genügend Informationen über ein Problem zusammentra-

gen hätten, würden diese sich schon irgendwie so zusammenfügen, dass eine überzeugende und wahrhaftige Lösung des Problems herauskommt.«

Die enorme Datenmenge, die wir mit Hilfe der neuen molekular-technologischen Verfahren anhäufen, ist zweifellos von großem Nutzen. Doch um ihretwillen haben wir andere Forschungsansätze vernachlässigt – darunter möglicherweise solche, die uns zu »echten« Lösungen führen würden. Würden wir die Evolution und Ökologie von Tumoren verstehen, was bislang nicht der Fall ist, dann würden wir vermutlich auch klarer erkennen, dass die Aussagefähigkeit dieser Daten begrenzt ist. Solange wir die grundlegenden Prinzipien von Krebserkrankungen nicht erfasst haben, erzeugen unser anhaltendes Vertrauen und unsere gewaltigen Investitionen in die Molekular-technologie womöglich nur eine Fortschrittsillusion.

Wenn wir in der Tumorbio-logie echte Fortschritte machen wollen, brauchen wir ein tragfähiges theoretisches Gerüst. Ähnlich wie in der Gravitationstheorie oder der Quantenfeldtheorie, müssen wir die Gesetzmäßigkeiten definieren, die dem komplexen molekularbiologischen Geschehen in Tumoren zu Grunde liegen. Das wird erst gelingen, wenn wir an der richtigen Stelle suchen. ~

DER AUTOR



Robert Gatenby leitet die Abteilungen für Radiologie und Integrierte Mathematische Onkologie am H. Lee Moffitt Cancer Center in Tampa, Florida.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/199280

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature Outlook 491, S. 55, 22. November 2012

TITELTHEMA: MECHANIK

Krebszellen im Kräftespiel

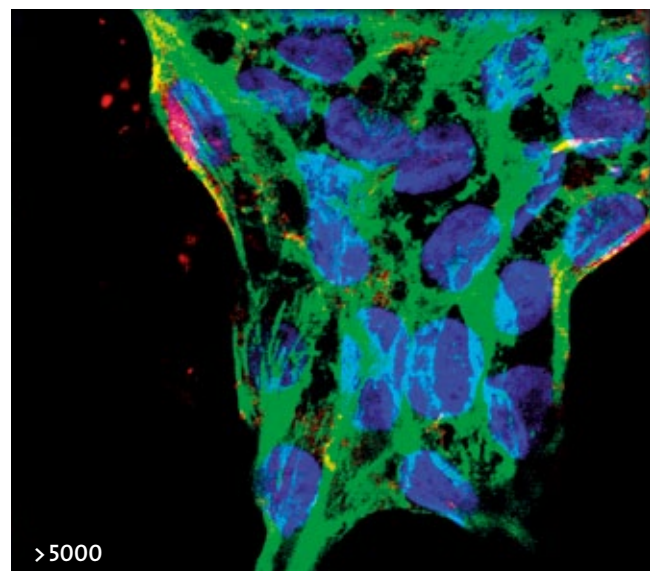
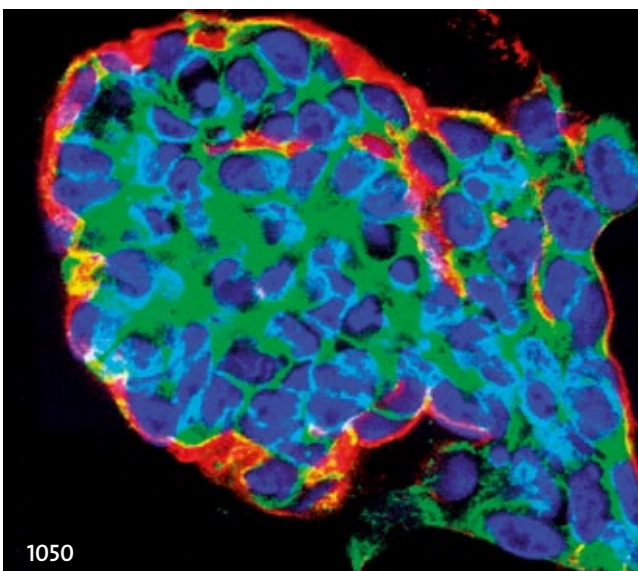
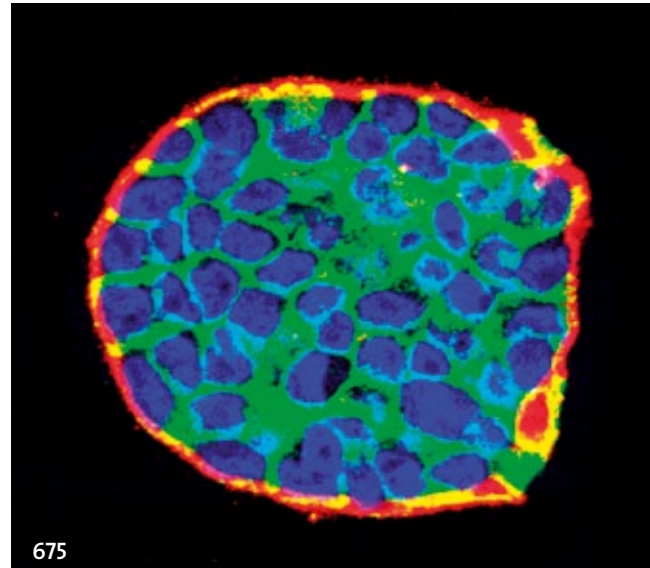
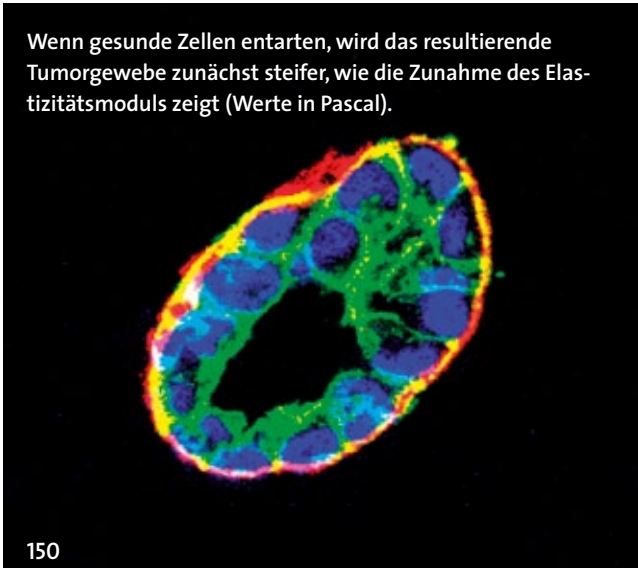
Onkologen erforschen die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Tumorzellen und ihrer Umgebung, um die Ausbreitung von Karzinomen besser zu verstehen – und eventuell zu stoppen.

Von Erika Jonietz

Noch Ende des 19. Jahrhunderts wussten Ärzte kaum mehr über Karzinome, als dass sie fester sind als das umgebende Gewebe. Nach wie vor gibt meist das Ertasten eines Knotens bei Brust- und Prostatakrebs den Anlass zu einer eingehenderen Diag-

nostik. Seit etwa 30 Jahren zeichnet sich ab, dass die mechanischen Eigenschaften von Karzinomen – also von Geschwulsten, die aus Zellverbänden auf äußeren oder inneren Körperoberflächen hervorgehen – in der Tumorentwicklung eine große Rolle spielen. »Mechanische Kräfte bestimmen

Wenn gesunde Zellen entarten, wird das resultierende Tumorgewebe zunächst steifer, wie die Zunahme des Elastizitätsmoduls zeigt (Werte in Pascal).



PASZEK, M. J. ET AL.: TENSIONAL HOMEOSTASIS AND THE MALIGNANT PHENOTYPE IN CANCER CELLS. S. 241–254, 2005. FIG. 2C. ABRUCK/GENEHEIMIGT VON ELSEVIER / CCC

maßgeblich, wie Zellen sich teilen und mit anderen wechselwirken, wie sie Signale verarbeiten und senden. Es sind auch Kräfte im Spiel, wenn bösartige Zellen in andere Gewebe eindringen, metastasieren und sich an Oberflächen anheften«, erklärt Muhammad Zaman, biomedizinischer Ingenieur an der Boston University in Massachusetts. Daher bilden mechanische Prozesse in der noch jungen physikalischen Krebsforschung einen Schwerpunkt – in der Hoffnung, neue Ansatzpunkte für Therapien und Diagnoseverfahren zu finden.

Eine Grundfrage lautet: Sind die mechanischen Eigenschaften der Zellen solider Tumoren untereinander vergleichbar oder hängen sie maßgeblich von denen der jeweiligen Mikroumgebung ab, beispielsweise den Proteingerüsten und den einwirkenden Kräften? Im ersten Fall müssten universelle Gesetze die Mechanik von Tumoren beschreiben, im zweiten wäre eine Vielzahl mechanischer Konstellationen zu erforschen.

Weichere Zellen dringen leichter in andere Gewebe

Josef Alfons Käs, Zellbiophysiker, vertritt die erste These. Der Leiter des Labors für Soft Matter der Universität Leipzig ist überzeugt, dass einige Zellcharakteristika, die er bei Brust- und Gebärmutterhalskrebs findet, für alle Karzinome gelten. Während die Molekularbiologie ein immer komplexeres und damit schwerer zu interpretierendes Bild liefert, erlaubt die Physik seiner Ansicht nach eine klarere Sicht auf das Krankheitsgeschehen. »In der Systembiologie definiert man funktionelle Einheiten für das Netzwerk Zelle, das bringt Struktur hinein. Ein solches Modul ist die Biomechanik einer Zelle, also ihre Materialeigenschaften. Wie steif ist sie beispielsweise, und welchen Einfluss hat das darauf, wie gut sie sich teilen oder fortbewegen kann. Aus dieser Perspektive sind Zellen einfach Beispiele für weiche Körper, die dann derselben Physik gehorchen wie etwa Kolloide.«

Käs hat etwa beobachtet, dass Brustkarzinomzellen – entartete Epithelzellen der Brustdrüse – weicher werden, wenn die Erkrankung voranschreitet. Die Erklärung dafür: Um das umliegende Gewebe zu befallen, müssen die Zellen durch Lücken im Proteingerüst der extrazellulären Matrix schlüpfen, was leichter gelingt, wenn sie sich verformen können. Dem entspricht auch, dass der aus Keratin aufgebaute Teil des

Zellgerüsts in bösartigen Krebszellen abgebaut wird. Im scheinbaren Widerspruch zur Verformbarkeit nimmt aber mit der Tumorentwicklung auch die Fähigkeit zu, sich bei mechanischen Reizen zusammenziehen zu können. Käs vermutet, dass sich diese Zellen dadurch einfacher aus dem Verband lösen und den Ursprungstumor verlassen können. »Eine sehr weiche Zelle könnte zwar leichter durch Lücken schlüpfen, um sich aktiv zu bewegen, muss sie jedoch zudem eine Kraft aufbringen können. Deshalb benötigen Tumorzellen beides, um in andere Gewebe vorzudringen und zu metastasieren: eine deformierbare Oberfläche und einen kontraktile Körper.«

Daher hat sein Team einen »optischen Zellstrecker« entwickelt, der mit zwei gegenläufigen Laserstrahlen die Verformbarkeit von 30 Zellen pro Minute vermisst (siehe Grafik). Damit hofft der Physiker, die Wahrscheinlichkeit einer Metastasierung, vor allem aber die Existenz metastasierender Zellen, schonender als bislang bestimmen zu können – bevor Tochtergeschwulste entstehen. Umgekehrt sollte es möglich sein, die mechanischen Veränderungen von Krebszellen medikamentös zu stoppen und so der Metastasenbildung entgegenzuwirken. Käs kooperiert zurzeit mit einem Pharmaunternehmen, um geeignete Hemmstoffe zu identifizieren.

Auch die Resistenz von Tumorzellen gegen Chemotherapien könnte sich physikalisch erklären lassen. Muhammed Zaman ist ihr mit Hilfe der Mikrorheologie auf der Spur. Bei diesem Verfahren zur Charakterisierung weicher Systeme injizieren Forscher den Zellen Nanopartikel und beobachten deren Bewegung im Inneren. Industrielabore messen auf diese Weise beispielsweise viskoelastische Eigenschaften von Kunststoffschäumen.

Zaman gibt dabei dreidimensionalen Zellkulturen den Vorzug, da sie dem Umfeld eines echten Tumors eher entsprechen als konventionelle Kulturen in flachen Plastikschalen, die unter anderem Beispiel viel empfindlicher auf Zellgifte ansprechen. Er pflanzt Krebszellen mal in eine steifere, mal in eine weichere Matrix und testet zudem verschiedene Konzentrationen von Chemotherapeutika, immer auf der Suche nach einer Korrelation zwischen mechanischen Parametern und Wirkstoffresistenz. Am Ende hofft Zaman vorhersagen zu können, ob ein Tumor behandelbar ist oder ob droht, eine Resistenz zu entwickeln.

Die meisten Wissenschaftler der neuen onkologischen Disziplin bezweifeln allerdings, dass sich Karzinomzellen verschiedener Ursprungsgewebe wirklich physikalisch ähneln. Valerie Weaver, Bioingenieurin an der University of California in San Francisco, ist überzeugt: »Eine Tumorerkrankung bedeutet zwar immer eine Störung der Mechanik des Gewebes, doch wie sich diese im Einzelnen auswirkt, hängt von der Krebsart ab.« So würden mechanische Umgebungsreize über das Zellinnenskelett an den Zellkern weitergeleitet, wo sie Genaktivitäten beeinflussten. Als Folge könnten Enzyme gebildet werden, welche das Kollagen der extrazellulären Matrix verdauen, was es den Krebszellen ermöglichte zu proliferieren. Diese Prozesse dürften aber ihrer Ansicht

AUF EINEN BLICK

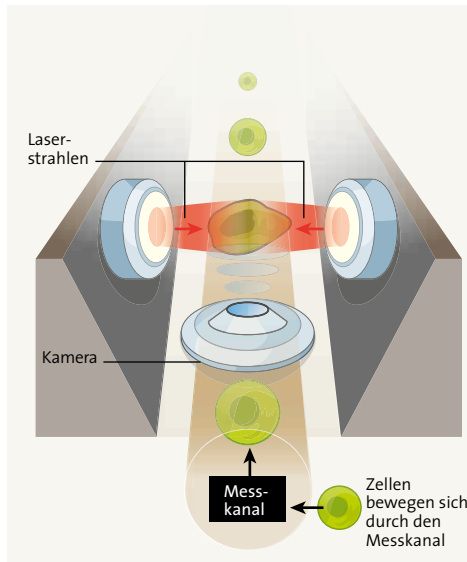
WEICHE KÖRPER, HARTE FAKTEN

1 Physiker sehen in lebenden Zellen »weiche Körper«, vergleichbar Kolloiden. Im Lauf der Tumorentwicklung verändern Karzinomzellen mechanische Eigenschaften wie **Verformbarkeit und Kontraktilität**.

2 Krebsforscher diskutieren, ob die gemessenen Parameter auf alle Tumorarten verallgemeinerbar sind oder stark von der **zellulären Mikroumgebung** abhängen. Im ersten Fall könnten bald neue Ansätze für Diagnose und Therapie gefunden werden.

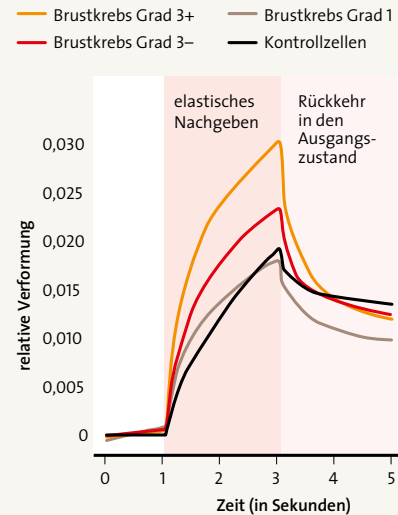
Diagnose auf Distanz

Der »optische Zellstrecker« des Labors für Zellbiophysik der Universität Leipzig misst die Elastizität und Kontraktionsfähigkeit von Krebszellen, um das Risiko der Bildung von Tochtergeschwulsten zu bestimmen.



Die Zellen bewegen sich durch einen flüssigkeitsgefüllten Kanal und werden zwischen zwei Laserstrahlen in der Schwebe gehalten (links). Während die Intensität des Laserlichts allmählich ansteigt, nimmt eine Kamera Serienbilder auf.

Brustdrüsenzellen aus Karzinomen lassen sich mit zunehmender Aggressivität (Malignitätsgrad G1 bis G3+) leichter dehnen, entspannen dann aber auch schnell wieder (Relaxation). Als Kontrollgruppe dienten gesunde Zellen dieses Gewebes.



JONIEZ, E., THE FORCES OF CANCER, IN: NATURE, 491, S. 556–557, 2012. DIAGRAMM NACH: JOSEFA, KAS, UNIVERSITÄT LEIPZIG

nach in verschiedenen Geweben unterschiedlich ablaufen, weil deren mechanische Eigenschaften differieren. Zudem ist Weaver der Ansicht, dass die physikalischen Anpassungen der Krebszellen teilweise erst außerhalb des Ursprungstumors erfolgen, was die Zahl der möglichen Konfigurationen mechanischer Variablen vervielfachte.

Ben Fabry, Biophysiker an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, verwendete Kollagenmatrizes mit eingebetteten fluoreszierenden Körnchen, um zu beobachten, wie Tumorzellen die umgebende Matrix beeinflussen, und um daraus ihre Kontraktionsfähigkeit zu berechnen. Dabei zeigte sich, dass Zellen invasiv wachsender Brust- und Lungenkarzinome viel stärker kontrahieren können als solche nichtinvasiver Geschwulste. Das würde die Theorie von Käs bestätigen. Allerdings ergab sich kein einheitliches Bild: Ein im Ursprungsgewebe verbliebener Genitalkrebs lieferte die höchsten gemessenen Kontraktilitätswerte. Fabry verwundert das nicht: »Die Zellen unterschiedlicher Krebsarten nutzen verschiedene Invasionsstrategien. Manche setzen auf eine weichere, flexiblere Konsistenz, andere auf Steifigkeit oder Kontraktilität.«

Die korrespondierenden molekularen Vorgänge sind noch kaum bekannt. »Wenn jemand behauptet, ein Phänomen sei rein mechanisch bedingt, kann man fast sicher sein, dass auch Biochemie im Spiel ist, und das gilt umgekehrt genauso«, erklärt Jan T. Liphardt vom Bay Area Physical Sciences-Oncology Center im kalifornischen Berkeley.

Weaver erinnert sich, dass James Watson, der Entdecker der DNA-Helixstruktur, 2012 kritisierte: »Ich verstehe nicht, wie sich daraus Therapieansätze ergeben könnten.« Die For-

scherin entgegnete damals: »Die einfachsten Signalsysteme sind mechanischer Art. Sie spielen eine so grundlegende Rolle für alle Lebensformen und insbesondere die vielzelligen Systeme, dass sie beim Krebs nicht bedeutungslos sein können.« Doch Weaver räumt ein, dass Watson einen wunden Punkt getroffen hatte: »Neue Therapieformen sind vorerst nicht in Sicht. Der schwierige Teil unserer Arbeit beginnt gerade erst.«

DIE AUTORIN

Erika Jonietz ist Wissenschaftsjournalistin in Austin (US-Bundesstaat Texas).

QUELLEN

Baker, E. L. et al.: Extracellular Matrix Stiffness and Architecture Govern Intracellular Rheology in Cancer. In: Biophysical Journal 97, S. 1013–1021, 2009

Fallica, B. et al.: Bioengineering Approaches to Study Multidrug Resistance in Tumor Cells. In: Integrative Biology 3, S. 529–539, 2011

Koch, T. M. et al.: 3D Traction Forces in Cancer Cell Invasion. In: PLoS One 7, e33476, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199281

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature Outlook 491, S. 56–57, 22. November 2012

Berechnung des Tumors

Computermodelle von Geweben helfen, Krebserkrankungen besser zu verstehen. Zudem liefern sie neue Therapieansätze.

Von Neil Savage

Als der Antikörper »Bevacizumab« vor neun Jahren für die Behandlung von Brustkrebs zugelassen wurde, hielten Ärzte und Forscher ihn für einen viel versprechenden Wirkstoff. Denn wachsende Tumoren benötigen zunehmend mehr Sauerstoff und senden daher chemische Signale aus, um die Bildung neuer Blutgefäße anzuregen, die ins Tumorgewebe einsprossen. Bevacizumab hemmt diesen Prozess, schneidet die Geschwulst damit von der Blutzufuhr ab und lässt sie schrumpfen. Doch schon bald stellten die Mediziner fest, dass einige der so behandelten Patientinnen keineswegs von der Therapie profitierten, im Gegenteil: Ihre Brusttumoren wuchsen noch intensiver ins umgebende Gewebe ein. Eine genaue Untersuchung des Phänomens bestätigte zwar, dass der Antikörper wie vorgesehen das Wachstum neuer Blutgefäße unterbindet. Doch der daraus resultierende Sauerstoffmangel im Tumor führt zur verstärkten Aktivierung von Krebsstammzellen, was die Geschwulst aggressiver macht. Daher widerrief die US-Arzneimittelbehörde FDA (Food and Drug Administration) ihre Zulassung des Medikaments vor zwei Jahren.

Diese Geschichte zeigt: Krebs ist eine komplexe Erkrankung. Tumoren setzen sich aus diversen Zelltypen zusammen, die sich in verschiedenen Zellzyklusstadien befinden und unterschiedliche chemische Signale aussenden und empfangen. Größere Geschwulste sind von Blutgefäßen durchzogen und treten in eine komplizierte Wechselwirkung mit dem umgebenden Körpergewebe und den Organen, in

die sie einwachsen. Zudem zeigen sie vielfältige Reaktionen auf Arzneistoffe, die sich gegen sie richten.

DNA-Sequenzierungen und Proteincharakterisierungen machen es möglich, dass wir Tumorzellen heute genauer untersuchen können als je zuvor. Sie liefern enorme Datenmengen, die erst ansatzweise ausgewertet sind. Um diese Komplexität zu durchdringen – etwa um zu verstehen, warum Arzneistoffe wie Bevacizumab nicht immer wie erwartet wirken –, nutzen Forscher seit einiger Zeit Computermodelle. Diese machen sichtbar, wie Tumoren wachsen, liefern Ansätze für mögliche Gegenmaßnahmen und simulieren, welche Folgen ein bestimmter medizinischer Eingriff hat.

»Wir besitzen heute unvorstellbar viele Informationen über Krebserkrankungen«, sagt Jasmin Fisher, Neuroimmunologin an der britischen Cambridge University. »Doch angesichts der enormen Komplexität der Daten erkennen wir darin keine sinnvollen, systematischen Zusammenhänge.«

Im Faktengestrüpp verfangen

Auch der Biophysiker James Glazier, Direktor am Institut für Biokomplexität der Indiana University in Bloomington (USA), meint, die Informationsflut in der Krebsforschung berge die Gefahr, sich in Einzelergebnissen zu verlieren. Onkologen konzentrierten sich immer mehr auf Gene und Proteine, doch um eine Krebserkrankung zu verstehen und wirksam zu bekämpfen, müsse sie als ein System aufgefasst werden und nicht bloß als eine Menge bestimmter Zellaktivitäten. Glazier zufolge liegt der wissenschaftliche Fokus zunehmend darauf, Genome und Signalübertragungswege von individuellen Zellen zu analysieren – was dazu führe, dass viele Forscher das Gesamtsystem aus dem Blick verlieren. »Selbst mit der genauesten Kenntnis darüber, was innerhalb einer einzelnen Krebszelle geschieht, lässt sich niemals vorhersagen, wie sich ein Tumorgewebe verhalten wird,« sagt der Biophysiker. »Die Komplexität von Geweben entsteht größtenteils durch die Wechselwirkungen der Zellen untereinander und mit dem extrazellulären Umfeld.«

Einer von denen, die Krebs als ganzheitliches System betrachten möchten, ist Philip Maini, Leiter des Zentrums für Mathematische Biologie an der University of Oxford (Eng-

AUF EINEN BLICK

MIT DER KRAFT DER THEORIE

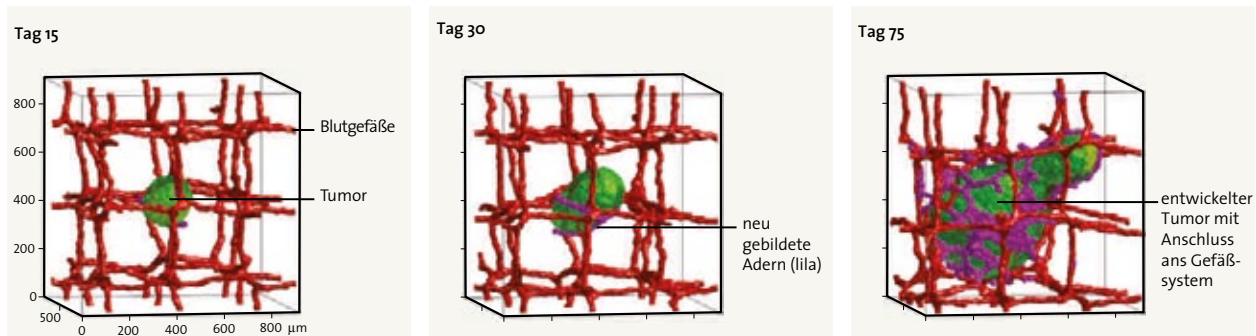
1 **Computermodelle** bilden ab, was in einem Tumor geschieht und wie sich Krebszellen verhalten. Sie erlauben unter anderem, die Entwicklung eines Tumors unter verschiedenen Bedingungen zu simulieren.

2 Mit Hilfe solcher Modelle wollen Forscher **Ansätze für neue Krebstherapien** finden. Berechnungen zeigten etwa, dass neu wachsende Blutgefäße so modifiziert werden können, dass sie im Gewebe »hängen bleiben«, statt den Tumor zu erreichen.

Simulierte Wucherung

Wenn ein Tumor wächst, veranlasst er nahe gelegene Blutgefäße dazu, Ausläufer zu ihm hin zu entsenden. Dadurch bekommt er Anschluss ans Gefäßsystem – und somit Sauerstoff und Nährstoffe. Dieser Prozess, die »Angiogenese«, lässt sich im

Computermodell abbilden. Unten sind die Ergebnisse einer solchen Simulation gezeigt. Daraus geht hervor, dass der wuchernde Tumor zunehmend mehr Gefäße an sich zieht und dabei das Adernetzwerk in seiner Umgebung massiv verändert.



SHIRINPARD, A. ET AL.: 3D MULTICELL SIMULATION OF TUMOR GROWTH AND ANGIOGENESIS. IN: PLOS ONE, 4, F7910, 2009

land). Er versucht im Computermodell abzubilden, wie Arzneistoffe wirken, die sich gegen das Wachstum von Tumorblutgefäßen richten. Diese Medikamente entfalten ihren größten Nutzen dann, wenn sie mit einer Strahlenbehandlung oder einer weiteren Chemotherapie kombiniert werden. Mainis Modell zeigt, dass ihre Effektivität wesentlich von der Dichte des Gefäßnetzes innerhalb des Tumors abhängt.

Computermodelle können nicht nur dazu dienen, die Wirkung eines Medikaments vorherzusagen, sie können auch mögliche Angriffspunkte für neue Arzneien aufzeigen. Damit lassen sich medizinische Hypothesen prüfen, ohne Tierversuche durchzuführen, wie Forscher betonen. »Dieser Forschungsansatz ist von großer Bedeutung, wenn wir verstehen wollen, wie Pharmaka bei komplexen Erkrankungen wirken«, sagt Adriano Henney von der Universität Heidelberg, Direktor des Deutschen Netzwerks Systembiologie der Leber, das sich zum Ziel gesetzt hat, Computermodelle des gesamten Organs zu entwickeln.

Auf dem Weg hin zu solchen Modellen stellt Jasmin Fisher im Computer nach, welche relevanten Signal- und Stoffwechselwege in Zellen existieren, wie diese funktionieren und auf welche Weise ihre Wechselwirkungen untereinander das Schicksal der Zellen bestimmen. »Wir betrachten biologische Prozesse so, als wären es Computerprogramme. Wir fragen also: Wie sieht der Algorithmus aus, der über das Verhalten der Zelle bestimmt?« Fishers Modellierungsansatz setzt Erkenntnisse über zelluläre Prozesse in formale Instruktionen um, die ein Computer ausführen kann. Stammzellen beispielsweise beschreiben unterschiedliche Differenzierungswege, je nachdem ob sie sich zu Blut- oder Herzmuskelzellen entwickeln. Dabei laufen die Veränderungen teils simultan ab und können über Rückkopplungssignale beeinflusst werden, die eine Zelle während ihrer Reifung erhält.

Fishers Programm erlaubt den Forschern, diese Prozesse virtuell zu manipulieren – etwa indem sie die Abfolge von Ereignissen ändern oder bestimmte Signalstärken reduzieren – und anschließend zu prüfen, ob das so modifizierte Modell im Einklang mit experimentellen Befunden steht.

Die große Herausforderung dabei lautet, so Maini, für jede Maßstabsebene den richtigen mathematischen Ansatz zu finden. So könne man intrazelluläre Vorgänge wie die Herstellung eines Proteins häufig am besten mit Differenzialgleichungen beschreiben, während sich Wechselwirkungen der Zellen untereinander eher mit regelbasierter Programmierung darstellen lassen.

Kristallisieren und schäumen

Um das Problem der verschiedenen Maßstabsebenen zu bewältigen, hat Glazier eine quelloffene Modellierungssoftware namens »CompuCell3D« entwickelt. Sie behandelt sowohl Zellbestandteile als auch Zellen und ihre Verbände als diskrete Objekte. Der Anwender kann verschiedene Daten in ein Zellmodell einfließen lassen – etwa, wie die Zelle auf chemische Reize reagiert oder wie stark sie an anderen haftet – und dann beobachten, wie sich diese Vorgaben auf das jeweils betrachtete System auswirken.

Glazier hatte schon im Jahr 2000 mit der Entwicklung der Software begonnen. Sie basiert auf einer Vorgängerversion, die simulierte, wie bestimmte Kristallstrukturen wachsen. Dabei waren ihm Ähnlichkeiten zwischen dem Entstehen kristalliner Strukturen und der Blasenbildung in schäumenden Flüssigkeiten aufgefallen. Zudem stellte sich heraus, dass seine Software auch Wechselwirkungen zwischen Zellen in einem heranwachsenden Embryo beschreiben kann.

Die Modelle, die Glazier, Fisher und andere entwickelt haben, versetzen selbst Krebsbiologen mit geringen Program-

mierkenntnissen in die Lage, eigene Computersimulationen durchzuführen. »Mit unserer quelloffenen Software wollten wir von Anfang an erreichen, dass jeder Wissenschaftler damit maßgeschneiderte Simulationen erstellen kann, die dann wiederum andere Forscher nutzen und an ihre jeweiligen Erfordernisse anpassen können«, erläutert Glazier. Eine Nutzeroberfläche mit vereinfachter Darstellung der zu modellierenden biologischen Prozesse sorgt dabei für leichte Bedienbarkeit. Der Anwender kann virtuelle Zellen, Proteine oder Gene per Mausclick auswählen und wie gewünscht in die Simulation einbauen.

Der Computerwissenschaftler Nicholas Flann und der Biologe Gregory Podgorski, beide von der Utah State University (USA), modellieren mit Hilfe von CompuCell3D, wie ein Tumor die Bildung neuer Blutgefäße anregt. Sie wollen herausfinden, wie man diese so genannte Angiogenese hemmen und das Krebswachstum eindämmen kann. Schon mikroskopisch kleine Tumoren sondern ein Protein namens VEGF ab (Vascular Endothelial Growth Factor, auf Deutsch etwa: Wachstumsfaktor für die innerste Zellschicht der Gefäßwände). Es veranlasst nahe gelegene Blutäderchen dazu, in Richtung der Geschwulst auszusprossen. Im lebenden Organismus dauert dieser Prozess ein bis drei Tage – im Computer spielt er sich binnen weniger Minuten ab.

Hunderttausend Wege zum Aushungern

Flann und Podgorski statteten ihr Modell mit 40 biochemischen Parametern aus. Dazu gehörten etwa die Fähigkeit einer Zelle, einen bestimmten Wachstumsfaktor zu erkennen, oder die Stärke, mit der Ausläufer von wachsenden Blutgefäßen an Stromazellen im benachbarten Gewebe binden. Die Software wählte jeweils drei Parameter aus, modifizierte einen davon nach dem Zufallsprinzip und prüfte, ob diese Veränderung das Blutgefäßwachstum im Modell verstärkt oder abschwächt. Insgesamt ergaben sich 100 000 mögliche Kombinationen von Parametern, bei denen die Nährstoffversorgung des Tumorgewebes eingeschränkt ist. Um die Ergebnisse statistisch abzusichern, wurde jede Kombination 128-mal getestet. Die Berechnungen liefen parallel auf zwei großen Computernetzwerken der US National Science Foundation und der US Air Force.

Dass das Modell sinnvolle Ergebnisse liefert, zeigte sich zunächst daran, dass es auf bekannte Angriffspunkte des Tumors hinwies – nämlich auf Signalwege, für deren Hemmung es bereits Medikamente gibt. Es legte jedoch auch bislang unbekannte Therapieansätze offen. Laut den Berechnungen kann etwa eine veränderte Haftwirkung zwischen dem Vorderende von aussprossenden Blutgefäßen und dem umgebenden Zellverband dazu führen, dass die Äderchen gewissermaßen im Gewebe hängen bleiben, statt in den Tumor einzuwachsen. Möglicherweise ließen sich neue Medikamente entwickeln, die genau darauf abzielen, meint Flann. Angesichts des komplexen Geschehens im Tumor, an dem sich hunderte Zellen beteiligen, hätte die alleinige

Kenntnis der Krebs auslösenden Genmutation oder bestimmter Stoffwechselwege in entarteten Zellen niemals zu dieser Entdeckung geführt – davon ist Flann überzeugt.

Computermodelle ermöglichen virtuelle Experimente, deren Durchführung im Labor zu teuer und Zeit raubend wäre. Forscher können damit neue Hypothesen testen oder die Schritte nachvollziehen, die zu einem bestimmten biologischen Effekt führen. Doch die Modelle müssen experimentell überprüft werden, weil sie nur von wissenschaftlichem Wert sind, wenn sie das reale Krankheitsgeschehen zutreffend abbilden. Maini warnt vor Computersimulationen, die sich auf unvereinbare Daten stützen – etwa aus Experimenten mit Mäusen, Ratten und menschlichen Zellen. Sie könnten die Forscher in die Irre führen. So hungern die angiogenesehemmenden Arzneistoffe, die er untersucht hat, Tumoren bei Mäusen auf andere Weise aus als bei Menschen. Deshalb müsse man die entsprechenden experimentellen Befunde voneinander trennen und könne sie nicht in dasselbe Modell einfließen lassen.

Bei allen Bedenken sind sich die meisten Wissenschaftler darüber einig, dass Computermodelle neue Möglichkeiten eröffnen, um komplexe Tumorerkrankungen zu erforschen. »Sie erlauben es, mit den riesigen Datenmengen umzugehen, die wir angesammelt haben – auf eine Weise, die unser Gehirn nicht beherrscht«, sagt der Mediziner und Systembiologe Adriano Henney. »Dabei wenden wir Verfahren aus den Ingenieurwissenschaften, der Physik, Chemie und dem Maschinenbau auf biologische Systeme an. Ich kann mir nicht vorstellen, wie wir die Datenfülle der heutigen Lebenswissenschaften bewältigen sollen, wenn nicht mit den Prinzipien der Mathematik und Physik.« ~

DER AUTOR



Neil Savage ist Wissenschafts- und Technologiejournalist. Er lebt in Lowell, Massachusetts (USA).

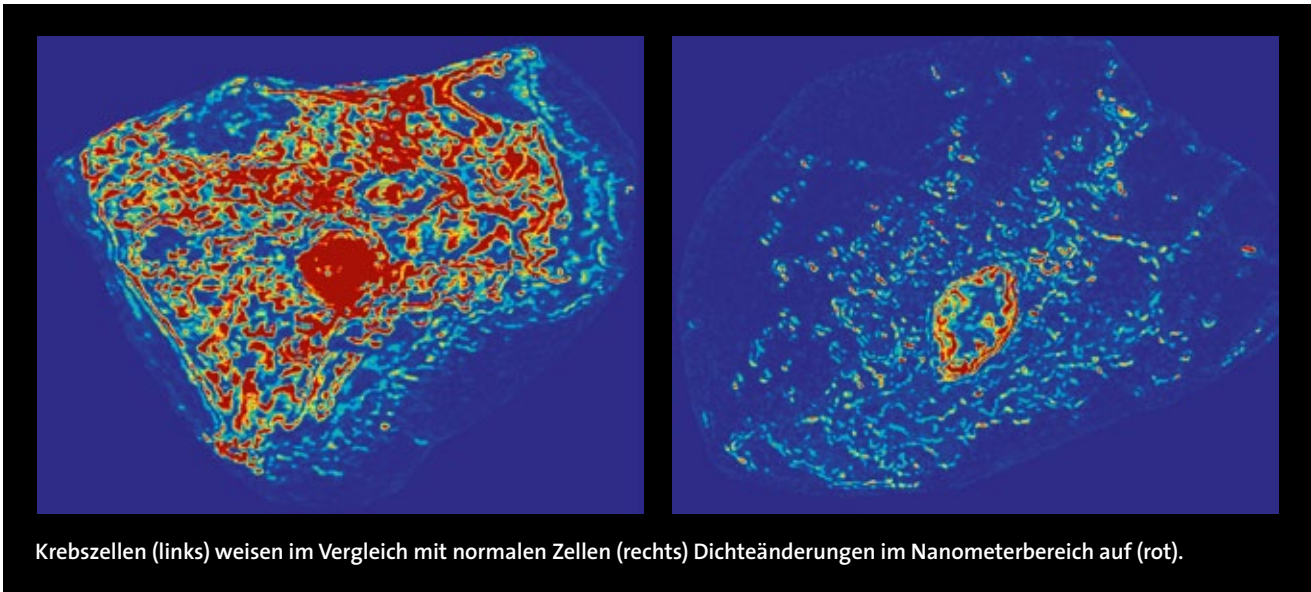
QUELLEN

- Fisher J., Henzinger T. A.:** Executable Cell Biology. In: Nature Biotechnology 25, S. 1239–1249, 2007
Stamper I.J. et al.: Modelling the Role of Angiogenesis and Vasculogenesis in Solid Tumour Growth. In: Bulletin of Mathematical Biology 69, S. 2737–2772, 2007
Swat M.H. et al.: Multi-Scale Modelling of Tissues Using CompuCell3D. In: Methods in Cell Biology 110, S. 325–366, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199282

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature Outlook 491, S. 62–62, 22. November 2012



Krebszellen (links) weisen im Vergleich mit normalen Zellen (rechts) Dichteänderungen im Nanometerbereich auf (rot).

TITELTHEMA: DIAGNOSTIK

Das Unheil kommen sehen

Physiker entwickeln neue Techniken, um Tumoren zeitiger zu erkennen.

Von Cassandra Willyard

Der Physiker Peter Kuhn sieht sich und seine Kollegen vor allem als Erfinder und Problemlöser. Seit einiger Zeit versucht er – so wie viele andere Physiker auch – ein Problem zu lösen, das Biologen und Onkologen schon seit Jahrzehnten beschäftigt: nämlich wie sich Krebs möglichst früh erkennen lässt, um seine Ausbreitung im Körper zu verhindern.

Kernspintomografie, Computertomografie und Positronen-Emissionstomografie sind heute unverzichtbare Methoden, um Krebsherde aufzuspüren und ihr Wachstum zu verfolgen. Nach wie vor arbeiten Physiker daran, diese bildgebenden Verfahren weiter zu verbessern und miteinander zu kombinieren, um noch aussagekräftigere Diagnoseergebnis-

se zu erhalten. Zunehmend schlüpfen sie aber auch in die Rolle von Pathologen, indem sie Techniken entwickeln, die entartete Zellen in Blut- und Gewebeproben nachweisen. Diese Techniken – von Nanosensoren bis hin zu verbesserten Mikroskopen – könnten das Potenzial besitzen, Krebsherde viel früher zu entdecken, als man es bislang für möglich hielt.

Aus soliden Tumoren lösen sich ständig Zellen, die in den Blutstrom gelangen und in andere Körperregionen wandern, wo sie sich festsetzen und Tochtergeschwülste bilden können. »Dieser Prozess ist bislang kaum verstanden«, sagt Kuhn, der am Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien) arbeitet. Das liege unter anderem an der sehr geringen Zahl zirkulierender Tumorzellen: Mitunter fänden sich in der Blutprobe eines Krebspatienten nur einige wenige entartete Zellen unter vielen Milliarden normalen. »Wir stehen also vor einem klassischen physikalischen Problem: der Detektion eines seltenen Ereignisses«, erläutert der Physiker.

Zum Nachweis der Krebszellen haben Kuhn und sein Team die Technik der so genannten Flüssigbiopsie entwickelt. Hierfür benötigen sie eine Probe von zwei Milliliter Blut. Daraus entfernen sie zunächst alle roten Blutkörperchen und übertragen den Rest als dicht gepackte, einlagige Schicht aus 10 Millionen Zellen auf einen Objektträger. Dann fügen sie Fluoreszenzfarbstoffe hinzu: einen zum Anfärben der Zellkerne, einen Antikörper zum Markieren von Immun-

AUF EINEN BLICK

EFFIZIENTE FRÜHWARNSYSTEME

1 Krebserkrankungen werden häufig erst in **fortgeschrittenem Stadium** erkannt, wenn es für eine wirksame Behandlung bereits zu spät ist.

2 Um das zu ändern, arbeiten Physiker an neuen Methoden zur Krebsfrüherkennung. So weisen sie entartete Zellen mit Hilfe **magnetischer Nanopartikel**, weiterentwickelter **Mikroskopieverfahren** und **rechnergestützter Bildauswertung** nach.

zellen und einen weiteren, der an Epithelzellen bindet. Anschließend nimmt eine digitale Mikroskopkamera etwa 10 000 Bilder der Zellschicht auf. »Diese Fotos gehen wir nun Stück für Stück durch«, beschreibt Kuhn. Er und sein Team verwenden einen Computeralgorithmus, der anhand der Fluoreszenzmuster bestimmte Epithelzellen erkennt, aus denen später einmal Tumoren hervorgehen können – etwa solche der Brust, der Lunge, des Darms, der Prostata, der Bauchspeicheldrüse und der Leber.

Effiziente Kameraüberwachung

»Sobald verdächtige Zellen entdeckt sind, lässt sich die Probe genauso weiteruntersuchen wie jede normale Biopsie«, erklärt Kuhn. Seine Daten belegen, dass die Flüssigbiopsie mehr zirkulierende Tumorzellen nachweist als der verbreitete CellSearch-Test. Dieser isoliert Tumorzellen mit Hilfe von Antikörpern und Magneten aus dem Blut und wurde von der amerikanischen Arzneimittelbehörde FDA für die klinische Anwendung zugelassen.

Momentan untersuchen die Wissenschaftler um Kuhn, ob sich aus der Zahl zirkulierender Tumorzellen ableiten lässt, wie eine bereits diagnostizierte Erkrankung weiter verlaufen oder auf eine Therapie ansprechen wird. Theoretisch eignet sich die Flüssigbiopsie aber auch selbst zur Diagnose. Wie das Team kürzlich nachwies, kann sie Tumorzellen im Blut von Patienten mit nichtkleinzelligem Bronchialkarzinom aufspüren, und das bereits in frühen Stadien der Erkrankung.

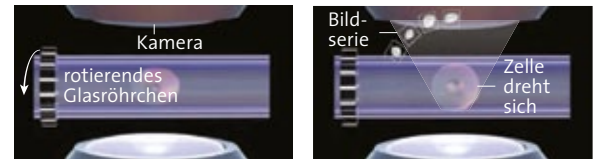
Um das volle diagnostische Potenzial der Methode auszuschöpfen, bedürfe es noch einiger Fortschritte, bemerkt Kelly Bethel, die als Pathologin am Scripps Research Institute mit Kuhn zusammenarbeitet. Sie will die Technik nutzen, um zirkulierende Tumorzellen bei Menschen mit hohem Krebsrisiko aufzuspiüren – etwa bei Personen mit nicht näher charakterisierten Wucherungen in Lunge oder Bauchspeicheldrüse. Hier könnte der Nachweis solcher Zellen den Ärzten dabei helfen, gutartige von bösartigen Tumoren zu unterscheiden.

Noch erlaubt die Flüssigbiopsie nicht, das Herkunftsorgan zirkulierender Tumorzellen zu bestimmen. Doch schon bald könnte sie diese Möglichkeit bieten. Die Forscher suchen bereits nach typischen Merkmalen von Zellen, die aus der Leber stammen. »Ich bin zuversichtlich, dass sich die Technik noch erheblich weiterentwickeln lässt«, sagt Bethel.

750 Kilometer weiter südöstlich forscht Sanjiv Gambhir ebenfalls über neue Ansätze der Krebsdiagnostik. Der Leiter

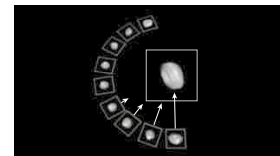
Diagnostik auf Einzelzellniveau

Das Cell-CT-Verfahren erzeugt dreidimensionale Bilder von Einzelzellen und analysiert sie auf Gestaltmerkmale, die für bestimmte Tumorarten typisch sind.



1. In ein Gel eingebettet werden Zellen einzeln durch ein feines Glasröhrchen transportiert.

2. Während das Röhrchen rotiert, fotografiert eine Kamera jede Zelle aus mehreren Blickwinkeln.



3. Aus diesen Aufnahmen erstellt ein Computerprogramm dreidimensionale Abbildungen der Zellen.



4. Das System analysiert, ob in den 3-D-Bildern ungewöhnliche Strukturen vorkommen, die auf Krebs hindeuten.

WILLIARD, C. PLACING DETECTIVE IN NATURE 491, 5, 564–565, 2012

der radiologischen Abteilung an der Stanford University (Kalifornien) ist frustriert darüber, dass bei vielen Krebspatienten die Krankheit erst erkannt wird, wenn es bereits zu spät ist. Entdecke der Arzt beispielsweise einen Brusttumor von der Größe einer Murmel, dann enthalte dieser bis zu 3 Milliarden Zellen und habe wahrscheinlich bereits in andere Organe gestreut. Um es erst gar nicht dazu kommen zu lassen, will Gambhir die Geschwulste bereits dann aufspüren, wenn diese noch kleiner sind als ein Stecknadelkopf.

Der Radiologe und sein Team haben einen briefmarkengroßen Microarraychip entwickelt, der Tumorproteine mit Hilfe magnetischer Nanopartikel nachweist. Auf der Oberfläche des Chips sind Antikörper fixiert, die an tumorspezifische Proteine binden. Trägt man einen Tropfen Blut oder andere Körperflüssigkeit auf den Chip auf, bleiben darin befindliche Tumorproteine an den Antikörpern hängen. Später geben die Forscher weitere Antikörper hinzu, die sich ihrerseits an die gefangenen Tumormoleküle heften.

Im nächsten Schritt setzt das Team magnetische Nanopartikel zu, die an einen der Antikörper koppeln. Sie lassen sich anschließend per Magnetfeldmessung nachweisen. Das ermöglicht es, die Proteine in einer bestimmten Probe zu identifizieren. Der Chip weist Tumorproteine in tausendfach niedrigerer Konzentration nach als ein Standard-ELISA, das am häufigsten eingesetzte Verfahren zum Aufspüren solcher Moleküle im Blut. Zurzeit ist Gambhir in der Lage, damit 256 verschiedene Tumorproteine zu detektieren. Um zu entscheiden, welche davon diagnostisch besonders wichtig sind, arbeitet das Team eng mit Biologen zusammen. »Diese Technik hilft uns nur, wenn wir wissen, nach welchen Proteinen wir suchen sollen«, erklärt der Radiologe.

W I S wissenschaft
in die schulen!



Ein handlungsorientiertes Projekt zum Thema »Krebs«
für die gymnasiale Oberstufe: kostenfrei unter
www.wissenschaft-schulen.de/krebs

Während Gambhir auf innovative Technologien setzt, arbeitet Peter Kuhn mit einem jahrhundertealten Gerät, dem Mikroskop. Doch obgleich betagt, lässt sich auch dessen diagnostisches Potenzial noch verbessern. Das amerikanische Unternehmen VisionGate etwa hat ein optisches Verfahren namens Cell-CT entwickelt, das dreidimensionale digitale Bilder von Zellen erzeugt. Hierfür werden die Zellen perlen-schnurartig in einem dünnen, mit Gel gefüllten Glasröhrchen aufgereiht. Während das Röhrchen rotiert, fotografiert das Mikroskop jede Zelle aus verschiedenen Blickwinkeln. Ein Computerprogramm erzeugt daraus 3-D-Bilder, die ungewöhnliche Strukturen in Krebszellen erkennen lassen.

»Manchmal sieht der Kern einer entarteten Zelle wie ein deformierter Wasserball aus«, berichtet der theoretische Physiker Paul Davies vom Center for the Convergence of Physical Science and Cancer Biology der Arizona State University (USA). Er und seine Kollegen haben mit Hilfe der 3-D-Aufnahmen kürzlich nachgewiesen, dass Zellen des Brustgewebes unterschiedliche Gestaltmerkmale zeigen – je nachdem, ob sie aus gesundem Gewebe, aus gut- oder bösartigen Tumoren stammen. Auf konventionellen zweidimensionalen Bildern sind diese Merkmale kaum zu erkennen.

