

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Traditionelle
Chinesische
Medizin

Die erstaunliche
Renaissance
von Akupunktur
und Co.

MÄRZ 2013

KLIMA

Warum unsere Winter
wieder kälter werden

HERSCHELS ERBE

Die Entdeckung
des Infrarot

ELEKTRONIK

Graphen für