Bestechend genaue Abbildung

Cell-CT gibt die Struktur der Zellen so präzise wieder, dass man daran Hunderte von unterschiedlichen Messungen vornehmen kann. Die resultierenden Daten lassen sich nach Mustern durchsuchen, die auf Krebs hindeuten. »Das Verfahren ist nicht auf die Expertise eines Pathologen angewiesen, es funktioniert voll automatisch«, erläutert Deirdre Meldrum, Elektroingenieurin und Leiterin des Center for Biosignatures Discovery Automation an der Arizona State University. Zurzeit entwickelt das Unternehmen VisionGate das Verfahren zu einer Früherkennungsmethode für Lungenkrebs weiter. Laut aktuellen Untersuchungen erlaubt sie, entartete Zellen im Atemwegssekret von Personen nachzuweisen, die ein hohes Erkrankungsrisiko tragen.

Eine Mikroskopiemethode, die noch subtilere Krankheitszeichen aufspürt, hat Vadim Backman entwickelt, Biomediziningenieur an der Northwestern University in Evanston (Illinois, USA). »Die konventionelle Lichtmikroskopie kann nur Strukturen darstellen, die mindestens einen halben Mikrometer groß sind«, sagt er. Er habe jedoch Hinweise darauf gefunden, dass die frühesten Veränderungen, die im Zuge einer Entartung einsetzen, sich auf der Nanometerskala abspielen.

Um solch winzige Details zu untersuchen, haben Backman und seine Kollegen ein Instrument entwickelt, das konventionelle Mikroskopie und Spektroskopie vereint. Das Partial Wave Spectroscopic Microscope (Partialwellen-Spektroskopiemikroskop) beleuchtet die fragliche Zelle und analysiert die Wellenlängen des reflektierten Lichts. Untersuchungen der Arbeitsgruppe zeigen: Die epigenetischen und genetischen Prozesse, die einer Entartung vorausgehen, verändern die intrazelluläre Dichte auf Längenskalen im Nanometerbereich – obwohl die Zelle oberflächlich völlig normal wirkt. Je

größer diese Abweichungen, desto näher steht die Zelle am Übergang zum Krebs.

Die nanometergroßen Dichteveränderungen sind nicht nur am Ort des entstehenden Tumors nachweisbar, sondern beeinflussen auch benachbarte Zellen. Das macht die Partialwellen-Spektroskopiemikroskope zu einem wertvollen Instrument der Krebsfrüherkennung, meint Backman. So ließen sich Anzeichen für Lungenkrebs eventuell schon in einfachen Abstrichen der Wangenschleimhaut erkennen. Backman und sein Team benutzten die neue Mikroskopiemethode, um Enddarmzellen von mehr als 100 Patienten zu untersuchen, die sich einer Darmspiegelung unterzogen hatten. Dabei stellten sie einen deutlichen Zusammenhang fest zwischen Veränderungen der intrazellulären Dichte auf der Nanometerskala und dem Risiko für Darmkrebs.

Die Physiker hoffen, dass solche Methoden den Onkologen dabei helfen werden, Krebs zeitiger zu entdecken – und zwar bevor er sich im Körper ausbreiten kann. Die 5-Jahres-Überlebensrate beträgt beim Lungenkrebs 50 Prozent, sofern die Krankheit früh diagnostiziert wird. Doch das ist selten der Fall, da die Symptome meist erst in fortgeschrittenen Erkrankungsstadien auftreten. Hat der Krebs sich erst einmal im Körper ausgebreitet, fällt die Überlebensrate auf 1 Prozent. Bestenfalls würden die neuen Verfahren nicht nur die ersten Anzeichen des Entartungsprozesses registrieren, sondern auch zwischen mehr und weniger gefährlichen Veränderungen unterscheiden. Dies ist jedoch ein enorm schwieriges Unterfangen, das Kuhn und seine Wissenschaftlerkollegen noch lange beschäftigen wird. ~

DIE AUTORIN



Cassandra Willyard ist Wissenschaftsjournalistin. Sie lebt und arbeitet in Brooklyn, New York.

QUELLEN

Damania, D. et al.: Nanocytology of Rectal Colonocytes to Assess Risk of Colon Cancer Based on Field Cancerization. In: *Cancer Research* 72, 2720–2727, 2012

Nandakumar, V. et al.: Isotropic 3D Nuclear Morphometry of Normal, Fibrocystic and Malignant Breast Epithelial Cells Reveals New Structural Alterations. In: *PLoS One* 7, e29230, 2012

Wendel M et al.: Fluid Biopsy for Circulating Tumor Cell Identification in Patients with Early- and Late-Stage Non-Small Cell Lung Cancer: a Glimpse into Lung Cancer Biology. In: *Physical Biology* 9, 016005, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199283

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature Outlook 491, S. 64–65, 22. November 2012

Freude, schöner Nervenfunken

Lange Zeit schien die Sache klar: Lust entsteht im Belohnungsschaltkreis des Gehirns. Doch laut neuen Befunden wurzeln Genuss und Verlangen in unterschiedlichen Regionen. Diese überraschende Erkenntnis könnte der Behandlung von Sucht und Depression neue Impulse geben.

Von Morten L. Kringsbach und Kent C. Berridge

Vor mehr als einem halben Jahrhundert begann der Psychiater Robert Heath von der Tulane University in New Orleans ein umstrittenes Projekt: Er pflanzte Elektroden in die Gehirne von Patienten mit schwerer Epilepsie, Schizophrenie, Depression und anderen neurologischen Störungen ein. Damit hoffte er nicht nur, den Sitz der Erkrankung im Gehirn zu orten, sondern die Patienten mittels künstlicher Stimulation des Nervengewebes möglicherweise sogar zu heilen.

Die Ergebnisse waren laut Heath in manchen Fällen dramatisch: Menschen, die in ihrer Depression fast erstarrt waren, lächelten durch die elektrische Hirnreizung wieder, unterhielten sich und kicherten sogar. Allerdings war die Besserung nur von kurzer Dauer. Endete die Stimulation, kehrten auch die Krankheitssymptome zurück.

Um die therapeutische Wirkung zu erhöhen, stattete Heath einige Patienten mit einer Fernbedienung aus, mit der sie den Strom selbst anschalten konnten. Einige verspürten recht häufig den Drang dazu. So aktivierte ein 24-jähriger Pa-

tient während einer dreistündigen Sitzung die Elektroden etwa 1500-mal. Heath beschrieb, dass die geradezu zwanghafte Selbststimulation bei dem jungen Mann (genannt B-19) äußerst angenehme Empfindungen auslöste – und dieser energisch protestierte, als die Behandlung beendet werden sollte.

Mit Hilfe solcher Experimente ließ sich eine Gruppe von Hirnstrukturen ausmachen, die man als so genanntes Lustzentrum des Gehirns zusammenfasste. Innerhalb der folgenden 30 Jahre identifizierten Forscher zudem jene Moleküle, mit denen die von Heath und anderen beschriebenen Hirnbereiche ihre frohen Botschaften verbreiten. Manche Menschen begannen sich bereits schöne neue Welten vorzustellen, die Glückseligkeit auf Knopfdruck ermöglichen.

Allerdings: Für die Behandlung von psychischen Krankheiten hat die Entdeckung des vermeintlichen Lustzentrums bisher keinen Durchbruch gebracht. Stattdessen verleitete sie einige Forscher wohl zu der falschen Annahme, sie verstünden bereits, wie das Gehirn Freude erzeugt und verarbeitet. Tatsächlich deuten aber neuere Untersuchungen an Nagetieren und Menschen darauf hin, dass die Aktivierung jenes Zentrums durch Elektroden oder mit chemischen Botenstoffen gar keine wirklichen Lustempfindungen auslöst. Offenbar führt sie lediglich ein starkes Verlangen danach herbei und damit wohl auch die manische Selbststimulation.

Wir und andere Arbeitsgruppen haben die an Lust beteiligten Verschaltungen im Gehirn mit Hilfe moderner molekularbiologischer Techniken und verbesserter Methoden der Tiefenstimulation genauer unter die Lupe genommen. Indem wir die beteiligten Strukturen präzise bestimmen, hoffen wir, den Weg zu einer gezielteren und effektiveren Behandlung von Depression, Sucht und anderen Störungen zu bahnen.

Ob man Lust nun als entzücktes Erschauern oder als wohlige Zufriedenheit erlebt – sie ist in jedem Fall mehr als nur eine Nebensache, die man erst begehrt, wenn grundlegende Verlangen gestillt sind. Tatsächlich spielt sie eine zentrale Rolle im Leben. Lustempfinden hält das Interesse für alles

AUF EINEN BLICK

HEDONISTISCHE HOTSPOTS

1 Neue Forschungsergebnisse haben zur Entdeckung jener Regionen im Gehirn geführt, die bei Stimulation Lust- und Freudeempfindungen verstärken. Diese **Lustzentren** sind nicht identisch mit dem **Belohnungsschaltkreis**, dem Neurowissenschaftler ursprünglich die Erzeugung angenehmer Gefühle zuschrieben. Letzterer bewirkt eher Verlangen als Genuss.

2 Übergeordnete Hirnregionen im so genannten **orbitofrontalen Kortex** empfangen Informationen von den Lust- und Belohnungszentren und sorgen für die bewusste Wahrnehmung von Freude und Glücksgefühlen.

3 Bei **Suchtverhalten** scheinen sich die beiden Systeme des Verlangens und des Genießens entkoppelt zu haben. Diese Erkenntnis eröffnet neue Behandlungen für Betroffene.

Es ist nicht immer leicht herauszufinden, ob etwas wirklich Vergnügen bereitet. Im Fall von schmackhaftem Essen gibt es jedoch ein eindeutiges, fast universelles Signal: Nicht nur Menschen, sondern auch die meisten anderen Säugetiere lecken sich dabei die Lippen.

aufrecht, was für das Überleben nötig ist. Nahrung, Sex und manchmal auch die soziale Gemeinschaft erzeugen positive Gefühle und dienen so allen Tieren, einschließlich uns Menschen, als natürliche Belohnung.

Die ersten Einsichten in die biologischen Grundlagen dieser Empfindungen gehen auf die ursprünglichen Entdecker der »Lustelektroden« vor annähernd 60 Jahren zurück. James Olds und Peter Milner von der McGill University in Montreal, Kanada, waren auf der Suche nach Hirnbereichen, die das Verhalten von Tieren beeinflussen. Sie gingen von früheren Untersuchungen an der Yale University aus, bei denen Ratten Elektroden ins Gehirn eingepflanzt worden waren. Die elektrische Reizung einer bestimmten Region sorgte dafür, dass die Tiere danach jene Handlungen vermieden, die sie während der Stimulation ausgeführt hatten. Als Olds und Milner die Versuche wiederholen wollten, stießen sie auf einen Hirnbereich mit umgekehrtem Effekt: Seine Reizung versuchten die Ratten aktiv herbeizuführen, ähnlich wie sie in Experimenten auch eine Aufgabe oder ein Verhalten wiederholen, wenn sie eine angemessene Belohnung dafür erhalten.

Lieber Stromstoß als Futter

Die Forscher hatten die Elektroden in verschiedenen Hirnregionen platziert, manchmal sogar woanders als beabsichtigt. Sie waren überrascht, einen Bereich zu entdecken, dessen leichte elektrische Reizung die Tiere zu genießen schienen. Die Ratten befanden sich in einer großen Kiste und kehrten immer wieder zu der Ecke zurück, in der sie einen kleinen elektrischen Stromstoß bekommen würden. Auf diese Weise konnten Olds und Milner sie zu fast jedem denkbaren Ort lenken. In einigen Fällen bevorzugten die Tiere sogar die Stimulation gegenüber Futter. Betätigten die Wissenschaftler den Knopf, wenn die Nager ein Labyrinth bereits zur Hälfte geschafft hatten, das am Ende eine leckere Mahlzeit versprach, so ließen sich die Ratten einfach nieder und interessierten sich nicht mehr für die Nahrung.

Noch erstaunlicher: Konnten sich die Nagetiere über einen Hebel selbst stimulieren, taten sie dies fast wie besessen, einige von ihnen mehr als 1000-mal pro Stunde. Wurde der Strom abgeschaltet, drückten die Ratten den Hebel noch ein paar Mal und legten sich dann schlafen.

Auf Grund dieser Ergebnisse erklärten Olds und Milner, sie hätten »möglicherweise eine Region im Gehirn identifiziert, deren besondere Aufgabe es ist, Verhalten zu belohnen.« Die betroffenen Hirnbereiche galten von da an als Grundlage des Belohnungsschaltkreises des Gehirns. Zu ihnen gehörte der Nucleus accumbens im unteren Vorderhirn und der zinguläre Kortex, der eine Art Krage um den so genannten Balken bildet, der wiederum die rechte mit der linken Hirnhälfte verbindet (siehe Grafik rechts).

Fast zeitgleich konnten andere Wissenschaftler die Ergebnisse reproduzieren und entdeckten ähnliche Wirkungen bei

höheren Primaten und beim Menschen. Besonders Heath ging mit der Interpretation seiner Resultate sehr weit, der zufolge die Stimulation dieser Regionen nicht nur Verhalten verstärkte, sondern sogar Euphorie hervorriefe. Dadurch entstand in den Köpfen vieler Wissenschaftler wie auch der breiten Öffentlichkeit die Idee, diese Hirnstrukturen seien das entscheidende Lustzentrum des Gehirns.

Vor gut zehn Jahren begannen wir beide uns jedoch zu fragen, ob die Selbststimulation wirklich die beste Methode ist, Vergnügen oder Lustgefühle zu messen. Woher wissen wir, dass die Versuchspersonen diese Hirnbereiche aktivieren, weil sie das resultierende Gefühl mögen und nicht aus einem anderen Grund? Wir kamen zu dem Schluss, einen anderen Weg beschreiten zu müssen, um den Lustschaltkreis genauer zu erforschen. Dazu galt es herauszufinden, was den Menschen und Tieren tatsächlich Vergnügen bereitet.

Bei Versuchen mit Menschen ist es nicht schwer, das Maß angenehmer Gefühle einzuschätzen: Man fragt sie einfach danach. Allerdings können die Antworten ungenau sein und die tatsächlichen Empfindungen nur unvollständig wiedergeben. Und bei Labortieren, den in der Biologie aus praktischen Gründen am häufigsten verwendeten Probanden, ist das ohnehin nicht möglich.

Ein alternativer Versuchsansatz geht auf Charles Darwin zurück. In seinem 1872 veröffentlichten Buch »The Expression of the Emotions in Man and Animals« (»Der Ausdruck der Gemütsbewegungen bei dem Menschen und den Tieren«) schrieb er, die Gemütsverfassung von Tieren verändere sich je nach den äußeren Bedingungen, was sich an ihrem Gesichtsausdruck zeige. Heute wissen wir, dass die neuronalen Mechanismen, die solcher Mimik zu Grunde liegen, bei den meisten Säugetiere ähnlich sind. Daher gleichen sich bestimmte Gesichtsausdrücke sogar zwischen Nagetieren und Menschen, wie zum Beispiel jener, wenn uns etwas sehr gut schmeckt.

Nahrung ist einer der universellsten Wege zur Lust – und außerdem überlebensnotwendig. Dieses leicht zugängliche Hilfsmittel nutzen Psychologen und Neurowissenschaftler gern bei der Erforschung von tierischem Verhalten. Die Reaktion auf Futter eröffnete uns eine Möglichkeit, Freude zu untersuchen, selbst wenn sie nicht artikuliert wird.

Jeder, der etwas Zeit mit Babys zugebracht hat, weiß, dass bereits die jüngsten zeigen, wie gut ihnen etwas schmeckt. Ein süßes Essen führt zu zufriedener Lecken der Lippen, Bitteres dagegen zu geöffnetem Mund, Kopfschütteln und heftigem Abwischen der Lippen. Die gleichen Reaktionen treten bei anderen Primaten, aber auch bei Ratten und Mäusen auf. Je mehr die Nahrung den Versuchstieren mundet, desto öfter lecken sie sich die Lippen. Daher filmen wir, wie die Tiere auf das Futter reagieren, und zählen anschließend, wie oft ihre Zunge aus dem Mund herausschnellt. Dieser Trick erlaubte uns herauszufinden, wo im Gehirn die Freude wirklich wohnt.

Denn bald entdeckten wir, dass das Empfinden von Vergnügen weder an dem Ort im Gehirn noch auf die Art und

»Es galt herauszufinden, was tatsächlich Vergnügen bereitet«

Weise entsteht wie ursprünglich angenommen. Die von Olds, Milner und anderen beschriebenen Regionen im vorderen Teil des Gehirns werden durch den Botenstoff Dopamin aktiviert, den Nervenzellen aus der Nähe des Hirnstamms freisetzen. Wir überlegten: Wären diese Bereiche tatsächlich für die Entstehung von Freude verantwortlich, sollte sich ein Tier auf einen angenehmen Reiz hin anders verhalten, wenn wir jene Zellen des Vorderhirns mit Dopamin überfluten oder aber ihnen den Botenstoff völlig entziehen.

Unser Kollege Xiaoxi Zhuang von der University of Chicago züchtete für diese Versuche spezielle Mäuse. Ihnen fehl-

te ein Eiweißmolekül, das Dopamin nach Freisetzung durch eine erregte Nervenzelle bindet und zurück ins Zellinnere transportiert. Diese Mutation führte im gesamten Gehirn der Tiere zu einer ungewöhnlich hohen Dopaminkonzentration. Trotzdem konnten wir nicht feststellen, dass die veränderten Nager freudiger auf Süßigkeiten reagierten als ihre normalen Artgenossen. Sie rannten zwar schneller zum Futter, aber sie leckten sich nicht öfter ihr Mäulchen – im Gegenteil sogar seltener.

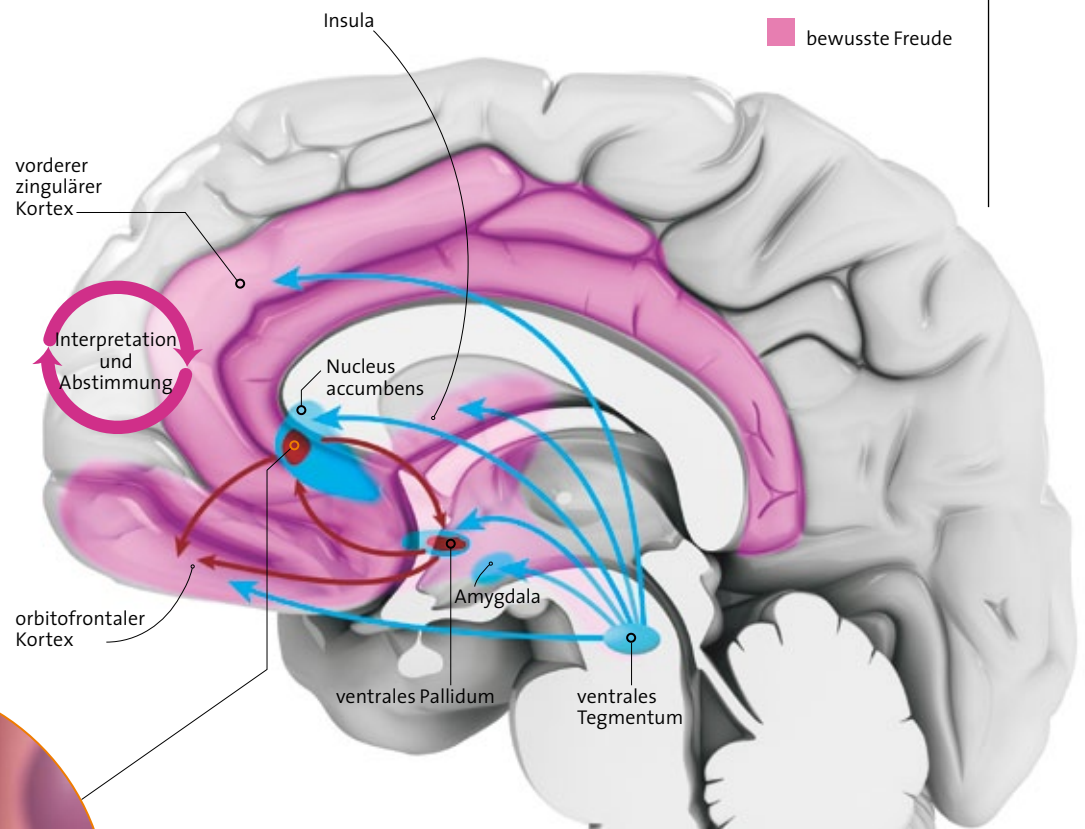
Dasselbe Ergebnis erhielten wir auch bei Ratten, deren Dopaminkonzentration auf eine andere Weise erhöht wurde,

Wege zur Lust

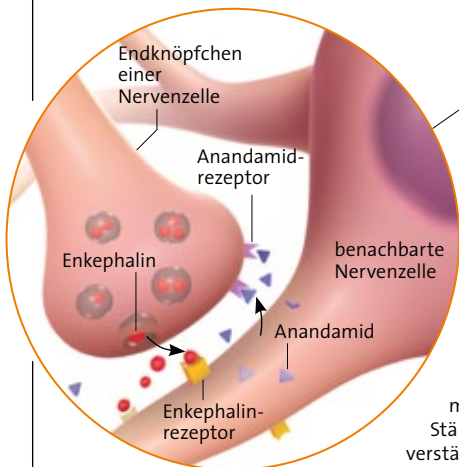
Freude ist ein komplexes Erlebnis, das sich von der Erwartung und dem Verlangen bis hin zur Empfindung und der anschließenden Befriedigung erstreckt. Daher überrascht es nicht, dass viele verschiedene Hirnregionen daran beteiligt sind.

WOLLEN UND MÖGEN

Ursprünglich ging man davon aus, dass lediglich ein neuronaler Schaltkreis (blau), der nahe dem Hirnstamm beginnt und sich bis ins Vorderhirn erstreckt, das Gefühl von Freude vermittelt. Tatsächlich ist dieser jedoch eher für die Entstehung von Verlangen verantwortlich. Mit ihm arbeiten verschiedene »hedonistische Hotspots« (rot) zusammen, um die Empfindung von Genuss hervorzurufen. Die Regelkreise des Verlangens und der Lust senden Informationen an übergeordnete Bereiche der Hirnrinde (pink), wo sie mit anderen Eingangssignalen abgeglichen und in das bewusst wahrgenommene Gefühl der Freude übersetzt werden.

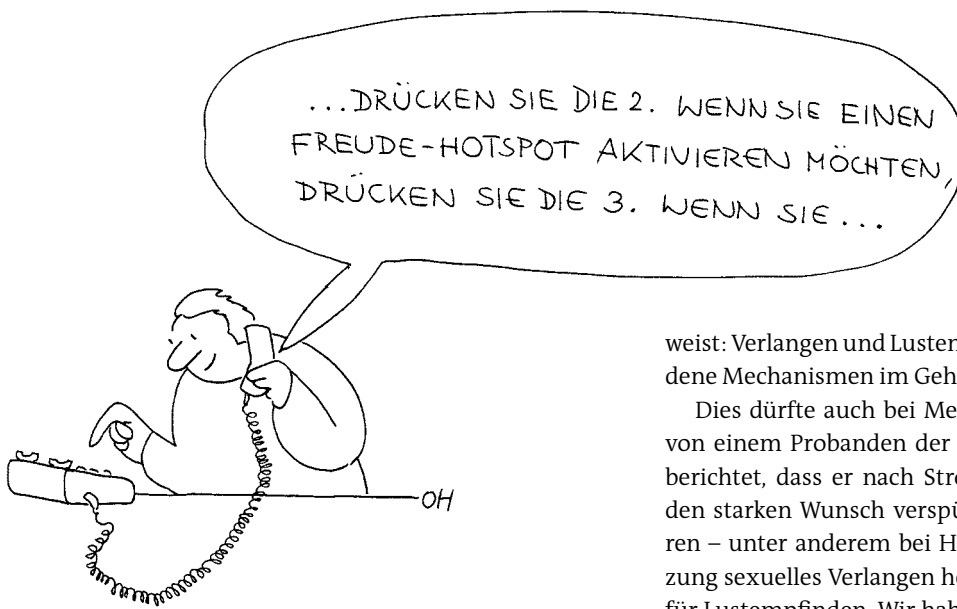


- Verlangen
- Genuss
- bewusste Freude



DIE CHEMIE DES GENUSSES

In hedonistischen Hotspots wirken zwei berauschende Botenstoffe zusammen, um das Gefühl der Lust zu verstärken. Ein angenehmer Reiz wie eine Süßigkeit veranlasst dort Nervenzellen Enkephalin auszuschütten, ein hirneigenes Opiat. Die Botenmoleküle heften sich an spezifische Rezeptorproteine angrenzender Neurone, was die Produktion von Anandamid auslösen könnte. Letzteres kann sich wiederum an Rezeptormoleküle der ersten Nervenzelle binden. Dadurch steigert es die Stärke des Freudegefühls und kann sogar die Enkephalinausschüttung verstärken – ein sich selbst verstärkender Kreis.



zum Beispiel durch Injektion von Amphetamin in den Nucleus accumbens. Wieder stellten wir fest, dass die Leckerli offenbar nicht besser schmeckten als vorher, die Tiere allerdings stärker motiviert wirkten, sie zu bekommen. Im Gegensatz dazu fehlt Ratten, die kein Dopamin produzieren, jegliches Verlangen nach Süßigkeiten. Ohne aktives Füttern würden diese Tiere einfach verhungern. Steckt man ihnen Leckereien ins Maul, schmecken diese ihnen aber offensichtlich.

Dopamin wirkt daher wohl anders, subtiler als ursprünglich angenommen. Das Molekül treibt eher dazu an, Lustempfindungen zu erreichen, als dass es sie selbst vermittelt. Auch bei Menschen scheint der Dopaminspiegel stärker dem Wunsch einer Person nach etwas als tatsächlichem Genuss zu entsprechen.

Neurobiologie der Sucht

Damit lässt sich das Verhalten von Süchtigen erklären. Bei Drogenmissbrauch wird das Gehirn mit Dopamin überflutet, insbesondere in Bereichen, die für das Verlangen eine Rolle spielen. Dieses Trommelfeuer löst nicht nur eine starke Gier aus, sondern macht die Zellen jener Regionen auch empfindlicher für zukünftige Drogengaben. Die Sensibilisierung kann Monate bis Jahre andauern, wie Arbeitsergebnisse unseres Kollegen Terry Robinson von der University of Michigan andeuten. Daher, so argumentiert er, kann ein Süchtiger immer noch ein starkes Verlangen nach der Droge empfinden, selbst wenn sie ihm gar keinen Lustgewinn mehr bringt.

Die neuen Erkenntnisse lassen die anfangs erwähnten Lustelektroden, die den Dopaminspiegel erhöhen, in einem anderen Licht erscheinen. Vielleicht wirkten sie nämlich gar nicht so angenehm wie gedacht. Dafür sprechen auch weitere Forschungsergebnisse: Stimulierten wir Elektroden im Gehirn von Ratten, so dass sich Dopamin im Nucleus accumbens anreicherte, stieg zwar die Motivation der Tiere, zu fressen und zu trinken. Aber schmackhafter wurde das Futter dadurch anscheinend nicht, eher im Gegenteil. Brachten wir die Ratten mit Hilfe von Strompulsen zum Fressen von Süßigkeiten, wischten sie sich über die Schnauze und schüttel-

ten den Kopf – beides Zeichen von Abneigung. Dass man die Tiere mit elektrischer Stimulation dazu zwingen kann, große Mengen offenbar unattraktiven Futters zu konsumieren, be-

weist: Verlangen und Lustempfinden werden durch verschiedene Mechanismen im Gehirn gesteuert.

Dies dürfte auch bei Menschen der Fall sein. Zumindest von einem Probanden der klassischen Experimente wurde berichtet, dass er nach Stromzufuhr durch die Elektroden den starken Wunsch verspürte, etwas zu trinken. Bei anderen – unter anderem bei Heaths Patient B-19 – rief die Reizung sexuelles Verlangen hervor. Damals galt das als Beweis für Lustempfinden. Wir haben jedoch bei unserer ausführlichen Sichtung der Fachliteratur keinen Beweis dafür gefunden, dass der Patient die Stimulation ausdrücklich als angenehm beschrieb. Niemals scheint B-19 etwas geäußert zu haben wie »oh, das fühlt sich gut an«. Die Aktivierung der Lustelektroden führte bei ihm und anderen lediglich dazu, dass sie nach weiterer Strombehandlung verlangten. Dies geschah jedoch wahrscheinlich nicht, weil es ihnen Spaß machte, sondern aus einem künstlich erzeugten Drang heraus.

Wo sitzen nun aber die tatsächlichen Lustzentren des Gehirns, die direkt angenehme Gefühle hervorrufen? Wie sich herausstellte, liegen sie innerhalb der bereits bekannten, als Teil des »Belohnungsschaltkreises« identifizierten Hirnstrukturen. Das erscheint auch sinnvoll, denn zu einer lohnenden Erfahrung gehören beide: Verlangen und Vergnügen. Einer dieser »hedonistischen Hotspots« befindet sich in einer Unterstruktur des Nucleus accumbens, in der mittleren Schalenregion (»medial shell«). Ein zweiter sitzt im ventralen Pallidum, das am Boden des Vorderhirns liegt und Signale überwiegend vom Nucleus accumbens erhält.

Diese Zentren fanden wir, indem wir nach Hirnbereichen suchten, deren Erregung angenehme Gefühle verstärkt, so dass beispielsweise Süßigkeiten noch leckerer wirken. Stimuliert man jene Hotspots chemisch mit Enkephalin, einem morphinähnlichen Botenstoff im Gehirn, so genießen Ratten Süßes mehr. Anandamid, das natürliche Gegenstück zum Wirkstoff des Marihuanas, hat den gleichen Effekt. Auch das Hormon Orexin, das während einer Hungerphase im Gehirn ausgeschüttet wird, regt möglicherweise diese wahren Lustzentren an, um die Schmackhaftigkeit des Futters zu steigern.

Jeder der Hotspots misst nur einen Bruchteil der übergeordneten Struktur: etwa einen Kubikmillimeter bei Ratten und wahrscheinlich nicht mehr als einen Kubikzentimeter im menschlichen Gehirn. Sie sind jedoch miteinander verbunden und bilden zusammen mit anderen Hirnregionen, die ebenfalls angenehme Empfindungen verarbeiten, einen leistungsfähigen Schaltkreis des Vergnügens. Dieses Netzwerk erwies sich als recht widerstandsfähig. Selbst wenn wir einzelne Komponenten ausschalteten, schwächte sich die

normale Reaktion auf Süßigkeiten meist nicht ab – bis auf eine Ausnahme: Eine Schädigung des ventralen Pallidums führte dazu, dass die Tiere ihre Nahrung nicht mehr mochten; zuvor schmackhaftes Futter wurde für sie anscheinend ungenießbar.

Eine massive Lustverstärkung scheint dagegen die gleichzeitige Aktivität des gesamten Netzwerks zu erfordern. Macht eine einzige seiner Komponenten nicht mit, verringert sich das Glücksgefühl. Das könnte ein Grund dafür sein, dass intensive Euphorie viel schwieriger zu erleben ist als alltägliches Vergnügen.

Kein Spaß ohne ventrales Pallidum

Ob der Lustschaltkreis, und insbesondere das ventrale Pallidum, beim Menschen genauso arbeitet, ist bisher allerdings noch ungeklärt. Bei Patienten kommen selektive Schäden an den betreffenden Strukturen ohne zusätzliche Verletzungen in den angrenzenden Bereichen kaum vor. Daher können wir nur schwer bestimmen, ob das ventrale Pallidum und andere Strukturen des Schaltkreises auch uns mit angenehmen Empfindungen versorgen.

Immerhin kennen wir einen Patienten, dessen ventrales Pallidum durch eine massive Überdosis an Drogen beschädigt wurde. Anschließend, so berichtete er, beherrschten ihn Depression, Hoffnungslosigkeit, Schuldgefühle und die Unfähigkeit, Freude zu empfinden. Das deutet zumindest auf eine zentrale Rolle des bislang wohl unterschätzten Hirnbereichs hin.

Allerdings werden zusätzlich zu diesem Schaltkreis weitere Hirnbereiche benötigt, um wahre Freude zu erzeugen. Solche übergeordneten Strukturen helfen uns einzuschätzen, wie erfreulich eine Erfahrung unter den momentanen Bedingungen tatsächlich ist – ob man beispielsweise hungrig oder bereits satt ist oder ein bestimmtes Vergnügen schon lange genossen hat. Selbst das größte Schleckmaul empfindet schließlich nach dem Verzehr einer ganzen Schüssel voller Brownies einen Schokoriegel als deutlich weniger attraktiv.

Bei der Nahrungsaufnahme ist derartige selektive Sättigung vielleicht entstanden, um eine abwechslungsreiche Ernährung zu fördern. Die dazu notwendigen Verarbeitungsprozesse laufen wahrscheinlich in der so genannten orbitofrontalen Hirnrinde ab. Diese Region befindet sich im unteren Teil des präfrontalen Kortex und liegt beim Menschen direkt über den Augen; sie empfängt Informationen aus dem Nucleus accumbens und dem ventralen Pallidum. Dort scheint die Feinabstimmung abzulaufen, auf welche Art uns ein Vergnügen bewusst wird: beispielsweise zunächst mit tiefster Befriedigung und dann schwächer, wenn man genug hat.

Mit Hilfe leistungsstarker Neuro-Imaging-Techniken fanden wir heraus, dass die Nervenzellaktivität in einem kleinen, dem »midanterioren« Bereich der orbitofrontalen Hirnrinde eng mit der subjektiv empfundenen Stärke eines angenehmen Gefühls korreliert, wie zum Beispiel dem Geschmack einer Schokomilch. Beim ersten Schluck leuchtet die Stelle vor Aktivität hell auf. Hat die Versuchsperson jedoch genug

davon, wird es dort wieder dunkler – das Trinken wird nicht mehr als Genuss empfunden.

Weitere Beweise für die Rolle der midanterioren Region beim menschlichen Lustempfinden liefern tiefe Hirnstimulationen zu therapeutischen Zwecken, zum Beispiel gegen chronische Schmerzen. Bei einem unserer Patienten mit Phantombeschwerden in seiner amputierten Extremität verringerte die Erregung nicht nur seine Qual, sondern ließ ihn zudem ausgeprägte Freude empfinden. Die zeitgleichen Neuro-Imaging-Aufnahmen des Gehirns offenbarten heftige Nervenzellaktivität in der midanterioren Region. Nun versuchen Forscher herauszufinden, ob die Stimulation spezifischer Hotspots des Lustschaltkreises einmal dazu dienen kann, Depression oder andere Formen von Anhedonie – der Unfähigkeit, Freude zu empfinden – zu lindern.

Darüber hinaus könnten zukünftige Studien zeigen, wie genau die Schaltkreise für Freude und für Belohnung miteinander verbunden sind. Unter normalen Bedingungen sind die hedonistischen Hotspots mit dem dopamingesteuerten Belohnungssystem gekoppelt, so dass wir jene Dinge wollen, die uns angenehme Empfindungen geben, und andere vermeiden oder ignorieren. Bei Suchterkrankungen haben sich diese beiden Systeme voneinander entkoppelt, denn Betroffene zeigen weiterhin den starken Drang nach etwas, das ihnen gar kein Vergnügen mehr bereitet.

Würden wir verstehen, wie und warum diese Entkopplung stattfindet, könnten wir vielleicht die Sucht verursachenden Veränderungen im Gehirn rückgängig machen, indem wir die natürliche Verknüpfung von Verlangen und Lust wieder herstellen. ~

DIE AUTOREN



Morten L. Kringelbach (links) leitet die Forschungsgruppe Hedonia: TrygFonden an der University of Oxford (Großbritannien) sowie der Universität Aarhus (Dänemark). Darüber hinaus ist er für die Zeitschrift »Scientific American« als wissenschaftlicher Berater tätig. **Kent C. Berridge** ist James Olds Collegiate Professor für Psychologie und Neurowissenschaft an der University of Michigan in Ann Arbor (USA).

QUELLEN

Berridge, K. C., Kringelbach, M. L.: Building a Neuroscience of Pleasure and Well-Being. In: Psychology of Well-Being: Theory, Research, and Practice 1(3) 2011. Frei erhältlich: www.psywb.com/content/1/1/3
Kringelbach, M. L., Berridge, K. C. (Hg.): Pleasures of the Brain. Oxford University Press, 2010
Kringelbach, M. L.: The Pleasure Center: Trust Your Animal Instincts. Oxford University Press, 2008
Leknes, S., Tracey, I.: A Common Neurobiology for Pain and Pleasure. In: Nature Reviews Neuroscience 9, S. 314–320, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199284

Angepasst an die Eiszeit

Gene von Mammuts enthüllen: Ihr Hämoglobin funktionierte noch bei tiefen Temperaturen gut und versorgte selbst kalte Füße.

Von Kevin L. Campbell und Michael Hofreiter

Das Bild, das wir uns von ausgestorbenen Tieren machen, beruhte lange hauptsächlich auf Studien von Versteinerungen. An Knochen- und Zahnfossilien lesen Paläontologen vieles ab: nicht nur Größe und Statur einer Art, sondern auch etwa die Ausbildung der Muskulatur, die Bewegungsweise sowie die Fressgewohnheiten. In seltenen Fällen tauchen zudem mumifizierte oder eingefrorene Kadaver auf, die zusätzliche Erkenntnisse liefern. Solche Funde geben mit etwas Glück Einzelheiten preis wie die Felldicke eines Tiers, manchmal sogar dessen Farbe, die Ohrform oder die letzte Mahlzeit. Näheres über besondere physiologische Anpassungen war allerdings bisher kaum in Erfahrung zu bringen.

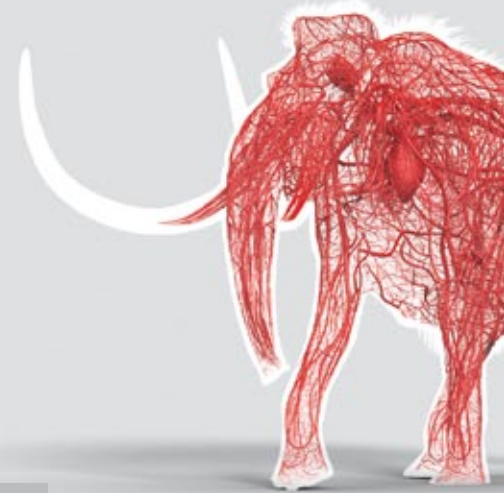
Doch langsam schließt sich diese Wissenslücke. Dank der Fortschritte der Biotechnologie lassen sich nun auch Gene längst verschwundener Geschöpfe herstellen, die zugehörigen Proteine produzieren und dann ihre Funktionen untersuchen. Das neue Forschungsgebiet, die Paläophysiologie, verspricht, Aufschluss über bisher unzugängliche Körperfunktionen einzelner Arten zu geben.

Ein Tier, das in extremen Umwelten zurechtkam, ist das Wollhaarmammut oder Wollmammut (*Mammuthus primigenius*) Eurasiens, das gegen Ende der letzten Vereisung ausstarb. Klonen wird man Mammuts sicherlich nicht so bald. Aber einzelne physische Prozesse lassen sich sehr wohl nachstellen und im Labor untersuchen.

Die Idee für unsere Studie kam einem von uns (Campbell) 2001, als er einen Fernsehbericht über die Bergung eines Mammuts aus dem sibirischen Dauerfrostboden anschaute. Nach der Euphorie um das Klonschaf Dolly, dessen Geburt 1997 bekannt gegeben worden war, hieß es in der Sendung, mit der konservierten DNA könnte man das Eiszeittier vielleicht demnächst wieder zum Leben erwecken – ein Irrtum, wie wir heute wissen. Campbell setzte sich ein viel bescheideneres Ziel. Er wollte herausfinden, wie sich der Dickhäuter, dessen nächster Verwandter der Indische Elefant ist, an das damalige harsche, kalte Klima der höheren Breiten angepasst hatte.

Fossilfunden zufolge stammten die Vorfahren der Mammuts aus subtropischen Ebenen Afrikas. Erst vor weniger als

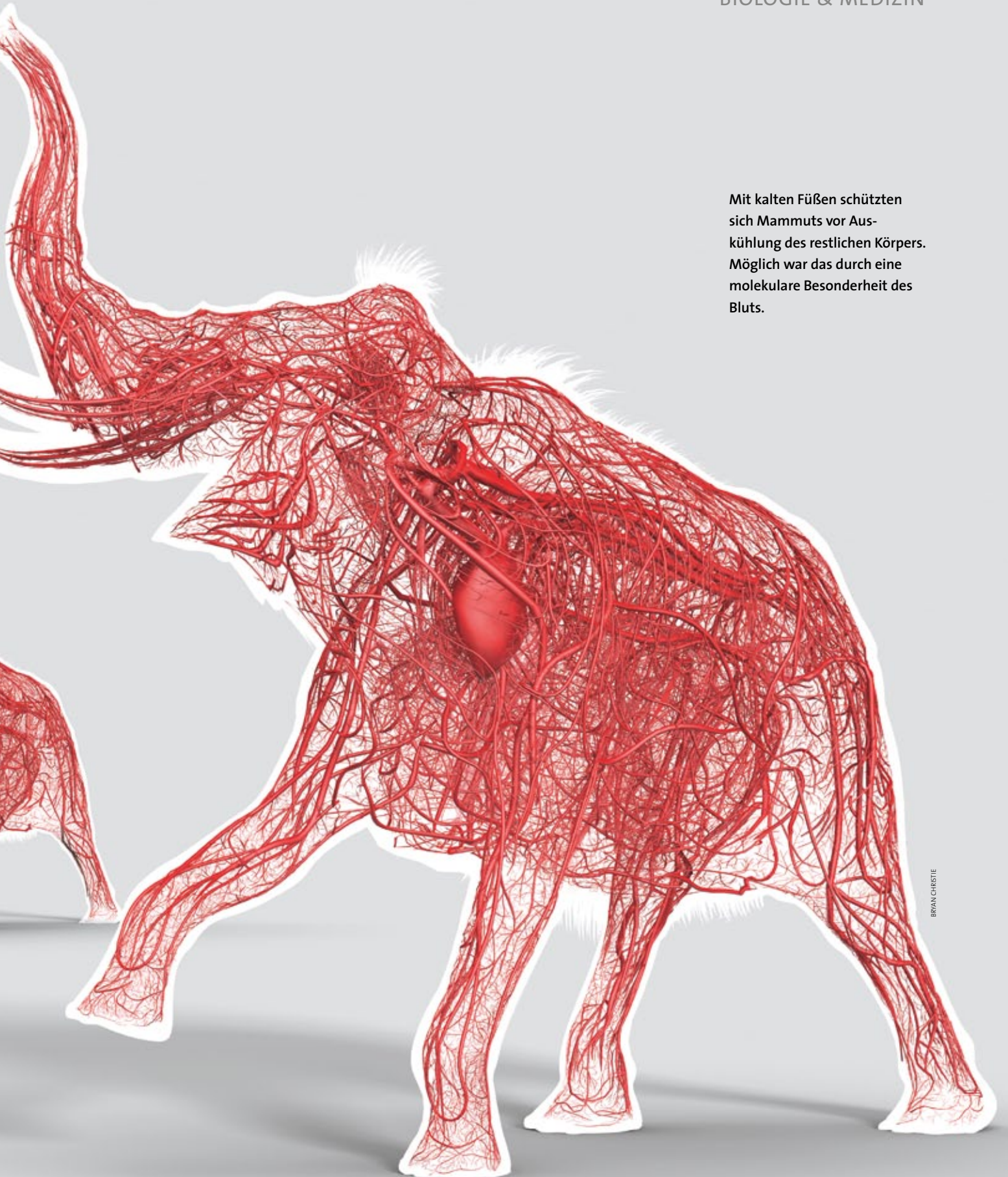
zwei Millionen Jahren gelangten die Rüsseltiere nach Sibirien. Da hatte schon das jetzige Pleistozän genannte Eiszeitalter eingesetzt, das eine Reihe von Kaltphasen mit sich bringen sollte. Während es im heißen Afrika, wie heute beim Afrikanischen Elefanten, für die Kolosse entscheidend gewesen war, einer Überhitzung des Körpers auch physiologisch entgegenzuwirken, so kam es nun eher darauf an, die Wärme zu bewahren. Viele denken da zuerst an eine gute Iso-



AUF EINEN BLICK

MOLEKULARBIOLOGIE AUSGESTORBENER TIERE

- 1 Um **physiologischen Anpassungen längst untergegangener Arten** zu erforschen, müssen Wissenschaftler sich nicht mehr nur auf Fossilien beschränken. Inzwischen gelingt es ihnen, vollständige Gene und die zugehörigen **Proteine zu rekonstruieren** und ihre Funktion im Labor zu untersuchen.
- 2 An bestimmten Pigmentfaktoren zeigt sich, dass es **blonde Mammuts** gab – und hellhäutige, rothaarige Neandertaler.
- 3 Mit rekonstruierten Mammutgenen gewannen Paläophysiologen **Mammothämoglobin** und erkannten daran, wie deren Blut der Kälte trotzte.

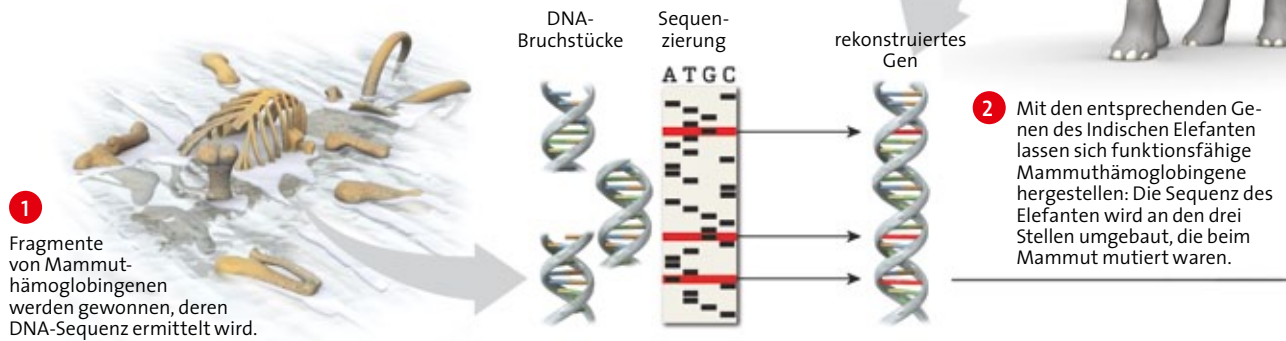


Mit kalten Füßen schützten sich Mammuts vor Auskühlung des restlichen Körpers. Möglich war das durch eine molekulare Besonderheit des Bluts.

BRVAN CHRISTIE

Mammutprotein zum Leben erweckt

Forscher können aus alter DNA komplette Gene gewinnen und die von ihnen kodierten Proteine herstellen. Auf die Weise haben sie den roten Blutfarbstoff Hämoglobin des vor Jahrtausenden ausgestorbenen Wollmammut erzeugt. Das Molekül weist Mutationen auf, die es befähigen, selbst kalten Geweben Sauerstoff zu liefern.



lierung wie die dicke Unterwolle der Mammuts oder an Fettschichten unter der Haut. Doch wahrscheinlich spielten solche physikalischen Faktoren eher eine Nebenrolle. Um in großer Kälte zu überleben, mussten verschiedene physiologische Prozesse hinzukommen und ineinandergreifen.

Uns war klar, dass wir entsprechende Anpassungen nur aufdecken konnten, wenn es uns gelingen würde, aus einem Mammutkadaver DNA-Fragmente von Genen zu gewinnen und sie anhand derer zu rekonstruieren. Die gewissermaßen wieder zum Leben erweckten Erbfaktoren müsste man dann in einen Mikroorganismus einbauen und diesen dazu bringen, die zugehörigen Mammutproteine herzustellen. Anschließend ließe sich ihre physiologische Funktion im Labor nach allen Regeln der Kunst untersuchen und mit Proteinen heutiger Elefanten vergleichen. Methodisch ist solch ein Unterfangen enorm ambitioniert. Uns half jedoch, dass Paläogenetiker die Erforschung von Erbsequenzen aus Fossilien in den letzten Jahren stark vorantreiben konnten.

Sofern die Überreste eines vor Langem gestorbenen Körpers überhaupt noch DNA aufweisen, sind davon allenfalls winzigste Spuren vorhanden, und es handelt sich höchstens um sehr kurze, zudem an vielen Stellen chemisch veränderte Bruchstücke. Außer dem Genom im Zellkern besitzen Zellen noch ein viel kleineres, einfacher aufgebautes in ihren Mitochondrien, den Organellen für die Zellatmung. Eine Zelle hat nur einen Kern, aber Hunderte von Mitochondrien. Deswegen nahm man sich bei Mammuts anfangs dieses Erbgut vor und ermittelte daran die Abstammungsverhältnisse.

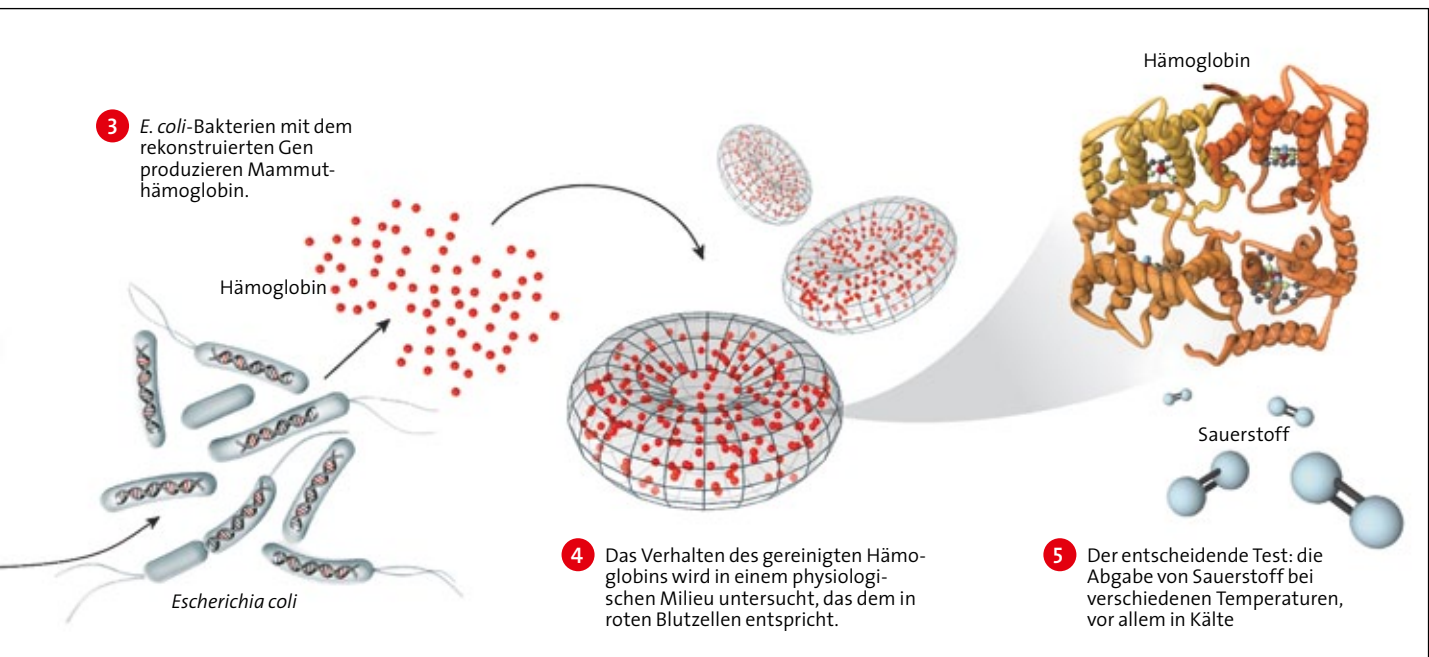
Allerdings enthält das Mitochondriengenom nur ein paar wenige Gene und reichte deswegen für unsere Zwecke nicht aus. Schon 1999 hatte eine Forschergruppe um Alex Greenwood, der heute an der freien Universität Berlin und am Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung arbeitet, gezeigt,

dass sich in gefrorenen Mammuts und anderen Eiszeittieren auch DNA-Bruchstücke des Zellkerns über mehrere zehntausend Jahre erhalten haben.

Mit ausgetüftelten Methoden zu alten Genen vordringen

Die Forscher konnten immerhin Fragmente aus bis zu 70 Nukleotiden gewinnen, den »Buchstaben« der Gene. Doch ein vollständiges Gen besteht aus hunderten oder tausenden Nukleotiden. Zudem hat das angewandte Verfahren viel von der alten DNA zerstört. Diese Schwierigkeiten überwand einer von uns (Hofreiter) mit Hilfe der so genannten Multiplex-PCR, einer molekularen Kettenreaktion, mit der Genetiker Abschnitte von heutiger DNA unter anderem für praktische Analysen schnell und effektiv vervielfältigen. Auf diese Weise erstellte Hofreiter mit einer Forschergruppe um Johannes Krause, der damals am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig arbeitete, als Erster ein komplettes Mitochondriengenom des Wollmammut, das aus 16 500 Nukleotiden besteht.

Als es dem Team gelang, die Methode noch zu verfeinern, konnte es schließlich – erstmals von einer ausgestorbenen Spezies – ein komplettes Gen aus dem Zellkern rekonstruieren. Diese Erbsequenz stammte aus dem hervorragend erhaltenen Oberschenkelknochen eines Mammuts, das vor 43 000 Jahren in Nordsibirien gestorben war. Und zwar handelte es sich um das Gen für den Melanocortin-1-Rezeptor, kurz *MC1R*-Gen genannt. Bei Säugern und Vögeln bestimmt es die Fell- und Federpigmentierung mit. Dieses Gen bot sich für eine solche Studie schon deswegen an, weil es mit insgesamt nur 1236 Nukleotiden recht kurz ist, sich relativ leicht in ein Zellgenom einbauen lässt und seine Funktion in Zellen gut verfolgt werden kann.



Speziell wollten Hofreiter und seine Mitarbeiter herausfinden, ob Varianten dieses Gens dabei mitgespielt hatten, dass manche der im Permafrostboden gefundenen Mammuts ein helles und andere ein dunkles Fell aufweisen. Denn genauso gut hätten chemische Einflüsse aus dem umgebenden Boden die Färbung verändern können. Tatsächlich lieferte die Sequenzierung zwei verschiedene Varianten oder Allele. Eine davon unterschied sich vom entsprechenden Gen des Afrikanischen Elefanten lediglich in einem einzigen Nukleotid, die andere aber besaß noch drei weitere Mutationen – und diese bewirkten, dass im Protein drei andere Aminosäuren auftraten.

Ob das die Fellfarbe beeinflusst hatte, war jedoch nicht gleich klar. Zwei der Mutationen lagen an Stellen, die sich im Lauf der Evolution bei anderen Tieren kaum jemals verändert haben; heutige Arten mit einem vergleichbaren Muster waren damals nicht bekannt. Doch Untersuchungen zur Aktivität dieser Gene in Zellen ließen schließlich keinen Zweifel mehr: Zumindest eine der festgestellten Mutationen setzte die Aktivität des Pigmentierungsgens deutlich herab, besser gesagt schwächte die Funktion seines Proteins.

Zufällig entdeckte zu der Zeit Hopi Hoekstra, die damals an der University of California in San Diego arbeitete, mit ihren Kollegen, dass bei einigen Populationen der in Nordamerika lebenden Küstenmaus eine *MC1R*-Genvariante vorkommt, durch die im Protein die gleiche Aminosäure ausgetauscht ist wie beim Wollmammut. Und diese Mäuse sind dann hell gefärbt! Wir dürfen somit annehmen, dass manche Mammuts wohl tatsächlich blond waren – und dass besagte Variante des Pigmentierungsgens dazu beitrug.

Eine helle Maus ist im Sand gut getarnt, doch ein helles Mammut muss in der baumlosen sibirischen Landschaft weithin sichtbar gewesen sein. Der Pigmentverzicht mag

dort einen anderen Grund gehabt haben: Wärmegewinn. Zwar reflektiert ein farbloses Fell die Sonnenstrahlen, aber ein Teil davon streut zur Haut hin, während dunkle Haare die Strahlung, und somit Wärme, lediglich in der obersten Fellschicht einfangen. Im Wind, wie er sicherlich meist herrschte, geht diese Wärme rasch wieder verloren. Dass das Prinzip funktioniert, zeigen viele hell gefärbte Vögel und Säuger.

Der Erfolg dieser Studie ermutigte Hofreiters Forschungsgruppe, sich an eine ähnliche Untersuchung bei Neandertalern zu wagen. Es gelang, vom *MC1R*-Gen der archaischen Menschenart ein 128 Nukleotide langes Fragment zu gewinnen. Der kurze Abschnitt trug tatsächlich eine Mutation, die zu einem Aminosäureaustausch führte – und im Übrigen bei heutigen Menschen nicht vorkommt. Funktionsanalysen zeigten dann, dass ein Pigmentierungsprotein mit dieser Mutation weniger gut funktioniert als das menschliche Stan-





Dieses Mammutkalb starb vor 42 000 Jahren. Solche im sibirischen Eis konservierten Kadaver liefern eine Menge Erkenntnisse. Physiologische Anpassungen können jedoch nur molekulare Studien mit Hilfe von Gensequenzen enthüllen.

dardprotein. Vermutlich besaßen manche Neandertaler eine helle Haut und rote Haare, denn bei rothaarigen, hellhäutigen Europäern kommen in dem Gen andere Mutationen vor, die das Protein gleichfalls behindern. Möglicher Grund: In den nördlichen Breiten ist die zur Vitamin-D-Synthese benötigte ultraviolette Sonneneinstrahlung oft knapp. Helle Haut fängt mehr davon ein.

Energie sparen mit kälteresistentem Blut

Mit dem vorhandenen methodischen Rüstzeug sollte es nun möglich sein, physiologischen Prozessen bei ausgestorbenen Tieren nachzuspüren, also echte Paläophysiologie zu betreiben. Campbell fragte sich, ob Mammutblut biochemische Kälteanpassungen aufwies, wie sie heutige arktische Tiere besitzen. Speziell interessierten ihn Schutzmechanismen gegen einen Wärmeverlust über die Füße. Bei den großen Säugetieren, ob Rentier oder Moschusochse, verhindert ihn ein »Wundernetz« (Rete mirabile): Venen und Arterien in den Beinen verlaufen dicht antiparallel zueinander, wobei das zurückfließende kühle Venenblut dem Arterienblut, das aus dem Körperinneren kommt, Wärme entnimmt. Das vermeidet allzu große Wärmeeinbußen an den Extremitäten, und das Tier kann beim Erhalt der Kerntemperatur des Körpers Energie einsparen.

Die Füße solcher Arten sind infolgedessen bei Kälte aber nur wenige Grad warm. Dennoch erhalten die Gewebe der Extremitäten genügend Sauerstoff, um zu funktionieren –

und das ist nicht selbstverständlich. Denn der rote Blutfarbstoff Hämoglobin benötigt Energie in Form von Wärme, um den angelagerten Sauerstoff wieder abzugeben. Je kälter die Bedingungen, um so schlechter löst sich das Gas normalerweise ab. Heutige kälteadaptierte Säugetiere haben dafür eine Lösung gefunden: Dazu gehört, dass sich an das Hämoglobin in ihren roten Blutzellen zusätzliche Moleküle binden. Dieser Mechanismus, der noch nicht völlig verstanden ist, liefert offenbar die benötigte Wärmeenergie.

Benutzten die Mammuts einen ähnlichen Trick? Campbells Arbeitsgruppe wollte dies an ihrem Hämoglobin untersuchen. Auch planten die Forscher Vergleiche mit dem Indischen Elefanten, dem nächsten lebenden Verwandten. Sie schlossen sich für die Studie mit Alan Cooper von der University of Adelaide in Australien zusammen. Hämoglobin ist ein komplexes Molekül, dessen vier Globinketten bei erwachsenen Tieren von zwei verschiedenen Genen herrühren. Es gelang den Forschern zunächst nicht, Mammut-DNA von für ihre Zwecke ausreichender Qualität zu gewinnen. Daraufhin traten sie an Hofreiter heran. Mit dem gleichen DNA-Extrakt wie zuvor für das Pigmentierungsgen gelang es dem Team rasch, die kodierenden Anteile der beiden Hämoglobingene vollständig zu rekonstruieren und daraus die Aminosäureabfolge der beiden Globinketten abzuleiten.

Eine der beiden unterschied sich in drei ihrer insgesamt 146 Aminosäuren von der des Indischen Elefanten. Dafür, dass wir damit molekularen Veränderungen für eine Käl-

teanpassung auf der Spur waren, sprach zudem eine Mutation beim Menschen, das Rush-Hämoglobin. Bei dieser seltenen menschlichen Variante ist eine von den drei beim Mammuthämo- globin veränderten Stellen im Aminosäurestrang mutiert. Die Folge sind deutlich andere biochemische Eigenschaften. Auf Kälte reagiert das Rush-Hämoglobin lange nicht so empfindlich wie normales und gibt darum bei tiefen Temperaturen viel leichter Sauerstoff ab. In dieser Hinsicht verhält es sich ähnlich wie die roten Blutfarbstoffe arktischer Tiere.

Um die Eigenschaften des Mammuthämoglobins direkt zu untersuchen, bedienten wir uns intakter Gene vom Indischen Elefanten. Diese Erbfaktoren veränderten wir genau an den drei beim Mammuthämo- globin mutierten Stellen, so dass sie nun deren Hämoglobin kodierten. Anschließend ließen wir *Escherichia coli*-Bakterien, denen wir die rekonstruierten Mammuthämo- globin Gene eingepflanzt hatten, echtes Mammuthämo- globin produzieren.

Mammuthämo- globin im Labortest

Erstmals in der Forschungsgeschichte konnten wir damit nun einen wichtigen physiologischen Vorgang bei einem längst ausgestorbenen Tier im Labor genau so analysieren wie bei einem heute lebenden. Wir gaben die Hämoglobine von Mammuthämo- globin und Elefant in Lösungen, die dem chemischen Milieu in roten Blutzellen ähnelten, und maßen die Bereitwilligkeit der Moleküle, bei verschiedenen physiologisch relevanten Temperaturen Sauerstoff zu binden und abzugeben. Wie vermutet, ließ das Mammuthämo- globin das Gas bei tiefen Temperaturen tatsächlich viel leichter los als jenes des Indischen Elefanten – obwohl sich beide bei 37 Grad Celsius hierin gleich verhielten. Diese besondere Eigenschaft von Mammuthämo- globin beruhte übrigens auf völlig anderen Mutationen als bei heutigen arktischen Säugern, bewirkte jedoch das Gleiche: Zusätzliche Substanzen gingen mit dem Blutfarbstoff eine Bindung ein, was Wärmeenergie für die Sauerstoffabgabe lieferte. Während die Mammuthämo- globine in diesem Molekül ein voll funktionsfähiges kälteadaptiertes Hämoglobin besaßen, ist das menschliche Rush-Hämoglobin im Gegensatz dazu instabil. Träger des entsprechenden Gens leiden daher an Blutarmut. Die Gründe für den Unterschied sind noch unklar.

Die Kälteadaptation des Hämoglobins ist mit Sicherheit nur eine von vielen physiologischen Anpassungen, mit denen Mammuthämo- globin der Eiszeit trotzte. Könnte man mehr über diese Mechanismen in Erfahrung bringen, wie auch über Lösungen, die andere ausgestorbene Arten entwickelt hatten, brächte das unser Verständnis evolutionsgeschichtlicher Hintergründe wichtiger Tiergruppen voran. Leider eignen sich die bisher von solchen Spezies gewonnenen Genomsequenzen für genauere Analysen von Molekülfunktionen wenig. Die meist verwendete so genannte Schrotschusstechnik – bei der die DNA zunächst in kurze Fragmente zerlegt wird, die später wieder zusammengesetzt werden – eignet sich zwar für einen ersten Überblick, doch die so erzielten Sequenzen sind eher Zufallsprodukte und in der Regel zu un-

genau und unvollständig für eingehende physiologische Studien. Um dem zu begegnen, wären so viele Durchläufe nötig, dass die Kosten nicht mehr vertretbar wären.

Viel günstiger und eher zielführend ist ein neues Verfahren, gezielt nur Gene »einzufangen« (englisch: Hybridisation Capture). Vielleicht wird es diese Methode bald sogar ermöglichen, genetische Netzwerke von Mammuthämo- globin aus verschiedenen Populationen zu vergleichen, etwa von Tieren aus Sibirien und aus Spanien, sowie aus einzelnen eiszeitlichen Phasen, vor allem den warmen und kalten Abschnitten. Damit kämen nicht nur ihre genetischen Variationen zum Vorschein, sondern ebenfalls lokale Anpassungen an veränderte Klimabedingungen. Zudem beschäftigen wir uns bereits mit mehreren anderen verschwundenen Arten, darunter dem Mastodon, einem urzeitlichen Rüsseltier, das mit Elefanten nur fern verwandt war, und mit der im 18. Jahrhundert ausgerotteten Stellertiersche Kuh.

Bei aller Euphorie, einen Einblick in die letzten 50 000 Jahre Evolution zu erhalten, werden sich solche Untersuchungen auch zukünftig rein auf Tests im Labor beschränken, mit allen Grenzen, die das den Analysen setzt. Ein Mammuthämo- globin oder eine andere ausgestorbene Art durch Klonen wieder zum Leben zu erwecken, erscheint derzeit utopisch. Aber es ist faszinierend genug, einzelne ihrer Proteine zu reanimieren. ~

DIE AUTOREN



Kevin L. Campbell (links) ist Professor für Umwelt- und Evolutionsphysiologie an der University of Manitoba (Kanada). Er erforscht Eigenschaften von Hämoglobin heutiger Säugetiere sowie das Verhalten und die Evolutionsgeschichte von rekonstruierten Proteinen ausgestorbener Arten.

Michael Hofreiter ist Professor für Biologie an der University of York (England). Er arbeitet unter anderem am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. An prähistorischen DNA-Sequenzen untersucht er Reaktionen von Körperfunktionen auf Umweltveränderungen.

QUELLEN

Campbell, K. L. et al.: Substitutions in Woolly Mammoth Hemoglobin Confer Biochemical Properties Adaptive for Cold Tolerance. In: *Nature Genetics* 42, S. 536–540, 2010

Krause, J. et al.: Multiplex Amplification of the Mammoth Mitochondrial Genome and the Evolution of Elephantidae. In: *Nature* 439, S. 724–727, 2006

Lalueza-Fox, C. et al.: A Melanocortin 1 Receptor Allele Suggests Varying Pigmentation among Neanderthals. In: *Science* 318, S. 1453–1455, 2007

Nogushi, H. et al.: Structures of Haemoglobin from Woolly Mammoth in Liganded and Unliganded States. In: *Acta Crystallographica Section D: Biological Crystallography* 68, S. 1441–1449, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199286

Das wechselhafte Leben der Sterne

Der funkelnde Nachthimmel erfüllt uns seit jeher mit Ehrfurcht und Staunen. Doch erst jetzt verstehen die Astronomen allmählich, welche Prozesse die Lichtquellen und Elementfabriken des Universums antreiben.

Von Ralf Launhardt

Warum fasziniert uns der Sternenhimmel? Ist es das Empfinden der eigenen Winzigkeit im Angesicht der Himmelskuppel, der eigenen Vergänglichkeit angesichts der scheinbar unverrückbar daran fixierten Lichtpunkte? Wenn Forscher das Schicksal der Sterne untersuchen, gerät dieses Bild in Bewegung und kann uns erst recht in Staunen versetzen.

Kosmologen wissen heute, dass das Universum überwiegend aus unsichtbarer Dunkler Materie und der noch rätselhafteren Dunklen Energie besteht. Nur vier Prozent gewöhnlicher Materie bleiben übrig – und davon bestehen 90 Prozent aus Gas, das meist unvorstellbar dünn im intergalaktischen Raum verteilt ist. Sterne machen am Ende also nur 0,4 Prozent der Gesamtmasse im Kosmos aus. Doch die Vor-

gänge bei ihrem Werden und Vergehen sind der Grund für unsere eigene Existenz.

Sterne bilden sich aus diffusem Gas, wandeln es in ihrem Inneren um und geben die veränderte Materie im Lauf der Zeit an den umgebenden Raum ab. Nur so erklärt sich die stoffliche Vielfalt des Universums, denn beim Urknall entstanden lediglich Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium. Erst die Kernfusionen im Inneren der Sterne reicherten das Universum mit schwereren Elementen an. Ohne Sterne gäbe es daher keine Planeten mit festen Oberflächen – und insbesondere kein Leben. Mit anderen Worten: Wir sind aus Sternenstaub geboren.

Allein in unserer Galaxie gibt es mindestens 100 Milliarden Sterne. Deren Anteil am Volumen der Milchstraße ist nahezu verschwindend gering – ein zehnmilliardstel Billionstel –, und doch befindet sich in ihnen zehnmal so viel Masse wie im gesamten restlichen interstellaren Gas. Wenn aus diesem ein neuer Stern entstehen soll, muss sich das dünn und großräumig verteilte Gas enorm verdichten – um 25 Zehnerpotenzen. Solche Größenordnungen liegen weit jenseits unserer Vorstellungskraft und machen es schwierig, die beteiligten Prozesse zu modellieren.

Das Gas in der Scheibe der Milchstraße besteht zu 70 Prozent aus Wasserstoff, zu 29 Prozent aus Helium und nur zu einem Prozent aus schwereren Elementen. Etwa die Hälfte davon ist relativ gleichmäßig und mit rund einem Atom pro Kubikzentimeter extrem dünn verteilt. Der Rest formt Wolken, die immerhin etwa 200-mal dichter sind, so dass sich einzelne Wasserstoffatome zusammenfinden und zu Molekülen verbinden können. Diese Molekülwolken füllen aber bloß 0,3 Prozent des gesamten Raums, und Sterne entstehen nur in den dichten Wolkenkernen.

Wie aber entwickelt das anfangs gleichmäßig verteilte Gas überhaupt solche Strukturen? Die Astronomen haben den Prozess noch nicht ganz verstanden, gehen aber von ei-

DIE SERIE IM ÜBERBLICK



DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER ASTRONOMIE

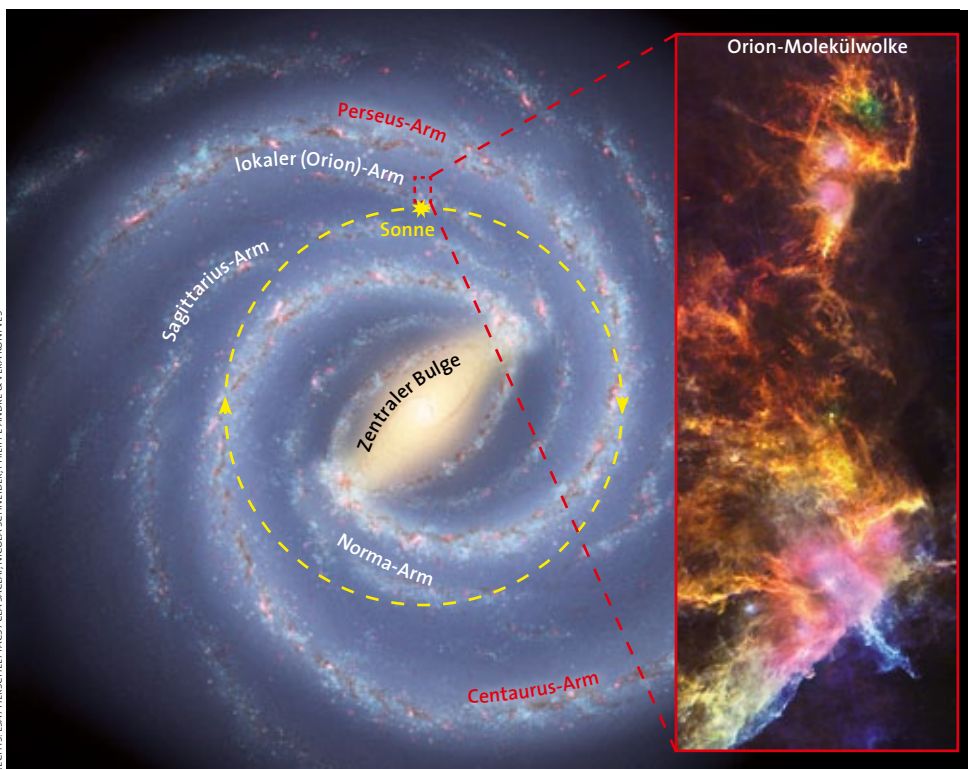
Teil 1	▶ Heiße Stürme im Kosmos <i>Gerhard Börner</i>	April 2013
Teil 2	▶ Giganten im All <i>Gerhard Börner</i>	Mai 2013
	▶ Zeugen des Urknalls <i>Marek Abramowicz und Julia Tjus</i>	
Teil 3	▶ Aus Staub geboren <i>Thomas Henning</i>	Juni 2013
Teil 4	▶ Faszinierende Neue Welten <i>Lisa Kaltenegger</i>	Juli 2013
Teil 5	▶ Das wechselhafte Leben der Sterne Ralf Launhardt	August 2013
Teil 6	▶ Dunkle Energie und Dunkle Materie <i>Volker Springel</i>	September 2013

NASA, JPL, CALTECH / STSCI / CXC / UNIVERSITY OF ARIZONA / ESA / AUBA / JHU



NASA / ESA / OSIRIS DE / MARCO MACQUARIE UNIVERSITY

Hell leuchten gewaltige, bizarr geformte Gaswolken im intensiven Licht junger, heißer Sterne: Das hier abgebildete Sternentstehungsgebiet im südlichen Sternbild Achterdeck ist rund 13 000 Lichtjahre von uns entfernt. Der Blick auf diese Region lässt erahnen, dass der Geburt jedes Sterns spektakuläre und höchst komplexe physikalische Ereignisse vorausgehen.



Diese künstlerische Ansicht der Milchstraße veranschaulicht das gegenwärtige Wissen der Astronomen über die Struktur unserer Galaxie. In zwei Hauptspiralarmen (rot) und mehreren Zwischenspiralarmen verdichten sich Gas und Staub – hier entstehen zahlreiche neue, helle Sterne. Wie all diese Materie umläuft auch unsere Sonne das galaktische Zentrum (gestrichelter Kreis). Das wohl bekannteste und eindrucksvollste Sternentstehungsgebiet in unserer direkten Nachbarschaft ist die rund 1300 Lichtjahre entfernte Orion-Molekülwolke (Infrarotaufnahme des Herschel-Weltraumteleskops rechts).

nem komplizierten Zusammenspiel von Gravitation und Sternentstehung aus. So bilden sich in der galaktischen Scheibe spiralförmige Dichtewellen, die nur langsam ihre Position ändern. In diese Bereiche strömen vergleichsweise schnell Gaswolken, die um das Zentrum rotieren. Die Materie verdichtet sich, bildet neue Sterne und formt so die leuchtenden Arme einer Spiralgalaxie wie der unseren. Auch die Sonne umkreist das Zentrum der Milchstraße und benötigt für einen Umlauf – ein galaktisches Jahr – etwa 240 Millionen irdische Jahre. Unser vor 4,6 Milliarden Jahren entstandenes Sonnensystem ist jetzt also etwa 20 galaktische Jahre alt. Gegenwärtig befinden wir uns am Rand des Orion-Arms, eines kleinen Zwischenspiralarms. Im verdichteten Gas verbinden sich Wasserstoffatome zu Molekülen.

Diese bilden entlang der dichteren Spiralarme große Wolken, die durch ihre eigene Schwerkraft zusammengehalten werden. In ihnen breiten sich immer wieder Stoßwellen aus – ausgelöst von Gaseruptionen entstehender Sterne sowie durch Supernovae, in denen sterbende massereiche Sterne ihre Hüllen explosionsartig abstoßen. Das führt in den Molekülwolken zu turbulenten Strömungen und lokalen Verdichtungen. Deren Anordnung ist nicht beliebig; Astronomen beobachten, dass sie fast immer entlang von Filamenten erfolgt.

AUF EINEN BLICK

UNSER LEBENDIGES FIRMAMENT

- 1** Der **Fixsternhimmel** galt in der Antike und im Mittelalter als eine ewig unveränderliche Sphäre.
- 2** Erst die moderne Naturwissenschaft entdeckte, dass im Weltall immerfort neue Sterne entstehen, unterschiedliche Schicksale durchlaufen und ihr Dasein oft mit spektakulären Explosionen beenden. Dabei werden **schwerere Elemente** erzeugt und in den interstellaren Raum ausgestoßen.
- 3** Offenbar geht die Sternentstehung häufig mit der **Bildung von Planeten** einher, die allerdings nur unter ganz bestimmten Bedingungen Leben tragen können. Viele Details der Stern- und Planetenentstehung sind noch ungeklärt.

Magnetfelder geben den Anstoß

Wie es dazu kommt, beginnen die Forscher aber gerade erst zu verstehen. Wahrscheinlich spielen Magnetfelder dabei eine wichtige Rolle: Energiereiche Strahlung wirkt ionisierend, das heißt, sie nimmt einigen Atomen Elektronen weg. Die geladenen Teilchen folgen dem Verlauf der Magnetfelder, stoßen dabei mit neutraler Materie zusammen und reißen diese mit sich. So kanalisiert sich allmählich die Bewegung des gesamten Gases. Die Magnetfelder sind aber nur sehr schwer messbar, zudem sehen wir immer nur eine Projektion der Materieverteilung in die Himmelsebene. Ob sich das alles wirklich so abspielt, ist daher noch immer Gegenstand aktueller Forschung.

In den Filamenten genügen kleine Störungen, damit lokal die Gravitation die Oberhand gewinnt, das Gas zusammendrückt und Wolkenkerne bildet, aus denen neue Sterne hervorgehen. Anhand von Beobachtungen und Computersimulationen zeigten Astronomen, dass die Massenverteilung und die räumliche Anordnung von bereits entstandenen

ALL VIEW™

Multi-Purpose Computerized Mount

Die innovative und äußerst vielseitige computergesteuerte Sky-Watcher Allview Montierung mit Handbox und Stativ ist ein unverzichtbarer Begleiter für alle fotografischen- und visuellen Beobachtungsbedürfnisse. Die Allview kann für Panorama- oder Zeitrafferaufnahmen, Videoaufnahmen, für die „Go-To“-Astronomie oder einfach nur als eine stabile motorisierte Plattform für die Montage eines Spektivs oder Fernglases verwendet werden. Die Allview Montierung bildet auch eine nützliche Basis für Sicherheits- und Überwachungsanwendungen.



Sky-Watcher®

Be amazed.



kompatibel mit seriellen Bluetoothadaptern zur drahtlosen Fernsteuerung der Montierung

PANORAMA

UVP € 439,-

Neu ab 2013



f64-tours

WORKSHOP PANORAMAFOTOGRAFIE

Vom Weitwinkel zum Panorama – vom Tag zur Nacht mit der Skywatcher Allview Montierung

Weitere Infos unter: www.f64-tours.de

Landschaft und Sternenhimmel - Ort: Moseltal - Termin: 12.10.13 / 2 Tage

Skyline und Citylights - Ort: Frankfurt / Main - Termin: 19.10.13 / 2 Tage

Fernsicht und Sternlicht - Ort: Schnalstal / Südtirol (I) - Termin: 24.01.14 / 4 Tage

Workshop Trainer:
Gernot Meiser



Gerd Jütten



Optical Vision Ltd. - UK
Vertretungsbüro & Warenlager
Duracher Str. 11
D - 87437 Kempten

Tel: +49+831-697 28 82 - 10
Fax: +49+831-697 28 82 - 20
eMail: info@optical-vision.de
www.optical-vision.de

Hintergrundbild:

Haus der Astronomie in Heidelberg;
Aufnahme von Gernot Meiser mit
Skywatcher Allview Montierung und Nikon D4



Die abgebildete Kamera ist nicht im Lieferumfang enthalten.

Sternen recht stark der von dichten Molekülwolkenkernen ähneln. Offenbar prägen deren Eigenschaften die der neuen Sonnen.

Erstaunlicherweise scheint die Verteilung der Sternmassen nicht von Wolke zu Wolke zu variieren, sondern relativ universell zu sein. Massearme Sterne entstehen immer sehr viel häufiger als massereiche. Auf 20 sonnenähnliche Sterne kommen etwa 100 leichte Exemplare mit nur 0,1 Sonnenmassen – aber nur ein einziges Schwergewicht mit zehnfacher Sonnenmasse.

Vom kalten Gas zum heißen Kern

Was geschieht nun, wenn ein Molekülwolkenkern so massereich und dicht geworden ist, dass weder der durch seine Eigenwärme erzeugte auswärts wirkende Druck noch turbulente Strömungen ihn wieder zerstören können? Dem Wolkenkern ist Staub beigemischt, der die Strahlung benachbarter Sterne abschirmt. Gleichzeitig regt die Wärme einige Moleküle dazu an, zu schwingen und Energie abzustrahlen. Somit kühlt das Gas aus, und der darin herrschende Druck sinkt. Jetzt gewinnt die Gravitation den Kampf gegen die auseinandertreibenden thermischen, turbulenten und magnetischen Kräfte. Der Wolkenkern kollabiert nahezu im freien Fall unter seiner eigenen Schwerkraft.

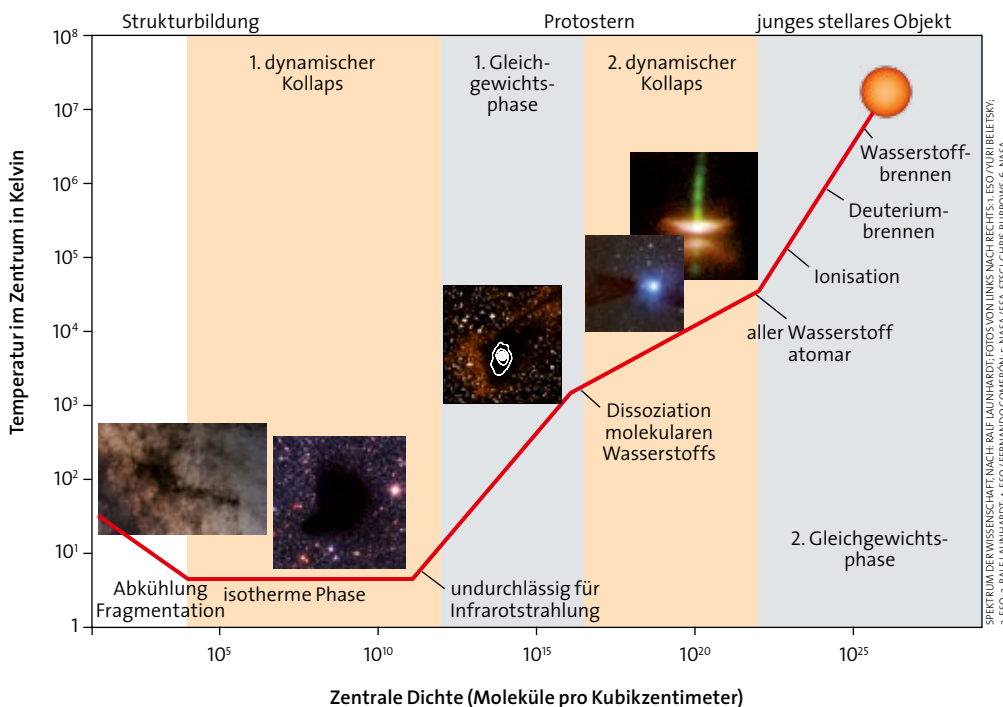
Für einen typischen Kern mit einer Anfangsdichte von einer Million Molekülen pro Kubikzentimeter dauert dieser Kollaps etwa 100 000 Jahre. Dabei steigt der Druck im Inneren wieder an, und es wird Wärme erzeugt. Stöße der Wasserstoffmoleküle übertragen diese auf die Staubteilchen, die sie als Infrarotstrahlung abgeben. So bleibt die Temperatur konstant bei etwa 7 bis 10 Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt).

Erst wenn die Dichte im Zentrum einen Wert von etwa zehn Milliarden Molekülen pro Kubikzentimeter übersteigt, wird der Kern für die Wärmestrahlung undurchlässig und heizt sich auf. Mit der Temperatur steigt der dem Gravitationsdruck entgegenwirkende Gasdruck. Der Kollaps stoppt vorerst, allerdings nur im Inneren dieser Sternvorstufe, eines protostellaren Objekts. Von außen stürzt weiterhin Materie aus der umgebenden Wolkenhülle in den Kern, der sich dadurch weiter aufheizt und an Masse gewinnt. Theoretisch sollte ein solches Gebilde etwa 1000-mal so groß sein wie unsere Sonne. Es ist allerdings tief in die Wolke eingebettet und leuchtschwach; Astronomen konnten noch keines zweifelsfrei beobachten.

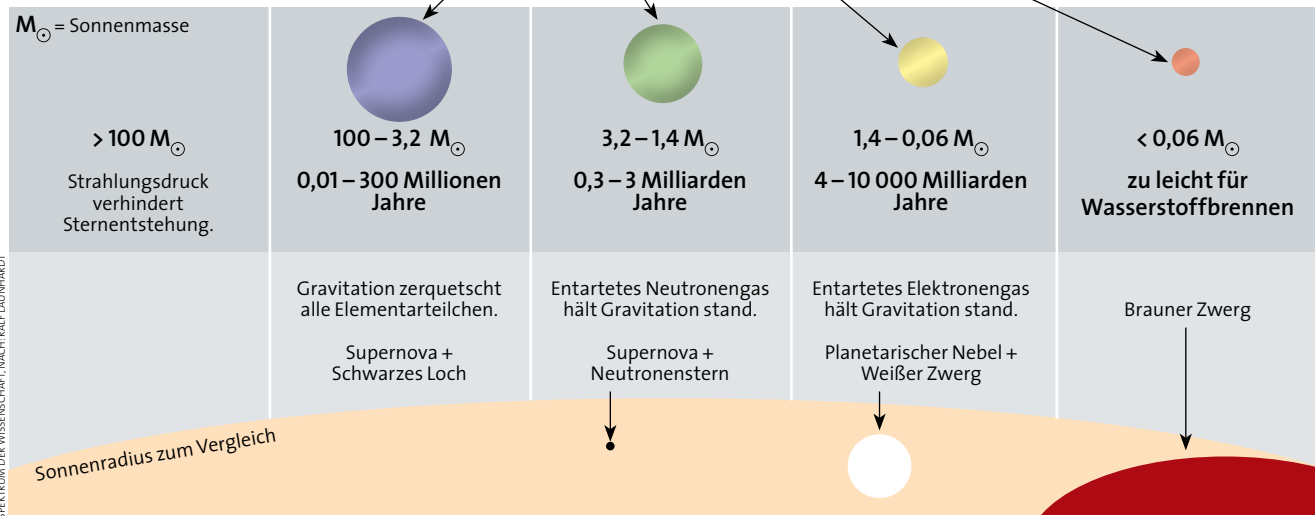
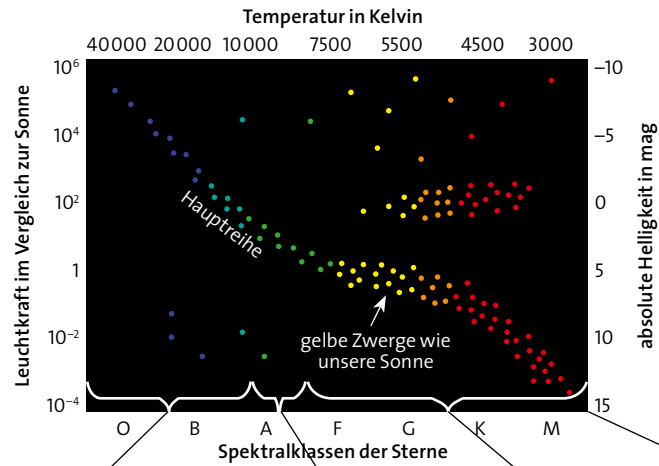
Sobald die Temperatur im Zentrum 2000 Kelvin erreicht und die Dichte auf etwa zehn Milliarden Moleküle pro Kubikzentimeter angestiegen ist, halten die Bindungen zwischen den Wasserstoffatomen den Teilchenstößen nicht mehr stand: Der molekulare Wasserstoff beginnt wieder in seine Atome zu zerfallen. Diese Dissoziation verbraucht fast die gesamte Energie der weiterhin einfallenden Materie. Temperatur und Druck im Inneren können nicht mehr schnell genug wachsen, um der Gravitation entgegenzuwirken. Der bislang im Gleichgewicht befindliche zentrale Kern kollabiert erneut, bis der gesamte Wasserstoff dissoziiert ist und die Temperatur wieder schneller ansteigt.

Bei einer Temperatur von einer Million Grad wird die Materie im Zentrum komplett ionisiert; sie bildet ein so genanntes Plasma aus Atomkernen und freien Elektronen. Nun setzt langsam der erste thermonukleare Prozess ein: Kerne des schweren Wasserstoffisotops Deuterium, die aus je einem Proton und einem Neutron bestehen, verschmelzen mit einem freien Proton zu Helium. Dieses eher unergiebig

Eine diffuse kosmische Gaswolke durchläuft viele Stationen auf ihrem Weg zum stellaren Objekt. Dabei wechseln sich Phasen ab, in denen das Gas unter seiner eigenen Schwerkraft kollabiert und die Dichte schnell steigt, und Gleichgewichtsphasen, in denen die Temperatur und damit der innere Druck stark anwachsen und der Gravitation entgegenwirken. Erst wenn der Kern endlich dicht und heiß genug ist, dass Fusionsreaktionen im Kern zünden, beginnt das lange Leben des Sterns.



Sterne in ihrer längsten Lebensphase liegen in diesem Diagramm grob entlang einer Linie, der »Hauptreihe«. Hier hängen Oberflächentemperatur und Leuchtkraft des Sterns nur von dessen Masse ab. Diese ist auch am Lebensende schicksalhaft: Aus sonnenähnlichen Sternen werden Weiße Zwerge, schwerere Sterne kollabieren zu Neutronensternen oder Schwarzen Löchern.



»Deuteriumbrennen« setzt allerdings weniger Energie frei als der fortschreitende Gravitationskollaps. Der Protostern befindet sich zu diesem Zeitpunkt noch tief eingebettet in der Wolkenhülle. Der Staub darin absorbiert sämtliche von ihm ausgesendete Strahlung und gibt sie als Wärmestrahlung nach außen ab. Der werdende Stern bleibt also weiterhin unsichtbar; er macht sich nur indirekt in Infrarotkameras oder speziellen Radioteleskopen bemerkbar.

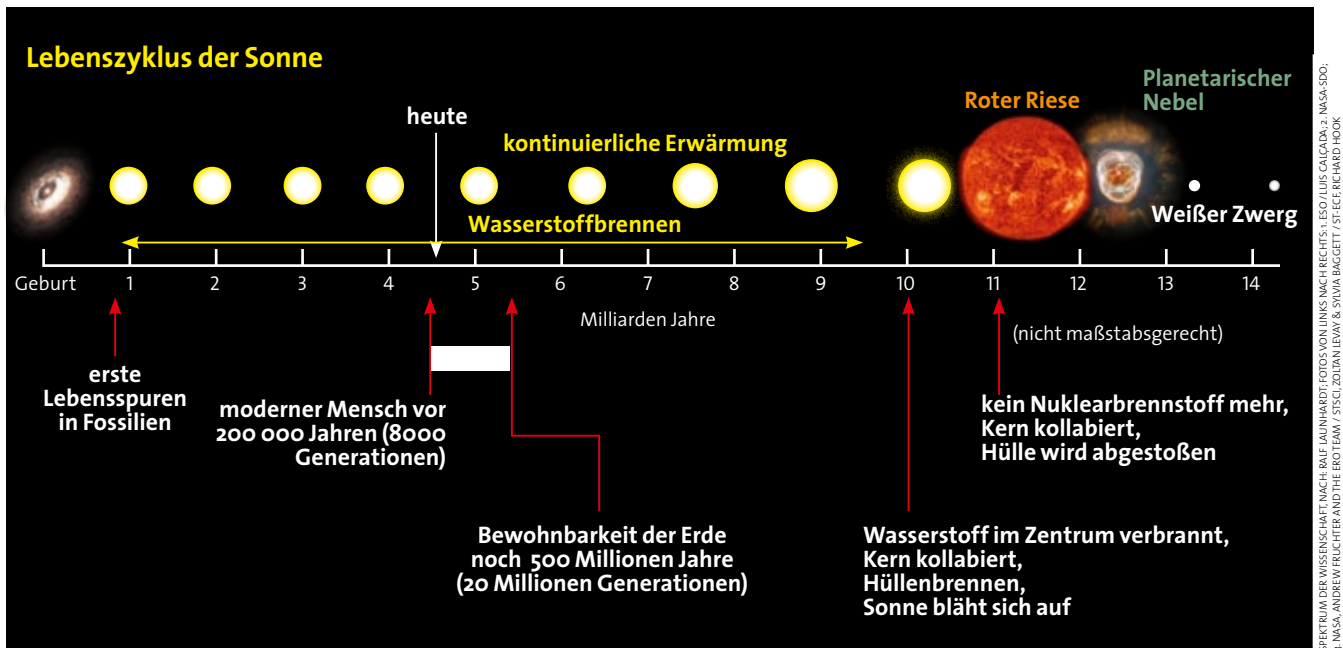
Wolkenkerne drehen Pirouetten

Allmählich gewinnt ein weiteres Phänomen an Bedeutung: Jede interstellare Wolke besitzt einen gewissen Drehimpuls – sie rotiert. Die Rotationsenergie ist allerdings anfangs meist mehr als 100-mal kleiner als die Gravitationsenergie des Molekülwolkenkerns. Während der Kontraktion wirkt jedoch das Prinzip der Drehimpulserhaltung, das sich am Beispiel einer Pirouetten drehenden Eiskunstläuferin illustrieren lässt: Sie dreht sich umso schneller, je mehr sie die anfangs ausgestreckten Arme an den Körper heranzieht. Doch während eine Eiskunstläuferin ihren Durchmesser dadurch höchstens auf ein Viertel verkleinern kann, reduziert sich derjenige eines Molekülwolkenkerns beim protostellaren Kollaps um einen Faktor von einer Million! Eigentlich müsste der rasend rotierende Wolkenkern durch die enormen Fliehkräfte zerris-

sen werden, lange bevor Dichte und Temperatur im Inneren ausreichen, einen neuen Stern zu bilden. Offenbar wird die Rotationsenergie während der Sternentstehung aber größtenteils abgeführt. Tatsächlich beträgt der Drehimpuls eines typischen Sterns nur etwa ein Millionstel des entsprechenden Werts einer protostellaren Wolke.

Die Astronomen verstehen erst ansatzweise, welche physikalischen Mechanismen dabei wirken. Ein Faktor ist die magnetische Bremsung: Der immer schneller rotierende und kontrahierende Wolkenkern wickelt das im umgebenden Medium verankerte Magnetfeld regelrecht auf, und das bremst die Drehung. Außerdem entsteht um den Protostern aus dem Zusammenspiel von Gravitation und Zentrifugalkraft eine flache, rotierende Gas- und Staubschicht. Durch diese Akkretionsscheibe bewegt sich Masse von der Wolkenhülle nach innen und verliert durch Reibung Drehimpuls.

In der unmittelbaren Umgebung des Protosterns findet dort, wo die Feldlinien des aufgewickelten Magnetfelds parallel zur Drehachse verlaufen, ein besonders spektakulärer Prozess statt: Geladene Teilchen können sich nur in Magnetfeldrichtung bewegen und reißen dabei auch neutrales Gas mit. So entstehen längs der Drehachse zwei dichte und energiereiche Materieströme, so genannte Jets, die Drehimpuls nach außen tragen. Der Vorgang ist komplex, und erst mit



Unsere Sonne entstand vor etwa fünf Milliarden Jahren und wird wohl noch ebenso lang scheinen, bevor sie sich – wenn der Wasserstoffvorrat im Inneren zur Neige geht – zum Roten Riesen aufbläht und schließlich als langsam verblassender Weißer Zwerg endet. Doch bereits jetzt wird sie allmählich heißer. Leben auf der Erde wird daher nur noch etwa 500 Millionen Jahre möglich sein (weißer Balken).

den neuesten Supercomputern können zumindest einfache Konfigurationen simuliert werden. Wie viel Drehimpuls die beschriebenen Prozesse in welchem Stadium genau abführen, verstehen die Forscher aber noch nicht. Das Drehimpulsproblem der Sternentstehung bleibt damit vorerst eines der ungelösten Rätsel der Astrophysik.

Letztlich spielen beim Drehimpulsproblem auch Planeten eine Rolle. In unserem Sonnensystem besitzen zum Beispiel alle Planeten zusammen etwa 60-mal mehr Drehimpuls als die Sonne selbst.

Planeten entstehen nebenbei

Planeten gehen aus einem natürlichen Nebenprodukt der Sternentstehung hervor, der Akkretionsscheibe. Doch das muss schnell geschehen, denn ihre Lebensdauer ist auf wenige Millionen Jahre beschränkt. Nur in dieser relativ kurzen Zeitspanne können sich aus dem Akkretionsmaterial Planeten formen. Die Frage lautet also: Was geht in einer zirkumstellaren Scheibe vor sich, außer dass sie Materie auf den Stern zu und Drehimpuls nach außen transportiert?

Durch die wachsende Dichte im Inneren der Scheibe stoßen die Staubteilchen immer häufiger zusammen und haften aneinander. Außerhalb einer »Schneegrenze« bei etwa drei bis fünf Astronomischen Einheiten – eine Astronomische Einheit ist der mittlere Abstand der Erde von der Sonne, rund 150 Millionen Kilometer – wird zudem die Sternstrahlung so schwach, dass Eisschichten auf den Staubkörnchen das Zusammenkleben begünstigen. Allerdings lassen Experimente und Computersimulationen darauf schließen, dass

auf diese Weise nur Steinchen bis zu einer Größe von wenigen Zentimetern verklumpen. Danach sollten sie entweder in den Stern stürzen oder durch weitere Stöße zerstört werden. Wie trotzdem größere Brocken und schließlich sogar Planeten wachsen können, ist eines der größten offenen Rätsel der Planetenentstehung. Als Lösungsvorschlag vermuten Astronomen dichte Gaswirbel, welche die Steinchen gefangen halten. Hinweise, dass es sich tatsächlich so abspielen könnte, fanden Forscher erst kürzlich am Alma-Observatorium in der chilenischen Atacama-Wüste: Sie beobachteten eine solche »Staubfalle« – einen Bereich mit größeren Partikeln – in der Akkretionsscheibe um einen jungen Stern.

Haben sich erst einmal kilometergroße Planetenkeime gebildet, so genannte Planetesimale, so ziehen diese sich gravitativ an und verschmelzen, bis auf einer bestimmten Umlaufbahn nur noch jeweils ein planetengroßer Körper übrig ist. In den Außenbereichen der Scheibe ist mehr Masse vorhanden als innen. Hier können Gesteinskerne von bis zu zehn Erdmassen entstehen, die durch ihre Gravitation viel Gas anziehen und so Riesenplaneten wie Jupiter formen. Anderen Modellen zufolge können sich Gasriesen auch entwickeln, indem dichte Gasklumpen in den Außenbereichen der Scheibe direkt durch ihre Schwerkraft kollabieren. Unter bestimmten Umständen driften solche Objekte später weit vom Entstehungsort fort. So erklären Forscher viele der neu entdeckten extrasolaren Planetensysteme, die oft völlig anders aufgebaut sind als unser eigenes.

Noch heute können wir mit bloßem Auge Spuren aus der Frühphase unseres Sonnensystems beobachten. Das Zodia-

kallicht, das in klaren Nächten vor der Morgendämmerung oder nach der Abenddämmerung über dem Horizont schimmert, verursachen kleine Staubteilchen innerhalb der Marsbahn, die das Sonnenlicht streuen. Aus viel größeren Brocken bestehen die Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter oder der so genannte Kuipergürtel jenseits der Neptunbahn, aus dem ein Großteil der Kometen stammt.

Doch zurück zur Sternentstehung. Der noch von einer Scheibe und Wolkenhülle umgebene Protostern gewinnt seine Energie hauptsächlich durch Masseneinfall von außen. Das Deuteriumbrennen bläht ihn zwar etwas auf, produziert aber nicht genügend Energie, um den Kern gegen die Gravitation zu stabilisieren. Wenn der Materienachschub versiegt und das Deuterium verbraucht ist, kühlt der junge Stern ab und schrumpft erneut. Dabei wird er wieder dichter und heißer, da sich durch Reibung erneut Gravitationsenergie in Wärme umwandelt. Bei der Protosonne dauerte diese Gravitationskontraktion etwas weniger als eine Million Jahre. Der junge Stern ist nun nicht mehr in einer Wolkenhülle versteckt; er wird sichtbar. Er heißt zwar nicht mehr Protostern, hat aber auch noch nicht das für richtige Sterne charakteristische Gleichgewichtsstadium erreicht. Er ist nun ein so genannter Vorhauptreihenstern.

Eine Reihe von Verwandten

Trägt man Temperatur und Helligkeit von Sternen in ein Hertzsprung-Russell-Diagramm ein – benannt nach dem dänischen Astronomen Ejnar Hertzsprung (1873–1967) und seinem amerikanischen Kollegen Henry Norris Russell (1877–1957) –, so liegen die meisten Sterne auf einer Linie, der so genannten Hauptreihe (siehe Grafik S. 51). In der längsten Lebensphase eines Sterns gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den zwei Größen, die sich letztlich beide auf die Masse des Sterns zurückführen lassen. Bloß für junge, noch kontrahierende Vorhauptreihensterne und sterbende Nachhauptreihensterne gilt die Regel nicht.

Den Zusammenhang zwischen Masse und Leuchtkraft erkannte der britische Astrophysiker Arthur Eddington (1882–1944) bereits in den 1920er Jahren und schuf damit die Grundlage für eine Theorie des inneren Sternaufbaus. Das Wesen der stellaren Energiequellen war allerdings damals noch unbekannt. Erst in den späten 1930er Jahren entdeckten die Physiker Hans Bethe (1906–2005) und Carl Friedrich

MITMACHEN UND GEWINNEN!

JETZT BEIM GROSSEN
ISON-GEWINNSPIEL
TEILNEHMEN UND MIT ETWAS GLÜCK EINEN VON
101 PREISEN GEWINNEN!



SkyProdigy 70



FirstScope 76



UpClose Spektiv 50



NexStar SLT 127



LCM 114



AstroMaster 114EQ



SkyMaster 15x70



Outland 8x25



Nature 8x42 Roof



Nature 8x42 Porro



UpClose 7x35



UpClose 7x50



Wetterstation Barometer



Wetterstation Kompakt

W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht
zum Thema »Sterne unseres Milchstraßensystems«
können Sie kostenfrei herunterladen unter

www.wissenschaft-schulen.de/sterne



Alle Infos und
Teilnahmebedingungen:

Jahrhundertkomet.de
www.jahrhundertkomet.de/ison-gewinnspiel

von Weizsäcker (1912–2007) die Fusionsreaktionen, die in den Sternen ablaufen.

Wenn die Temperatur des beständig schrumpfenden jungen Sterns im Inneren mehrere Millionen Grad erreicht und seine zentrale Dichte mehrere Gramm pro Kubikzentimeter beträgt, setzt die Fusion von Wasserstoffkernen zu Helium ein – das so genannte Wasserstoffbrennen. Es ist nicht nur viel ergiebiger als das Deuteriumbrennen, sondern liefert sogar mehr Energie als jede andere Kernreaktion – so viel, dass es den Wärmeverlust durch Abstrahlung kompensiert und die Kontraktion stoppt. In der leuchtenden Gaskugel stellt sich ein stabiles Gleichgewicht aus Gravitation und Gasdruck ein: Ein neuer Stern ist geboren.

Die für das Wasserstoffbrennen notwendige Temperatur wird jedoch nur bei einer Gesamtmasse von mehr als etwa sechs Prozent der Sonnenmasse erreicht. Leichtere Wolkenkerne schrumpfen einfach weiter und kühlen dabei langsam aus. Obwohl sie eigentlich eher rötlich glimmen, nennt man solche Gebilde Braune Zwerge. Sie leuchten so schwach, dass Astronomen ihre Existenz erst Mitte der 1990er Jahre nachweisen konnten. Ein kollabierender Wolkenkern mit mehr als etwa 100 Sonnenmassen heizt sich hingegen den gängigen Modellen zu Folge so stark auf, dass der Strahlungsdruck ihn zerreißt. Deshalb sollte es Sterne nur im Massenbereich zwischen 0,06 und 100 Sonnenmassen geben. Diese Grenzen sind allerdings sehr unsicher; die Untergrenze ist schwer nachprüfbar, und in der letzten Zeit mehren sich Indizien für Sternriesen mit mehreren hundert Sonnenmassen.

Wasserstoff für ein langes Leben

Die Atomkerne der schwereren Elemente fusionieren erst bei sehr viel höheren Temperaturen. Solche Reaktionen spielen nur in den Spätstadien der Sternentwicklung eine Rolle, wenn der meiste Wasserstoff verbrannt ist. Selbst dann können im Inneren der Sterne keine Elemente erzeugt werden, die schwerer sind als Eisen und Nickel, die Elemente mit den am stärksten gebundenen Kernen. Durch Bilden noch schwererer Elemente würde keine Energie mehr freigesetzt. Diese entstehen erst, wenn am Ende eines Sternlebens eine große Zahl Neutronen die Atomkerne der Sternhülle bombardiert.

Die Fusion von Wasserstoffkernen ist die langlebigste Energiequelle eines Sterns. Deswegen hängt die Lebensdauer auf der Hauptreihe davon ab, wie viel Wasserstoff zur Verf-

gung steht und wie schnell er verbraucht wird. Für unsere Sonne beträgt diese Lebensdauer etwa 10 Milliarden Jahre. Die Leuchtkraft und damit der Energieverbrauch eines Sterns steigen mit der vierten Potenz seiner Masse an; deswegen sind massereiche Sterne sehr viel kurzlebiger als massearme. So beträgt die Hauptreihenlebensdauer eines Sterns mit zehn Sonnenmassen nur zehn Millionen Jahre, während sie für Sterne mit weniger als 0,8 Sonnenmassen das bisherige Alter des Universums übersteigt.

Unser Sonnensystem ist rund fünf Milliarden Jahre alt, hat also etwa die Hälfte seines Daseins erreicht; die Sonne wird noch weitere fünf Milliarden Jahre auf die Erde scheinen (siehe Grafik auf S. 52). Durch Fossilienfunde wissen wir,

dass sich Leben bereits weniger als eine Milliarde Jahre nach der Entstehung unseres Planeten entwickelte. Doch dann dauerte es fast vier Milliarden Jahre, bis die Evolution vor rund 200 000 Jahren den modernen Menschen hervorbrachte. Wir kennen bis heute kein anderes Beispiel eines belebten Planeten und können deshalb nur vorsichtig schluss-

folgern, dass die Entstehung von höherem Leben wahrscheinlich nur während einer sehr langen Gleichgewichtsphase des Hauptreihenstadiums eines Sterns möglich ist.

Damit die Erde bewohnbar bleibt, muss sich die Sonneneinstrahlung in sehr engen Grenzen halten: genug, um das Wasser der Ozeane flüssig zu halten, aber nicht so viel, dass es verdampft und aus der Atmosphäre entweicht. Das ist nur innerhalb gewisser Umlaufbahnen möglich. Diese so genannte bewohnbare Zone ist sehr schmal; bereits unsere nächsten Nachbarn, Venus und Mars, liegen außerhalb. Allerdings sind diese Grenzen nicht unverrückbar, da sich die Leuchtkraft der Sonne im Lauf ihres Hauptreihenlebens langsam ändert. Das liegt daran, dass der Gasdruck in ihrem Inneren konstant bleiben muss, um der Gravitation entgegenzuwirken. Mathematisch ist der Gasdruck das Produkt aus Teilchendichte und Temperatur. Doch durch die Fusion von vier Wasserstoffkernen zu jeweils einem Heliumkern sinkt die Teilchendichte. Folglich steigt die Temperatur, und die Sonne wird alle 100 Millionen Jahre etwa 0,7 Prozent heller. Infolgedessen bleibt die Erde »nur noch« etwa 500 Millionen Jahre bewohnbar. Führt man sich aber vor Augen, dass dies 20 Millionen Menschengenerationen à 25 Jahre entspricht, während die moderne Menschheit erst etwa 8000 Generationen alt ist, so steht unsere Spezies erst am Beginn ihrer Entwicklung. Es liegt an uns, ob wir diese lange Frist nutzen.

Wenn im Kern des Sterns schließlich aller Wasserstoff zu Helium verbrannt ist, versiegt die Energieproduktion, und der Kern kollabiert erneut. Dabei heizt er sich weiter auf, bis Gasdruck und Gravitation wieder im Gleichgewicht sind. Durch die höhere Temperatur kann jetzt auch in der bisher inaktiven Wasserstoffhülle die Fusion zu Helium einsetzen. Dieses so genannte Schalenbrennen blht die äußere Hülle des Sterns auf: Er wird zum Roten Riesen. Nach einem Zehn-

»Die Erde bleibt noch etwa 500 Millionen Jahre bewohnbar«

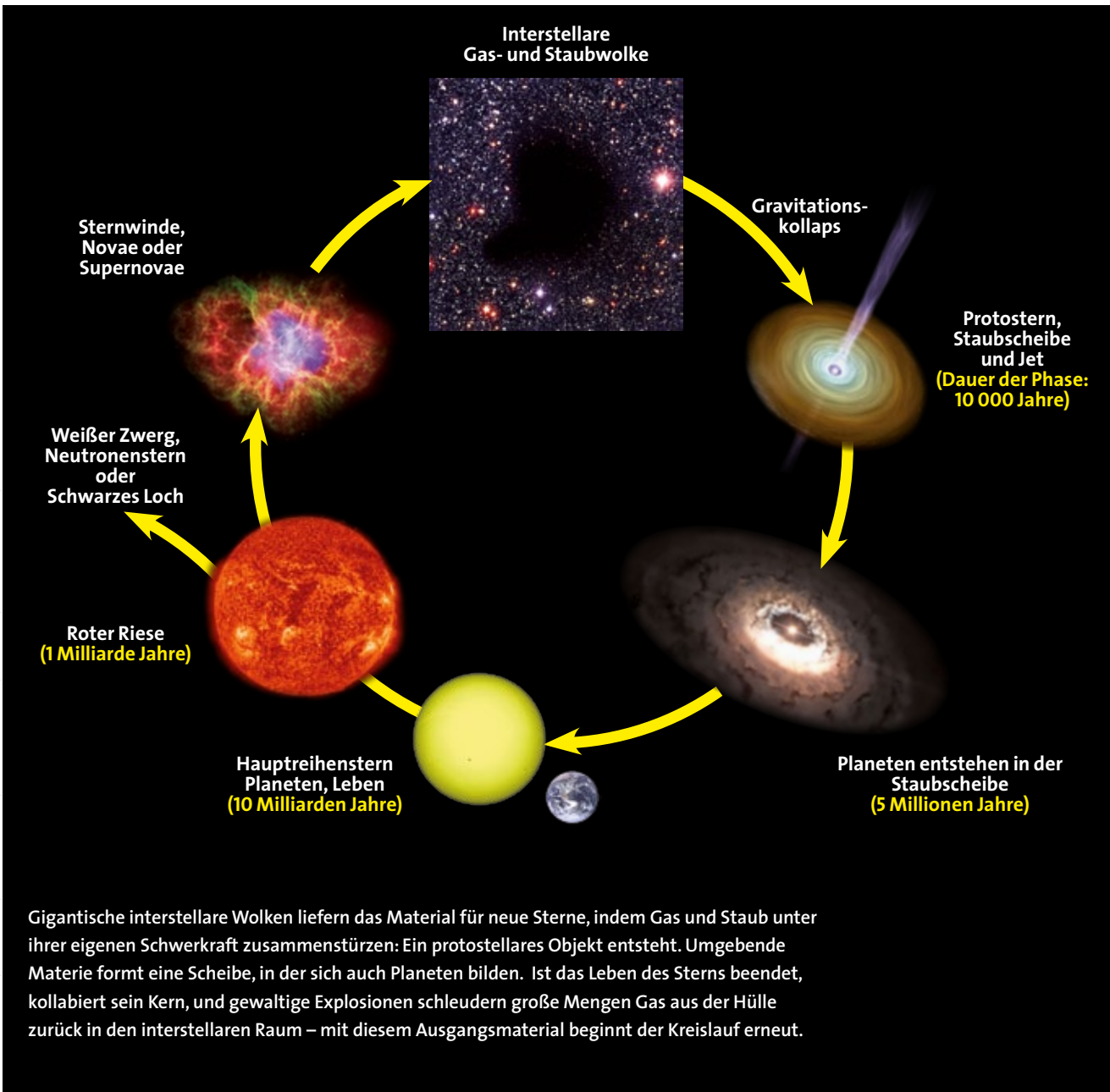


MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Kosmologie« finden Sie unter
www.spektrum.de/kosmologie

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: MACH: RAEL LAUNHARDT; FOTOS VON OBEN MITTE (IM UHRZEIGERSINN): ESO, NASA, JPL / CALTECH / SSC, ROBERT HURF, ESO / IUE, CALZADA, NASA, NASA, 4B + 5, NASA-SDO, B. KONIG, NASA, COCCASO, JEFF HESTER & ALISON LOULIN, BRADY L. BARNETT, NASA, JPL / CALTECH / UMINNESOTA, ROBERT GERZ.



tel der Hauptreihenlebensdauer übersteigt die Temperatur im jetzt mit Helium angereicherten Kern 100 Millionen Kelvin, und nun beginnt dort die Fusion von Heliumkernen zu Kohlenstoff und Sauerstoff. Diese neue Energiequelle, die sich nach einiger Zeit auch wieder in die Hülle ausbreiten wird, brennt nur noch relativ kurz, lässt den Riesenstern aber weiter anschwellen.

Etwa eine Milliarde Jahre nach Versiegen des Wasserstoffbrennens im Kern hat sich ein anfangs sonnenähnlicher Stern auf das über 150-Fache seines ursprünglichen Durchmessers ausgedehnt und leuchtet mehr als 2000-mal so hell. Da die Erde nur etwa 200 Sonnenradien von der Sonne entfernt ist, müsste sie dann in den oberen Atmosphärenschichten der roten Riesen Sonne liegen. Aber inzwischen wird der

Stern durch starke Sonnenwinde auch bis zu 30 Prozent seiner Masse verloren haben. Dadurch hat sich der Bahnradius der Erde derart vergrößert, dass sie diesem Schicksal wohl entkommen wird.

Wenn schließlich das Helium verbrannt ist, muss auch der Kohlenstoffkern kollabieren, und Druck und Temperatur steigen erneut. Bei sonnenähnlichen Sternen reicht das allerdings nicht mehr aus, um weitere Fusionsreaktionen zu zünden. Doch Sterne mit mehr als vier Sonnenmassen können dann Temperaturen von über 500 Millionen Kelvin erreichen und das Kohlenstoffbrennen starten, bei dem Kohlenstoffkerne mit Helium und miteinander fusionieren. Je massereicher ein Stern ist, desto schwerere Elemente kann er – bei immer höheren Temperaturen und immer schneller

ablaufenden Fusionsreaktionen – erzeugen und sich dabei zu einem Roten Überriesen aufblähen. Eindrucksvolle Beispiele dafür sind am Nachthimmel mit bloßem Auge sichtbar. Aldebaran, der helle Augenstern des Stiers, ist ein 67 Lichtjahre entfernter Roter Riese mit der 25-fachen Größe der Sonne. Ein sonnenähnlicher Hauptreihenstern in dieser Entfernung wäre mit bloßem Auge nicht mehr sichtbar. Betelgeuze, der linke rote Schulterstern des Orion, ist ein mehr als zehnmals weiter entfernter Überrieser mit 25 Sonnenmassen sowie der 660-fachen Größe und der über 50 000-fachen Leuchtkraft unserer Sonne.

Massereiche Sterne unterscheiden sich von masseärmeren vor allem durch ihre sehr viel schnellere Entwicklung sowie durch höhere Leuchtkraft und Temperatur. Ansonsten durchlaufen aber alle Sterne ähnliche Entwicklungsphasen. Dies ändert sich, wenn die Kernfusionsquellen im Inneren versiegen und der ausgebrannte Kern des sterbenden Sterns ein letztes Mal kollabiert. Welchen Endzustand der Kern dann erreicht und wie heftig dabei die verbleibende Hülle abgestoßen wird, hängt von der Masse des Riesensterns ab.

Die drei Tode der Sterne

Bei Sternen mit weniger als 1,4 Sonnenmassen wird der Kollaps des ausgebrannten Kerns am Ende durch einen quantenmechanischen Effekt gestoppt, der verbietet, dass zwei Elektronen den exakt gleichen Zustand einnehmen. So entsteht ein »entartetes Elektronengas«, das für Gegendruck sorgt. Was übrig bleibt, ist ein »Weißer Zwerg« von der Größe der Erde, aber mit einer Dichte von einer Tonne pro Kubikzentimeter. Weiße Zwerge stellen einen stabilen Endzustand der Sternentwicklung dar. Sie senden durch ihre Restwärme zunächst noch Licht aus, kühlen im Verlauf von Milliarden Jahren dann langsam aus und verblassen. Der uns nächste, nur mit dem Teleskop sichtbare Weiße Zwerg ist Sirius B – der Begleiter des hellsten Sterns am Nordhimmel, Sirius A.

Schwerere Sterne in dieser Leichtgewichtsklasse, wie beispielsweise unsere Sonne, stoßen während des vorangegangenen Riesenstadiums so viel Material ab, dass die Materiehülle vom Weißen Zwerg zum Leuchten angeregt und als so genannter Planetarischer Nebel sichtbar wird.

Oberhalb der Massengrenze von 1,4 Sonnenmassen, die der amerikanische Astrophysiker und Nobelpreisträger Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) theoretisch herleitete, hält selbst das entartete Elektronengas der Gravitation nicht mehr stand. Diese presst die Elektronen in die Atomkerne, und ein reines Neutronengas entsteht. Am Ende stoppt jedoch wiederum die Quantenmechanik den Kollaps durch den Druck des entarteten Neutronengases. Das Ergebnis ist ein Neutronenstern mit etwa 20 Kilometer Durchmesser und der unvorstellbaren Dichte von einer Milliarde Tonnen pro Kubikzentimeter. Der Kollaps setzt so viel Energie frei, dass die äußere Hülle des Sterns in einer gewaltigen Supernovaexplosion abgestoßen wird. Der Neutronenbeschuss in der Hülle erzeugt dort nun auch Elemente, die schwerer als Eisen sind.

Falls die Masse des ausgebrannten Riesensterns allerdings mehr als 3,2 Sonnenmassen betragen hat, rettet kein quantenmechanischer Effekt die letzten verbliebenen Elementarteilchen vor der zermalmenden Wirkung der Gravitation. Mit der Supernovaexplosion kollabiert der Kern zu einem Schwarzen Loch, zu einem bisher nur indirekt nachgewiesenen und theoretisch noch nicht vollständig verstandenen Gebilde, das durch seine enorme Schwerkraft sogar das Licht gefangen hält.

Erst wenn ein Stern erlischt, scheidet der stabile Endkern – ob Weißer Zwerg, Neutronenstern oder Schwarzes Loch – aus dem kosmischen Materiekreislauf aus. Im Lauf ihres aktiven Daseins geben die Sterne viel Material an den interstellaren Raum zurück; vor allem die massereichen Exemplare bilden große Mengen schwererer Elemente. Ausgehend von dieser ins All verstreuten Materie beginnt der Prozess von Werden und Vergehen erneut: Gewaltige Gaswolken kollabieren, und das Zusammenspiel von Gravitation und Rotation formt eine zirkumstellare Scheibe, in der sich aus Staub und Gas auch Planetenkerne und ihre Atmosphären bilden. Die Reibung der einstürzenden Materie erzeugt so viel Wärme, dass im Stern Kernfusionsprozesse zünden und ihn gegen die Gravitation stabilisieren – über so lange Zeit, dass auf geeigneten Planeten sogar Leben entstehen kann. Und daraus entwickelt sich mit unwahrscheinlich viel Glück eine Lebensform, welche die Faszination des Sternenhimmels zu begreifen und die spektakulären Prozesse, die ihn erschufen, allmählich zu erklären vermag. ~

DER AUTOR



Ralf Launhardt studierte Physik und Astronomie an der Universität Jena und promovierte dort 1996 über Probleme der Sternentstehung. Nach Forschungsaufenthalten am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und am California Institute of Technology in Pasadena ist er nun am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg tätig.

QUELLEN

Armitage, P. J.: A Trap for Planet Formation. In: *Science* 340, S. 1179–1180, 2013

Young, E. T.: Die Geburt der Sterne. In: *Spektrum der Wissenschaft* 2/2011, S. 46

WEBLINKS

www.spektrum.de/alias/videos-aus-der-wissenschaft/50-der-lebensweg-der-sterne/1155273
Video eines Vortrags von Ralf Launhardt

www.almaobservatory.org/en/press-room/press-releases/600-dust-trap-around-distant-star-may-solve-planet-formation-mystery
Pressemittteilung über die Entdeckung einer »Staubfalle« als möglicher Planetenkeim

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199288



Teleskope und Ferngläser

■ Omegon Einsteigerteleskope

Die Teleskope von Omegon sind gerade für den Einstieg in die Astronomie besonders zu empfehlen. Unsere Marke Omegon steht für ausgewählte Produkte und geprüfte Qualität zum kleinen Preis, oft günstiger als vergleichbare Modelle anderer Marken.



Unser Kauf Tipp

	Artikel-Nr.	Preis
¹ 60/700 AZ-1	11267	69,90 statt 79,-
² 114/900 EQ-1	11266	159,-
³ 130/920 EQ-2	13762	199,-
⁴ 150/750 EQ-4	22465	349,-

■ Omegon Nightstar 20x80

Ein sehr schönes Fernglas, mit hoher Auflösung. Mit 80mm Öffnung sammelt es fast 20% mehr Licht als eine 70mm Öffnung. Erkennen Sie mehr Himmelsobjekte und entdecken somit weit entfernt liegende Galaxien und Einzelsterne. Nicht selbstverständlich ist eine volle Multivergütung auf allen optischen Flächen, aber bei dem 20x80 ist auch dies gegeben. Damit haben Sie eine hervorragende Bildhelligkeit bei hohem Kontrast.



Artikel-Nr.: 12461 Preis: 129,-

■ Omegon Nightstar 25x100 mit Tasche

Das Omegon Nightstar 25x100 ist ein leistungsfähiges Großfernglas für Naturbeobachtungen und ein lichtstarkes Instrument für astronomische Übersichtsbeobachtungen. Es eignet sich aufgrund der eingebauten Filtergewinde auch ausgezeichnet für großflächige Nebelregionen. Es bietet mit 4mm Austrittspupille auch dem Naturbeobachter bei zunehmender Dämmerung eine helle und kontrastreiche Abbildung. Durch überdimensionierte BaK-4 Prismen ist eine große Ausleuchtung gewährleistet.



Artikel-Nr.: 14698 Preis: 299,-

Empfehlungen

■ Kosmos Himmelsjahr 2013

Dieses Jahrbuch beinhaltet alle Mondphasen, einen monatlichen Überblick von Planeten, Sternbildern und besondere Ereignisse am Firmament sowie Berichte über astronomische Phänomene und die Rätsel des Weltalls.



Artikel-Nr.: 25453 Preis: 16,99

■ Oculum Verlag Fernrohr Führerschein in 4 Schritten

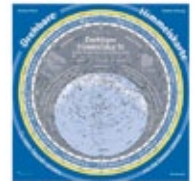
Dieses Buch bringt anfangersfreundlich alle Antworten auf Fragen rund um die Optik, Mechanik und Benutzung eines astronomischen Teleskops. Erstmals wurden alle wichtigen Definitionen und Formeln zur Fernrohrtechnik zusammengefasst.



Artikel-Nr.: 1486 Preis: 16,90

■ Oculum Verlag Drehbare Himmelskarte

Diese drehbare Sternkarte ist ein Basis-Instrument für das Hobby Astronomie. Hiermit lernen Sie umfassend den kompletten Sternenhimmel kennen.



Artikel-Nr.: 4893 Preis: 14,90

■ Sega Toys Homestar Planetarium

Holen Sie sich 60.000 funkelnde Sterne vom Himmel an Ihre Zimmerdecke. Stellen Sie sich vor Sie könnten den Sternenhimmel beobachten während Sie bequem auf der Couch sitzen. Mit Homestar, dem hochauflösenden 3 Watt LED Heimplanetarium mit Rotationsbewegung, das das Bild des Himmelsgewölbes dem Jahresverlauf getreu wiedergibt, wird dieser Traum Wirklichkeit.



Artikel-Nr.: 26925 Preis: 119,-

Persönliche Beratung

@ Service@Astroshop.de

+49 8191 94049-1

+49 8191 94049-9

Astroshop.de
c/o nimax GmbH
Otto-Lilienthal-Str. 9
86899 Landsberg am Lech
Direkt an der A96 und B17,
ca. 30min von Augsburg
und München.

Damit wir uns genug Zeit für Sie nehmen können, rufen Sie bitte immer vor Ihrem Besuch bei uns an und vereinbaren einen Termin. >>Danke<<

Wir sind Mo-Fr von 9-17 Uhr und jeden 1. Sa im Monat von 10-16 Uhr für Sie da!

Immer der Sonne entgegen

Ein scheinbar harmloses Wandervorhaben entwickelt sich zum komplexen geografisch-astronomischen Problem.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»Wo käm' man da eigentlich hin? Wenn man immerfort ›Der Sonn' entgegen‹ ginge?« »Von morgens an? – Na, da würd's' De Abends wieder am Ausgangspunkt sein.«

So einfach ist es denn doch nicht, wie auch die Freunde in Arno Schmidts Erzählung »Der Sonn' entgegen« bei näherer Betrachtung schnell feststellen. Die Probleme beginnen schon vor der Haustür: Sieht man von dort aus überhaupt, wo am Morgen die Sonne aufgeht? Und müsste man nicht allerlei Hindernisse überwinden, wenn man direkt auf sie zusteuern wollte?

Befreien wir uns darum gleich von materiellen Hürden und gehen das Unternehmen mit dem Finger auf der Landkarte an. In der Physik gelangt man ohnehin nur dann zu allgemein gültigen Gesetzen, wenn man sich auf möglichst einfache, idealisierte Situationen beschränkt. Wir starten in Gedanken bei Sonnenaufgang und gehen mit kons-

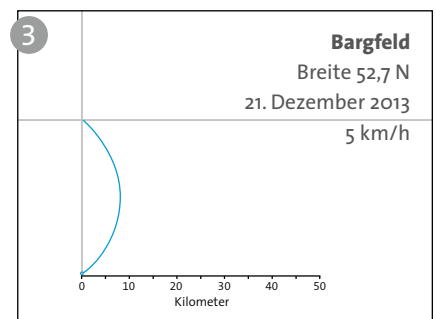
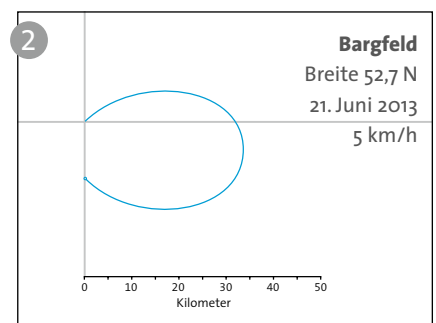
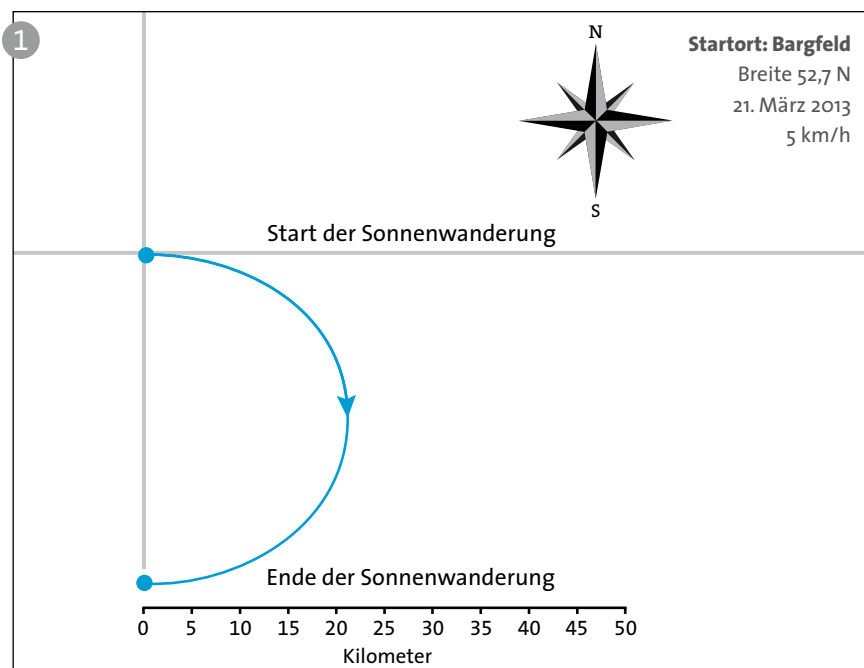
tantem Tempo immer auf die Sonne zu. Demnach ginge man zuerst nach Osten, holte dann nach Süden aus und wanderte schließlich nach Westen (❶). Das klingt zunächst nach einem Halbkreis.

Aber die Krümmung des Wegs ist nicht stets dieselbe, obwohl sich die Sonne gleichmäßig auf ihrer Bahn bewegt. Während sie am Morgen aufsteigt, ändert sie ihre Richtung nur wenig. Gegen Mittag, wenn sie nahezu horizontal zu ihrer südlichsten Position wandert, ist ihre Richtungsänderung pro Zeiteinheit am größten. Schließlich, während sie genau im Süden ihren höchsten Punkt einnimmt, erreichen wir den östlichsten Punkt unserer Wanderung. Ab jetzt sinkt die Sonne dem westlichen Untergangspunkt zu. Entspre-

Wer recht in Freuden wandern will,
der geh' der Sonn' entgegen.

Emanuel Geibel (1815–1884)

Was geschieht, wenn wir einen Tag lang der Sonne entgegenlaufen? Starten wir im Heidedorf Bargfeld, langjährige Heimat Arno Schmidts (1914–1979), der diese Frage einst in einer Erzählung aufwarf. Zu Frühlingsbeginn wandern wir genau nach Osten, drehen uns allmählich gen Süden und kehren schließlich in westlicher Richtung zurück (❶). Zum Sommer hin wandern wir hingegen nach Nordosten los, holen weit nach Süden aus und sehen die Sonne schließlich im Nordwesten untergehen (❷). Am wenigsten gekrümmt verläuft der Weg zu Winterbeginn (❸). Jenseits heimischer Gefilde werden die Pfade wunderlicher. Bei 23,5 Grad Nord zu Sommerbeginn scheint man zunächst auf demselben Weg zurückzukehren. Doch dann gabelt sich dieser unerwartet (❹).





Wer der Sonne einen Tag lang stets entgegenlaufen will, muss nicht nur Hindernisse einplanen. An manchen Sommertagen wäre er 16 Stunden und mehr unterwegs, bevor sie hinter dem Horizont versinkt.

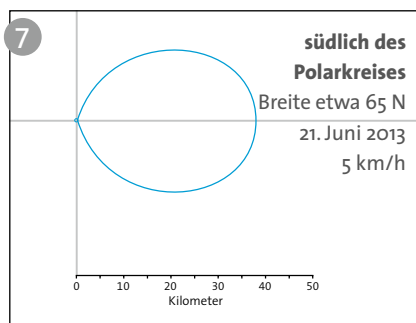
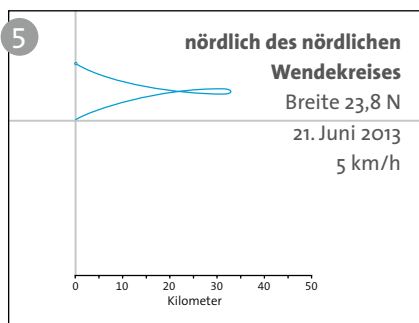
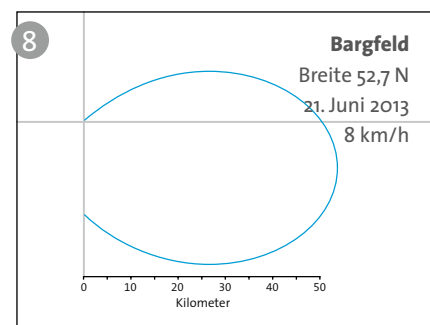
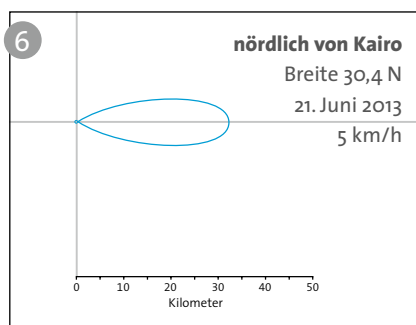
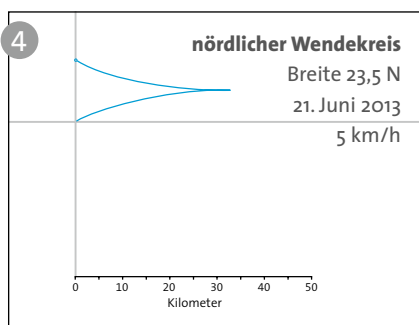
chend krümmt sich unser Weg nach Westen zurück, erst stärker, dann immer schwächer. Wir laufen also keinen Halbkreis ab, sondern ein halbes Oval.

Übrigens durchkreuzt zumindest in der wärmeren Jahreszeit auch die lange Zeitspanne zwischen Sonnenauf- und -untergang den Plan, selbst loszuwandern. Am 20. März wäre man von Bargfeld aus, der langjährigen Heimat Arno

Schmidts, genau zwölf Stunden unterwegs und hätte bei einer typischen Wandergeschwindigkeit von fünf Kilometern pro Stunde einen Weg von 60 Kilometer zurückzulegen. Erreicht die Sonnenscheindauer im hiesigen Sommer 16 und mehr Stunden, kapituliert wohl selbst der strammste Wanderer.

Will man einen Sonnenpfad nachzeichnen, muss man aber so oder so

raus ins Freie und sich einen sonnigen Platz mit freien Horizonten suchen. Dort richtet man eine Wanderkarte (Maßstab 1:50000) nach Norden aus, hält den Startpunkt auf ihr fest und markiert schließlich zu jeder vollen Stunde den Punkt, den man wandernd erreicht hätte. Dieser lässt sich mit einem dünnen Stift feststellen, den man in einem Zentimeter Entfernung, ent-



Noch seltsamer wird es, wenn man knapp nördlich des Wendekreises auf einer Schleife wandert (5). Bequeme starten etwa bei 30,4 oder 65 Grad: Dann kehren sie genau zum Ort ihres Aufbruchs zurück (6, 7). Man kann auch schneller laufen, dann holt man aber nur weiter aus (8). Wer hingegen fliegt, tut das nicht bei konstanter Breite, und bringt dadurch weitere Wegformen ins Spiel.

sprechend fünf Kilometern, senkrecht aufstellt – und zwar genau so, dass sein Schatten auf den vorhergehenden Punkt fällt. Der neue Punkt ist dann wieder Ausgangspunkt für den nächsten Streckenabschnitt.

Tatsächlich ist niemand mehr auf den Gang in die Natur angewiesen, um solche Experimente durchzuführen. Programme wie jenes von Jürgen Giesen auf www.jgiesen.de/pursuit erledigen das für uns. Außerdem berechnen sie, wie der Sonnenweg zu anderen Jahreszeiten, in nördlicheren oder südlicheren Gefilden und bei unterschiedlichen Wandergeschwindigkeiten aussehen würde. Was sie quantitativ leisten, kann man sich jedoch auch einfach selbst überlegen. Zum Frühlingsanfang beispielsweise startet man genau gegen Osten (☉). Im Verlauf des Frühlings verschiebt sich die Startrichtung dann immer mehr nach Nordosten. Man geht also in einem stark gerundeten Bogen, der nach Süden ausholt und schließlich in nordwestliche Richtung weist (☺). Zu Herbstbeginn verläuft der Weg wie am Frühlingsanfang. Noch später im Jahr läuft man immer mehr in südöstlicher Richtung los und geht nachmittags dem Sonnenuntergang in südwestlicher Richtung entgegen. Bei Winteranfang ist die Wegform am flachsten (☻).

Übrigens könnte man sich jeweils die halbe Strecke sparen, wollte man nur deren Form wissen. Denn natürlich überträgt sich die Symmetrie der Sonnenbahn mit der Kulmination am Mittag auf den Wanderweg, der nachmittägliche Weg ist also genau spiegelbildlich zu dem Pfad, den man am Vormittag zurücklegt. Während ambitionierte Wanderer ihre Stiefel trotzdem nicht schon mittags ausziehen werden, sind solche Symmetrieargumente für Physiker durchaus reizvoll.

Je weiter man sich zu einer Sommer-sonnenwanderung in südliche Breiten begibt, desto steiler steht die Sonne mittags am Südhimmel. Wer eine entsprechende Tour am Äquator durchführt, erblickt die Sonne aber schon im Norden. Dazwischen muss es also einen Breitenkreis geben, wo die Sonne im Lauf des Vormittags senkrecht nach

oben steigt, bis sie mittags im Zenit genau über uns steht.

Doch dies gilt nur an einem Tag des Jahres, und auch an diesem nur für einen Moment. Denn die Sonne dreht sich unaufhörlich weiter, je nach Jahreszeit in Richtung Norden oder Süden. Sonst könnte man an diesem Tag in exakt gerader Linie auf die Sonne zulaufen – und auf demselben Weg wieder zurückgehen. Tatsächlich verläuft der Weg keineswegs so linear. Startet man am 21. Juni auf dem nördlichen Wendekreis, der auf der Breite 23,5 Grad liegt, so kehrt man nach Mittag zunächst auf etwa demselben Weg zurück; mit der Zeit laufen die Wege dann aber doch auseinander (☉). Zwischen Start- und Zielpunkt liegen schließlich rund 13 Kilometer.

Start = Ziel: Routen für Bequeme

Noch kurioser wird es, wenn wir am 21. Juni etwas nördlich des Wendekreises starten und der Weg zu einer Art Schleife entartet: Während wir am späten Nachmittag in nordwestliche Richtung zurückgehen, kreuzen wir den Weg, den wir am Vormittag gegangen sind (☉).

Schon aus praktischen Gründen drängt sich die folgende Frage auf: Gibt es Möglichkeiten, die Wanderung dort zu beenden, wo man morgens losgelaufen ist? Wer etwas nördlich des Wendekreises startet, kommt noch weiter im Norden an. Wer in unseren Breiten losläuft, kommt südlicher an. Dazwischen muss es also einen Weg geben, auf dem wir genau zu unserem Startpunkt zurückkämen. Seine Breite liegt am 21. Juni bei 30,4 Grad (☉). Im hohen Norden tritt das Phänomen ebenfalls auf: Auch bei etwa 65 Grad, also nahe dem Polarkreis, ist man abends wieder da, wo man morgens aufgebrochen ist (☉).

Bislang haben wir uns bei unseren virtuellen Wanderungen auf Geschwindigkeiten beschränkt, die sich zu Fuß bewältigen lassen. Steigen wir aber ins Flugzeug, ergeben sich ganz neue Perspektiven, denn dann schlagen die Veränderungen von geografischer Länge und Breite, die wir bei einem Fußmarsch näherungsweise als konstant

ansehen konnten, voll zu Buche. Da sich das Flugzeug der Sonne noch etwas schneller »entgegen dreht« als die Erde selbst, würde sich beim Flug nach Osten der Aufstieg der Sonne zum Zenit spürbar beschleunigen, während sich in Gegenrichtung der Sonnenuntergang entsprechend verzögerte. Richtig kompliziert wird der Sonnenweg dadurch, dass sich in der Zwischenzeit auch der jeweils überflogene Breitengrad ganz erheblich verändern würde.

Der Sonn' »immerfort« entgegenzuwandern, erweist sich also mehr als intellektuelle Tätigkeit denn als romantische. Schon Arno Schmidt sah bei näherer Betrachtung erhebliche Probleme voraus, weil »astronomischerseits ... Begriffe wie Exakter Sonnenauf- und -untergang; Morgen- beziehungsweise Abendweite reichlich ins Spiel (kommen); von Azimuth, Höhe, MEZ, Zeitgleichung ... ganz zu schweigen«. ☺

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.

QUELLEN

Schmidt, A.: Der Sonn' entgegen. In: Schmidt, A.: Orpheus. Erzählungen. Fischer, Frankfurt 1970, S. 95ff
Schuppar, B.: Der Sonn' entgegen – Ein mathematisch-astronomisches Problem, gestellt von Arno Schmidt. In: Didaktik der Mathematik 20, S. 89–111, 1992

LITERATURTIPP

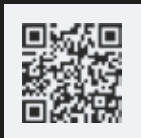
Finkenzeller, U.: Sterne und Wortraum Arno Schmidts. In: Sterne und Weltraum 8/2007, S. 48–54
Kenntnisreich geht der Autor den astronomischen Bezügen in Arno Schmidts Werk auf den Grund.

WEBLINKS

www.jgiesen.de/pursuit
 Arno Schmidts Problem, mathematisch mit Hilfe eines Java-Applets gelöst

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1194966

MONTAG IST FOCUS TAG. SONNTAG JETZT AUCH! FOCUS MAGAZIN APP FÜR ABONNENTEN GRATIS.



Jetzt den digitalen **FOCUS** kaufen oder als Abonnent des **FOCUS** Magazins gratis downloaden.

Exklusive Inhalte, spektakuläre Bilder, hoher Nutzwert: Erleben Sie Deutschlands großes Nachrichtenmagazin auf dem Tablet – bequem und schnell schon sonntags ab 8 Uhr. Lesen Sie außerdem gratis jede Woche das Inhaltsverzeichnis, bevor Sie eine Ausgabe herunterladen. Einfach QR-Code scannen oder direkt auf www.focus.de/magazin/digital



Das Entscheidende im

FOCUS

Auf den Inseln des Hawaii-Archipels hatte sich die ursprünglich wenig differenzierte polynesische Gesellschaft in drei streng voneinander getrennte Klassen aufgespalten. Häuptlinge wie dieser 1819 abgebildete repräsentierten die Elite, doch gab es auch von ihnen noch neun verschiedene Ränge.



Dessiné par S. Lery et gravé par J. B. Leveque.

Gravé par Leveque et Fortet.

ÎLES SANDWICH. UN OFFICIER DU ROI EN GRAND COSTUME.

HAWAII

Gottkönige im Inselparadies

Auf dem Archipel von Hawaii könnten sich ab dem 14. Jahrhundert echte archaische Staaten entwickelt haben – die letzten in der Weltgeschichte.

von Patrick Vinton Kirch

Kauapo liegt im Schatten des Haleakalā, einem 3055 Meter hohen Vulkan auf der Insel Maui des Hawaii-Archipels. Heute ist es ein verschlafenes Dorf, dessen Einwohner meist von der Viehhaltung leben. Um 1710 jedoch war Kauapo der Sitz des Häuptlings Kekaulike, eines Nachfahren des großen Piilani, der die Inselgruppe um 1570 erstmals vereint hatte. Als James Cook 1778 als erster Europäer dort eintraf, war sie aber längst wieder in vier rivalisierende Herrschaftsbereiche zerfallen, von denen die größten Hawaii und Maui waren (siehe Karte S. 65).

Historikern und Ethnologen gelten diese politischen Gebilde meist als Häuptlingstümer, eine in der von Polynesiern besiedelten Inselwelt des Pazifiks meist auch zutreffende Einordnung. Meines Erachtens aber hatten sich zumindest auf den beiden großen Inseln des Hawaii-Archipels bereits archaische Staaten entwickelt, also komplexere gesellschaftliche und politische Strukturen, wie wir sie aus dem alten Ägypten oder dem Inkareich kennen. Diese beiden Beispiele zeigen auch schon, warum die genaue Kategorisierung keine akademische Haarspalterei ist: Sämtliche archaische Staaten, die wir kennen, sind lange vergangen und lassen sich nur anhand von archäologischen Befunden oder schriftlichen Überlieferungen studieren.

Dokumentation der Kultur

Auf den Inseln des Hawaii-Archipels hingegen blieben die Traditionen nach dem Eintreffen der Europäer noch gut 40 Jahre lang intakt. Daher liegen zahlreiche Texte vor, um den Prozess der frühen Staatenbildung zu verstehen. Neben den Berichten der ersten Europäer gehören dazu vor allem von Einheimischen verfasste Chroniken. Die evangelischen Missionare veränderten zwar die angetroffene Kultur, förderten andererseits aber ihre Dokumentation, unter anderem durch die Einführung eines vereinfachten Alphabets. Eine dritte Möglichkeit bieten Verwaltungsunterlagen, da das traditionelle System der Landverteilung und Tributzahlung beibehalten wurde. Hinzu kommen schließlich noch ethnologische Studien ab dem späten 19. Jahrhundert sowie die in jüngerer Zeit unternommenen linguistischen Analysen sowie archäologische Surveys und Grabungen.

Von dem Missionsschüler Samuel Manaiakalani Kamakau, dessen Werk »Herrschende Häuptlinge von Hawaii« als wichtige Quelle dient, wissen wir, dass Kekaulike Anfang des

18. Jahrhunderts auf Maui »luakini heiaus« baute, also Tempel (»heiau«) für den gefürchteten Kriegsgott Ku. Solche Anlagen waren häufig massive Strukturen aus Trockenmauerwerk, mit hölzernen Skulpturen, Plattformen, Türmen und anderen Aufbauten mehr (siehe Bild S. 66). Kamakau überliefert ebenfalls, warum Kekaulike solchen Aufwand trieb: Er beabsichtigte nichts weniger als die Eroberung der »Großen Insel«, also des Nachbarn Hawaii selbst. Zu diesem Zweck hatte er eine gewaltige Armee und eine Flotte von Kriegskanus aufgestellt.

Einer der von Kekaulike gebauten »luakini« mit Namen Loa Loa ist Forschern gut bekannt. Es handelt sich um eine rechteckige Steinplattform mit einer Grundfläche von fast 4200 Quadratmetern und einer terrassierten Vorderseite, die sich gut neun Meter über dem Boden erhebt. Kamakau berichtete noch von einem zweiten Tempel namens Kanemalohemo, dessen Lage auf einem von Sträuchern überwucherten Hügel zwar bekannt war, der aber nie untersucht worden war.

Mein Student Alex Baer führte vor wenigen Jahren im Rahmen seiner Dissertation an der University of California in Berkeley eine Geländebegehung in Kauapo durch. Vor seinem Abflug nach Maui gab ich ihm den Auftrag, die Ruinen von Kanemalohemo zu finden. Ein paar Wochen später kam ich nach. Noch während ich mein Gepäck auf den Rücksitz des Jeeps schwang, versicherte er mir: »Du wirst begeistert sein.« Wenige Stunden später tauchten wir hoch über der Bucht von Mokolau in die tropische Vegetation ein und folg-

AUF EINEN BLICK

VOM HÄUPTLING ZUM GOTTKÖNIG

1 Polynesishe Einwanderer erreichten um das Jahr 1000 den hawaiianische Archipel. Fast 400 Jahre standen sie noch in kulturellem Austausch mit der Heimat, dann brach der Kontakt ab.

2 Ursprüngliche kulturelle, politische und religiöse Merkmale wurden teilweise bewahrt, teilweise aber auch eigenständig weiterentwickelt. Dabei entstanden neue Gesellschaftsschichten, die durch ein System von Ritualen und Tabus strukturiert waren.

3 Insbesondere regierten nicht mehr einfache Häuptlinge die Stämme, sondern Gottkönige, denen jeweils ein gut organisierter Hofstaat, hauptamtliche Priester und ein Heer aus Berufskriegern zur Seite stand. Nach Ansicht des Autors sind dies bereits Kennzeichen eines so genannten archaischen Staats.

ten einem Pfad, den Baer gemeinsam mit der Studentin Kris Hara einige Tage zuvor geschlagen hatte.

Bald erreichten wir eine kleine, von einem Lichtnussbaum überschattete Lichtung. Vor uns erhob sich eine massive Mauer, auf der das Moos seit Jahrhunderten ungestört wuchs. »Dieses Ding ist riesig«, staunte ich. Baer nickte. »Und das ist nur eine der äußeren Terrassen. Warte, bis du auf dem Hauptbau stehst!«

Wir verbrachten Stunden damit, die Ruinen zu erkunden, die sich über fast zwei Hektar Hügelland verteilten. Meine Kollegen hatten die wichtigsten Mauern und Terrassenoberflächen mit ihren Macheten freigelegt. Wir kämpften uns zu einem Hof vor, der mit Zigtausenden von Kieseln gepflastert war, die man offenbar vom Strand hier hinaufgeschleppt hatte – sie waren vom Wasser rund geschliffen. Dann kletterten wir auf eine kleine, gepflasterte Terrasse, von der aus man die Bucht überblickte. Ich stellte fest, dass sie von einer Steinwand abgestützt wurde, die steil in Richtung Küste abfiel, und deren Form an ein umgedrehtes V erinnerte. Sogleich hatte ich das Bild eines Kanus im Kopf, dessen Bug meinem Kompass zufolge anscheinend auf Waipio ausgerichtet war, der Residenz der Gottkönige von Hawaii, der Erzrivalen und gleichzeitig Blutsverwandten Kekaulikes. Ob er einst auf dieser Plattform saß, mit überkreuzten Beinen auf bequemen Matten, und eine Strategie für die Eroberung überlegte?

»Der Hawaii-Archipel war der letzte Ort auf Erden, an dem sich aus Häuptlingstümmern archaische Staaten entwickelt haben«, dozierte ich abends beim Barbecue. »Denn genau wie etwa in den frühen Zivilisationen Mesopotamiens oder Ägyptens gab es Gottkönige, ein formelles Priesteramt und deutlich unterschiedene Klassen von Volk und Elite.«

Viehzucht als Vorratshaltung

Während der Abend voranschritt und das Feuer langsam niederbrannte, unterhielten wir uns darüber, wie neuere Forschungen die Ansichten über die Entwicklung der hawaiischen Gesellschaft verändern. Die Polynesier dürften die Inselgruppe um das Jahr 1000 erreicht haben. An Bord ihrer Kanus waren Nutzpflanzen wie Taro und Yams, Nutztiere wie Schweine, Hühner und Hunde, die ebenfalls gegessen wurden. Tatsächlich ist die Aufzucht von Vieh und Geflügel die einzige Möglichkeit im subtropischen Klima der paradiesisch anmutenden Inseln Nahrung auf Vorrat zu halten, da alle Feldfrüchte schnell faulen.

Die älteren Vulkaninseln Oahu und Kauai lieferten ideale Bedingungen für den Bewässerungsfeldbau, denn es gab Quellen und Flüsse. Kanäle und Becken wurden in die Felsen geschlagen und Terrassen angelegt, um darauf Taro anzubauen, ein Aronstabgewächs, das ein stärkehaltiges Rhizom bildet. Auf den fruchtbaren vulkanischen Böden der jüngeren Inseln pflanzte man Yams und Süßkartoffeln. Die Riffe und küstennahen Gewässer lieferten ebenfalls Nahrung, doch auch hier boten die älteren Inseln mehr Möglichkeiten, was die Bewohner Hawaiis beispielsweise durch Fischbecken auf den Riffdächern wettmachten.

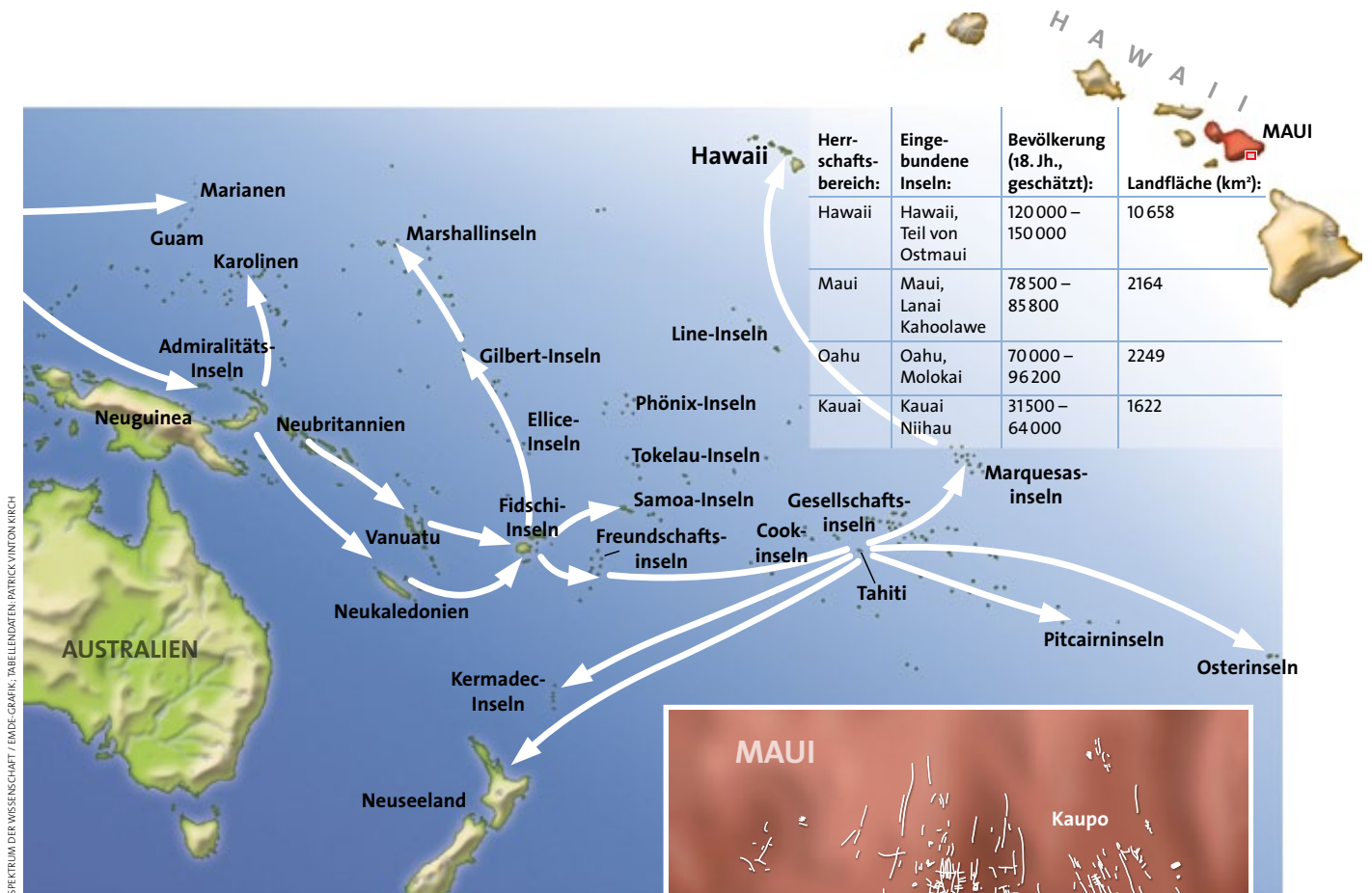
Zwei oder drei Jahrhunderte lang hielten die Kolonisten Kontakt zu den Heimatinseln, wie Überlieferungen vermuten lassen. Auf traditionellen Festen werden heute noch die Fahrten berühmter Häuptlinge nachgespielt. Das waren abenteuerliche Leistungen, denn zwischen dem Land der Vorfahren Kahiki – dem heutigen Tahiti – und Hawaii liegen mehr als 4200 Kilometer Ozean. Gegen Ende des 14. Jahrhunderts jedoch endeten diese Reisen aus unbekanntem Grund, und die kulturelle Entwicklung auf dem Archipel verlief unabhängig von der anderer polynesischer Gesellschaften.

Um 1400 hatte die Bevölkerung die günstigsten ökologischen Zonen dicht besiedelt, besonders die von Bächen durchzogenen Täler. Nun wurden auch die trockeneren, windgeschützten Gebiete erschlossen, etwa die weiten Hügellandschaften von Kohala und Kona auf der Insel Hawaii oder die vergleichbaren Regionen Kahikinui und Kaupo auf Maui. Obwohl die Bauern dort auf ergiebige Regenfälle angewiesen waren, sorgten die fruchtbaren vulkanischen Böden für gute Süßkartoffel- und Taroernten bis hin zur Überschussproduktion. Bei seiner Geländebegehung entdeckte Baer, dass auch Kaupo einst von Steinwällen und Dämmen für die Landwirtschaft durchzogen war. Dieses Feldsystem lieferte Kekaulike die Mittel, seine Armee aufzustellen.

Alle polynesischen Gesellschaften kannten verschiedenrangige Häuptlinge, »ariki« beziehungsweise in der hawaiische Variante »ali'i« genannt. Anfangs waren das wohl nur Angehörige höher gestellter Familien, die Erstgeborenen der Erstgeborenen. Später jedoch, als das Archipel nicht mehr tausende, sondern zehntausende Bewohner zählte, begannen die ali'i untereinander zu konkurrieren. Feiner abgestimmte Grade entwickelten sich, bis sich schließlich neun Eliteränge etabliert hatten.

Gleichzeitig vergrößerten sich die Unterschiede zwischen Häuptlingen und Gemeinen. Zur Zeit der ersten Kontakte mit Europäern lautete das auf Hawaii verwendete Wort für Volk »maka'ainana«. Es hat ebenfalls polynesishe Wurzeln, bedeutete ursprünglich aber die Gesamtheit der Nachfahren eines Vorfahren. Der Begriff beschrieb also eine Gruppe Verwandter mit gemeinsamem Territorium und Bewirtschaftungsrechten. Auf dem hawaiianischen Archipel aber wurde daraus das gemeine Volk, das alle Güter produzierte – für die Elite. In den ursprünglichen polynesischen Gesellschaften besaßen alle Nachkommen des mythischen Ahnen das Recht auf die Nutzung von Land und Fischereigründen. Im Hawaii des 18. Jahrhunderts jedoch gehörten weitläufige Gebiete, »ahupua'a« genannt, allein hochrangigen Häuptlingen. Ali'i von geringerem Rang verwalteten diese Besitztümer, Angehörigen des Volks wurden Grundstücke zur Bearbeitung zugewiesen; im Gegenzug hatten sie dafür Tribute zu entrichten. Heiraten zwischen den beiden Klassen waren strikt verboten. Einzige Ausnahme: Ein Angehöriger der Elite durfte besonders schöne junge Frauen aus dem Volk zur Zweitfrau oder Konkubine nehmen.

Es gab sogar eine dritte Klasse: die Ausgestoßenen. Möglicherweise mussten diese Entrechteten als Sklaven schuften,

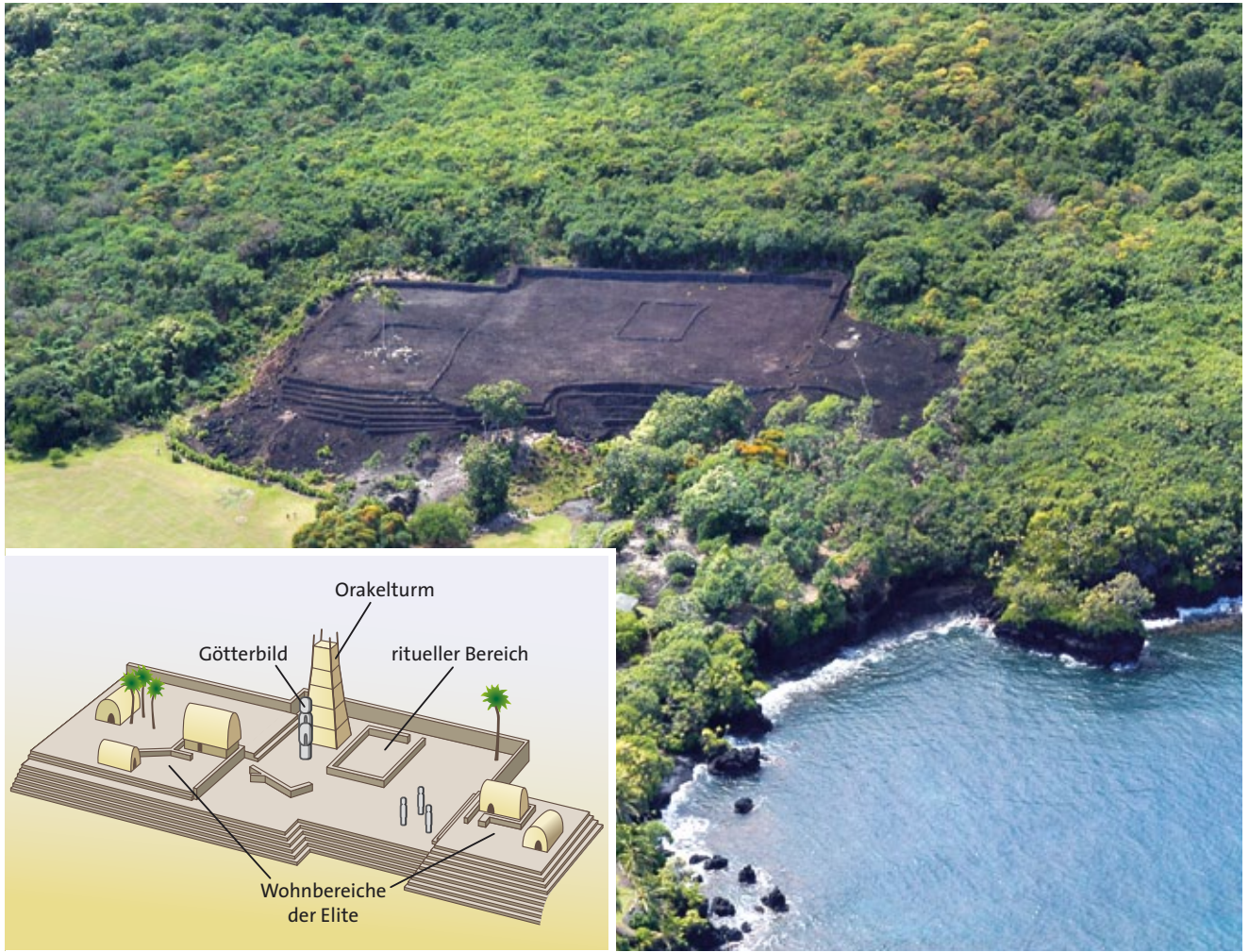


Der Hawaii-Archipel wurde als letzte Inselgruppe von Polynesiern besiedelt. Im 18. Jahrhundert konkurrierten dort vier Herrschaftsbereiche. Mauern und Bewässerungsgräben – im Bild rechts als Striche erkennbar – zeugen von intensiver Landwirtschaft, hier in der Kaupo-Region auf Maui.

aus ihren Reihen wurden auch Menschen zur Opferung ausgesucht. Eine Möglichkeit, aller Rechte verlustig zu gehen, war der Verstoß gegen ein »kapu«. Alle Angehörigen der Elite hatten dafür Sorge zu tragen, dass »mana«, die göttliche Kraft auf Erden wirksam wurde. Ein System von »kapus« – rituellen Vorschriften und Verboten – sollte dafür sorgen, dass dies ohne Störungen möglich war. Beispielsweise durften die Angehörigen der beiden höchsten Eliteklassen nur von denen der beiden nächsten betrachtet werden, doch mussten diese sitzen. Dabei war es selbst den meisten Hochrangigen und erst recht einem Gemeinen bei Todesstrafe verboten, einen Häuptling vom Rang Kekaulikes anzusehen. Denn Kekaulike war ein »ali'i akua« – ein König, der seine Abstammung auf die Götter zurückführte und als ihr direkter Mittler fungierte. Träger dieses Amtes waren beispielsweise für die Fruchtbarkeit ihres Volks verantwortlich. Ließ es sich nicht vermeiden, ihren Weg zu kreuzen, warf man sich mit dem Gesicht zum Boden. Andernfalls drohte die sofortige Exekution. Um ihre Blutlinie sauber zu halten, war es Gottkönigen erlaubt, eine Schwester oder – wie Kekaulike es tat – eine Halbschwester zu schwängern.

Dieses System existierte in seinen Grundzügen in der polynesischen Welt schon seit Jahrhunderten. So war es Aufgabe der Anführer das »mana« durch Rituale zu kanalisieren. Beispiel dafür war die Darbringung der ersten Yams-Ernte nachdem die Plejaden erstmals nach Sonnenuntergang am Horizont sichtbar wurden. Diese Rituale wie auch jene Personen, die sie durchführten, mussten geschützt werden – sie waren »tapu«. Dieses Konzept wurde auf Hawaii schließlich zum »kapu«-System ausgebaut, das ausgefeilte Protokolle und Verbote umfasste.

Die Rituale wurden stets in heiligen Häusern abgehalten, die ursprünglich wohl auch die Wohnstätten der Anführer waren. Auf der dem Meer zugewandten Seite lag ein offener Platz, wo beispielsweise psychoaktive Pflanzen für den kultischen Gebrauch zubereitet wurden. Das Haus selbst stand auf einem Hügel, in dem oft die Ahnen begraben lagen. Holzpfeiler im Haus repräsentierten Gottheiten und Vorfahren. Im östlichen Polynesien entwickelte sich diese Architektur weiter zu einem umfriedeten Hof, oft auf einer Steinplattform gelegen, die Pfeiler wurden durch Bildnisse ersetzt. Das wohl berühmteste Beispiel dafür sind die Steinkolosse



Der nach der Herrscherdynastie Piilani benannte Tempel auf Maui ist einer der größten des Archipels. Auf der 15 Meter hohen Plattform standen einst typische Elemente polynesisch-hawaiianischer Tempelarchitektur.

auf den Osterinseln. Auf Hawaii entstanden daraus die »heidau« genannten Tempelanlagen (siehe Bilder oben).

Diese Ausbildung verschiedener Gesellschaftsschichten und -klassen, ein Gottkönig an der Regierungsspitze mit einem Hofstaat und einem Pool an Spezialisten inklusive Krieger, die täglich trainierten und für den Krieg bereitstanden, der Bau von Monumenten – all das sind Merkmale archaischer Staaten. Neue Forschungen deuten darauf hin, dass sich zwischen dem Ende des 16. und dem Beginn des 17. Jahrhunderts das alte polynesisches Häuptlingstum dahingehend weiterentwickelte. Chroniken zufolge konsolidierten Häuptling Piilani und sein Sohn Kiha-a-Piilani damals das Königreich von Maui, Häuptling Umi-a-Liloa das auf Hawaii. Letzterer heiratete eine Schwester Kihas, doch das Bündnis war nicht von Dauer.

Was wurde aus Kekaulike, dem Nachfahren Piilanis, der von seinem Aussichtspunkt über der Bucht von Mokolau die Eroberung Hawaiis geplant haben mag? In seinem Werk

»Herrschende Häuptlinge in Hawaii« berichtete der Chronist Kamakau, Kekaulike sei mit seiner Flotte tatsächlich unentdeckt beim heutigen Kailua-Kona gelandet. Wo in unseren Tagen alljährlich Extremsportler die Strapazen des Ironman bewältigen, schlugen die Streitkräfte Mauis eine Schneise der Zerstörung. Dann jedoch ging König Alapainui zum Gegenangriff über und trieb die Invasoren zu ihren Kanus zurück. Auf ihrer Flucht fällten die Maui-Krieger alle Kokosnusspalmen und töteten jeden, der ihnen in die Quere kam.

Zurück in Kaupo opferte Kekaulike dem Kriegsgott in seinen »luakini«-Tempeln und plante die erneute Invasion Hawaiis. Sein Rivale aber war nicht gewillt, die Zerstörung ertragreicher Plantagen und die Ermordung Hilfloser hinzunehmen und überquerte nun seinerseits mit einer Armee das Meer. Vermutlich erlitt Kekaulike einen epileptischen Anfall – Kamakau beschrieb es als »die Augen zum Himmel gedreht«. Zusammen mit seinen wichtigsten Häuptlingen floh Kekaulike und übergab den Thron seinem Sohn Kamehamehanui. Als Alapainui eintraf, brach er seinen Feldzug ab, denn der junge Mann war sein Neffe. Damit hatte die Heiratspolitik der Dynasten des Archipels doch noch einen Zweck gehabt.

Der Friede sollte nicht von Dauer sein. Zwar gelang es Khekili, Gottkönig Mauis, bis 1786 eine Insel nach der anderen



Die Basaltsteine des Tempelwalls von Kānemalohemo liegen heute unter dichter Vegetation verborgen. Um 1710 überblickte König Kekaulike von diesem Ort aus die Bucht von Mokulāu, dem Ausgangspunkt seiner missglückten Invasion von Hawaii.



Häuptling Kamehameha obsiegte auf Hawaii gegen Kokurrenten wie Häuptling Keoua. Dieser wurde bei seiner Landung getötet und als Bauopfer für den neuen Tempel auf dem Puukohola (»Hügel des Wals«, Foto) dargebracht. Die Illustration rechts gibt dieses Ereignis wieder. Unterstützt von den Europäern eroberte Kamehameha bis 1810 den gesamten Archipel.



zu erobern oder in Gefolgschaft zu zwingen, doch vier Jahre später unterlag er Hawaiis jungen König Kamehameha I. Bis 1810 hatte dieser das gesamte Archipel vereint, zum Teil aber mit Hilfe von Europäern, die ihm Feuerwaffen lieferten. Kamehameha I. verbot Menschenopfer und gab den Kriegskult des Gottes Ku auf. Er vereinheitlichte das Rechtssystem und begann Rohstoffe wie Sandelholz zu exportieren. Sein Sohn Liholiho führte diese Politik fort, um die Unabhängigkeit des Königreichs zu erhalten. Außerdem schaffte er das »kapu«-System ab. Diesen Bruch mit den jahrhundertealten Traditionen vollzog er auch symbolisch, indem er nach der Inthronisation gemeinsam mit der Lieblingsfrau seines Vaters und anderen Häuptlingsfrauen zusammen eine Mahlzeit einnahm – die heiligen Regeln verlangten eine strikte Trennung der Geschlechter, um jede Verunreinigung und damit Störung des »mana«-Flusses zu verhindern.

Auch wenn sie nicht als Kolonialherren auftraten, brachten die Weißen keineswegs nur die Segnungen der Zivilisation. Für Walfänger wurden die Inseln zum Ausgangspunkt ihrer Expeditionen und mit den Seeleuten kamen Alkoholismus und Epidemien. Amerikanische Großgrundbesitzer, die auf Hawaii Zuckerrohrplantagen betrieben, sorgten dafür, dass 1893 US-Marines auf der Insel landeten und die amtierende Königin inhaftierten; ein Jahr später riefen sie die Republik aus. Eine gescheiterte Rebellion von Monarchisten wurde ausgenutzt, um die Regentin zum Abdanken zu zwin-

gen. Auf Grund seiner strategisch günstigen Lage wurde Hawaii 1898 von den Vereinigten Staaten annektiert, 1959 zum 50. Bundesstaat erklärt. Die polynesischen Kultur geriet durch Einwanderer aus Asien und Amerika ins Hintertreffen, die daraus resultierenden ethnischen Konflikte sind bis heute ungelöst. ~

DER AUTOR



Patrick Vinton Kirch lehrt Anthropologie an der University of California in Berkeley. Er erforscht seit 40 Jahren die Kultur und Geschichte des Hawaii-Archipels, auf dem sich eines der komplexesten polynesischen Gesellschaftssysteme entwickelt hatte. Dabei nutzt er sowohl linguistische Analysen, Quellenstudien als auch archäologische Feldforschung.

QUELLEN

- Kirch, P. V.:** How Chiefs Became Kings Divine Kingship and the Rise of Archaic States in Ancient Hawai'i, University of California Press, Berkeley 2010
- Kirch, P. V.:** The God-Kings of Paradise. In: Popular-Archaeology.com, März 2013

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/199289

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Was kann Nanowissenschaft?
Können Nanoroboter Krankheiten heilen?
Wo begegnet uns Nanotechnologie im Alltag?

Do 12.09.2013 / 19.00 / HANNOVER VON ZWERGEN UND FUSSBÄLLEN: Was steckt hinter der Nanotechnologie?

MIT **Ralf Wehrsporn** Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, **Prof. Dr. Stephan Förster** Universität Bayreuth,
Prof. Dr. Armin Grunwald Institut für Technikfolgenabschätzung, KIT
MODERIERT VON **Prof. Dr. Carsten Könneker** Chefredakteur Spektrum der Wissenschaft

VERANSTALTUNGSORT Tagungszentrum Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG mensch@volkswagenstiftung.de

MEHR INFOS www.volkswagenstiftung.de/veranstaltungen und www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Räumliche Gleichdicke

Manche Körper lassen sich – theoretisch – in Kugellagern nutzen, ohne Kugeln zu sein. Die Aufgabe, solche räumlichen Gebilde mit möglichst kleinem Volumen zu finden, führt zu einem merkwürdigen Phänomen. Physiker würden es einen entarteten Grundzustand nennen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Wenn man einen Kreis zwischen zwei parallele Geraden einklemmt, dann ist der Abstand zwischen ihnen stets derselbe, einerlei wie der Kreis orientiert ist. Das wussten schon die ägyptischen Pyramidenbauer: Ein schwerer Steinquader lässt sich mit Hilfe kreisrunder Rollen über ebenen Untergrund transportieren, ohne sich auf- und abzubewegen.

Gilt das auch umgekehrt? Wenn der Steinklotz nicht auf- und abschwankt, können wir dann sicher sein, dass die Rolle einen kreisförmigen Querschnitt hat? Eben nicht! An Stelle des Kreises tut es auch ein so genanntes Reuleaux-Dreieck (Bild unten, links). Es entsteht aus einem gleichseitigen Dreieck, indem man in jede seiner Ecken einen Zirkel einsticht und die beiden jeweils anderen Ecken durch einen Kreisbogen verbindet.

Die Mathematiker nennen den Abstand zweier paralleler, dicht an der Kurve anliegender Geraden eine »Dicke« dieser Kurve, obgleich man nor-

malerweise eher von der Dicke (oder Breite) der Fläche sprechen würde, die von der Kurve eingeschlossen wird. Je nach der Orientierung der Geraden kann ein und dieselbe geschlossene Kurve unterschiedliche Dicken aufweisen. Wenn sie in jeder Richtung gleich dick ist, nennt man sie eine Kurve konstanter Dicke, kurz »Gleichdick-Kurve« oder auch »Gleichdick«. Weitere Gleichdick-Kurven entstehen durch die entsprechende Konstruktion aus regelmäßigen Vielecken mit fünf, sieben oder allgemein einer beliebigen ungeraden Anzahl von Seiten.

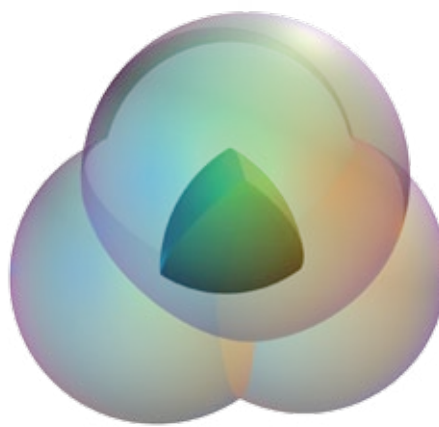
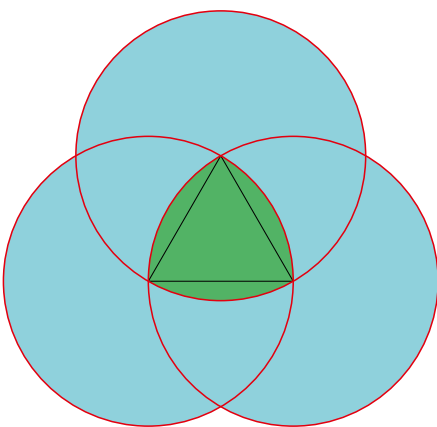
Gleich dick heißt nicht kreisrund

Wer also nachprüfen will, ob ein großes Gefäß kreisrund ist, darf sich nicht damit begnügen, seine Dicke in verschiedenen Richtungen zu vermessen. Diese simple Weisheit hatte sich offensichtlich nicht bis zu den Betreibern der Raumfähre »Challenger« herumgesprochen. Die hatten nämlich durch derartige Dickemessungen nachge-

prüft, ob ein Raketentreibstoffbehälter nach dem Raumflug und der Bergung aus dem Meer seine kreisförmige Gestalt behalten hatte. Nach positivem Ausgang der Tests setzten sie zwei derartige Behälter zusammen und dichteten die Fuge zwischen ihnen mit einem dicken kreisförmigen Gummiring, einem »O-Ring«, ab. Aus dieser Fuge schoss beim nächsten Flug der »Challenger« am 28. Januar 1986 Treibstoff heraus, mit den bekannten katastrophalen Folgen.

Kurz nach dem Start dehnen sich beide Behälter aus, und der O-Ring muss sich mitdehnen, damit die Fuge dicht bleibt. Nach dem Ergebnis der umfangreichen Untersuchungen nach dem Unglück hatte der Ring diese Bewegung nicht rechtzeitig vollführt, weil er wegen der Kälte in der Nacht zuvor gefroren und daher zu träge war. Möglicherweise war der Gummiring außerdem an der Bewegung gehindert, weil er zwischen den nicht perfekt kreisrunden Teilen verklemmt war.

Das Reuleaux-Dreieck (links), benannt nach Franz Reuleaux (1829–1905), dem »Vater des wissenschaftlichen Maschinenbaus«, besteht aus allen Punkten, die drei Kreisen gemeinsam sind (dem »Durchschnitt« dieser Kreise). Die Mittelpunkte der Kreise liegen auf den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks, und ihr Radius ist gleich dessen Seitenlänge. Entsprechend ist das Reuleaux-Tetraeder (rechts) der Durchschnitt von vier Kugeln mit Mittelpunkten in den Ecken eines regelmäßigen Tetraeders und dem Radius gleich dessen Kantenlänge.



LINKS: CHRISTOPH PÖPPE, RECHTS: STIAN ELLINGSEN / CC-BY-SA 3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0)

Diese Gleichdick sind alles andere als kugelrund – funktionieren aber wie Kugellager. Die Plexiglasplatte (oben im Bild) ist der Unterbau eines »Schlittens«. Während die Besucher des New Yorker Museum of Mathematics (»MoMath«) schwungvoll und erschütterungsfrei bergab gleiten, bleibt die Platte stets in Kontakt mit den merkwürdig geformten Gebilden.

Hätten die Verantwortlichen nur die »Mathematical Games« des legendären Martin Gardner gelesen! Schon 1963 schrieb er im »Scientific American« über Kurven konstanter Dicke und wusste zu berichten, dass man die richtige Form einer U-Boot-Hülle nicht durch Dickemessungen, sondern durch Anlegen kreisförmiger Schablonen zu ermitteln hat.

Für die antiken Steintransporteure hätten Rollen mit dem Querschnitt eines Reuleaux-Dreiecks zumindest einen Vorteil gehabt: Sie sind leichter als kreisrunde, sogar die leichtesten überhaupt möglichen (wenn man gleiches Material, gleiche Länge und so weiter unterstellt). Unter allen Kurven vorgegebener konstanter Dicke ist das Reuleaux-Dreieck diejenige mit dem kleinsten Flächeninhalt in ihrem Inneren. Es wäre also etwas weniger mühsam gewesen, die Rolle, die hinter dem Stein zum Vorschein kommt, nach vorne zu schleppen und wieder unter den wandernden Stein zu legen.

In der Praxis hätte eine derartige Leichtrolle jedoch erhebliche Nachteile. Das Reuleaux-Dreieck ist nicht überall schön rund; vielmehr treffen seine drei Kreisbögen unter einem Winkel von 60 Grad aufeinander – dort, wo auch das gewöhnliche Dreieck, aus dem es entstanden ist, seine Ecken hat. Beim Rollen liegt entweder eine solche Ecke auf dem Boden, während der gegenüberliegende Kreisbogen unter dem Stein abrollt, oder eine Ecke hat Kontakt mit dem Stein, und der zugehörige Kreisbogen bewegt sich wie ein Rad über die Erde. Oben oder unten – stets ist die ganze Last des Steins auf einen Punkt



MOMATH - NATIONAL MUSEUM OF MATHEMATICS, NEW YORK

konzentriert. Kaum ein Material hält eine solch extreme Belastung auf die Dauer aus.

Dem könnte man entgegenwirken, indem man die Ecken etwas abrundet. Wieder entsteht ein Gleichdick, allerdings hat es – bei vorgegebener Dicke – nicht mehr minimale Fläche. Das beweist man »hinterrücks« mit einem typischen Widerspruchsargument.

Behauptung: Ein minimales Gleichdick muss Ecken haben, also Stellen, an denen eine Tangente an die Kurve nicht definiert ist und eine Krümmung erst recht nicht. Beweis: Von einer eckenlosen Gleichdick-Kurve könnte man eine dünne Schicht abschälen, und es wäre immer noch ein Gleichdick und hätte in jedem Punkt eine Krümmung. Durch Nachrechnen stellt sich heraus, dass das geschälte Gleichdick nach Rückvergrößerung auf die ursprüngliche Dicke immer noch eine kleinere Fläche hätte als das Original, also kann dieses nicht minimal gewesen sein: Widerspruch!

Minimieren durch Abschleifen

Mathematiker haben einen ziemlich speziellen Sinn für Ästhetik. Sie stellen sich die Lösung eines Minimierungsproblems perfekt symmetrisch und glatt, das heißt ohne jegliche Ecken und Kanten vor – und finden sich oft genug bestätigt. Die Figur minimalen Um-

fangs bei vorgeschriebenem Flächeninhalt ist der Kreis; der Zustand minimaler Energie einer Menge Wasser ist die spiegelglatte, ebene Seeoberfläche; Sterne und Planeten entledigen sich überschüssiger Gravitationsenergie so lange, bis sie Kugelform angenommen haben; der (energieärmste) Grundzustand des Elektrons im Wasserstoffatom ist eine perfekt kugelförmige Wahrscheinlichkeitswolke.

Irgendwelche Ecken und Kanten bieten normalerweise Gelegenheit, die zu minimierende Größe – Flächeninhalt, Energie und so weiter – noch kleiner zu machen, indem man das, was so unrund hervorsticht, ein bisschen glatt schleift. Das Problem »Minimiere die Fläche einer ebenen Figur bei vorgeschriebener Dicke« fällt also aus dem Rahmen. Abschleifen hilft zwar im Prinzip, aber der endgültige Erfolg stellt sich erst ein, wenn die Figur vor lauter Abschleifen nicht mehr glatt ist.

Wenn aber ein minimales Gleichdick schon unvermeidlich Ecken haben muss, dann sollen es wenigstens so wenig wie möglich sein. So erklärt sich die Anzahl 3.

In drei statt zwei Dimensionen steht es um die Abweichung von der perfekten Symmetrie noch schlimmer. Die Kugel ist ohne Zweifel ein Gleichdick, aber sie löst das Optimierungsproblem

Die vorsichtige Glättung des Reuleaux-Tetraeders

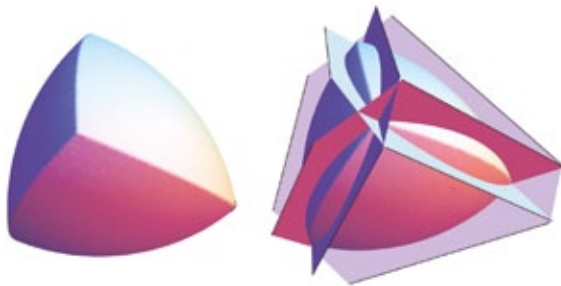
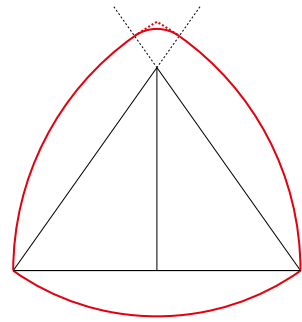
Die sechs Kanten eines (gewöhnlichen) regulären Tetraeders lassen sich zu drei Paaren gruppieren. Die beiden Partner jedes Paares liegen einander gegenüber, haben insbesondere keine Ecke gemeinsam. Verbindet man die Mittelpunkte beider Kanten miteinander, so steht die Verbindungslinie senkrecht auf beiden.

Man schiebe nun in Gedanken ein Tetraeder aus Brotteig in den Backofen. Dort geht es auf, bis daraus das Reuleaux-Tetraeder wird. (Bild unten, links; die Ecken des Tetraeders bleiben an ihren Plätzen.) Schneidet man nun mit dem Brotmesser entlang der Flächen des ursprünglichen Tetraeders, so fällt der gesamte Zuwachs ab, bestehend aus vier gerade abgeschnittenen Kugelkappen an den Flächen und sechs spitz zulaufenden Keilen an den Kanten (Bild unten, rechts). Ein Keil enthält die gebogene Kante (aus Brotkruste), an der zwei Kugelabschnitte aneinandergrenzen, eine gerade Kante (aus Brot), die mit der Kante des ursprünglichen Tetraeders zusammenfällt, sowie zwei »Schnittkanten«, an denen Brot und Kruste aneinandergrenzen, also die

Schnittebene die Außenseite des Reuleaux-Tetraeders trifft.

Meissners Rezept besteht nun darin, jeden zweiten Keil zu einer »Spindel« abzurunden. Die Prozedur betrifft von jedem Paar gegenüberliegender Kanten nur einen Partner. Dazu legt man ein bogenförmiges, unendlich dünnes Messer, eigentlich eher einen Schneidedraht, entlang einer Schnittkante an und schneidet damit durch den Keil in einer Rotationsbewegung, bei der das Messer in den Eckpunkten des Keils unbewegt bleibt. Am Ende kommt das Messer an der anderen Schnittkante wieder zum Vorschein. Im Querschnitt sieht das so aus, dass die beiden Bögen des Keils, die aus Brotkruste bestehen, durch ein einziges Stück Kreisbogen ersetzt werden, der tangential an den Rest der Brotkruste anschließt. Schließlich setzt man das Reuleaux-Tetraeder wieder so zusammen, wie es auseinandergeschnitten wurde.

Das Bild oben zeigt einen Querschnitt durch den ganzen Körper. Eine unversehrte Kante (unten) liegt genau in der (vertikalen) Schnittebene; die gegenüberliegende abgerundete Kante (oben; gestrichelt: die ursprüngliche Grenze des Reuleaux-Tetraeders) ist im Querschnitt zu sehen. Diese ebene Figur ist ein Gleichdick mit der richtigen Dicke. Da das für alle Querschnitte gilt, ist der gesamte Meissner-Körper ein räumliches Gleichdick.



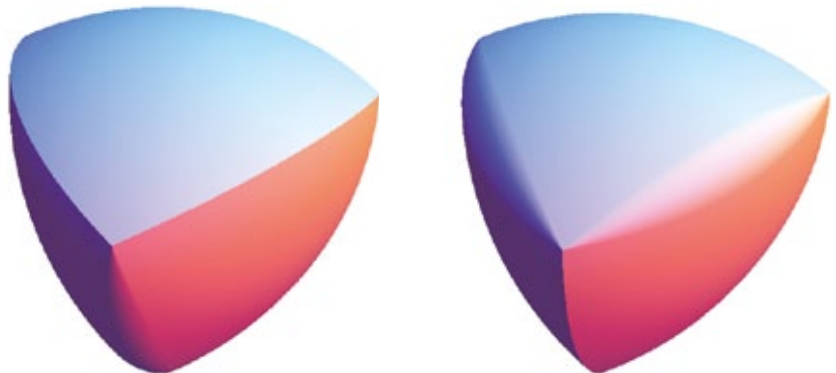
mit umgekehrtem Vorzeichen: Unter allen Gleichdicken vorgeschriebener Dicke ist sie das »fetteste«, also das mit dem größten Volumen.

Wer schlanke Gleichdicke sucht, orientiert sich zweckmäßig am zweidimensionalen Vorbild. Man stelle ein Reuleaux-Dreieck in Gedanken aufrecht, mit einer Ecke nach oben, und

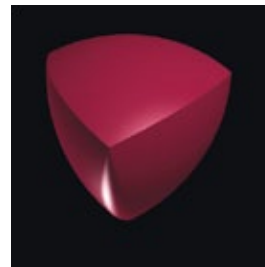
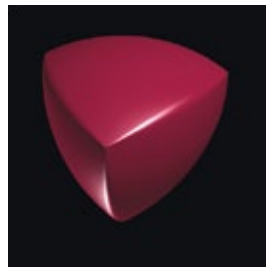
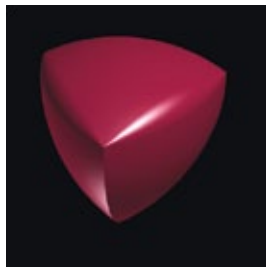
drehe es um die vertikale Symmetrieachse. Das Volumen, das die zweidimensionale Figur dabei überstreicht, ist ein dreidimensionales Gleichdick. Das funktioniert allgemein: Nach diesem Drehbankverfahren kann man aus jedem zweidimensionalen Gleichdick, das eine Symmetrieachse hat, ein dreidimensionales machen.

Aber es geht noch schlanker. Man setze an die Stelle des gleichseitigen Dreiecks dessen räumliches Pendant, das regelmäßige Tetraeder, das ist eine dreiseitige Pyramide aus vier gleichseitigen Dreiecken. Diesen Körper muss man wie sein ebenes Gegenstück »ausbeulen«, und zwar nicht mit Kreisbögen, sondern mit Kugelausschnitten.

Meissners minimale Gleichdicke auf Basis des Reuleaux-Tetraeders. Die abgerundeten Kanten treffen sich entweder in einem Eckpunkt (unten im linken Bild), oder sie begrenzen eine Fläche (oben im rechten Bild).



Der eine Meissner-Körper (links) geht über ein Kontinuum von Gleichdicken mit mehr oder weniger gerundeten Kanten (Mitte) in den anderen (rechts) über. Aber alle Zwischenstadien haben ein größeres Volumen als die Meissner-Körper.



ÉDOUARD OUDET, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER, GRENOBLE

Die genaue Vorschrift lautet: Lege um jeden Eckpunkt des Tetraeders eine Kugel, die durch die übrigen drei Ecken geht – also muss der Kugelradius gleich der Kantenlänge des Tetraeders sein. Der gesuchte Körper besteht dann aus den Punkten, die allen vier Kugeln gemeinsam sind (Bild S. 70 unten, rechts).

Aber das ist noch kein Gleichdick! Im »Normalfall«, das heißt, wenn das Reuleaux-Tetraeder mit irgendeinem Punkt eines Kugelausschnitts auf dem Boden aufliegt und mit dem zugehörigen Eckpunkt an die Decke stößt oder umgekehrt, ist seine Dicke gleich dem Kugelradius; so ist es konstruiert. Wenn es aber mit einer Kante auf dem Boden steht und mit der gegenüberliegenden Kante die Decke berührt, ist es merklich dicker – ungefähr 2,5 Prozent.

Meissners mehrfaches Minimum

Was tun? Na ja – es bietet sich an, die Kanten ein bisschen abzuschleifen. Aber Vorsicht! Durch Abschleifen wird der Körper auch in Richtungen dünner, in denen er das gar nicht soll. Außerdem dürfen die Ecken und Kanten bei dieser Aktion nicht gänzlich verschwinden. Der Satz, dass ein überall wohlgerundetes Gleichdick nicht minimal sein kann, gilt auch in drei Dimensionen.

Die Lösung fand bereits vor reichlich 100 Jahren der Schweizer Mathematiker Ernst Meissner (1883–1939) – aber er konnte nicht beweisen, dass die von ihm gefundenen Körper minimal sind. Der Beweis steht bis heute aus, auch wenn an der Korrektheit der Aussage kein ernsthafter Zweifel mehr besteht. Bernd Kawohl, Mathematikprofessor an der Universität zu Köln und in dieser Zeitschrift schon als Erfinder des perfekten Sichtschutzes im Kleingarten in Erscheinung getreten (Spektrum

der Wissenschaft 11/2003, S. 102), und Christof Weber, Dozent an der Pädagogischen Hochschule Nordwestschweiz in Basel, haben Meissners alte Arbeit weitergetrieben. Einen Beweis für dessen Behauptung haben auch sie nicht gefunden, aber mehr als eine Million gute Gründe für ihre Korrektheit.

Die wesentliche Idee Meissners: Man schleife nicht alle Kanten ein bisschen ab, sondern die einen ganz und die anderen gar nicht (Kasten). Genauer: Man rundet von jedem Paar gegenüberliegender Kanten nur einen Partner. Aber welchen? Dafür gibt es viele Auswahlmöglichkeiten; aber am Ende bleiben nur zwei übrig, die wesentlich verschieden sind, das heißt, nicht durch eine geeignete Drehung des ganzen Tetraeders ineinander übergehen. Man rundet entweder drei Kanten, die ein Fläche begrenzen, oder drei, die sich in einer Ecke treffen (Bild links unten). Beide Körper haben das gleiche und – höchstwahrscheinlich – minimale Volumen.

Das ist nun fast noch schlimmer als der Mangel an Symmetrie. Zwei verschiedene, gleich große Minima? Also ein »entarteter Grundzustand« in der Sprache der Atomphysiker? Das passt nicht ins allgemeine Bild. Auf der Suche nach einer »noch minimaleren« Lösung deformierten Thomas Lachand-Robert und Édouard Oudet von der Université de Savoie ganz allmählich den einen Körper in den anderen (»Morphing«) derart, dass jedes Zwischenstadium die Gleichdick-Bedingung erfüllt, in der Hoffnung, dass unterwegs das Volumen noch ein bisschen absinkt (Bild oben). Leider steigt das Volumen geringfügig an.

Martin Müller, ein Diplomand von Bernd Kawohl, wählte einen anderen Zugang. Lachand-Robert und Oudet ha-

ben eine alte Idee von Hans Rademacher (1892–1969) und Otto Toeplitz (1881–1941) zu einer Methode verallgemeinert, aus einem n -dimensionalen Gleichdick ein $(n+1)$ -dimensionales zu konstruieren. Dieses Verfahren hat Müller für $n=2$ an einer Million nach dem Zufallsprinzip ausgewählter Beispiele durchgeführt. Keines der Ergebnisse konnte die Meissner-Körper an Volumen unterbieten.

Auch wenn der Beweis noch aussteht: Aller Voraussicht nach wird das merkwürdige Phänomen mit dem doppelten Minimum jeder weiteren Nachprüfung standhalten. ∞

DER AUTOR



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

QUELLEN

Gardner, M.: Geschlossene Kurven mit konstantem Durchmesser. In: Logik unterm Galgen. Vieweg, Braunschweig 1980, S. 198–207

Kawohl, B., Weber, C.: Meissner's Mysterious Bodies. In: The Mathematical Intelligencer 33, Nr. 3, S. 94–101, 2011

Lachand-Robert, T., Oudet, É.: Bodies of Constant Width in Arbitrary Dimension. In: Mathematische Nachrichten 280, S. 740–750, 2007

Rademacher, H., Toeplitz, O.: Kurven konstanter Breite. In: Von Zahlen und Figuren. Nachdruck der Erstausgabe von 1930. Springer, Heidelberg 2000, S. 128–141

WEBLINK

Diesen Artikel, weitere Literaturhinweise sowie Weblinks finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199290

Auf den Spuren der Tiere

Neue Techniken ermöglichen es Biologen, die teils erdumspannenden Wege von Zugvögeln, aber auch von anderen Wirbeltieren oder Insekten zu verfolgen. Die Daten können lange umstrittene Punkte klären – und sorgen zudem für manche Überraschung.

Von Roland Knauer

Irgendwo am Himmel über Franken nimmt das Schicksal des jungen Weißstorchs plötzlich einen unerwarteten Verlauf. Seine Eltern gehören eindeutig zu den Störchen, die östlich einer gedachten Linie vom Alpenfluss Lech über den Harz bis zum Ijsselmeer in den Niederlanden leben. Im Spätsommer ziehen diese Schreitvögel auf der so genannten Ostroute über den Bosphorus und das Niltal bis hin zu den Savannen Ost- und Südafrikas.

Doch über Franken entscheidet sich das Jungtier abrupt anders; das verrät ein kleiner Sender auf seinem Rücken. Martin Wikelski, der den Weg des Vogels seit geraumer Zeit mit Hilfe dieses Geräts verfolgt, ist überrascht. Die ungewöhnliche Kursabweichung kann sich der Biologe vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell am Bodensee und der Universität Konstanz nicht so recht erklären. Kurz entschlossen fliegt er mit der Cessna »Spirit of MaxCine« des Instituts los, peilt den Vogel an und findet ihn tatsächlich.

Das Jungtier hat sich wohl einer anderen Gruppe von Artgenossen angeschlossen, die westlich der Linie von den Alpen zur Nordsee zu Hause sind und daher mit ihrer Westroute einen völlig anderen Weg gen Süden einschlagen. Etliche

dieser Tiere überwintern bereits auf der Iberischen Halbinsel mit ihren vielen Maisfeldern, die auch im Winter genug Nahrung versprechen. Andere ziehen über die Straße von Gibraltar und von dort weiter in die Sahelzone Afrikas.

Unterwegs meldet der Sender auf dem Rücken des jungen Weißstorchs erneut ein abweichendes Verhalten: Offensichtlich kehrt das Tier über Marokko um. Der Sender verrät zudem, dass es dort gelandet ist, vermutlich in einer Oase. Dann aber bewegt es sich praktisch nicht mehr weiter. Was ist geschehen? Das erfährt Martin Wikelski erst, als einer seiner Mitarbeiter direkt in der Oase in der marokkanischen Wüste vorbeischaute. Der Storch wird, so findet er rasch heraus, dort inzwischen von einem Mädchen versorgt, das ihn in ihre Hütte mitgenommen hat. Der Vogel war zuvor in einen Sandsturm geraten, die peitschenden Körner hatten sein Augenlicht zerstört. Wenn das Mädchen ihn nicht gerettet hätte, wäre er wahrscheinlich verhungert.

Für den Max-Planck-Forscher ist das Schicksal dieses Weißstorchs ein weiterer Puzzlestein für seine Arbeit, mit der er die Geheimnisse der Wanderungen von Tieren entschlüsseln will. Damit betritt er kein Neuland – Ornithologen widmen sich spätestens seit Anfang des 20. Jahrhunderts intensiv dem Vogelzug. In den 1950er Jahren brachte der damalige Direktor des Frankfurter Zoos Bernhard Grzimek die langen Wanderungen von Säugetieren über die Savannen Ostafrikas einem breiten Publikum nahe. Diese Forschung stieß aber sehr häufig rasch an ihre technischen Grenzen, berichtet Martin Wikelski: »Für die meisten Wanderungen von Tieren gibt es zwar Theorien, die aber bis vor wenigen Jahren mangels geeigneter Geräte kaum überprüft werden konnten«

Weshalb wandern Tiere überhaupt? Auf welchen Routen sind sie unterwegs? Wie verhalten und orientieren sie sich dabei? Welche Gefahren drohen ihnen? Beantworten lassen sich solche Fragen nur, wenn man die Tiere nahezu pausenlos beobachtet. Wie aber soll das gehen, wenn ein Weißer Hai

AUF EINEN BLICK

MOBILITÄT UND ÖKOSYSTEM

1 Seit 1899 beringen Forscher Vögel, um Informationen über ihre **Wanderrouuten** zu erhalten. Da nur ein Bruchteil der Ringe erneut erfasst werden konnte, blieben die Daten sehr lückenhaft.

2 Mit modernen, leichten **Sendern** gelingt es Biologen heute, die Wanderbewegungen nicht nur von Vögeln, sondern auch von Landtieren, Fischen und sogar Insekten zu analysieren.

3 Künftig lassen sich auch kleinere Tiere über Satellit online und in Echtzeit verfolgen. Damit werden ihre **Einflüsse auf Ökosysteme** sowie die **Verbreitung von Krankheiten** sichtbar.

oder ein Buckelwal die Ozeane unter Wasser durchquert? Oder wenn ein Storch in den Lüften zwischen seinem Horst an der Elbe und seinem dem Forscher unbekanntem Winterquartier in Afrika oder Spanien unterwegs ist? »Meist beobachten wir wandernde Arten nicht einmal in einem Prozent ihrer Lebenszeit«, beklagt Martin Wikelski die dünne Datengrundlage seiner Disziplin.

Erst seit hinreichend kleine und leichte Sender entwickelt wurden, hat sich die Situation erheblich verbessert: Mit Hilfe des Satellitenortungssystems GPS lässt sich nun laufend die Position und damit der Standort des Tieres bestimmen. Ein solches Miniaturgerät zeichnet zuerst die Daten auf und leitet sie danach über Satellit oder Handynet an die Wissenschaftler weiter, die so auch die Wege des jungen Weißstorchs bis in die Oase von Marokko verfolgen konnten.

Vor dieser technischen Errungenschaft ähnelte die Wissenschaft über Tierwanderungen eher einem Glücksspiel, bei dem die Verhaltensforscher auf Zufallstreffer hoffen muss-

ten. Noch am Ende des 19. Jahrhunderts wusste man darüber kaum viel mehr als die Bauern, die alljährlich das gleiche Schauspiel erlebten: Im September versammeln sich etwa die Mehlschwalben zu größeren Gruppen auf Telegrafenteleuten und verschwinden dann plötzlich spurlos. Ende April oder Anfang Mai kehren die Vögel zurück. Verbrachten sie die Zwischenzeit vielleicht in Afrika? Das jedenfalls ließen Berichte aus Ostafrika vermuten, wo Mehlschwalben aufgetaucht waren. Aber handelte es sich dabei auch wirklich um die aus Mitteleuropa bekannte Art? Niemand wusste Genaueres. Ähnlich war die Situation bei vielen anderen mobilen Arten, vom Kranich bis zum Star.

Erst Hans Christian Cornelius Mortensen brachte die Forschung einen großen Schritt weiter, als er 1899 mehreren Starren ein kleines Stück Zinkblech als Ring um ein Bein bog. Auf das Metall hatte der dänische Lehrer seine Adresse sowie eine fortlaufende Nummer gestempelt, mit der er den Vogel später wieder identifizieren wollte. Ein wenig funktioniert Mor-



Diese amerikanische Königslibelle trägt einen Minisender am Bauch. Er wiegt nur ein viertel Gramm.

CHRISTIAN ZIEGLER

Wissen, wo es langgeht

Woher wissen Tiere eigentlich, wo sie sind und wohin sie ziehen sollen, wenn sie in bestimmten Jahreszeiten oder manchmal sogar nur einmal im Leben zu einer Wanderung aufbrechen? Genau wie bei Menschen spielen dabei Landmarken und Orientierungspunkte eine wichtige Rolle, schildert Max-Planck-Forscher Martin Wikelski: »Wenn wir in den USA mit Sendern ausgerüstete Fledermäuse verfolgt haben, flogen sie häufig entlang Bahnlinien.«

Ähnlich lassen sich viele Tiere von Strom- und Telefonleitungen oder Autobahnen leiten. Oft folgen Vögel auch Bergen, Flüssen oder langen Halbinseln wie der Kurischen Nehrung im Baltikum. Deren hellen Sanddünen dienen ihnen nicht nur als Wegweiser, sondern erleichtern auch den Flug: Über den stark reflektierenden Uferflächen erhitzt sich die Luft stärker als etwa über dunkleren Wäldern oder der Ostsee und steigt in die Höhe. Diese Aufwinde nutzen viele Zugvögel zum Energiesparen.

Jungtiere schließen sich dabei zunächst gern Artgenossen an, die den Weg vielleicht schon kennen. Später fliegen sie aus eigener Erfahrung in die ungefähre Richtung und orientieren sich vor allem an Strukturen wie Hochgebirgen, die sie schon aus großer Entfernung sehen. In der Nacht, über flachen Wüsten oder über dem Meer aber mangelt es an solchen Landmarken. Dann orientieren sich nicht nur Vögel, sondern auch andere Tierarten – von Meeresschildkröten und Geckos bis zu Fledermäusen – unter anderem mit Hilfe des Magnetfelds der Erde.

Allerdings hat der Magnetkompass einige Tücken. So unterscheidet sich der magnetische Nordpol deutlich vom geografischen und wandert im Lauf der Jahrtausende langsam weiter. Je nach Weltregion weicht daher nicht nur die Nadel eines vom

Menschen konstruierten Magnetkompasses mehr oder weniger von der gewünschten Richtung ab, sondern auch der Magnetsinn der Tiere. Diese Abweichung müssen Tiere und Menschen gleichermaßen korrigieren. Grauwangendrosseln nutzen dazu den Sonnenuntergang. Das konnten Martin Wikelski, William Cochran vom Illinois National History Survey und Henrik Mouritsen von der Universität Oldenburg in einem Freilandexperiment belegen.

Die Forscher hatten im Mittleren Westen der USA Drosseln eingefangen, mit Miniradiosendern ausgerüstet und jeweils zwei Stunden nach Sonnenuntergang freigelassen. Zielstrebig flogen die Vögel nach Norden. Ganz anders verhielten sich Drosseln, die während ihrer Käfiggefangenschaft für einige Stunden einem künstlichen Magnetfeld ausgesetzt waren, bei dem die Nordrichtung um 80 Grad nach Osten gedreht war. Hatten diese magnetisch beeinflussten Vögel während ihrer kurzen Gefangenschaft im Käfig auch einen Sonnenuntergang erlebt, flogen sie genau wie ihre unbeeinflussten Artgenossen nach der nächtlichen Freilassung im normalen Magnetfeld der Erde schnurstracks los. Aber nicht nach Norden, sondern in eine um rund 80 Grad gegen den Uhrzeigersinn gedrehte Richtung. Sie hielten sich also nach Westen und wichen damit fast rechtwinklig vom Ziel ab.

In ungezählten Experimenten haben Forscher die Existenz eines solchen Magnetkompasses nachgewiesen. Welcher Sensor in den Tieren dafür verantwortlich ist, wird dagegen nach wie vor diskutiert. Der Biologe Henrik Mouritsen von der Universität Ol-



MPI FÜR ORNITHOLOGIE RADOLFZELL/MAXCINE

Der Biologe Martin Wikelski (links) vom Max-Planck-Institut für Ornithologie rüstet in der Alexander-von-Humboldt-Höhle in Venezuela Fettschwalme mit Sendern aus.

senzens Methode wie die Flaschenpost, deren Absender auch nicht weiß, wo seine Nachricht anlandet: Wird eine geborgen, bewegt hoffentlich die Neugier den Finder, an die vermerkte Adresse zu schreiben. Auf solche Weise erfuhr auch der Lehrer in Dänemark, wo einige seiner Vögel gelandet waren.

Die Beringung der Tiere war so erfolgreich, dass Johannes Thienemann sie bereits 1903 in der gerade eröffneten ersten ornithologischen Forschungsstation der Welt einführte – in Rossitten auf der Kurischen Nehrung im damaligen Ostpreußen. Im Zweiten Weltkrieg musste diese Forschungsstelle evakuiert werden, seit 1946 wird sie in Radolfzell am Bodensee weitergeführt und ist heute Teil des dortigen Max-Planck-Instituts für Ornithologie. Dessen Leiter Martin Wikelski ergänzt die nach wie vor gängige Beringungstechnik inzwischen mit erheblich genaueren Methoden.

Die kleinen, heute aus Aluminium oder Plastik gefertigten Ringe an den Vogelbeinen liefern nämlich nach wie vor nur Zufallstreffer. Insgesamt starteten im 20. Jahrhundert rund 115 Millionen Vögel mit einem Ring in die Freiheit. Aber gerade zwei Millionen dieser Markierungen konnten wiedergefunden und wissenschaftlich ausgewertet werden. Die Me-



Eine Amsel wird mit einem vier Gramm schweren Sender auf dem Rücken freigelassen (links). Der Sender auf einem Palmenflughund (rechts) meldet beim Fliegen alle fünf Minuten seine Position.

denburg vermutet ihn zum Beispiel im Auge der Tiere. Sein Argument: In Vogelaugen erzeugt das schwache blaue oder grüne Licht von den Sternen oder der Sonne im Protein Kryptochrom-1 so genannte Radikalpaare. Je nach Ausrichtung des Erdmagnetfelds geschieht das aber unterschiedlich leicht.

Sind die Kryptochrom-1-Proteine in der halbrunden Netzhaut jeweils in der gleichen Richtung zur Oberfläche der Netzhaut eingebaut, liegen sie an verschiedenen Stellen jeweils anders zum Erdmagnetfeld, wodurch die Radikalpaare verschieden schnell entstehen. Im Auge bildet sich also ein Muster von Radikalpaaren, an dem die Vögel sich orientieren können. Der Nachteil einer solchen optischen Orientierung liegt auf der Hand: Sie

funktioniert nur bei Licht, in stockdunkler Nacht muss sie versagen. Andere Forscher favorisieren daher von Natur aus magnetische Eisenverbindungen, die zum Beispiel im Schnabel eingebaut sein könnten und sich dort zum magnetischen Nordpol ausrichten.

Neben dem Magnetsinn und der Orientierung an Landmarken nutzen wandernde Tiere oft noch weitere Sinne: »Ein wichtiges Organ für die Orientierung ist auch der Geruchssinn«, betont Martin Wikelski. Eine Wiese riecht schließlich anders als ein Wald, das Mittelmeer anders als die Nordsee oder der Atlantik. Vögel folgen also nicht nur ihrem Magnetkompass, sondern fliegen immer auch ein wenig »der Nase nach«.

thode liefert also gute Stichproben, nicht mehr. Immerhin lernen die Forscher so zum Beispiel, dass ein in Skandinavien beringter Vogel im Wattenmeer der Nordsee Rast macht. Oder dass etliche Mönchsgrasmücken in Süddeutschland im Herbst nicht mehr in den Süden, sondern eher Richtung Nordwesten ziehen und in Großbritannien überwintern.

Unzureichende Daten durch Beringungen

Liegen die Winterquartiere einer Art aber in Afrikas Sahelzone oder noch weiter im Süden, erfahren die Ringjäger nur selten etwas über das Schicksal der Wandertiere. Noch viel weniger verraten die Markierungen über die langen Wege zwischen Nest, Rastplätzen und Winterdomizil. »Mit solchen Daten lässt sich also kaum untersuchen, ob Zugvögel Krankheiten aus Asien nach Europa tragen können oder welche Gefahren einem Storch auf dem Weg in den Süden drohen«, umreißt Martin Wikelski die Grenzen dieser Methode.

Das vielleicht eindrucksvollste Beispiel für die Schwächen der Beringungsforschung liefern Küstenseeschwalben. Mit rund 100 Gramm liegen diese eleganten Vögel in der gleichen Gewichtsklasse wie Amseln, haben aber mit einer

Spannweite von ungefähr 80 Zentimetern mehr als doppelt so lange Flügel. Im Sommer brüten Küstenseeschwalben in vielen Regionen zwischen den Küsten von Nord- und Ostsee bis hinauf in den Norden Grönlands, den Norden Sibiriens und Nordamerikas.

Als Ornithologen die rasanten Flieger mit Ringen versehen freiließen, entdeckten sie nach einiger Zeit sogar Winterquartiere weit im Süden auf den Inseln im Südpolarmeer. Offensichtlich pendeln Küstenseeschwalben also mit den Jahreszeiten längs über den Globus zwischen nördlichen und südlichen Polarregionen. Auf der Landkarte ergibt das eine Entfernung von mindestens 30 000 Kilometern, die der weiße bis hellgraue Vogel mit der schwarzen Federkappe auf dem Kopf jedes Jahr zurücklegt.

So weit die Theorie; in der Praxis sieht das Ganze oft noch ein wenig anders aus. Das erfuhren Carsten Egevang vom Greenland Institute of National Resources in Grönlands Hauptstadt Nuuk und seine Kollegen, als sie elf Küstenseeschwalben mit jeweils 1,4 Gramm schweren »Loggern« ausrüsteten. Diese winzigen Fahrtenschreiber zeichnen täglich auf, wie lange es hell ist. Kehren die Tiere ein Jahr später in



MPF FÜR ORNITHOLOGIE RADOLFZELL



BART KEMPENAEERS

ihr Brutgebiet zurück, befreien die Forscher sie von den Mini-geräten. Aus den aufgezeichneten Tageslängen ermitteln sie dann die Aufenthaltsorte auf rund 200 Kilometer genau. Die 2010 in der Fachzeitschrift »Proceedings of the National Academy of Sciences« veröffentlichten Ergebnisse übertrafen die erwarteten Flugdistanzen noch deutlich: Einige Küstenseeschwalben hatten jährlich sogar mehr als 80 000 Kilometer zurückgelegt. Dabei bevorzugten sie Routen, auf denen sie häufig Rückenwind haben und möglichst wenig Gegenwind – das belegen die Korrelationen mit den globalen Wetterdaten.

Auf der Suche nach klarem Wasser

Die weitaus meiste Zeit ziehen Küstenseeschwalben über Wasser. Sowohl über dem Atlantik wie auch über dem Pazifik fliegen sie fern aller Küsten oft Tausende von Kilometern. Die registrierten Daten zeigten auch bisher unbekannte Rastplätze der Weitwanderer. Bei deren Auswahl legen Küstenseeschwalben offenbar auf ganz bestimmte Eigenschaften großen Wert – das Wasser sollte sehr klar sein, und viele kleine Fische sollten darin schwimmen

Der Grund dafür ist ihre Jagdmethode: Die Vögel fliegen dabei meist nur wenige Meter über den Wellen und spähen in die Tiefe. Entdecken ihre scharfen Augen eine mögliche Beute, legt die Küstenseeschwalbe ihre Flügel ein wenig an, kippt ab und stößt im Sturzflug auf ihr Unterwasserziel zu.

Junge Tiere müssen diese Technik lange üben, bis sie ihren ersten Fisch erwischen. Küstenseeschwalben müssen ihre Beute gut im Blick haben, was aber nur am hellen Tag und bei klarem Wasser funktioniert. Das erklärt die langen Wanderungen der Vögel: Sowohl im hohen Norden wie auch im tiefen Süden enthalten die kalten Gewässer viele Nährstoffe. Daher gibt es dort viele Fische, trotzdem ist das Wasser meist sehr klar. Da die Nächte im polaren Sommer kurz sind oder jenseits der Polarkreise zeitweise sogar ganz ausfallen, haben die Tiere für ihre schwierige Jagd genügend Zeit.

Offensichtlich nutzen auch andere Vögel diesen Vorteil, wie Bart Kempenaers und Niels Rattenborg 2012 im hohen Norden Alaskas feststellten. Die beiden Forscher vom Max-Planck-Institut für Ornithologie im oberbayerischen Seewiesen untersuchten mit kleinen Sendern die Gehirnströme männlicher Graubruststrandläufer. Während der Polartage ist in der Balzzeit an Ausschlafen nicht zu denken. Die etwa amselgroßen Schnepfenvögel leisten sich dann nur Mikroschlafperioden von allenfalls wenigen Minuten Dauer, wie die beiden Biologen registrierten.

Im Winter gibt es im hohen Norden dagegen nur wenige Stunden Tageslicht; während der Polarnacht steigt die Sonne erst gar nicht über den Horizont. Vögel wie die Küstenseeschwalben würden dort also hungern. In der gleichen Zeit sind aber die Tage im Südsommer vor der Antarktis besonders

Die Wege der Vogelgrippe

Wenn Epidemiologen rätseln, auf welchen Wegen die Vogelgrippe aus Asien nach Europa kommt, haben sie vor allem zwei Verdächtige im Visier: den internationalen Tierhandel und die Zugvögel. Enten könnten zum Beispiel die für Menschen gefährlichen H5N1-Viren weitertragen. So brüten Stockenten fast überall in Nordamerika, Sibirien und Europa, überwintern aber auch im Süden Chinas und damit in einem Brennpunkt der Vogelgrippe.

Um mehr über das Leben dieser Vögel zu erfahren, rüsten Martin Wikelski und seine Mitarbeiter von Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell einzelne Tiere mit Sendern aus, die nicht nur die Position, sondern auch Körperdaten wie zum

Beispiel die Herzschlagrate verraten. So erfahren die Forscher einiges über den Alltag der Enten: Wo halten sie sich auf, wohin wandern sie, welche Situationen stressen sie, welchen Gefahren sind sie ausgesetzt und wie kommen sie zu Tode?

In Schweden bauen die Ornithologen große Fallen auf dem Wasser. Mit Hilfe von dort stationierten Stockenten und Futter werden dann Artgenossen angelockt. Die so gefangenen Zugvögel werden auf Erreger wie Viren für Vogelgrippe oder Maul- und Klauenseuche untersucht. Mit Sendern versehen dürfen diese Enten dann weiter fliegen und verraten so weitere Details aus ihrem Leben.



ROLAND KNAUER



ROLAND KNAUER

Mit kleinen Sendern ausgerüstete Kraniche, Graubruststrandläufer, Küstenseeschwalben und Palmenflughunde (von links nach rechts) sollen ihre Flugdaten in Zukunft live über das ICARUS-Satellitensystem (rechts) an Wissenschaftler übertragen.

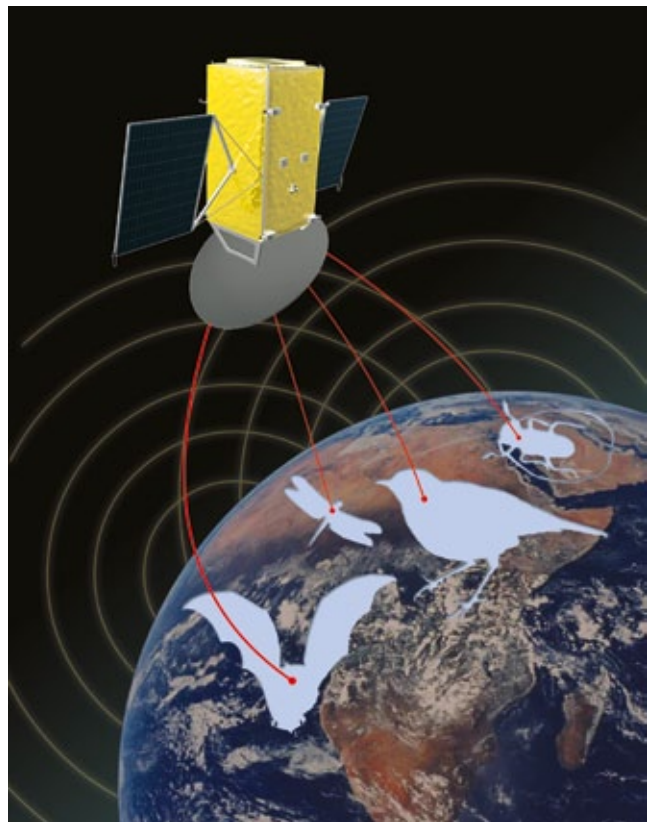
lang, in den klaren Gewässern wimmelt es von Fischen. Auch wenn es viel Energie und Zeit kostet, rentiert sich offenbar der lange Flug zu den ergiebigen Jagdrevieren im tiefen Süden.

Seit die Forscher wandernden Tieren winzige Fahrten-schreiber anheften, erhalten sie also detaillierte Daten. Dabei erleben sie häufig große Überraschungen. So haben Martin Wikelski und seine Kollegen von der Universität in Caracas und der amerikanischen Princeton University vor einigen Jahren in Venezuela ein Freilandexperiment gestartet. Die Forscher haben in einer Karsthöhle in der Nähe der Stadt Caripe einige der Fettschwalme gefangen, die dort die Nacht verbringen und ihre Jungen füttern.

Wo Humboldt irrt

Bereits Alexander von Humboldt hatte diese exotischen Vögel auf seiner Südamerikareise 1799 in der gleichen Höhle entdeckt. 15 000 der Tiere leben dort, notierte sich der Naturforscher am Ende des 18. Jahrhunderts. Jeden Morgen kehren sie in die Höhle zurück, um ihren Nachwuchs mit den Ölfrüchten zu füttern, die sie in der Nacht gesammelt haben. Von Humboldt schloss auf diese Nahrung, als er den Boden der mehr als zehn Kilometer langen Tropfsteinhöhle näher untersuchte. Noch heute ist er mit Vogelkot und Samen von Ölfrüchten bedeckt. Direkt konnte der Naturforscher das Leben der Vögel damals aber nicht beobachten. Tagsüber leben die Fettschwalme ja in der stockdunklen Höhle und orientieren sich ähnlich wie Fledermäuse mit Klicklauten und deren Echo. Auch auf ihren nächtlichen Flügen zu den Palmen sieht man die Tiere kaum.

Das wollten Martin Wikelski und seine Kollegen mit ihren neu entwickelten Loggern ändern. Diese kleinen Flugschreiber wiegen nur wenige Prozent des Körpergewichts der Tiere und bestimmen deren Position in regelmäßigen Abständen mit Hilfe von GPS. Zusätzlich bauten die Forscher noch einen Beschleunigungsmesser ein. »Schlägt der Vogel kräftig mit den Flügeln, beschleunigt er stark«, erklärt Wikelski. Verän-



MPI FÜR ORNITHOLOGIE RADOLZELL / MAXINE

dert sich zugleich die Position, fliegt der Vogel offensichtlich. Bewegt sich der Fettschwalm aber nicht vom Fleck, obwohl der Sensor am Körper Beschleunigungen registriert, schreit das Tier höchstwahrscheinlich. Mit der Kombination von Satellitenortung und Beschleunigungsmesser können die Forscher also auf bestimmte Verhaltensweisen schließen.

Als die Fettschwalme am Abend mit ihren Loggern losflogen, war Martin Wikelski noch bester Dinge. Doch bis zum nächsten Morgen kam keiner der beiden mit Minigeräten ausgestatteten Vögel in die Höhle zurück. Dem Biologen kamen Zweifel: Vielleicht behindert der Sender die Tiere zu sehr? Sollte er das Experiment nicht besser abbrechen, um die Vögel nicht zu gefährden? Aber wenn die Tiere nicht zurückkehren, kann man ihnen die Geräte ja nicht abnehmen! Auch am folgenden Morgen tauchte keines der Tiere wieder in der Höhle auf. Die Stimmung des Forschers sank. Erst am

Ziegen warnen vor Vulkanausbrüchen

Beim Vorhersagen von Naturkatastrophen schlagen Tiere Naturwissenschaftler um Längen. Kröten, Schlangen, Elefanten oder Gänse scheinen Erdbeben, Tsunamis oder Vulkanausbrüche manchmal schon Stunden oder gar Tage im Voraus zu spüren und verschwinden dann aus gefährdeten Zonen. Für eine zuverlässige Prognose aber taugt das Verhalten einzelner Tiere wenig. Um dieses oft sagenumwobene Verhalten genauer zu ergründen, hat Martin Wikelski am Vulkan Ätna auf Sizilien zwölf Ziegen und fünf Schafe mit Halsbandsendern ausgerüstet, die online über längere Zeiträume Position und Aktivität der Tiere melden.

Beim Auswerten der Daten stach sofort ins Auge, dass zwar in den Nächten einzelne Tiere immer wieder aufwachen und ihren Standort verändern. Sechs oder sieben Stunden vor einem Vulkanausbruch aber schreckten offensichtlich viel mehr Ziegen als sonst auf, und die Logger meldeten eine erheblich gesteigerte Ak-



MARTIN WIKELSKI

Diese Ziege trägt am Halsband einen Sender, der ihre Aktivitäten an den Hängen des Ätnas in Sizilien an Forschungsinstitute überträgt. Ganz rechts sieht man das Bewegungsmuster einer Ziege am Vulkan. Die Grafik in der Mitte zeigt in Blau Stunden vor einer Eruption ein deutlich abweichendes Verhalten.

ktivität. »Mit diesem auffälligen Bewegungsmuster hätten wir jede bisher erfolgte größere Eruption Stunden vorher zuverlässig prognostizieren können«, erklärt der Max-Planck-Forscher. Eine Patentanmeldung für diese Methode ist bereits eingereicht. Weil

dritten Morgen kehrten die Versuchstiere wieder zurück, offensichtlich unversehrt. Was war inzwischen geschehen?

Die in den Loggern aufgezeichneten Daten zeigten, dass die Fettschwalme sich ganz anders verhalten, als Alexander von Humboldt vermutet hatte. Zuerst flogen sie von der Höhle zielstrebig zu einem Baum mit Ölfrüchten, der durchaus 100 Kilometer entfernt sein kann. Vollgefressen kommen sie dann aber nicht zur Höhle zurück, sondern schlafen tagsüber in einem anderen Baum, der weitere 80 Kilometer entfernt sein kann. Dort erst verdauen sie die Ölfrüchte.

Am nächsten Abend geht es dann häufig wieder zum selben Fruchtbäum zurück, wobei der Schlafbaum am darauf folgenden Morgen oft ein ganz anderer ist als der vom Vortag. Warum fliegen die Fettschwalme nicht gleich wieder in ihre Höhle zurück? Schließlich liegt sie nicht viel weiter entfernt, und die Vögel wären dort während des Schlafs vor Räubern wie etwa den nachtaktiven Ozelots geschützt. »Die Daten verraten uns, dass die Tiere in der Höhle jede Nacht bis zu 15-mal aufwachen und laut schreien. Vielleicht können sie weit weg von ihren lärmenden Artgenossen also endlich einmal ungestört ausschlafen«, spekuliert Wikelski.

Am dritten Morgen kehren die Fettschwalme jedenfalls stets zur Stammhöhle zurück, um ihren schon wartenden Nachwuchs zu füttern. Damit aber hatten die Forscher die seit Alexander von Humboldt feststehende Lehrmeinung widerlegt. Bisher ging man von einem Bestand von 15 000 Fettschwalmen in der großen Tropfsteinhöhle aus, weil man dort an jedem Tag so viele Tiere zählen kann. Wenn sie aber nur jeden dritten Tag dort nächtigen, muss es auch dreimal so viele von ihnen geben wie bisher angenommen.

Obendrein entpuppten sich die exotischen Vögel als extrem wichtige Komponente des Ökosystems Regenwald. Wenn sie in zwei von drei Nächten an jeweils anderen Schlafbäumen die Samen der verdauten Ölfrüchte ausspucken, verbreiten die Vögel Palmen und Lorbeerbäume über große Distan-

zen. Da die Art zwischen Panama und Bolivien in den Bergen Lateinamerikas in vielen großen Kolonien lebt, scheinen Fettschwalme für die Artenvielfalt dort sehr wichtig zu sein.

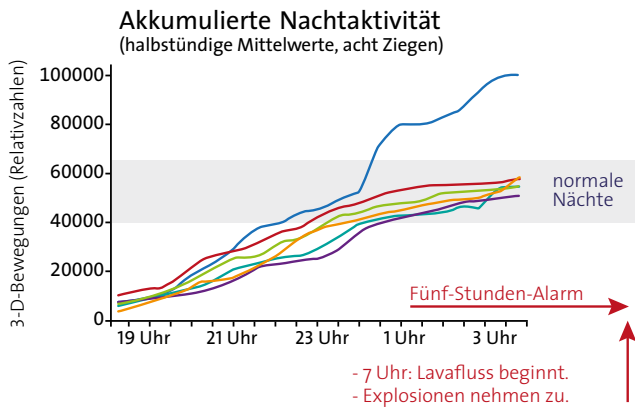
Um diese ökologische Funktion aufzuklären, plant Martin Wikelski weitere Experimente: Implantiert man die Logger in die Bauchhöhle der Tiere, können die Geräte die winzigen elektrischen Ströme von aktiven Nervenzellen aufzeichnen. Aus solchen Daten lassen sich dann die Nervenimpulse am Herzen herausfiltern und damit kann man den Vögeln sozusagen den Puls fühlen oder ihre Gehirnströme messen.

»Ähnlich könnte man auch die Nervensignale aufzeichnen, die den Darm und seine Aktivität steuern. Auf diese Weise ließe sich exakt verfolgen, wo und wann ein Vogel kotet.« Damit würde klar, wo der Fettschwalm überall die Samen von Palmen und Lorbeerbäumen deponiert. »Das liefert uns Hinweise, wie das Ökosystem im Regenwald Südamerikas funktioniert.«

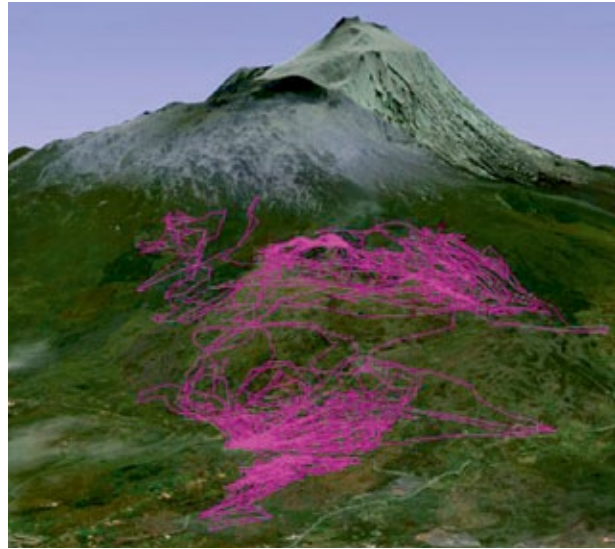


ROLAND RAUWER

Auf dem Galapagos-Archipel wandern an den Vulkanhängen Riesenschildkröten, hier auf der Insel Santa Cruz.



Elefanten zum Beispiel die Tsunamiriesenwellen von Weihnachten 2004 vorab geahnt haben sollen, will er demnächst auch testen, ob mit Sendern ausgerüstete Dickhäuter zur Katastrophenvorhersage tauglich sind.



Auch in den Wäldern Afrikas hängt die Artenvielfalt möglicherweise von solchen Flugkünstlern ab. Wer einmal Ende Oktober oder Anfang November den Kasanka-Nationalpark in Sambia besucht, kann dort das afrikanische Samenverbreitungskommando bei der Arbeit beobachten. In dichten Trauben hängen die Palmenflughunde tagsüber in den Ästen eines lichten Walds. Erst in der Dämmerung werden sie richtig aktiv. Dann schwärmen aber gleich bis zu fünf Millionen der Tiere aus und flattern unter einem Heidenspektakel zu den Bäumen, die nur zwischen Mitte Oktober und Mitte Dezember reife Früchte tragen.

Wie viele andere Flughundarten ist auch *Eidolon helvum* ein leidenschaftlicher Obstkonsument. Wenn die Früchte im Kasanka-Nationalpark reifen, ziehen die Tiere aus dem tropischen Regenwald im Kongobecken etliche tausend Kilometer weit bis nach Sambia. Die bis zu 350 Gramm schweren Säugtiere sind zwischen der Sahelzone im Norden, den großen Städten im Westen Afrikas und Sambia im Südosten des Kontinents unterwegs.

Zumindest vermuten Fledertierforscher das. Genaueres über diese Wanderungen will derzeit Dina Dechmann herausfinden, die an der Universität Konstanz in der Gruppe von Wikelski arbeitet. Im Frühjahr 2013 haben die Forscher die Tiere mit GPS-Loggern ausgerüstet und sie damit auf die Reise geschickt. Nach Auswerten dieser Daten sollte klar werden, wo Palmenflughunde überall Samen verteilen und welche Rolle sie für das Ökosystem spielen.

Doch nicht nur Vögel und Säugetiere wandern, um sich den Magen vollzuschlagen. Auch Reptilien erweisen sich als ziemlich mobil. Das haben die Max-Planck-Forscher Martin Wikelski und Stephen Blake gemeinsam mit Washington Tapia vom Galapagos-Nationalpark erfahren. Auf den Galapagosinseln Santa Cruz und Isabela rüsteten sie 17 Riesenschildkröten mit GPS-Ortungssystem und Beschleunigungsmessern aus. Die Beobachtungen zeigten, dass die bis zu 250 Kilogramm schwe-

ren, erwachsenen Tiere in der Trockenzeit im Juni bis zu zehn Kilometer weit an den Hängen der Vulkanberge entlangwandern. So erreichen die Reptilien schließlich das mehr als 1000 Meter über dem Meeresspiegel gelegene Hochland. Im Küstenbereich regnet es dann fast nie, während die Hochlagen oft im dichten Nebel liegen. Der versorgt die Pflanzen dort oben mit Feuchtigkeit, die damit weiterwachsen können und den Schildkröten Futter bieten. In der Regenzeit hingegen lassen die Niederschläge auch in den tieferen Regionen der Galapagosinseln das Grün üppig sprießen, und die Kolosse machen sich auf ihren mühevollen Rückweg.

Buckelwale schwimmen bis Hawaii

Trotz dieser plausiblen Erklärung für die Wanderungen der Riesenschildkröten gibt es noch Rätsel: Warum bleiben die jungen und kleineren Schildkröten das ganze Jahr im Tiefland? Ist die Wanderung für sie vielleicht zu anstrengend? Falls ja, weshalb sparen sich dann die älteren Tiere nicht ebenso die Kraft raubende Expedition? Gibt es im Tiefland vielleicht nicht genug Futter für alle, so dass einige wandern müssen? Oder sind die jungen Tiere noch zu empfindlich für die kühle Witterung in der Nebelzone? »Um das zu klären, rüsten wir derzeit weitere Schildkröten mit Loggern aus«, berichtet Wikelski.

Geht es bei den Riesenschildkröten ums Fressen, könnten noch größere Tiere wieder ganz andere Gründe für Wanderungen haben. Die 25 bis 30 Tonnen schweren Buckelwale fischen in den artenreichen Gewässern vor Alaska reichlich Kleintiere aus dem Wasser. In gut einem Monat schwimmen die Weibchen dann über 5000 Kilometer bis vor die Küsten Hawaiis, um dort ihren Nachwuchs auf die Welt zu bringen. Im Umfeld der Inselkette finden sie jedoch kaum Nahrung und hungern in dieser Zeit. Warum also der Umzug in die Weiten des Pazifischen Ozeans?

Als Grund für die Wanderung und die damit verbundene Fastenzeit der Buckelwale haben Forscher die Schwertwale in Verdacht. Für die auch Orca genannten Tiere, die mit bis zu neun Metern die Länge eines Lkws erreichen, wären neugeborene Buckelwalkälber ein gefundenes Fressen. Schwertwale patrouillieren zwar häufig vor Alaska, erreichen aber kaum jemals das ferne Hawaii. Vielleicht suchen Buckelwale mit ihren ausgedehnten Reisen also für ihren Nachwuchs eine sichere Kinderstube?

Um das zu aufzuklären, greifen die Forscher wieder zum probaten Mittel, die Tiere mit Sendern zu versehen. Tauchen die Wale auf, übertragen die Geräte ihre Daten zu einem Satelliten. Bei anderen Meeresbewohnern sind allerdings weitere Tricks gefordert. So beobachtet Barbara Block von der Stanford University in Kalifornien zum Beispiel die Züge von Tunfischen oder Weißen Haien. Diese Tiere aber tauchen selten oder gar nicht auf.

Da Funksignale unter Wasser kaum weitergeleitet werden, stattdessen die Verhaltensbiologin die Fische daher mit so genannten Pop-up-Geräten aus. Die Apparate registrieren in bestimmten Zeitabständen den Ort der Tiere, errechnen aus dem Wasserdruck die aktuelle Tauchtiefe, messen Wassertemperatur und Körperwärme. Ein kleiner Computer speichert alle Daten, bis das Gerät nach etlichen Monaten oder wenigen Jahren abgetrennt wird und an die Wasseroberfläche gelangt. Dort kann es sich dann bei einem Satelliten melden, und die Daten können übertragen und ausgewertet werden. Mit solchen Sendern entlarvten Forscher zum Beispiel einen Weißen Hai als Weitwanderer, der zwischen Südafrika und Australien unterwegs war.

Fledermäuse und Singvögel werden ihre Ortssignale künftig zur Raumstation ISS schicken können

Neben den Kolossen wandern aber auch Winzlinge wie die Insekten. Nachdem Martin Wikelski die Amerikanische Königlibelle an der Ostküste der USA mit Minisendern ausgestattet hatte, verfolgte er die acht Zentimeter langen und ein Gramm schweren Insekten einige hundert Kilometer weit nach Süden. Insgesamt legen die Tiere in ihrem Leben wohl einige tausend Kilometer bis nach Florida zurück, manchmal erreichen sie sogar Ölbohrplattformen im Golf von Mexiko. »Vielleicht suchen sie Gebiete, in denen ihre Larven genug zu fressen finden«, vermutet der Max-Planck-Forscher.

Um mehr zu erfahren, möchte der Biologe die Tiere am liebsten rund um die Uhr beobachten. Das aber scheitert zurzeit noch an der Größe der Logger. Deren Gewicht sollte nämlich nicht mehr als fünf Prozent des Körpergewichts des Tieres betragen. Für einen mittelschweren Menschen dürfte ein solches Gepäck daher höchstens vier Kilogramm wiegen, eine 20 Gramm schwere Kohlmeise sollte allenfalls mit einem zusätzlichen Gramm belastet werden. Für die Ingenieure in der Elektronikindustrie stellte die Entwicklung entsprechender Superminisender eine enorme Herausforderung dar. Doch schließlich lieferten sie den Radolfzeller Forschern ein 0,2 Gramm leichtes Gerät, mit dem Wikelski 2010 wäh-



MPI FÜR ÖKONTHOLOGIE RADOLFZELL

Mit winzigen Sendern ausgerüstet, können selbst Insekten wie die Erdhummel links im Bild den Biologen laufend ihre Position verraten.

rend der Obstblüte am Bodensee erstmals eine Hummel ausgestattet. Tatsächlich flog das Insekt trotz des Gepäcks einige Kilometer weit zu den verlockendsten Blüten.

Bei so kleinen Sendern und Tieren haben die Forscher aber ein großes Problem: Auch mit den leichtesten Batterien reicht die Energie nur für Signale, die im dichten Regenwald ein paar hundert Meter oder über einer Graslandschaft einige Kilometer weit empfangen werden können. Sie müssen die Tiere also laufend verfolgen und mit einer Antenne das Signal aus relativ kurzem Abstand direkt aufzeichnen.

Das ist natürlich nicht einfach. Folgt Wikelski zum Beispiel mit Auto und Empfangsantenne einer Amsel mit Sender auf ihrem Weg von Radolfzell in Richtung Dijon in Frankreich, ist er gleich mehrfach benachteiligt. So ist er auf Straßen angewiesen, die oft in andere Richtungen als der Vogelzug führen. »Es braucht einige Erfahrung, um das Verhalten des Tiers einzuschätzen und den richtigen Weg am Boden zu finden.« Obendrein kommen Fahrzeuge mit Antennen auf dem Dach Ordnungshütern leicht verdächtig vor. Während einer Polizeikontrolle kann der Vogel jedoch schnell außer Reichweite geraten.

Auch ein mit Antennen ausgerüstetes Flugzeug löst das Problem nur teilweise. Um etwa den Flug der Küstenseeschwalben zu verfolgen, ist die Reichweite der Instituts-Cessna viel zu gering. Auf hoher See mangelt es an Landeplätzen, und Tankstellen sind noch viel dünner gesät. Auch die Ausstattung der Tiere mit Loggern, die wichtige Daten speichern, hat gravierende Nachteile: Ergebnisse erhalten die Forscher ja nur, wenn sie das Gerät wieder in die Finger bekommen. Kehrt ein Vogel aber nach einem Jahr nicht in sein Sommerrevier zurück, weil er sein Glück vielleicht in einer anderen Gegend sucht oder einem Greifvogel zum Opfer gefallen ist, stehen die Forscher mit leeren Händen da.

Immerhin können große Vögel wie Störche, Kraniche oder Gänse etwas schwerere Sender problemlos tragen, die zumindest jeden Tag zweimal die Position des Tiers über Satel-



Diese Orchideenbiene zeigt, dass auch die Sendertechnologie an Grenzen stößt. Sogar kleinste Geräte belasten Tiere wie Bienen und Hummeln teils erheblich.

lit direkt übermitteln. Damit ließ sich etwa das Schicksal des in Marokko notgelandeten Storches klären.

Martin Wikelski relativierte mit dieser Methode inzwischen auch den einen oder anderen Zugvogelrekord. So wurden aus Flugzeugen Schwarzhalskraniche beobachtet, die in 9000 Metern über dem Meeresspiegel noch die höchsten Gipfel des Himalajas überflogen. Als der Max-Planck-Forscher diesen schier unglaublichen Leistungen mit Satellitenfunkloggern auf den Grund gehen wollte, wählten die Vögel dann aber doch eine einfachere Route. Aus ihren Wintergebieten im Zentraltal des Königreichs Bhutan flogen die Vögel vor allem über die bequemerer Gebirgspässe zu ihren Brutplätzen in Hochland von Tibet. Diese rund 100 Kilometer lange Strecke bewältigen die Kraniche flott in gerade einmal 90 Minuten, fliegen dabei aber nicht höher als 7000 Meter. Kräftezehrende Gipfelüberflüge in 9000 Metern scheinen also eher eine Ausnahme als der Regelfall zu sein.

Die Online-Satellitenfunk-Methode möchte Wikelski demnächst auch auf kleinere Tiere ausdehnen. Dafür gibt es eine ganze Reihe von Kandidaten: von den Fettschwalmen in Südamerika bis zu Singvögeln in Eurasien und Amerika, von deren Zügen bisher allenfalls winzige Bruchstücke bekannt sind, oder den Fledermäusen der Alten Welt. Viele der Großen Abendsegler zum Beispiel, einer Fledermausart aus der Familie der Glattnasen, verbringen den Winter nicht in ihren Sommergebieten im Nordosten Deutschlands, in Polen oder in den baltischen Ländern. Stattdessen wandern sie für die kalte Jahreszeit in die mildere Bodenseeregion oder in den Süden Frankreichs. Um über solche Wanderzüge mehr zu erfahren, bräuchte man einen Satellitenfunk, der allenfalls 1,5 Gramm wiegt, um die 25 Gramm schweren Tiere nicht allzu sehr zu belasten.

Für diese Leichtgewichte hat Wikelski die »International Cooperation for Animal Research Using Space« oder kurz ICARUS ins Leben gerufen. Das Projekt treibt er derzeit zusammen mit Kollegen wie Roland Kays vom North Carolina

Museum of Natural Sciences und Kasper Thorup vom Naturhistorischen Museum in Dänemark voran. Die Gruppe entwickelt kleine Logger mit rund fünf Gramm Gewicht, die von 100 Gramm schweren Amseln oder Küstenseeschwalben mehrmals täglich ihre Signale an Satelliten senden. Die Miniaturausgabe dieser Sender soll demnächst sogar nur noch 1,5 Gramm wiegen und eignet sich daher auch für den Großen Abendsegler und einige Singvögel in Mitteleuropa.

Die Signale dieser Sender gehen an eine spezielle Antenne, die voraussichtlich 2015 von der russischen Raumfahrtbehörde Roskosmos an der Internationalen Raumstation ISS angebracht werden soll. Künftig sollen ähnliche Antennen auch auf einigen Satelliten mitfliegen, die ohne Bodenstationen Mobilfunk und Internet von fast jedem Ort der Erde aus ermöglichen. Um seine Daten zu übertragen, berechnet ein Logger auf einem Tier dann mit Hilfe des GPS, wann wieder eine Empfangsantenne im Weltraum in Sichtweite kommt, und sendet im richtigen Moment die Informationen.

Ein Computer an Bord der ISS bereitet die schwachen Signale der Logger so auf, dass sie weitergenutzt werden können. Diese Informationen gehen dann an eine bereits vorbereitete Datenbank namens »Movebank«, auf die alle beteiligten Forscher und andere Interessierte Zugriff haben. Insgesamt 15 000 Logger soll ICARUS so von der ISS aus einmal im Blick behalten. Einige davon werden bestimmt neue Überraschungen aus der Welt der wandernden Tiere liefern. ~

DER AUTOR



Roland Knauer, geboren 1957, hat Chemie studiert und 1987 in Molekularbiologie, Virologie und Immunbiologie promoviert. Seit 1989 arbeitet er als freier Wissenschaftsjournalist und Fotograf für etliche Tageszeitungen im deutschsprachigen Raum, sowie für Zeitschriften und Magazine. Mit seiner Kollegin Kerstin Viering hat er mehr als ein Dutzend Sachbücher und einige hundert Buchbeiträge publiziert (www.naturejournalism.com).

QUELLEN

- Berthold, P.:** Vogelzug: Eine aktuelle Gesamtübersicht. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 7. Auflage, 2011
Elphick, J.: Atlas des Vogelzugs, Haupt Verlag, Bern 2008
Kostyal, K. M.: Das große Wunder der Tierwanderungen. National Geographic Deutschland, Hamburg 2010

WEBLINKS

- www.orn.mpg.de/3113/Standort_Radolfzell
 Webseite des Max-Planck-Instituts für Ornithologie
- www.wildvogelhilfe.org/sonderbeitraege/grundwissen/vogelzug.html
 Informationen rund um den Vogelzug
- www.movebank.org/
 Datenbank, mit denen Wissenschaftler die Wege der Zugvögel verfolgen können

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199291



MATERIALFORSCHUNG

Biegsamer Beton

Beton ist spröde und bricht schon bei relativ geringen Zug- oder Scherspannungen. Das schränkt seine Verwendung als Baumaterial erheblich ein. Ingenieuren ist es jedoch gelungen, ihn mit Kunststofffasern verformbar zu machen.

Von Victor C. Li

Seit der Erfindung des Portlandzements durch den britischen Maurer Joseph Aspdin im Jahr 1824 hat sich Beton zum wichtigsten Baustoff entwickelt. Sowohl das höchste Gebäude der Welt, der Burj Khalifa in Dubai, als auch die längste Brücke, die 165 Kilometer lange Danyang-Kunshan Grand Bridge in China, sind größtenteils daraus gefertigt. Im Jahr 2012 wurden schätzungsweise zwölf Milliarden Tonnen Beton für Bauwerke verbraucht; das entspricht zwei Tonnen pro Erdbewohner. Das Material ist inzwischen aber nicht nur Grundstoff für Häuser, Straßen und Staudämme, sondern auch Bestandteil der gesamten zivilen Infrastruktur – von Kanalisationsrohren bis Blumenkübeln.

Die Herstellung von Beton ist ein mehrstufiger, energieintensiver Prozess. Der meist als Bindemittel verwendete

Portlandzement wird durch das pulverfeine Zermahlen von Kalkstein (wegen des Kalziumgehalts) und Ton (wegen des enthaltenen Siliziums) und anschließendes Erhitzen der Mischung in einem Ofen auf mehr als 1450 Grad Celsius erzeugt. Bei derart hohen Temperaturen diffundieren die Moleküle der verschiedenen Materialien ineinander – Fachleute sprechen von Sintern.

Die resultierenden festen Brocken, Klinker genannt, werden dann erneut zusammen mit anderen Spurenstoffen gemahlen. Ein besonderes Charakteristikum von Portlandzement ist, dass er zwei Arten von Kalzium-Silizium-Verbindungen enthält: Alit und Belit. Alit verleiht ihm zu Beginn des Aushärtens Festigkeit, während Belit für die langfristige Beständigkeit sorgt.



Zur Herstellung von Beton wird Zement mit Zuschlagstoffen wie Kies oder Sand gemischt und mit Wasser versetzt. Durch chemische Reaktionen mit dem Wasser – die so genannte Hydratation – härtet das Material aus. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Umgebung feucht ist.

Zum Konstruktionsmaterial wurde Beton, als der Franzose Joseph Monier 1867 auf die Idee kam, ihn mit Stahlstäben zu verstärken (»armieren«). Seither gab es viele weitere Verbesserungen wie die Erhöhung der Druckfestigkeit oder die Einführung von selbstverdichtendem Beton, den man nach dem Gießen nicht rütteln muss, um ihn zu komprimieren und Luftporen zu entfernen. Neuerdings werden im Interesse der Umweltfreundlichkeit gerne industrielle Abfallprodukte wie Flugasche aus Kohlekraftwerken oder Schlacken aus Hochöfen als Zuschlagstoffe verwendet.

Während seiner langen Geschichte wurde Beton immer wieder an neue industrielle und gesellschaftliche Anforderungen angepasst. Dabei zeigten sich allerdings auch seine Grenzen. Hohem Druck widersteht Beton sehr gut, doch beim Ziehen oder Biegen bricht er wegen seiner Sprödigkeit relativ leicht. Dabei breitet sich ein Riss von einer bereits vorhandenen Fehlstelle aus, typischerweise entlang einer Grenzfläche zwischen Zuschlagstoffen und Bindemittel. Obwohl Beton gewöhnlich nicht darauf ausgelegt ist, größere Zugbelastungen aufzunehmen, muss er solche Kräfte in gewissem Ausmaß verkraften, um in großen Bauteilen einsetzbar zu sein. Beispielsweise entstehen Zugspannungen, wenn er beim Trocknen schrumpft. Die Stahlarmierung ist eine Möglichkeit, die Zugfestigkeit zu erhöhen. Außerdem können in

Normalerweise bricht Beton bei Überlastung – wie etwa beim Erdbeben in Kalifornien 1989 (rechts). Mit speziellen Zusätzen wird er jedoch verformbar (links). Dabei bilden sich zahlreiche Mikrorisse, die sich aber nicht weiter öffnen. Verantwortlich dafür sind Kunststofffasern geeigneter Dicke mit besonderen Oberflächeneigenschaften. Aus diesem Grund heißt das Material Engineered Cementitious Composite (gezielt entworfenes zementhaltiges Komposit) oder kurz ECC.

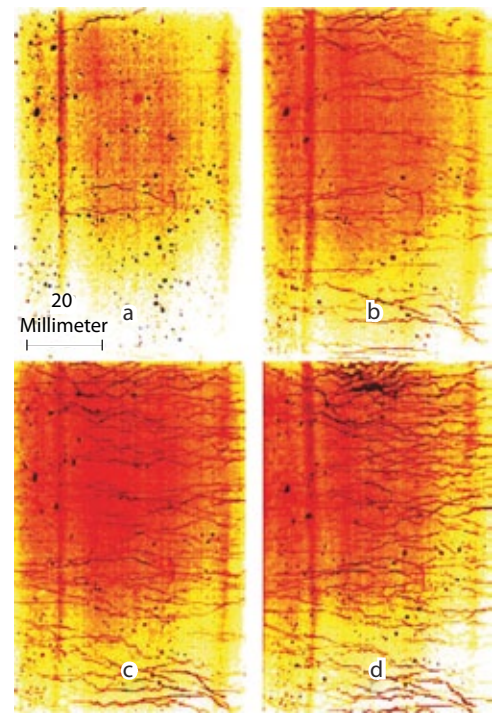
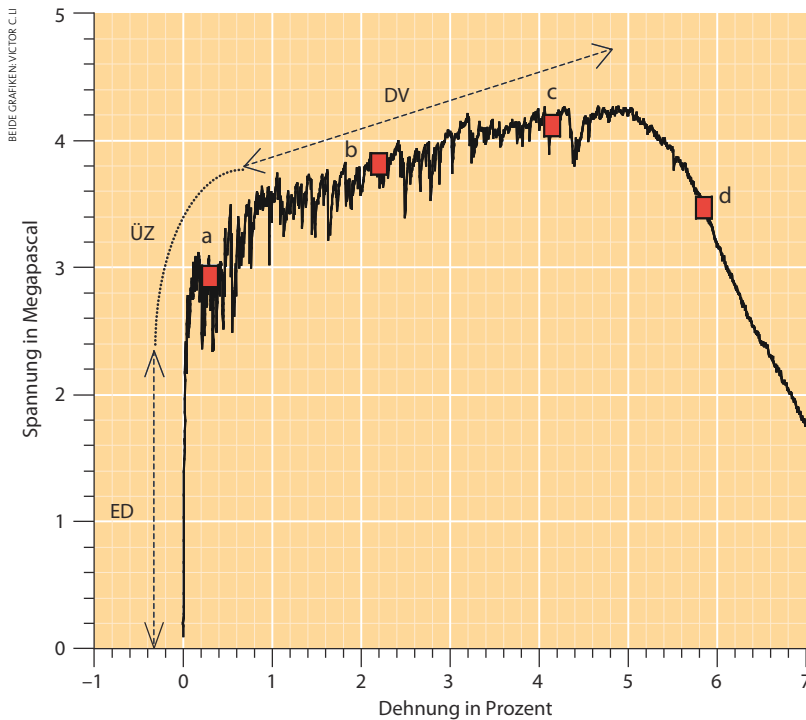
AUF EINEN BLICK

ALTER BAUSTOFF MIT NEUER FLEXIBILITÄT

1 Ohne Beton wären moderne Gebäude undenkbar. Doch seine **geringe Zugfestigkeit** birgt Gefahren. Weil er so spröde ist, kommt es bei Überlastung zu plötzlichem katastrophalem Versagen.

2 Durch Zusatz von maßgeschneiderten **Kunststofffasern** gelang die Entwicklung eines Betons, der sich bei hoher Belastung allmählich verformt, statt zu brechen. Die **Dehnung** kann bis zu fünf Prozent betragen, und die Zugfestigkeit nimmt dabei weiter zu.

3 Der Grund ist die Bildung zahlreicher **Mikrorisse**, die sich nur begrenzt öffnen. Das liegt daran, dass die Fasern anfangs ein Stück weit aus der **Zementmatrix** herausgezogen und dabei abgeschabt werden. Weil der Abrieb die Reibung erhöht, bleiben sie schließlich stecken.



Die Spannungs-Dehnungs-Kurve von biegsamem Beton (links) zerfällt in vier Abschnitte. Zunächst verformt sich das Material elastisch, allerdings nur minimal (ED). Folglich verläuft die Kurve fast senkrecht. In der anschließenden Übergangszone (ÜZ) beginnt die Steifigkeit nachzulassen. Entsprechend krümmt sich die Kurve, bevor sie im Bereich der Dehnungs-

verfestigung (DV) wieder linear verläuft. Dort verformt sich der Beton proportional zur steigenden Belastung. Sobald die Dehnungsgrenze erreicht ist, bricht das Material, und die Spannungs-Dehnungs-Kurve fällt steil ab. Eingefärbte Aufnahmen (rechts) zeigen für einzelne Punkte der Kurve die zugehörigen Rissmuster im Beton.

Betonplatten »Sehnen« aus Spanngliedern eingefügt werden. Das Ergebnis ist so genannter Spannbeton.

Trotz dieser Maßnahmen kommt es unter extremer Belastung immer wieder zu katastrophalem Versagen. So sind bei einem schweren Erdbeben in der chinesischen Provinz Sichuan im Jahr 2008 viele Stahlbetonkonstruktionen eingestürzt; mehr als 69000 Menschen starben. Und bei dem starken Tohoku-Erdbeben mit nachfolgendem Tsunami in Japan gelangte 2011 durch eine 20 Zentimeter lange Betonbruchstelle am Kernkraftwerk Fukushima Nr. 2 unkontrolliert radioaktives Wasser ins Meer.

Fehlender Mechanismus zur Energieabfuhr

Ein Beton, der nicht mehr spröde ist, wäre wesentlich sicherer. Zudem hätte er wegen seiner größeren Lebensdauer auch in wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Hinsicht Vorteile. Derzeit verfallen Betonkonstruktionen mit der Zeit, weil sich Risse bilden und Stücke von der Oberfläche abplatzen. Sie müssen deshalb immer wieder repariert werden, was erhebliche Kosten verursacht und auch dem Klima schadet; denn bei der Herstellung von Portlandzement gelangt durch den hohen Energieverbrauch viel Kohlendioxid in die Luft.

In jedem Material, das unter Spannung steht, neigen vorhandene Defekte oder Fehlstellen dazu, sich auszuweiten.

Das lässt sich nur verhindern, wenn die Spannungsenergie auf andere Weise abgebaut werden kann. Beim Beton gibt es praktisch keine Mechanismen dafür. Deshalb führen Risse zum Bruch und zum raschen Verlust der Tragfähigkeit.

Defekte im Beton können vielerlei Ursachen haben. So ist der Zusammenhalt zwischen dem mineralischen Zuschlagstoff und dem Zementbinder relativ schwach; denn an dieser Grenzfläche befinden sich besonders viele Poren und Kalziumhydroxidkristalle geringer Festigkeit. Auch Luftblasen und Schrumpfrisse bilden Fehlstellen, die von Anfang an existieren. Im Zement widersetzt sich das Kalziumsilikat-hydrat, ein Produkt der Hydratisierungsreaktion, zwar dem Eindringen eines Risses. Das gelförmige Material aufzusprengen erfordert aber nicht allzu viel Energie. Ein von einer Fehlstelle ausgehender Riss stößt deshalb auf relativ wenig Widerstand und kann sich leicht zu einem Bruch ausweiten. Dadurch ist Beton genauso spröde wie Glas.

Stahl dagegen kann durch Umarrangieren von Bindungen zwischen seinen Atomen Energie abbauen. Dadurch setzt er der Rissausbreitung einen um mehrere Größenordnungen höheren Widerstand entgegen.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, die Zahl der Fehlstellen im Beton zu senken, um seine Sprödigkeit zu verringern. Zum Bei-

spiel lassen sich Defekte an der Grenzfläche zum Zuschlagstoff unterdrücken, wenn man dessen Korngröße gering hält. Eine andere Methode, diese schwache, poröse Übergangszone zu verdichten und zu festigen, besteht in der Zugabe von »Mikrosilica«-Teilchen zur Betonmischung. Sie sind 100-mal kleiner als Portlandzementpartikel. Durch diverse Maßnahmen lässt sich außerdem die Anzahl der Poren und Luftblasen klein halten. Und die Zugabe von Teilchen, die einer lokalen Spannungskonzentration entgegenwirken, senkt die Gefahr, dass von einer solchen Stelle ein Riss ausgeht.

Zwar steigern Methoden, die das Entstehen eines katastrophalen Bruchs verzögern, die Zug- und vor allem Druckfestigkeit. Dennoch bleibt das Material spröde oder wird sogar noch spröder; denn man muss mehr elastische Energie zuführen, bis sich ein Riss bildet. Dadurch breitet er sich aber auch schneller aus, sobald er entstanden ist. Die Beseitigung von Fehlstellen führt also zwar zu einem festeren Beton; doch dieser bricht bei zu hoher Belastung noch schneller.

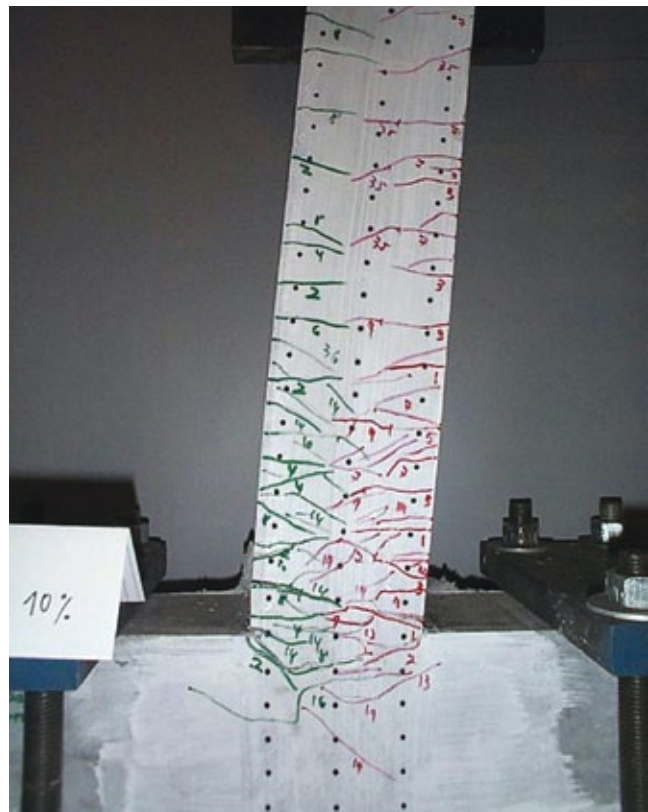
Faserverstärkter Beton enthält ein Netzwerk von kurzen Strängen, die üblicherweise aus Stahl, Glas oder Kunststoff bestehen. Deren Zusatz kann die Bruchzähigkeit – den Widerstand gegen die Ausbreitung eines Risses – deutlich erhöhen. Allerdings beschränkt sich ihre Wirkung auf einen kleinen Bereich um die Rissspitze. Das Ergebnis ist eine modifizierte Form des Versagens, bei der ein Bruch nicht plötzlich,

sondern schrittweise auftritt. Die Faserverstärkung verringert also die Sprödigkeit von Beton, beseitigt sie aber nicht.

Lange Zeit galt verformbarer (»duktiler«) Beton als Widerspruch in sich. Doch das hat sich geändert. Sicher: Beton ist kein Gummi und sollte es auch nicht werden, weil er dann genau jene Eigenschaften verlieren würde, die ihn als Baustoff auszeichnen. Duktiles Beton muss bei normalem Einsatz ebenso steif sein wie das herkömmliche Material. Aber unter extremen Bedingungen sollte er ohne Verlust der Tragfähigkeit nachgeben und sich verformen. In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat meine Arbeitsgruppe an der University of Michigan in Ann Arbor einen solchen Beton entwickelt, der die offizielle Bezeichnung Engineered Cementitious Composite (ECC, gezielt entworfenes zementhaltiges Verbundmaterial) trägt. Seine ungewöhnlichen Eigenschaften verdankt er dem Zusatz von speziellen Kunststofffasern.

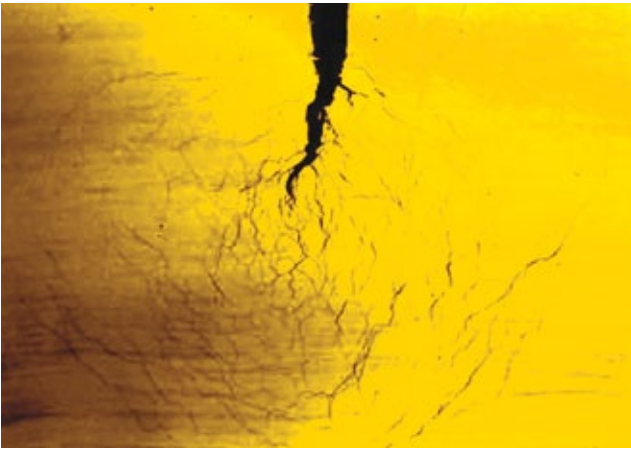
Material mit verblüffenden Eigenschaften

Alle Werkstoffe haben eine Grenze für Belastungen, die sie ohne irreversible Schäden verkraften. Wird sie überschritten, verformen sich duktile Stoffe dauerhaft, brechen aber nicht. Dasselbe gilt für Beschädigungen etwa durch eine Kerbe. Die Spannung verteilt sich dabei auf das umgebende Material, was ein Totalversagen durch einen sich ausbreitenden Riss verhindert. Um die Duktilität eines Werkstoffs zu prüfen,

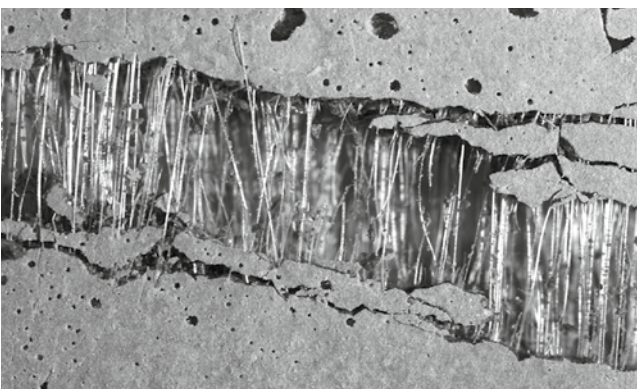


BEIDE FOTOS: VICTOR CUI

Bei einem herkömmlichen Stahlbetonpfeiler (links) platzt der Beton, wenn er – etwa bei einem Erdbeben – rasch hin- und herbewegt wird, von der Bewehrung aus Stahl ab. In seinem Gegenstück aus biegsamem Beton (rechts) treten zwar Mikrorisse auf (rot und grün markierte Linien), aber der Pfeiler bleibt sogar ohne Verstärkung mit Stahlstäben intakt.



Biegsamer Beton verträgt auch Kerben, ohne zu zerspringen. Wie diese eingefärbten Aufnahmen zeigen, bildet sich rund um die Kerbspitze ein Hof von Mikrorissen. Diese verteilen die Spannung weiträumig. So verhindern sie, dass sich von der Kerbe aus ein breiter Riss quer durch das Material ausbreitet.

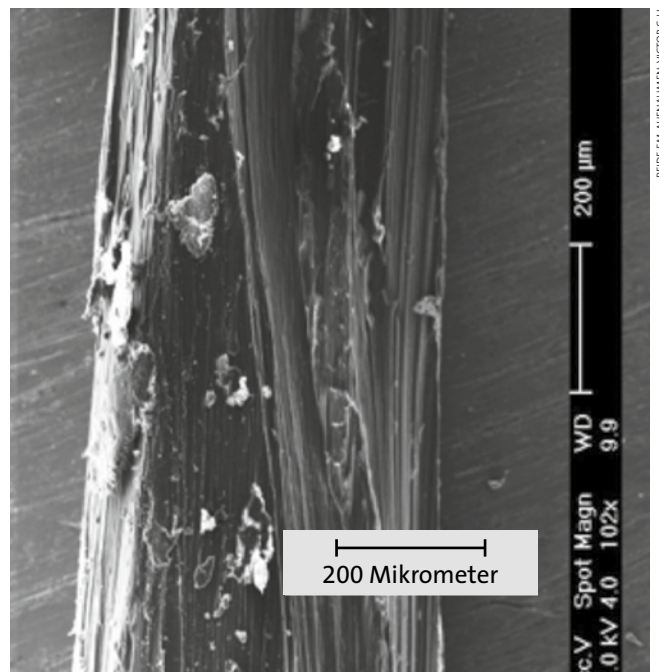


Kunststofffasern in biegsamem Beton hindern die entstehenden Mikrorisse daran, sich zu verbreitern (links; der abgebildete Bereich ist etwa fünf Millimeter breit). Sie haben einen gleitfördernden Überzug, so dass sie sich zunächst ein Stück aus der Zementmatrix herausziehen lassen. Dabei wird jedoch die Gleitschicht abgeschabt (rechts). Der Abrieb sorgt dann zusammen mit dem gut haftenden Inneren dafür, dass die Fasern verkantet und stecken bleiben.

misst man seine Dehnung unter wachsender Zugspannung, bis er seine Tragfähigkeit verliert. Als Maß der Verformbarkeit dient der maximale Dehnungswert, auch Dehnungskapazität genannt. In der Praxis spannt man einen rechteckigen Probekörper an beiden Enden hydraulisch ein, zieht ihn auseinander und misst seine Dehnung in Abhängigkeit von der angelegten Zugspannung. Die resultierende Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreibt das mechanische Verhalten des Materials unter Zugbelastung. Für spröde Stoffe ist diese Kurve eine fast senkrechte Linie, die beim Bruch des Probekörpers endet. Die Dehnungskapazität von Normalbeton beträgt nur etwa 0,01 Prozent.

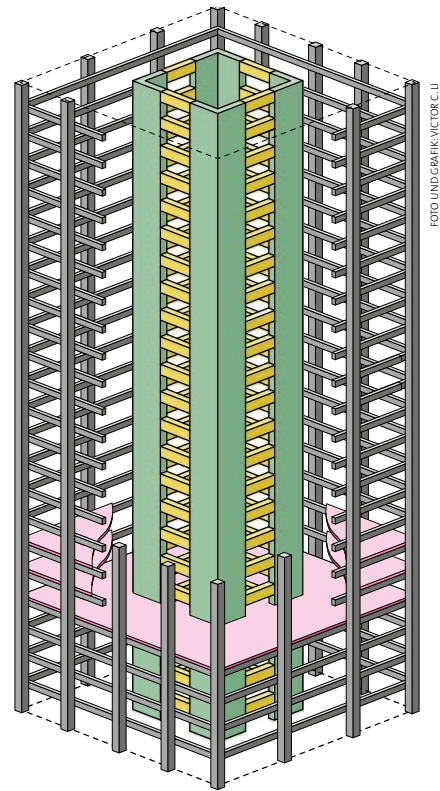
Die Spannungs-Dehnungs-Kurve von ECC sieht völlig anders aus (Grafik S. 86 oben). Sie setzt sich aus vier Abschnitten zusammen. Da ist zunächst der Bereich der linearen elastischen Verformung, in dem die Kurve wie bei herkömmlichem Beton fast senkrecht verläuft. Hier nimmt das Material wieder seine frühere Form an, sobald es entlastet wird. Nach dem Erreichen der Elastizitätsgrenze folgt eine Übergangszone, in der sich die Kurve zu krümmen beginnt. Dabei nimmt die »effektive Steifigkeit« des Betons allmählich ab. Der dritte Abschnitt kennzeichnet den Bereich der fast linearen »inelastischen Dehnungsverfestigung«. Hier verläuft die Kurve erneut geradlinig, aber mit einer deutlich geringeren Steigung. Beim Überschreiten der Dehnungskapazität kommt es schließlich zum Versagen, und der vierte Abschnitt der Spannungs-Dehnungs-Kurve beginnt, in dem sie steil abfällt.

Der Bereich der elastischen Verformung geht bis zu einem Dehnungswert von etwa 0,01 Prozent, wie er auch bei normalem Beton unmittelbar vor dem Versagen gemessen wird. Die Übergangszone der Kurve erstreckt sich über den Dehnungsbereich von 0,01 bis etwa 1 Prozent. Dabei geben zunächst größere, bereits bestehende Fehlstellen nach, bevor





Im 2007 fertig gestellten, 41-stöckigen Nabeaure Yokohama Residential Tower (links) in Tokio verbinden auf jeder Etage vier Träger aus biegsamem Beton (Skizze rechts, gelb) die Ecken der Kernstruktur (grün). Sie sollen Scherspannungen, die bei Erdbeben auftreten, durch Verformung auffangen.



Mikrorisse entstehen, die mit zunehmender Spannung von immer kleineren Defekten ausgehen. Dieses Verhalten lässt auf eine statistische Größenverteilung der Fehlstellen schließen. Wären alle gleich groß, gäbe es keine Übergangszone. Dann würde die Spannungs-Dehnungs-Kurve am Ende des elastischen Abschnitts einfach abknicken und direkt in den Bereich der inelastischen Dehnungsverfestigung übergehen.

Dort treten schließlich viele weitere, fast parallele Mikrorisse senkrecht zur Richtung der Zugspannung auf. Anders als Risse in herkömmlichem oder faserverstärktem Beton tragen sie aber weiterhin einen Anteil der Last, der sogar zunimmt, bevor das Material schließlich versagt. Das passiert, abhängig von der speziellen Version des Werkstoffs, bei einer Streckung von etwa zwei bis fünf Prozent. Damit liegt die Dehnungskapazität von ECC zwei Größenordnungen über der von herkömmlichem Beton.

Es ist die kontrollierte Öffnung der Mikrorisse, die dem Material seine Duktilität verleiht. Risse sind also nicht nur unvermeidlich, sondern sogar notwendig; denn sie nehmen die wachsende Spannungsenergie auf, bevor sich eine Fehlstelle zu einem Bruch entwickeln kann. Damit wirken sie ähnlich wie die Knautschzone eines Autos bei einem Unfall – nur dass es dabei um eine Stauchung geht.

Wie Aufnahmen gestreckter Proben zeigen, verbreitern sich die Mikrorisse zunächst fast linear mit der Dehnung. Sobald diese etwa ein Prozent erreicht hat, nimmt die Rissbreite trotz weiter ansteigender Spannung aber nicht mehr zu, sondern bleibt typischerweise unter einem Wert 100 Mikrometern. Bei einem von uns entwickelten ECC geht sie sogar nicht über etwa 20 Mikrometer hinaus. Der Grund dafür sind die schon erwähnten Kunststofffasern, die sich teils quer zum Mikroriss erstrecken und diesen daran hindern, sich weiter zu öffnen. Auf diesen entscheidenden Aspekt gehe ich weiter unten detaillierter ein.

Warum Fehlstellen günstig sind

Auch eine Kerbung verkräftet das ECC problemlos. Insbesondere bildet sich an der Spitze des Einschnitts kein sich rasch ausbreitender Riss wie bei normalem oder faserverstärktem Beton. Vielmehr entsteht eine zwiebelartige Schadenszone mit zahlreichen gekrümmt verlaufenden Mikrorissen (Bilder links oben). Diese Zone erstreckte sich bei unseren Versuchen teils bis zum gegenüberliegenden Rand des Probekörpers – selbst wenn dieser 300 Millimeter breit und 61 Millimeter dick war. Die großräumige Verteilung der Belastung um eine Kerbe ist das Kennzeichen eines wirklich duktilen Materials.

Bei einem kerbunempfindlichen Werkstoff nimmt die Festigkeit normalerweise linear mit der Kerbtiefe ab, während sie bei gewöhnlichem Beton noch viel schneller zurückgeht. In unseren Tests an ECC-Probekörpern mit zwei Kerben an gegenüberliegenden Seiten sank die Belastbarkeit aber sogar weniger stark, als bei linearer Abnahme zu erwarten war. Das lässt sich erklären, wenn man annimmt, dass die Zugfes-

tigkeit durch die schwächste Schicht bestimmt wird, die als erste aufreißt. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um diejenige mit der geringsten Menge an überbrückenden Fasern (wenn diese uneinheitlich verteilt sind). In der Regel wird die schwächste Schicht aber nicht ausgerechnet in der Engstelle zwischen den beiden Kerben liegen, wo der Bruch erfolgt, weil die Probe hier am dünnsten ist.

Da sich die inelastische Verformung biegsamen Betons aus der Bildung von Mikrorissen ergibt und diese von bereits vorhandenen Fehlern im Material ausgehen, kommt es entscheidend darauf an, die Fehlstellenzahl und -größe im ECC zu steuern. Insbesondere müssen an den vorhandenen Defekten neue Mikrorisse entstehen können, bevor die schon existierenden ihre Belastungsgrenze erreicht haben. Deshalb sind nicht nur genügend viele Fehlstellen nötig, sie dürfen auch nicht zu klein sein. Wenn sich erst bei sehr hohen Belastungen ein Riss bildet, besteht die Gefahr eines großen lokalen Bruchs. All das steht in krassem Widerspruch zum Konzept des hochfesten Betons, wo versucht wird, die Fehl-

stellen durch eine enge Partikelpackung und andere Maßnahmen möglichst klein zu halten oder völlig zu beseitigen.

Dagegen hat meine Arbeitsgruppe bewiesen, dass es sogar günstig ist, Defekte künstlich einzuführen. Als Paradebeispiel dafür kann eine ECC-Version gelten, die sich für schnelle Reparaturen eignet, weil sie früh im Aushärtungsprozess eine hohe Festigkeit entwickelt. Hier geben wir dem Zement kleine Polystyrolpartikel mit bis zu vier Millimeter Durchmesser bei, die sich nicht gut mit Zement verbinden und deshalb Schwachpunkte sind, an denen Mikrorisse auftreten können.

Die Fehlstellen dürfen aber auch nicht zu groß sein; sonst bilden sich die Mikrorisse zu leicht und werden zu ausgedehnt. Außerdem leidet die Druckfestigkeit. Es gibt also einen optimalen Größenbereich für die Defekte, der dafür sorgt, dass sich bei steigender Zugbelastung allmählich immer neue Mikrorisse entwickeln. Die statistische Verteilung der Defektgröße regelt somit die Geschwindigkeit, mit der die effektive Steifigkeit schrittweise ab- und die inelastische Verformung zunimmt. Insofern bestimmt sie den Verlauf der Zugspannungs-Dehnungs-Kurve eines ECC, vor allem im Übergangs- und Dehnungsverfestigungsbereich.

Die Bedeutung der Kunststofffasern

Eine ganz wesentliche Rolle spielen aber auch die zugesetzten Polymerfasern. Sie entscheiden über die Tragfähigkeit der Mikrorissebenen, die pro Quadratzentimeter im Mittel mehr als 1000 von ihnen enthalten. Bei unseren ECCs verwenden wir üblicherweise Fasern aus Polyvinylalkohol (PVA) mit einem Durchmesser von 39 Mikrometern.

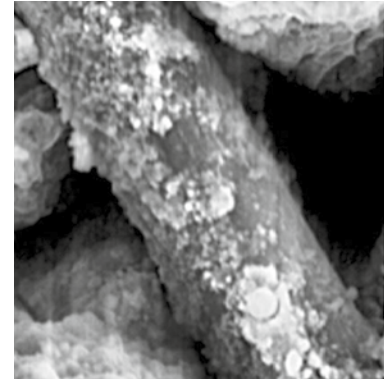
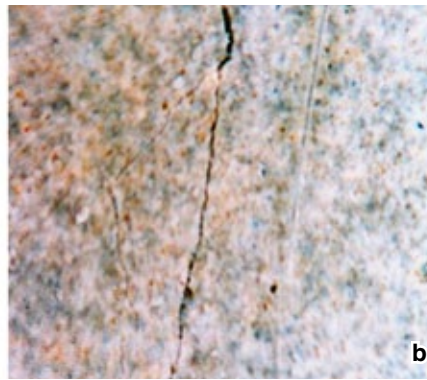
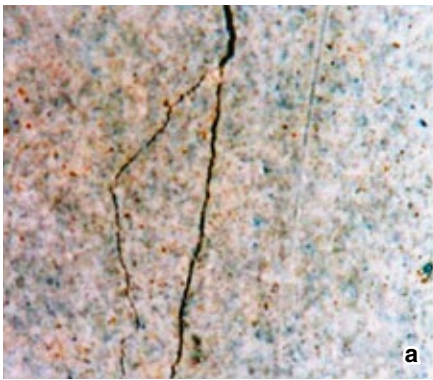
Wenn sich ein Mikroriss öffnet, steigt zunächst die auf die Fasern ausgeübte Kraft. Die Energie, die sie auffangen müssen, bleibt allerdings begrenzt, weil sich der Spalt nicht über einen gewissen Wert hinaus verbreitert. Deshalb besteht auch keine Gefahr, dass sie reißen oder komplett aus der Matrix herausgezogen werden, während sich der Mikroriss verlängert. Man spricht von flacher Rissausbreitung. Normalerweise wird ein Spalt mit zunehmender Länge dagegen immer breiter.

Sobald solch ein flacher Mikroriss entstanden ist und die ihn überbrückenden Fasern einen Teil der Spannung aufgenommen haben, bewirkt jede zusätzliche Belastung, dass sich an anderen Fehlstellen weitere Mikrorisse bilden. Dadurch erhöht sich die Tragfähigkeit des Betons, während er sich weiter dehnt.

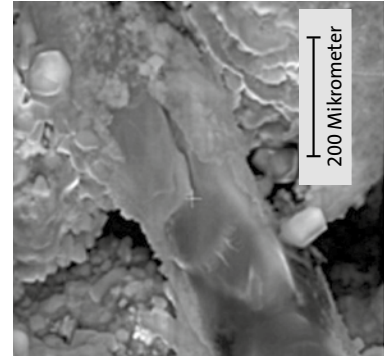
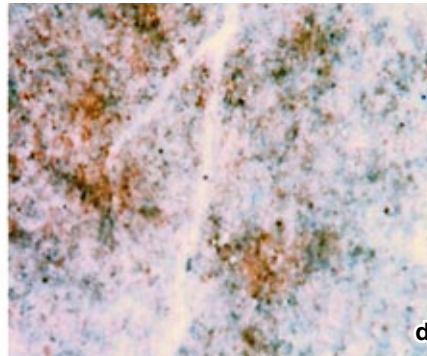
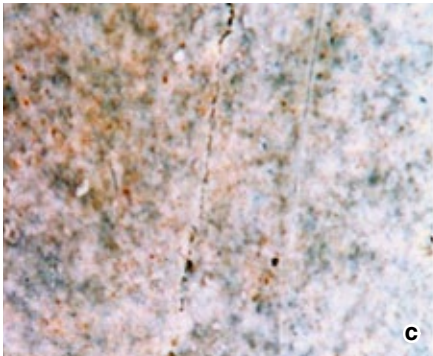
Im Verlauf der vielfachen Rissbildung hängt die Zugbelastbarkeit der vorhandenen Mikrorisse davon ab, welche Spannung die sie überbrückenden Fasern verkraften. Da diese innerhalb des Komposits nicht völlig gleichmäßig verteilt sind, variiert der betreffende Wert von einer Rissebene zur anderen. Das ECC hat seine endgültige Zugfestigkeit erreicht, sobald die Belastbarkeit der Faserüberbrückung an einem der Mikrorisse voll ausgeschöpft ist. Menge, Durchmesser und Festigkeit der Fasern spielen also eine entscheidende Rolle. Zusammen mit der anfänglichen Verteilung der Fehlstellen bestimmen sie die Zugduktilität des Komposits.



Ein 2005 gegossenes Stück Fahrbahn aus biegsamem Beton auf einer Brücke im Südosten Michigans (oben) schließt sich nahtlos an den Asphalt links und rechts an. Die ECC-Platte übernimmt die Funktion einer herkömmlichen Dehnungsfuge. Während diese Fugen sonst schnell verschleißen, erfüllt sie bis heute ohne jede Reparatur ihre Aufgabe (unten).



AUFNAHME: VICTOR CUI



Die Wechselwirkung zwischen Mikrorissen und Fasern ist komplex. Das gilt insbesondere dann, wenn beide sich unter einem schrägen Winkel kreuzen. Das aber dürfte bei den meisten Fasern der Fall sein, da sie innerhalb der Mörtelmatrix zufällig orientiert sind. Wichtig ist, dass sie während der Öffnung der Risse ein wenig verrutschen. Anderenfalls würden sie brechen. Sie dürfen aber nicht zu stark rutschen; sonst ginge die Verbundwirkung verloren, und der Mikroriss würde seine flache Form verlieren und sich in einen makroskopischen Bruch verwandeln.

In einem ECC ist der Schlupf kein einfacher Reibungsprozess, sondern beinhaltet eine Härtungsreaktion, so dass der Gleitwiderstand der Grenzfläche zwischen der Faser und dem umgebenden Mörtel während des Verrutschens zunimmt. Dieser Vorgang muss sorgfältig gesteuert sein, weil von ihm die Beziehung zwischen Spannung und Rissöffnung abhängt.

Die hochgradig nichtlineare Schlupfhärtung ergibt sich aus einer bewusst vorgesehenen Beschädigung der Faser beim Rutschen: Ihre Oberfläche wird dabei vom umgebenden rauen Zement – vor allem am hinteren Ende – zunehmend abgeschabt. Der sich ansammelnde Abrieb bewirkt, dass sich die Faser im Matrixtunnel, durch den sie rutscht, verkantet. Deshalb sind zum weiteren Herausziehen größere Kräfte nötig, und der Schlupf kommt zum Stillstand.

Die Steuerung des Vorgangs erfordert, die Oberflächenchemie der Faser systematisch abzustimmen. In meinem Arbeitskreis verwenden wir deshalb hydrophile – Wasser liebende – PVA-Fasern. Die meisten anderen Kunststofffasern stoßen Wasser ab, sind also hydrophob, und lassen sich mit wenig Widerstand aus Beton herausziehen. Die PVA-Fasern dagegen haften wegen ihrer hydrophilen Oberfläche sogar ei-

Biegsamer Beton ist auch selbstheilend. Die Aufnahmeserie (a bis d) dokumentiert, wie sich ein verzweigter Riss durch mehrfaches Befeuchten und Trockenlassen wieder schließt. Die beiden mikroskopischen Bilder (rechts), die direkt nach der Beschädigung (oben) und 36 Stunden später (unten) entstanden, lassen erkennen, dass sich bei der Selbstheilung innerhalb des Risses und auf den Fasern, die ihn überbrücken, neues Material abscheidet.

gentlich zu stark an der Zementmatrix, weil sie mit Metallhydroxiden komplexe Cluster bilden. Sie neigen folglich dazu, beim Herausziehen zu brechen. Um das zu verhindern, überziehen wir sie mit einer 10 bis 100 Nanometer dicken Schicht eines hydrophoben Materials. Durch diesen Überzug ist das Haftvermögen zunächst nicht allzu hoch. Wenn er abgeschabt wird, sorgt neben dem Abrieb auch der freigelegte hydrophile Kern für eine festere Haftung an der Zementmatrix.

Bewährung in der Praxis

Unsere ECCs haben bereits großtechnische Anwendungen gefunden – etwa für vorgefertigte Träger im Innern einiger japanischer Hochhäuser zur Verbesserung der Erdbebensicherheit. Eines davon ist der 2007 fertig gestellte, 41-geschossige Nabeaure Yokohama Residential Tower in Tokio (siehe Foto S. 89). Vier ECC-Träger auf jeder Etage verbinden hier die Ecken der Kernstruktur. Bei einem Erdbeben sind diese Verbindungsbalken großen Scherkräften ausgesetzt. Durch Verformung führen sie die einwirkende seismische Energie ab. Da die Festigkeit unter der Deformation nicht leidet, kommt es nicht zum Kollaps des Hochhauses.

Biegsamer Beton kann auch die Lebensdauer einer technischen Konstruktion erhöhen, indem er Frostschäden, die Korrosion des Bewehrungsstahls durch eindringendes Chlorid (etwa von Streusalz) und das Auftreten von Ermüdungsrissen verzögert oder minimiert. So dient eine Verbindungsplatte aus ECC auf einer Brücke im Südosten Michigans als Dehnfuge (Bild S. 90). Herkömmliche Dehnfugen aus Beton müssen häufig repariert werden, bei stark befahrenen Brücken manchmal sogar jährlich.

Die ECC-Platte ist über Bewehrungsstäbe mit den benachbarten Deckplatten und mit den Stahlträgern der Betonbrücke verbunden. Sie streckt sich dank ihrer Fähigkeit zur inelastischen Zugverformung, wenn sich die Brückenträger bei einem Temperaturanstieg ausdehnen, und zieht sich im umgekehrten Fall wieder zusammen. Anders als herkömmliche Dehnungsfugen verkantet sie aber nicht und lässt auch kein chloridhaltiges Wasser eindringen. Tatsächlich befindet sie sich immer noch im gleichen einwandfreien Zustand wie bei ihrem Einbau 2005 – bisher war keine Reparatur nötig.

Selbtheilung und Selbstüberwachung

Biegsamer Beton hat noch zwei weitere wertvolle Eigenschaften: die Fähigkeit zur Selbstheilung und zum Selbstmonitoring. Ein ECC-Bauteil könnte in künftigen Konstruktionen also Schäden von sich aus reparieren. Dank des Selbstmonitorings würde es zudem eigenständig Informationen über seinen Zustand an Kontrollstationen liefern und so eine einfache Überwachung aus der Ferne ermöglichen. Beide Funktionen beruhen auf der Schadenstoleranz des ECC und werden derzeit von uns genauer erforscht.

Die Fähigkeit zur Selbstheilung konnten wir an Proben nachweisen, die wir zuvor in einer Apparatur stark belastet und dabei beschädigt hatten. Wenn wir die Werkstücke anschließend mehrfach hintereinander befeuchteten und trocknen ließen, schlossen sich die Mikrorisse von selbst wieder.

Wie der Heilungsprozess abläuft, zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (Bilder S. 91 rechts). Darauf ist zu sehen, dass sich auf den überbrückenden Fasern innerhalb des Risses und auf der Rissoberfläche selbst neue chemische Verbindungen anlagern. Dabei handelt es sich, wie wir herausfanden, um eine Mischung aus Kalziumsilikathydrat und Kalziumhydrogenkarbonat. Sie bilden sich, wenn Wasser und kohlendioxidhaltige Luft in die Mikrorisse eindringen und mit ausgewaschenen Kalziumionen des ECC reagieren. Nach einiger Zeit hatten sie die Mikrorisse vollständig versiegelt.

Die beiden Substanzen formen ein festes Mikrokomposit, durch das der beschädigte Beton seine früheren mechanischen Eigenschaften zurückgewinnt. Das bewiesen erneute Belastungstests mit der geheilten Probe: Sie hatte ihre ursprüngliche Steifheit, Festigkeit und Duktilität komplett wiedererlangt.

Zum Selbstmonitoring dienen Leitfähigkeitsmessungen. Legt man zwischen zwei Punkten einer ECC-Probe mittels zwei Elektroden eine elektrische Spannung an, fließt ein Strom, weil sich die Ionen in den untereinander verbunde-

nen Kapillarporen des Zements jeweils zum entgegengesetzt geladenen Pol hin bewegen. Wenn sich Mikrorisse bilden, versperren sie diesen Ionen teilweise den Weg, was den lokalen Widerstand des Materials deutlich erhöhen kann. Mit weiteren Elektroden lässt sich die Potenzialverteilung rund um einen beschädigten Bereich ermitteln und daraus über eine so genannte Inversion eine Leitfähigkeitskarte des Mediums innerhalb der Schadzone erstellen.

Mit dieser auf der elektrischen Impedanztomografie (EIT) basierenden Bildgebung befasst sich die Arbeitsgruppe von Jerome Lynch in dem von ihm geleiteten Laboratory for Intelligent Structural Technology an der University of Michigan. Auf den dort erstellten vorläufigen EIT-Karten eines ECC fallen, wie erwartet, die Linien erhöhten spezifischen Widerstands – oder verringerter Leitfähigkeit – recht genau mit den sichtbaren Mikrorissen zusammen. In weiterentwickelter Form dürfte dieses Verfahren eine kostengünstige Möglichkeit bieten, nur mit Elektroden und ohne zusätzliche Sensoren den Zustand des Betons zu überwachen und genau festzustellen, wann irgendwo ein gefährlicher Defekt auftritt.

Eines nicht allzu fernen Tages könnte ein ECC-Material somit, ähnlich unserer Haut, von sich aus feststellen, wo es beschädigt wurde und daraufhin nicht nur eine Selbstheilung einleiten, sondern den Reparaturvorgang zugleich autonom überwachen. Beton wird dann nicht nur biegsam sein, sondern auch intelligent und auf diese Weise Konstruktionen ermöglichen, die das Leben in städtischen Ballungsräumen noch angenehmer und sicherer zugleich machen. ∞

DER AUTOR



Victor C. Li ist Professor für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik sowie für Materialwissenschaften und Ingenieurwesen an der University of Michigan in Ann Arbor. Er hat 1981 an der Brown University in Providence (Rhode Island) in Festkörper- und Strukturmechanik promoviert und hält neun US-Patente.

QUELLEN

- Lepech, M. D., Li, V. C.:** Large-scale Processing of Engineered Cementitious Composites. In: *ACI Materials Journal* 105, S. 358–366, 2008
- Li, V. C.:** On Engineered Cementitious Composites (ECC): A Review of the Material and its Applications. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* 1, S. 215–230, 2003
- Li, V. C.:** Tailoring ECC for Special Attributes: A Review. In: *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6, S. 135–144, 2012
- Li, V. C., Herbert, E.:** Robust Selfhealing Concrete for Sustainable Infrastructure. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* 10, S. 207–218, 2012
- Li, V. C., Sahmaran, M.:** Engineered Cementitious Composites: Can Composites Be Accepted as a Crack-free Concrete? In: *Transportation Research Record* 2164, S. 1–8, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201486

© American Scientist



E.O. Wilson

Die soziale Eroberung der Erde

Eine biologische Geschichte des Menschen

Aus dem Englischen von Elsbeth Ranke.

C.H.Beck, München 2013, 384 S., € 22,95

SOZIOBIOLOGIE

Von Insekten und Menschen

Der Altmeister der Soziobiologie wagt sich an eine große Synthese – und überzeugt auch auf dem Feld der Anthropologie.

Edward Osborne Wilson, kurz E.O. Wilson, ist einer der renommiertesten Biologen der Gegenwart. Sein Buch »Sociobiology: The new synthesis« avancierte 1971 rasch zur Bibel der Soziobiologie, einer neuen Disziplin, die das Wechselspiel von Evolution und sozialem Verhalten im engen Verbund mit der Populationsbiologie betrachtet. Wilson, Jahrgang 1929, hat zeitlebens insbesondere das Zusammenleben der Ameisen erforscht. Insofern überrascht es, dass er sich, gleichsam als Krönung seines Lebenswerks, nunmehr der biologischen Geschichte des Menschen zuwendet. Mehr noch, Wilson wagt sich sogar an eine »neue Synthese« von Natur- und Geisteswissenschaften. Kann das gut gehen?

Es geht über weite Strecken sogar außerordentlich gut. Dennoch leidet dieses an und für sich großartige Buch an einer konzeptionellen Grundschwäche: Während Anthropologen die nähere Verwandtschaft aufzusuchen pflegen, um quasi vom Affenfelsen aus einen Blick auf die menschliche Natur zu werfen, wandert Wilson stattdessen auf den nächsten Termitenhügel oder Ameisenhaufen. Das ist gewöhnungsbedürftig. Wilson vergleicht die Entwicklung dieser beiden »sozialen Eroberer der Erde«, obwohl es da nicht viel zu vergleichen gibt. Vielmehr betont er selbst mehrfach den fundamentalen Unterschied: In einer Insektenkolonie produziert eine Königin mittels reinen Instinktverhaltens eine »automaten-

hafte Nachkommenschaft«, Menschengruppen hingegen beruhen auf individueller Bindung und Kooperation.

Glücklicherweise vermag der zweifache Pulitzerpreisträger nicht nur hinreißende Ameisenprosa zu schreiben. Mit seinem immensen biologischen, verhaltenspsychologischen und anthropologischen Wissen gelingt es Wilson trotz allem, eine tragfähige Brücke zwischen Insekten und Menschen zu schlagen. Indem er jene Erfindungen ausführlich würdigt, die vor allem die staatenbildenden Insekten bei ihrer Eroberung der Erde voranbrachten, beschreibt er zugleich die Kräfte der sozialen Evolution. Darin eingebettet sind die Grundfragen nach der Natur des Menschen: Woher kommen wir? Was sind wir? Wohin gehen wir?

Abschied vom egoistischen Gen

Wir sind das Ergebnis eines einmaligen evolutionären Prozesses. Unsere genetische Fitness ist eine Folge der »Multilevel-Selektion«, das heißt eines Wechselspiels verschiedener Selektionskräfte, die an Merkmalen individueller Gruppenmitglieder wie auch der Gruppe als Gesamtheit angreifen. Damit die Multilevel-Selektion die Menschheit durch das Labyrinth der Evolution schleusen konnte, mussten jedoch einige Eigenschaften bereits vorhanden sein: ein ausbaufähiges Gehirn, greiffähige Hände sowie die simple Tatsache, dass unsere Vorfahren Landlebewesen waren. »Ein Schweinswal oder ein Polyp

kann noch so ein brillanter Denker sein, aber er kann keinen Blasebalg erfinden und nicht schmieden. Und er kann keine Kultur entwickeln, die ein Mikroskop baut, die oxidative Chemie der Photosynthese erschließt oder die Saturnmonde fotografiert.«

Eine der »ganz großen Innovationen« in der Geschichte des Lebens ist die Eusozialität: Mehrere Generationen einer Art sind unter altruistischer Arbeitsteilung zu Gruppen organisiert. Erfinder sind die Insekten; sie sind den Menschen dabei um rund 175 Millionen Jahre zuvorgekommen. Doch während Eusozialität sich bei Insekten durch individuelle Selektion an der Linie der Königin herausbildete, entstand sie beim Vormenschen auf Grund eines Wechselspiels von Individual- und Gruppenselektion: »In Kolonien aus tatsächlich kooperierenden Individuen (also beim Menschen ...) belohnt die Selektion unter genetisch unterschiedlichen Einzelmitgliedern egoistisches Verhalten. Im menschlichen Gruppenvergleich dagegen belohnt die Selektion normalerweise Altruismus zwischen den Kolonienmitgliedern.«

Das Stichwort Altruismus bietet Wilson denn auch eine willkommene Steilvorlage, um der längst schwer angeschlagenen Theorie von der »Verwandtenselektion« beziehungsweise »Gesamtfitness« den Fangschuss zu geben. »Egoistische Gene« mag es zwar geben, doch als treibende Kraft der Evolution scheiden sie aus. Die Vorstellung vom »Altruismus« in einer Insektenkolonie ist »eine hübsche Metapher«, jedoch ohne analytischen Wert: »Als Gegenstand einer allgemeinen Theorie«, so Wilson, »ist die Gesamtfitness ein trügerisches mathematisches Konstrukt; unter keinen Umständen lässt es sich so fassen, dass es wirkliche biologische Bedeutung erhält.«

Wilson gibt zu, dass auch ihm die – vor allem von Richard Dawkins vertretene – »Theorie vom egoistischen Gen« zunächst ganz und gar vernünftig vorkam. Nach eingehender empirischer Überprüfung könne Verwandtenselektion jedoch allenfalls noch als Spezialfall gelten. Ihre langjährige Über-



Theodor Much

Der große Bluff. Irrwege und Lügen der Alternativmedizin

Goldegg, Berlin 2013. 267 S., € 19,95

Theodor Much, selbst Arzt an einem großen Wiener Krankenhaus, war eigentlich überzeugt von der Alternativmedizin, wurde als Patient bitter von ihr enttäuscht und schreibt jetzt seine ganz persönliche Abrechnung. Dazu stellt er zahlreiche alternativmedizinische Diagnose- und Therapieverfahren vor und versucht diese mit wissenschaftlichen Mitteln zu entlarven. Das geht völlig in die Hose – weil er selbst seine Argumente nicht mit wissenschaftlicher Evidenz untermauert. Statt auf konkrete Wirksamkeitsstudien zu den einzelnen Methoden zurückzugreifen, verwendet er zuhauf Floskeln wie »Gebildeten Menschen ist bewusst ...«, »... reicht simpler Hausverstand ...« oder »Untersuchungen in aller Welt zeigen ...«, welche die Undifferenziertheit seiner Abhandlung gnadenlos offenlegen. Much mag mit all dem gar Recht haben, doch mit diesem tendenziösen Werk begibt er sich auf das Niveau seiner Gegner oder noch darunter – und das kann nicht im Sinne eines Abrechners sein.

JULIAN JAKUBIAK



Marianne Taylor (Text), Andrew Perris (Fotos)

Schöne Eulen. Porträts faszinierender Arten

Aus dem Englischen von Dorothea Raspe.

LV, Münster 2013. 112 S., € 17,95

Wer fühlt sich nicht unmittelbar berührt von dem menschenähnlichen Blick einer Eule, die einem genau ins Gesicht schaut? Die freiberufliche Autorin Marianne Taylor und der Fotograf Andrew Perris stellen 25 Eulenarten aus aller Welt in ganzseitigen Nahaufnahmen vor. Dazu liefern sie jeweils einen kurzen Hintergrundtext über Biologie, Lebensraum und Lebensweise. Es mag künstlerische Absicht gewesen sein, alle Vögel vor völlig schwarzem Hintergrund auf die immer gleichen Äste zu setzen; aber auf den Betrachter wirken sie dadurch seltsam unnatürlich, fast wie ausgestopft – was nicht der Fall ist; alle abgebildeten Eulen leben in Tierparks. Ergänzend erfährt der Leser noch einiges zu Eulen allgemein und kann am Ende einige locker – wie auf einer Pinnwand – arrangierte Fotos zum Umgang des Zoopersonals mit seinen Pfleglingen anschauen. Ein nettes Buch, das keine ernsthaften wissenschaftlichen Ansprüche stellt.

ADELHEID STAHNKE



Der Virginia-Uhu (*Bubo virginianus*)

ANDREW PERRIS/ MIT FOTOL. GEN. DES VERLAGS



Werner Nachtigall, Alfred Wisser

Bionik in Beispielen. 250 illustrierte Ansätze

Springer Spektrum, Heidelberg 2013. 343 S., € 69,99

Was haben Stahlbeton, Klettverschluss und selbstreinigendes Glas nach dem Prinzip der Lotuspflanze gemeinsam? Es handelt sich um bionische Erfindungen: Der Natur abgeschauten Prinzipien werden technisch umgesetzt. Werner Nachtigall hat Anfang der 1960er Jahre die Bionik in Deutschland mitbegründet und an der Universität des Saarlandes jahrzehntelang vorangetrieben. Er und sein ehemaliger Mitarbeiter Alfred Wisser haben nun ein Panorama bionischer Ansätze von den Anfängen bis zur Gegenwart herausgebracht. Das Spektrum reicht von Miniaturgreifern, die den Mundwerkzeugen von Insekten ähneln, über fischflossenähnliche Schiffsantriebe bis hin zu Infrarotdetektoren, die den Sinnesorganen von Feuerkäfern nachempfunden sind. Die 250 Beispiele werden auf je einer Buchseite vorgestellt – durchgängig bebildert und mit Literaturhinweisen versehen. Eine interessante und reichhaltige Faktensammlung, auch wenn die Illustrationen nur in Schwarzweiß und oft winzig sind und die Erläuterungen manchmal sehr knapp ausfallen.

FRANK SCHUBERT

höhung zum evolutionsbiologischen Dogma habe der Wissenschaft mehr geschadet als genützt, denn im Gegensatz zum üblichen wissenschaftlichen Verfahren wurde erst »hypothetisch die zentrale Rolle der Verwandtschaft und der Verwandtenselektion festgelegt, dann wurde nach Beweisen gesucht, die diese Hypothese belegen sollten«, mit dem Effekt, dass konkurrierende Hypothesen gar nicht erst in Betracht gezogen wurden.

Wilson's »neue Synthese« von Natur- und Geisteswissenschaften entpuppt sich als freundlich-gönnere Übernahmangebot: Die Deutungshoheit hinsichtlich der Frage »Was ist der Mensch?« liegt allein bei den Biowissenschaften. Denn die Spezies Mensch hat ihre »einzigartige, auf Kultur fußende soziale Lebensform« zwar in einem »aus Kultur und Genetik kombinierten Prozess« erlangt (Theorie der Gen-Kultur-Koevolution), doch die inneren, ultimaten Ursachen dafür kann allein die

Biologie erklären. Erst dank der modernen Naturwissenschaften können wir »jetzt vernünftig erklären, warum die Menschheit einzigartig ist, warum es zu etwas Vergleichbarem kein zweites Mal gekommen ist und warum es damit so lange gedauert hat«.

Dagegen sei die Geschichte der Geisteswissenschaften vor allem eine Geschichte gescheiterter Erkenntnismodelle: »Die Ökonomen haben die menschliche Natur im Großen und Ganzen umfahren, während die Philosophen, die so kühn waren, sie erkunden zu wollen, sich unterwegs immer veranrannt haben. Theologen neigen zur Kapitulation und weisen sie in unterschiedlichen Anteilen Gott und dem Teufel zu. Politische Ideologien von Anarchismus bis Faschismus definieren sie zu ihrem egoistischen Vorteil.« Immerhin überlässt es Wilson großzügig den Geistes- und Sozialwissenschaften, sich »den proximatsten, äußerlich sichtbaren Phänomenen der menschlichen

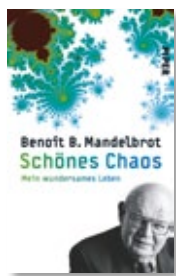
Wahrnehmungen und Gedanken« zu widmen.

Über weite Strecken des Buchs vermag Wilson zu faszinieren, aber auch niveauvoll zu provozieren. Sein abschließender Ausblick »Wohin gehen wir?« indes wirkt vergleichsweise uninspiriert. Diese Mischung aus etwas Wissenschaft, viel Spekulation und noch mehr persönlicher Meinung ist nur etwas für Leser, die immer schon wissen wollten, was Wilson über Aliens, Künstliche Intelligenz, Internet, Klimaerwärmung und Regenwaldabholzung denkt.

Trotz mancher Schwächen und Überlängen ist dieses Buch das beeindruckende Vermächtnis eines bedeutenden Wissenschaftlers, der zudem einmal mehr den Nachweis erbracht hat, welch ein großer Autor er ist.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist und Publizist in Celle.



Benoît B. Mandelbrot

Schönes Chaos

Mein wunderbares Leben

Aus dem Englischen von Helmut Reuter.

Piper, München 2013. 472 S., € 24,99

BIOGRAFIE

Geschichte eines mathematischen Außenseiters

Benoît Mandelbrot war noch nie geneigt, sich herrschenden Meinungen anzupassen – und so genial, dass er es trotzdem zu großem Ruhm brachte.

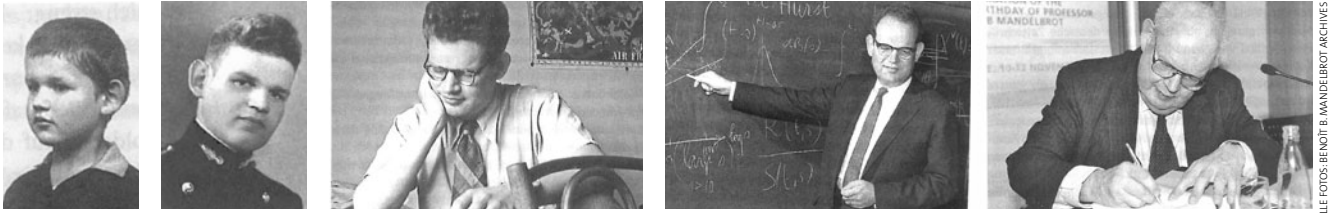
Benoît B. Mandelbrot (1924–2010) ist als »Vater der Fraktale« weltberühmt geworden. Die fantastisch geformte, stachelige Teilmenge der komplexen Ebene, die heute seinen Namen trägt, hat unzählige Profis wie Amateure zu computergrafischen Anstrengungen animiert, weil ihre Umgebung sich

mit leichter Mühe so einfärben lässt, dass die unglaublichsten Strukturen zu Tage treten. Der Begriff »Fraktal« ist zu einem neuen Paradigma in der Mathematik und ihren Anwendungen avanciert; es soll Zeiten gegeben haben, in denen in jeder zweiten wissenschaftlichen Veröffentlichung zur Physik das

Wort »Fraktal« vorkam. Mittlerweile sind die merkwürdigen Gebilde mit Rauheit auf jeder Größenskala, bei denen jeder beliebig kleine Teil dem Ganzen in einem gewissen Sinne ähnlich ist und die so merkwürdige Dimensionen wie 1,26186 aufweisen, im Schulunterricht angekommen.

In seiner Autobiografie, die postum von seiner Familie und engen Freunden vervollständigt wurde, beschreibt Mandelbrot seinen Lebensweg als ebenso rau und chaotisch wie ein Fraktal. In der Tat ist es ungewöhnlich, wenn ein Mathematiker die erste Fassung seines Hauptwerks erst mit 51 Jahren veröffentlicht und seine erste unbefristete Professorenstelle mit 75 antritt. Mandelbrot hat in seiner Karriere reichlich einstecken müssen – und später reichlich ausgeteilt. In seinem Buch drückt er sich dagegen stets sehr milde aus.

Bei der Schilderung der Kindheit und Jugend wird dem deutschen Leser unweigerlich etwas anders zumute. Um dem wachsenden Antisemitismus zu entgehen, zieht seine polnisch-jüdische



ALLE FOTOS: BENOÎT B. MANDELBROT ARCHIVES

Von links nach rechts: Benoît Mandelbrot als Erstklässler, als Student an der Pariser Militärakademie, als Reserveoffizier der französischen Luftwaffe, als Dozent in Harvard und bei der Feier seines 80. Geburtstags.

Familie bereits 1936 nach Frankreich, wo Benoîts Onkel Szolem Mathematikprofessor ist, muss aber bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs um ihr Leben fürchten. Wenn der kleine Benoît nicht sehr viel Glück und zahlreiche selbstlose Helfer gehabt hätte, wüssten wir vielleicht heute noch nicht eine Vielzahl der augenscheinlich verschiedensten Phänomene unter dem gemeinsamen Konzept »Fraktal« zu verbinden.

Den üblen Erfahrungen seiner Jugend zum Trotz hat Mandelbrot keine Vorbehalte gegenüber den Deutschen gezeigt. Im Gegenteil: Mit Heinz-Otto Peitgen und seinen Kollegen von der Universität Bremen hat er bei der Popularisierung seiner Werke eng zusammengearbeitet (Spektrum der Wissenschaft 9/1989, S. 52).

Obgleich Benoît den Umständen entsprechend nur sehr unregelmäßig die Schule besucht, besteht er die französische Reifeprüfung und die Eingangsprüfungen zu den Elitehochschulen mit traumhaften Punktzahlen. Damit steht ihm eine akademische Karriere in Frankreich offen; aber er kann sich nicht damit anfreunden. Zu dieser Zeit dominieren André Weil und seine prominenten Kollegen, die sich unter dem Pseudonym »Nicolas Bourbaki« zusammengetan haben, die französische Mathematik. Sie propagieren einen extremen Formalismus; Denken in geometrischen Bildern und Analogien ist verpönt. Wie sehr diese Ausrichtung Mandelbrot zuwider war, spricht er erst viel später im Buch aus, indem er in einem ganz anderen Kontext André Weil als seine Nemesis bezeichnet.

Mandelbrot verbringt unruhige Lehr- und Wanderjahre an vielen Orten. Dabei arbeitet er mit mehreren Leuten

zusammen, die später berühmt werden: dem Entwicklungspsychologen Jean Piaget in Genf, dem Molekularbiologen Max Delbrück am Caltech in Pasadena und dem Computerpionier John von Neumann in Princeton. 1951 gelingt es ihm, das Gesetz von George Kingsley Zipf zur Verteilung von Worthäufigkeiten in geschriebenen Texten zu verallgemeinern: eine erste Entdeckung von Ordnung im Chaos, die eben nicht auf ein Zusammentreffen zufälliger unabhängiger Ereignisse (und damit auf die allgegenwärtige gaußsche Glockenkurve) hinausläuft.

Als ihm 1958 das Thomas J. Watson Research Center der IBM einen Sommerjob anbietet, nimmt er an – und bleibt 35 Jahre, bis die Firma ihre wissenschaftlichen Aktivitäten gänzlich einstellt. In diese Zeit fallen seine großen Werke, allen voran »Die fraktale Geometrie der Natur« (Spektrum der Wissenschaft 7/1988, S. 114). Aus verschiedenen Gründen »sammelte sich eine Halde unvollendeter Entwürfe an, die schwer in den Griff zu bekommen war«. Auf den dringlichen Rat seines Freundes Mark Kac verarbeitet er in drei Schritten »eine erhebliche Menge an Originalarbeiten ... in Kombination mit einer fraktalen Grundsatzerklärung und einer Fallsammlung« zu dem Buch, das seinen Weltruhm begründet, die Collegegebühren seiner beiden Söhne finanziert und heute noch nachgedruckt wird.

Die Mathematik kannte die Fraktale, wenn auch nicht unter diesem Namen, schon lange vor Mandelbrot. Allerdings pflegte man bis weit ins 20. Jahrhundert diese Kopfgeburten wegen ihrer verstörenden Eigenschaften als »Monster« zu verabscheuen (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 72). Mit seinen Fallbei-

spielen führt Mandelbrot den Nachweis, dass Fraktale zahlreiche Dinge aus der Natur wie Gebirge, Blitze, Wolken, Küstenlinien, Bäume und Blutgefäße weit besser modellieren als die wohlgeformten Standardfiguren der klassischen Geometrie. Hier kommen seine Stärken zum Tragen: das Denken in Bildern und das Entdecken von Analogien zwischen scheinbar weit entfernten Gegenstandsbereichen.

Die Mathematiker alter Schule pflegen ein eher distanziertes Verhältnis zur physischen Realität; es dürfte auch ihren Neid erregt haben, dass Mandelbrot mit seinen bunten Bildern im Gegensatz zu ihnen die öffentliche Aufmerksamkeit bis zur Tagespresse auf sich zog. Diese Vorbehalte scheinen inzwischen weit gehend verschwunden: Man liest mittlerweile auch in mathematischen Fachveröffentlichungen das Wort Fraktal ohne Gänsefüßchen.

Gegen Ende seines Lebens schließt sich ein merkwürdiger Bogen: von der Weltwirtschaftskrise, die seine frühe Kindheit überschattete, bis zur aktuellen Finanzkrise. Für die Schwankungen von Börsenkursen hat er beizeiten das mathematische Modell der Multifraktale entwickelt (Spektrum der Wissenschaft 5/1999, S. 74); im Buch deutet er vorsichtig an, dass die Finanzwelt sich vielleicht anders entwickelt hätte, wenn sie sich nicht das konkurrierende mathematische Modell von Black und Scholes mit deren berühmter Formel zu eigen gemacht hätte. Aber darüber scheint das letzte Wort noch nicht gesprochen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

DAMIT AUS NEUGIER WISSEN WIRD!



Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert. Jetzt abonnieren und sparen: Vier Ausgaben pro Jahr für je € 5,50 inkl. Inlandsversand (statt € 6,50 im Einzelkauf)!

www.spektrum-neo.de/abo



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Sächsische Carlowitz-Gesellschaft (Hg.)
Die Erfindung der Nachhaltigkeit
 Leben, Werk und Wirkung
 des Hans Carl von Carlowitz
 oekom, München 2013. 285 S., € 24,95

ÖKOLOGIE

Nachhaltigkeit – ein Begriff, der aus dem Walde kam

Der sächsische Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz hat sich um mehr gekümmert als nur um eine dauerhafte Holzversorgung. Die Grundgedanken seines umfangreichen Lehrbuchs beschäftigen uns bis heute.

»Der Wald soll so bewirtschaftet werden, dass die Nutzung immerwährend, kontinuierlich und perpetuierlich stattfinden kann.« So schrieb Hans Carl von Carlowitz (1645–1714) in seinem Buch »Sylvicultura oeconomica« und brachte damit den Gedanken der Nachhaltigkeit zur Sprache – mit weit reichenden Nachwirkungen. Das vorliegende Buch versammelt zum 300. Jahrestag dieses Werks Beiträge von 14 Fachleuten verschiedener Richtungen. Die drei Teile befassen sich mit den historischen Wurzeln des Nachhaltigkeitsbegriffs, der aktuellen Diskussion zum Thema Nachhaltigkeit und der Person von Carlowitz.

Dessen Familie spielt seit dem 14. Jahrhundert eine große Rolle im sächsischen Bergbau- und Forstwesen. Unter den Vorfahren sind zahlreiche Träger von Titeln wie Jägermeister, Forstmeister und Oberforstmeister; auch unter den Verfassern dieses Sammelbands findet sich ein Oberforstdirektor von Carlowitz.

Hans Carl ist das zweite von 17 Kindern. Dem Chaos des ausgehenden Dreißigjährigen Kriegs zum Trotz erhält er eine gute Erziehung, unter anderem am berühmten Gymnasium von Halle. Zwei Studienjahre in Jena schließen auch Vorlesungen über Mathematik ein.

Für die Weiterbildung verlegt er sich aufs Reisen. Nach bedeutenden Städten und Residenzen Deutschlands zieht es ihn Richtung Holland, mit Studienaufenthalten in Utrecht und Leiden. In London erlebt er den Großen Brand vom 2. September 1666 und wahrscheinlich auch ein Jahr später die Zerstörung der englischen Flotte – und damit die Entstehung eines großen Holzbedarfs – durch ein niederländisches Geschwader auf der Themse. Ebenfalls in England begegnet er dem vielseitigen Wald- und Baumfreund John Evelyn, den er jedoch in

»Ohne eine kontinuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung des Holzes kann das Land in seinem Esse nicht bleiben«

seiner Schrift nicht erwähnt. Es folgen Nordeuropa und dann Paris, wo er Kontakte mit »vornehmen und gelehrten Männern« hat und erlebt, wie Minister Colbert eine »grande réformation des forêts« verkündet, um den Hochwald vor der Ausplünderung zu retten. Als der 25-jährige Hans Carl nach fünf Reisejahren mit weiteren Stationen in Italien und Malta zurückkehrt, ist er vielseitig gebildet und spricht mehrere Sprachen. Das verhilft ihm zu einer Karriere in sächsischen

Staatsdiensten, die 1711 in der Bestallung zum sächsischen Oberberghauptmann gipfelt.

Ein Jahr vor seinem Tod, 1713, erscheint sein Hauptwerk »Sylvicultura oeconomica«, ein Lehrbuch über die Nachzucht und Verwendung der Baumarten und über den pfleglichen und haushälterischen Umgang mit dem Wald. Was dieses Werk über ähnliche Publikationen erhebt, ist die Sorge um die Zukunft. Zu dieser Zeit droht großer Holzangel, und die beiden Hauptverbraucher von Holz, Bergbau und Köhlerei, haben starkes Interesse an einer dauerhaften Holzquelle. Damit diese nicht versiege, sei eine »kontinuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung« geboten, »ohne welche das Land in seinem Esse [seiner Existenz] nicht bleiben kann«. Die Förster müssen mit der Natur arbeiten und die Fruchtbarkeit des Bodens bewahren. Das benötigte Holz darf auch nicht einfach von einem anderen Ort geholt werden. Mit der Vorsorge für die »liebe Posterität« bringt von Carlowitz neben Ökologie und Ökonomie auch die Sozialethik ins Spiel.

Rasch übernehmen die Forstleute diese Ideen, vor allem auch den Hinweis auf die Bedeutung der Mathematik. Dies führt zwar einerseits zu den Reinertragstheorien des 19. Jahrhunderts, deren nachteilige Folgen – vor allem die Fichtenmonokulturen – nur

schwer zu beheben sind. Andererseits wird die zahlenmäßige Erfassung der Holzvorräte zur Grundlage einer forstlichen Planung nach dem Nachhaltigkeitsprinzip. Dessen wichtigste Faktoren sind

- langfristiges Denken in die Vergangenheit und die Zukunft,
- Nutzung nicht nach Bedarf, sondern nach den Möglichkeiten von Standort und Bestand – ein Paradigmenwechsel, der sich immer noch nicht durchgesetzt hat,

- Schaffung vielseitiger Waldbestände, um unbekanntem zukünftigen Bedürfnissen entgegenzukommen, und
- Schonung der Bodenfruchtbarkeit.

In der weiteren Öffentlichkeit und von der Wissenschaft wurde von Carlowitz nur wenig beachtet. Das geht den Forstleuten bis heute nicht besser. Erst die moderne Umweltschutzbewegung hat die Gedanken des sächsischen Oberberghauptmanns wieder aktuell gemacht.

Die Beiträge des vorliegenden Sammelbands stehen eher nebeneinander, als dass sie sich ergänzen. Dem Menschen von Carlowitz am nächsten kommt noch der Beitrag »Die Sylvicultura oeconomica – eine Rezension aus heutiger Sicht« von Harald Thomasius. Die anderen zeigen immerhin zu meist, wie die heutigen Debatten aus den Ideen dieses Werks Kraft ziehen. Ihre Überlegungen zum aktuellen Nachhaltigkeitsdiskurs sind teilweise

sehr tiefgründig und gut gemeint, aber schwer verständlich in ihrer Fachsprache. Nachhaltigkeit wird heute in einem sehr weiten Sinn verstanden: »eine wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung, welche in umfassender Weise die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation befriedigt, ohne die Fähigkeit zukünftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen«, so der Wortlaut der Definition, die auf der UN-Konferenz von Rio 1992 verabschiedet wurde.

Mit dieser Verbreiterung und Vertiefung wird der Begriff der Nachhaltigkeit zunehmend abstrakter und verliert seinen Fußhalt bei von Carlowitz. Einerseits wird er abhängig vom Kontext, andererseits soll er alles Erstrebenswerte der Welt umfassen. Eine Entgrenzung des Begriffs führt aber auch zu seiner Entleerung, wie einzelne Beiträge unfreiwillig dokumentieren.

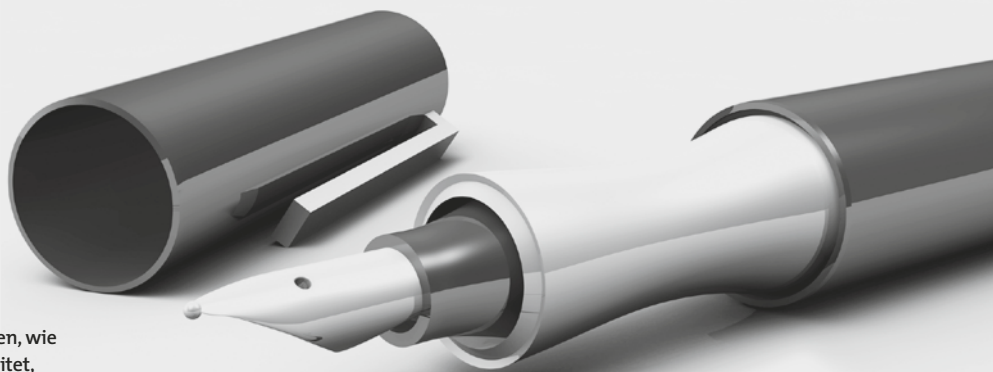
Was auf von Carlowitz zurückgeführt werden kann, sind Bezeichnungen wie haushälterisch und generationengerecht sowie die Feststellung, dass das Streben nach möglichst geringem Verbrauch und wirksamem Einsatz (Suffizienz und Effizienz) zu sparsamer Holzverwendung führt, Rentabilitätsdenken aber die Zukunft zerstört.

Unter der Überfülle an Büchern zur Nachhaltigkeit ragt das vorliegende heraus durch den konsequenten Bezug auf Hans Carl von Carlowitz und die Vielfalt der Betrachtungsweisen. Ein wertvolles Buch für alle, die mitreden möchten.

Felix Thommen

Der Rezensent ist Forstingenieur und war bis zu seinem Ruhestand Leiter eines Kreisforstamts im Kanton Zürich. Er besitzt 83 Ar Wald, die gemäß FSC-Zertifikat nachhaltig bewirtschaftet sind.

DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT



Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit

www.spektrum.de/schreibwerkstatt

Ort: Heidelberg

Teilnahmegebühr: € 99,-

Abonnenten unserer Magazine erhalten einen Rabatt von € 10,-



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

www.spektrum.de/schreibwerkstatt

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Brian Clegg

Die Vermessung des Körpers

Warum unsere Haut sehen und die Nase durch die Zeit reisen kann

Aus dem Englischen von Henning Dedekind.

Hanser, München 2013. 302 S., € 19,90

NATURWISSENSCHAFTEN

Mehr als der Titel verspricht

Brian Clegg unternimmt eine lehrreiche Expedition querbeet durch alle Naturwissenschaften – und vermisst dabei längst nicht nur den menschlichen Körper.

»Wissenschaft liefert uns anhand unserer aktuellen Erkenntnisse stets das beste Bild – aber sie ist ein fortwährender Prozess.« Dem Autor war sicher kaum bewusst, wie treffend dieser Satz für sein Werk steht. Es zeichnet nämlich ein verblüffend umfassendes Bild von der vollen Bandbreite der Naturwissenschaften – mit einer spannenden Reise von den unendlichen Weiten des Universums bis in die kleinste menschliche Zelle.

Dies erreicht er durch unzählige Kurzgeschichten, die sich aneinandergereiht wie eine einzige große lesen, mit einem dicken roten Faden, obwohl es in einer um unsere Augen oder Haare geht und in der nächsten plötzlich um den Urknall. Durch diese Erzählstrategie ergeben sich teils skurrile, aber stets lehrreiche Abstecher zu Hintergründen, die selbst erfahrene Naturwissenschaftler garantiert nicht alle kennen. So gelangt der Autor von den Auswirkungen pharmakologischer Substanzen auf unser Gehirn über die Geschichte des Aspirins bis zum Vertrag von Versailles, weil dort festgelegt wurde, dass der Markenname Aspirin in Großbritannien und anderen Unterzeichnerländern des Vertrags von jedermann verwendet werden darf.

Selbst komplexe physikalische Gesetze wie die heisenbergsche Unschärferelation erklärt Brian Clegg äußerst lebensnah und laientauglich. Der Leser bekommt kleine Anekdoten serviert, etwa wie der schottische Botaniker Robert

Brown die nach ihm benannte Molekularbewegung entdeckte, wie Quarks zu ihrem Namen kamen oder wie Dmitri Mendelejew nach und nach die Idee des Periodensystems der Elemente entwickelte, ehe er sie 1869 der Weltöffentlichkeit präsentierte – Dinge, die man in Universitätsvorlesungen so spannend und historisch vollständig sicher nicht zu hören bekommt.

Meerwasser enthält kein Salz

Clegg reißt den wissenschaftlich vorgeprägten Leser vom etablierten Modelldenken weg und zerrt ihn auf der Leiter der Forschung eine Sprosse tiefer. Damit eröffnet er ihm einen fast jungfräulichen Blick: auf den im Titel genannten eigenen Körper und vor allem auf den Rest der Welt. So kommt uns die Ladung der Quarks – ein Drittel oder zwei Drittel der Elementarladung – merkwürdig kompliziert vor. Falsche Perspektive, sagt Clegg. Die Quarks selbst sind das Elementare, und deren Ladung müsste eigentlich als Recheneinheit dienen.

»Die Vermessung des Körpers« ist sich nicht zu schade, komplexe Sachverhalte von Grund auf zu erklären. Das Werk ließe sich problemlos als cooles, spannendes Einsteiger- und Fortgeschrittenenlehrbuch für Schüler verwenden. Und auch Fachleuten bietet es so manches Aha-Erlebnis zu Hintergründen, die man zuvor schlichtweg nicht hinterfragt hat. So macht Wissenschaft Spaß!

Der britische Humor des Autors ist bei der Übersetzung ins Deutsche nicht auf der Strecke geblieben. Und auch die eingebauten Mitmachexperimente haben eine besondere Komik. Hätten Sie gewusst, dass man trockenen Fußes über einen Swimmingpool voller Vanillesoße wandern kann? Vor allem aber wartet dieser Rundumschlag über alle Naturwissenschaften mit allumfassendem, geballtem Allgemeinwissen auf. Auf den 280 Textseiten lässt sich dabei nur eine einzige Schwachstelle identifizieren: Zu Beginn des Werks erzählt Clegg, dass unsere Vorfahren vor etwa 100 000 Jahren die letzten genetischen Veränderungen durchlebten, die sie zu modernen Menschen machten. Im Schlusskapitel jedoch führt er ausgiebig aus, warum Arten nicht zu fixen Terminen entstehen. Evolution sei vielmehr ein dynamischer Prozess, der nie aufhört und bei dem sich minimale Veränderungen über Millionen von Jahren stetig anhäufen. Doch dieser kleine Widerspruch sei dem erfolgreichen Popularisierer der Wissenschaft verziehen.

Denn auf der anderen Seite überwiegen die zahlreichen Stärken des Sachbuchs. Diese blitzen immer dann auf, wenn Clegg Phänomene hinterfragt, die man einfach hinzunehmen pflegt – etwa dass die meisten Menschen noch heute nachts geboren werden, weil das in dunkler Vorzeit Schutz vor Räubern bot. Oder wenn er Mythen aufklärt, die sich in den Köpfen der Menschen eingestriet haben: Entgegen der landläufigen Meinung enthält Meerwasser kein Salz, sondern nur Natrium- und Chlorionen; und unsere Vorfahren im Mittelalter wurden deutlich älter, als wir denken, weil das niedrige Durchschnittsalter von einer hohen Kindersterblichkeit herrührt.

Spätestens wenn Clegg erklärt, warum Riesenspinnen und andere Monster ein physikalisches Ding der Unmöglichkeit sind, fragt man sich: Wie kann ein einziger Wissenschaftslehrer einen so allumfassenden Blick auf die Welt vermitteln?

Julian Jakubiak

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

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!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebritzer Agrarbetriebsgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Stadtwerke Düsseldorf | Förderverein des Eichsfeldgymnasiums | Kernkraftwerk Isar, Essenbach | HUK Coburg | 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 Justus-Leibig-Schule Darmstadt



Michael Zimmermann, Christof Spitz und
Stefan Schmidt (Hg.)

Achtsamkeit
Ein buddhistisches Konzept erobert die
Wissenschaft

Hans Huber, Bern 2012. 358 S., € 29,95

PSYCHOLOGIE

Ganz aufmerksam im Hier und Jetzt

Psychotherapeuten und Ärzte setzen auf das 2500 Jahre alte Konzept der Achtsamkeit – nur ohne den religiösen Überbau.

Versuche, östliche Weisheitslehren mit den Erkenntnissen moderner Wissenschaft zu verbinden, hat es immer wieder gegeben. So kombinierte der Österreicher Fritjof Capra in den 1970er und 1980er Jahren Quantenphysik und Taoismus, um eine ganzheitliche Weltansicht zu entwickeln. Der Dalai Lama, einer der höchsten Würdenträger des tibetischen Buddhismus, tritt gern mit Forschern in einen Dialog. Häufig aber ist das Ergebnis solcher Grenzgänge ein unbrauchbares Gemisch aus rationalen und mystischen Weltmodellen.

Das ist bei dem vorliegenden Werk nicht zu befürchten. Entgegen dem ein wenig zu vollmundig formulierten Untertitel handelt es sich um den keineswegs esoterischen Tagungsband des Kongresses »Achtsamkeit: eine buddhistische Praxis für die Gesellschaft heute«, der 2011 an der Universität Hamburg stattfand.

Achtsamkeit, im Englischen häufig mit »mindfulness« übersetzt, ist ein zentrales Konzept aller buddhistischen Lehren. Der Religionswissenschaftler B. Alan Wallace erläutert in seinem Beitrag die Bedeutungen der originalen Begriffe in der klassischen buddhistischen Literatur: »etwas im Gedächtnis behalten« und »Fokussierung auf den Augenblick«. Beides zusammen ergibt ein Bewusstsein für das Gegenwärtige,

das dann ein Fundament für tiefere Erkenntnis bilden soll.

In den späten 1970er Jahren entwickelte der heute emeritierte Molekularbiologe Jon Kabat-Zinn von der University of Massachusetts Medical School in Worcester eine säkularisierte Form: die achtsamkeitsbasierte Stressreduktion (englisch MBSR). Inzwischen findet sie vielfach Anwendung, etwa in der Therapie von chronischen Schmerzen, Angststörungen und Depressionen. MBSR setzt geleitete Meditationen ein. Dazu gehören der Bodyscan, bei dem der Praktizierende alle Körperteile der Reihe nach im Geist durchwandert und seinem momentanen Befinden »nachspürt«, eine Gehmeditation sowie die Beobachtung des Atemflusses.

Welche Effekte dergleichen auf das Gehirn zeitigt, darüber berichtet die amerikanische Neurowissenschaftlerin Sara Lazar. Sie maß an Meditierenden mittels Magnetresonanztomografie unter anderem gesteigerte Aktivität in Hirnstrukturen des paralimbischen Kortex, der das emotionale Zentrum – das limbische System – mit den für Denken und Problemlösung zuständigen Regionen der Großhirnrinde verknüpft. Hingegen war die an Fluchtreaktionen beteiligte Amygdala weniger aktiv als sonst. Die Forscher ermittelten zudem Veränderungen der grauen Hirnsubstanz in Strukturen wie dem Hippo-

campus, der bei der Steuerung von Emotionen sowie beim Lernen eine große Rolle spielt. Diese Veränderungen waren bei Personen, die seit mehreren Jahren fast täglich 40 Minuten meditieren, deutlich ausgeprägter als bei Patienten, die ein dreimonatiges MBSR-Programm absolvierten. Daraus schließt Lazar, dass es sich um einen Trainingseffekt handeln müsse.

Der in Liverpool forschende deutsche Psychologe Peter Malinowski untersucht, wie die Achtsamkeitsmeditation Gefühlsregulation und kognitive Flexibilität beeinflusst. 40 Versuchsteilnehmer wurden per Los einer Kontroll- und einer Meditationsgruppe zugeteilt. Letztere Probanden erhielten eine Einführung in die Atemmeditation, die sie dann 16 Wochen lang täglich 10 bis 15 Minuten praktizieren sollten. Die Teilnehmer absolvierten zu Beginn und am Ende der Studie den Stroop-Test: Hierbei gilt es, Farbwörter laut vorzulesen, deren Bedeutung nicht mit der Schriftfarbe übereinstimmt, also beispielsweise das Wort »Blau« in roten Buchstaben. Diese Aufgabe erfordert hohe Konzentration, sonst kommt einem rasch die falsche Farbe über die Lippen. Unterstützt durch EEG-Messungen fanden die Psychologen, dass die Meditationspraxis den Einsatz der kognitiven Ressourcen optimiert und die Regulation der Aufmerksamkeit verbessert hatte.

Ihr Fachkollege Stefan Schmidt von der Europa-Universität Viadrina in Frankfurt an der Oder, einer der Herausgeber, überprüft die Wirkung von Achtsamkeitsübungen bei der Bekämpfung von Schmerzen. Meditationspraxis senke deren Intensität zwar oft nur geringfügig, doch die Patienten gingen mit ihrem Leiden gelassener um.

Solchen Berichten aus Medizin und Psychologie stehen Erörterungen der wichtigsten Textstellen in den maßgeblichen buddhistischen Werken aus Sicht der Religions- und Erkenntniswissenschaften gegenüber. Das ist allerdings harte Kost und dem Laien nur schwer zugänglich. Deutlich wird in diesen Beiträgen aber, dass sich das säkularisierte Achtsamkeitskonzept west-

lichen Zuschnitts in einem wesentlichen Punkt von dem buddhistischen unterscheidet: Während der therapeutische Kontext eine neutrale Haltung verlangt, in der Gedanken und Gefühle, die während der Meditation auftauchen, nicht bewertet werden, geht die buddhistische Achtsamkeitspraxis un-

abdingbar mit einer ethischen Erziehung einher – Gedanken schädlichen Inhalts müssen als solche erkannt werden, sodann gilt es, die Aufmerksamkeit bewusst von ihnen abzuwenden.

Meditation ist offenbar nicht gleich Meditation, auch sie vollzieht sich in einem kulturellen Kontext. Sich dessen

bewusst zu werden hilft, die Klippen der Esoterik zu umschiffen. Auch das ist letztlich eine Form von Achtsamkeit.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Er schätzt Yoga und Meditation als Möglichkeit zur Selbstbesinnung.



Martin Bleif

Krebs

Die unsterbliche Krankheit

Klett-Cotta, Stuttgart 2013. 528 S., € 24,95

MEDIZIN

Ein Arzt erklärt aus der Perspektive des Patienten

Martin Bleif hat aus einem persönlichen Schicksal heraus ein umfassendes und verständliches Sachbuch geschrieben.

Erinnern Sie sich noch an »Sofies Welt«? Vor mehr als 20 Jahren kapitulierte der norwegische Schriftsteller Jostein Gaarder die Geschichte der europäischen Philosophie mit Hilfe eines Briefwechsels zwischen einem Gelehrten und einer Schülerin. Hier ist der Gelehrte seit 20 Jahren Krebsmediziner, Professor für Radioonkologie in Tübingen und Leiter eines Zentrums für Radiochirurgie. Martin Bleif erklärt uns auf mühelose Art alles, was man über diese komplexe Krankheit wissen muss. Schrittweise erfährt der Leser, weshalb sich die eigenen Zellen manchmal in bösartige Widersacher verwandeln, wie die verschiedenen Therapien funktionieren und warum manche Krebserkrankungen immer noch so schwer zu besiegen sind. Die Fragen stellt dabei Bleifs Frau Imogen, die sich zum einen als Unfallchirurgin mit dem menschlichen Körper auskennt und

zum anderen selbst 2008 an Brustkrebs erkrankte.

Der Autor eröffnet jedes Kapitel mit einem Gespräch zwischen ihm selbst und seiner Frau, die ihre Krankheit so genau wie möglich verstehen will. Neben Ursachen und Risikofaktoren geht es auch um praktische Aspekte wie Vorsorge, Diagnose und Behandlung. Bleif beginnt stets mit den Grundlagen, so dass auch der Leser ohne Vorwissen den Faden nicht verliert. In klarer und präziser Sprache erläutert er zuerst die Funktion der genetischen Bausteine einer Zelle und die Ursachen von Mutationen, bevor er zur Krankheit selbst kommt. Parallel verfolgt das Buch die Entwicklung der Krebsforschung; dem Leser begegnen bekannte Namen wie Hippokrates und Paracelsus, Koch und Virchow, Mendel und Curie.

Auf viele von Imogens Fragen gibt es noch keine Antwort. Krebs ist eine

unendlich vielgestaltige Krankheit; deswegen ist die Suche nach einem universellen Heilmittel so gut wie aussichtslos. Die Forschung strebt stattdessen beständig nach Therapien für bestimmte Krebsarten. Dieser Aspekt des Buchs ist erstaunlich aktuell und durchaus auch für fachnahe Leser interessant. Der Autor ist hier weder unnötig kritisch, noch weckt er falsche Hoffnungen – im Gegenteil: Besonders in den Kapiteln zu alternativen Therapien und Spontanheilungen räumt er mit einigen Mythen auf.

Als seine Frau erkrankt, verändert sich Bleifs Blickwinkel von der Vogelperspektive des Arztes zur Froschperspektive von Betroffenen und Angehörigen. Er setzt sich zum Ziel, mit seinem Buch die grundlegende Erklärungsarbeit zu leisten, die im Alltag eines vielbeschäftigten Arztes oft keinen Platz findet.

Obwohl viele persönliche Erfahrungen mit eingeflochten sind, mangelt es dem Buch nie an der nötigen Sachlichkeit. Wer als Betroffener oder Angehöriger nach objektiven Informationen sucht, erfährt daraus alles, was er wissen muss. Gerade dadurch gelingt es Bleif, der Krankheit etwas von ihrem Schrecken zu nehmen.

Als Imogen zwei Jahre nach der Diagnose stirbt, endet auch das Buch. Die letzten Seiten sind entsprechend persönlicher, bleiben aber auf einem guten Mittelweg zwischen Nähe und Distanz. Und wo dem Autor am Ende die Worte fehlen, nimmt er Zuflucht zu einem Gedicht.

Julia Heymann

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

AKTUELLES AUS DEM 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 auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm;

€ 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl.

Inlandsversand

Blättern Sie schon hier durch die Seiten:

www.spektrum.com/kalender



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

www.spektrum.com/recherche



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

1913

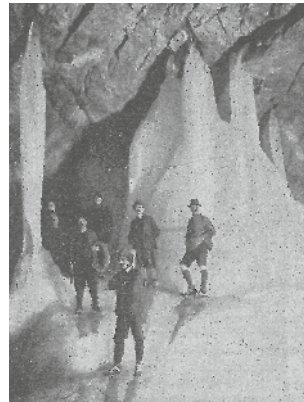
Stiller Ozean – weniger tief?

»Auf einer im Auftrage der mexikanischen Regierung ausgeführten geologischen Forschungsreise durch den südlichen Teil der kalifornischen Halbinsel hat E. Witich festgestellt, daß im Laufe der Zeit in dortiger Gegend der Stille Ozean seinen Spiegel bedeutend gesenkt, oder daß dort eine entsprechende Landhebung stattgefunden hat. So fand er auf der Insel Magdalena in 210 m Höhe die Reste von Seetieren. Auch zeigten alle Höhen, ebenso wie die schluchtenartigen Täler, Auswaschungs-

erscheinungen, Brandungsformen, Pilzfelsen usw., die sich bis zum Meeresufer fortsetzen. Die Küstenzonen selbst umsäumen mehrere breite Küstenterrassen in etwa 15 bis 25 m Höhe, die sich an manchen Stellen bis zu 500 m Breite ins Innere der Insel erstrecken und eine Unmasse von Subfossilien enthalten.« (1915 formulierte der deutsche Geowissenschaftler Alfred Wegener in seinem Buch »Die Entstehung der Kontinente und Ozeane« erstmals die Vorstellung mobiler kontinentaler Platten. Erst Jahrzehnte später galt als sicher, dass sich Gebirge wie das kalifornische Küstengebirge durch plattentektonische Prozesse auffalteten; d. Red.)« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 34, S. 709, 1913

Auf Eisexpedition im Dachstein

»Eine dieser Riesengrotten, deren Längachse 2000 m beträgt, ist überdies durch enorme Eismassen interessant und gilt zurzeit als die größte bekannte Eishöhle der Erde. Sie besteht aus mehreren eiserfüllten Domen, die durch vereiste Galerien miteinander in Verbindung stehen. Das schwierigste Stück der Befahrung bildete die Überschreitung eines 27 m tiefen und 35 m breiten Eisschrundes, der in einer Entfernung von 50 m vom Eingange den Boden der Höhle durchsetzt. Riesenhafte Eissäulen flankieren beide Bruchränder. Jenseits des Abgrundes erweitert sich die Höhle zu einem mächtigen Dome, dem



Der Tristandom in der Dachstein-Riesenhöhle.

»Tristandom«. Von Wand zu Wand breitet sich hier eine ebene Eisfläche aus, auf der sich Eisstalagmiten in den abenteuerlichsten Formen erheben. Ihre Fortsetzung findet diese Halle in einem Stollen, durch den ein Eisstrom hinabfließt, um in einem kreuzgangartigem Räume sich nach verschiedenen Richtungen auszubreiten.«

Die Umschau in Wissenschaft und Technik 32, S. 665, 1913

Archäologie gegen die Zeit

»Seit dem Beginn der Bauvorhaben am Assuan-Staudamm hat sich die Ausgrabungstätigkeit in den in naher Zukunft unter den Fluten des Stromes versin-

kenden Teilen des südägyptischen und nordsudanesischen Niltales beträchtlich gesteigert. Dazu gehört die seit dem Jahre 1961 andauernde Grabung in den Orten Tûshka und Arminna. In der Nähe von Tûshka wurde 1962 ein Umschlagplatz für Diorit und Amethyst entdeckt, der mindestens aus der Zeit des mittleren ägyptischen Reiches stammt. Den ersten Hinweis darauf lieferte der Abdruck eines Rollsiegels, das auf Grund seiner Schriftzeichen an das Ende der ersten Dynastie datiert werden kann, deren Könige nachweislich ihre Macht schon bis Wadi Halfa, also bis zum zweiten Nilkatarakt, ausgedehnt hatten.«

Die Umschau in Wissenschaft und Technik 16, S. 495, 1963



Ein Zeugnis 4000-jähriger Besiedlung in Nubien, ausgegraben in Tûshka.

Hoch hinaus zur Marsbeobachtung

»Der Beobachtung des Mars steht die irdische Atmosphäre als lästiges Hindernis im Wege. Vor allem sind es die wasserdampfhaltigen Schichten, welche die infrarote Strahlung aus dem Weltraum absorbieren. Aber gerade Infrarotaufnahmen sind besonders wichtig, weil sie uns nähere Aufschlüsse über die Marsoberfläche zu geben vermögen. Unter der Leitung von Prof. Dr. Martin Schwarzschild von der Princeton-Universität (USA) wurde daher ein Stratoskop entwickelt. An einem Stratosphärenballon befindet sich ein Fernrohr, das von der Erde aus so gesteuert werden kann, daß es genau auf den zu untersuchenden Himmelskörper eingestellt bleibt.« Kosmos 8, S. 277, 1963

Sensoren für die Gesundheit

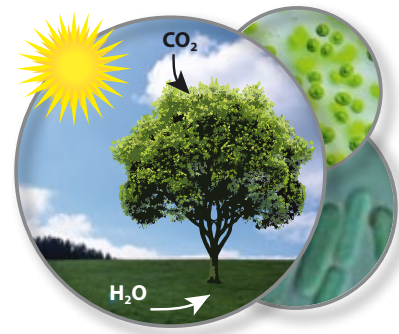
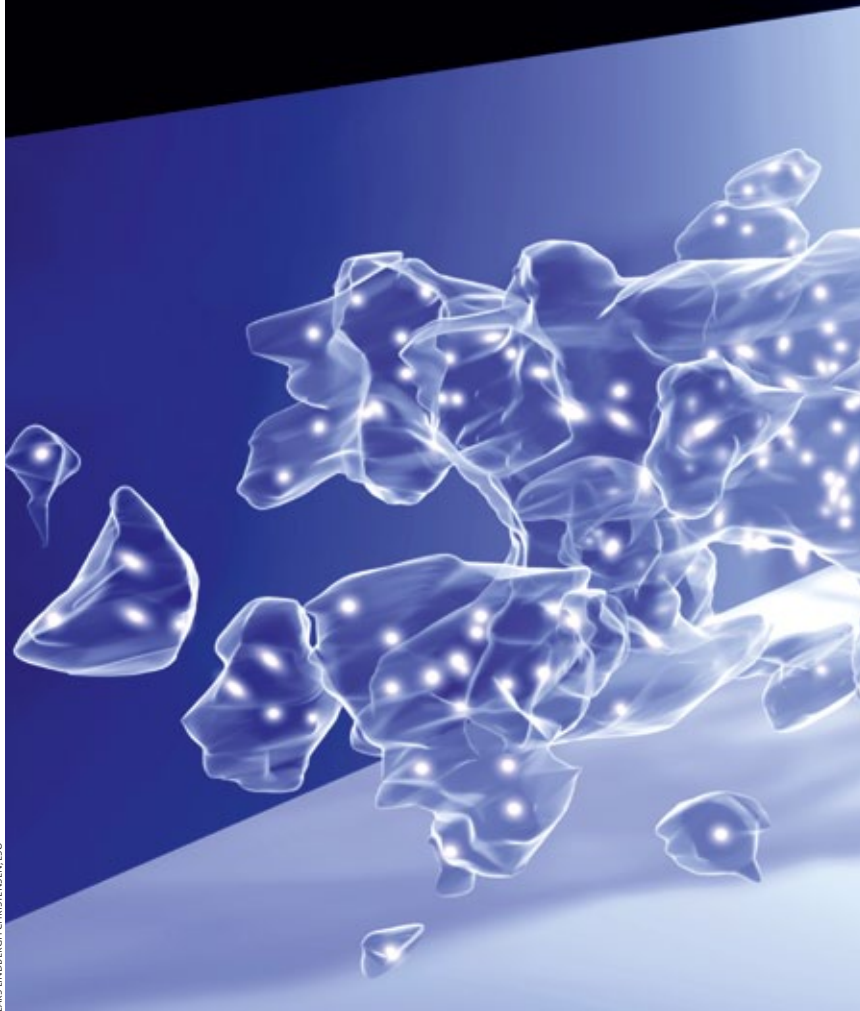
»So können wir heute schon eine Zeit voraussehen, in der alle herz- und zuckerkranken Patienten solche Geräte bei sich tragen. Falls dann eine bedeutsame Änderung im körperlichen Befinden eintritt, werden empfindliche kleine Sensoren nicht nur Warnsignale an Kontrollstellen in Hospitälern übertragen können, sondern auch den Patienten selbst davon in Kenntnis setzen.« Automatik 8, S. 321, 1963

1963

Mehr Licht ins dunkle Universum

Physiker wollen die Welt auf möglichst einfache Weise erklären. Da scheint es schlecht ins Bild zu passen, dass sie über ein Universum voller Dunkler Materie und Dunkler Energie spekulieren. Immer mehr Messdaten deuten jedoch darauf hin, dass diese mysteriösen Phänomene real sind.

LARS LINDBERGH CHRISTENSEN, ESO



WOLFGANG LUBITZ

Die letzten Rätsel der Fotosynthese

Beim Aufbau von Biomasse spalten Pflanzen mit Hilfe des Sonnenlichts Wassermoleküle. Wie das genau geschieht, zeigen nun spektroskopische Experimente und eine neue Strukturanalyse des dafür zuständigen Proteins. Die Erkenntnisse helfen, den Vorgang technisch nachzuahmen.



HEINRICH STÜRZEL, /CC-BY/3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BB/3.0)

Im Zeichen des Mondes

Archäologische Befunde zu Grabanlagen wie dem Glauberg zeigen, dass die keltischen Priester nicht erst zu Cäsars Zeit etwas von Astronomie verstanden. So waren wichtige Achsen der Anlagen auf bestimmte Mondaufgangspunkte ausgerichtet.

Zoff um den Yellowstone

Ökologen frohlocken, dass in Amerikas berühmtem Nationalpark heute wieder Wölfe und große Bisonherden leben. Doch die Tiere halten sich nicht an dessen Grenzen. Besonders im Winter bevorzugen manche von ihnen das tiefer gelegene angrenzende Farmland – zum Ärger der Landwirte.

Eine neue Quantentheorie?

Keine physikalische Theorie ist erfolgreicher als die Quantenmechanik – und keine so seltsam. Eine neue Deutung mit dem sperrigen Namen Quanten-Bayesianismus beansprucht, alle Rätsel zu lösen. Das hat seinen Preis: Die Quantenformeln beschreiben nicht die Natur, sondern das Vorwissen des Beobachters!

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert werden?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter



JETZT IM
ABO
BESTELLEN!

- SPAREN:** 12 Ausgaben für nur € 7,- je Heft (inkl. Inlandsversand) anstatt € 7,90 im Einzelkauf)
- 2 IN 1:** Neben der Printausgabe erhalten Sie auch Zugriff auf die Digitalausgabe
- ARCHIV:** Komplettzugriff auf das *Spektrum der Wissenschaft*-E-Paper-Heftarchiv

Für Ihre Abobestellung erhalten Sie zudem noch ein Präsent Ihrer Wahl!
Weitere Prämien im Aboshop



JAHRGANGS-CD-ROM SDW 2012«

Hier finden Sie alle *Spektrum der Wissenschaft*-Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Des Weiteren finden Sie das Spektrum.de-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. Spektrum.de und das Suchregister laufen nur unter Windows.



Spektrum ARTBOOK

Das fadengeheftete Din-A4-Spektrum-Artbook bietet Ihnen viel Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



NELSONTELESKOP + Spektrum NEO NR. 1

Mit dem Bausatz lässt sich ein schönes Teleskop mit fünf Auszügen und einer sechsfachen Vergrößerung basteln. Dazu gibt es noch die *Spektrum NEO*-Ausgabe »Unser Universum«.

www.spektrum.de/abo



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO**



Ein Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-).
Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen,
sondern haben auch Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

www.spektrum.de/digitalabo



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND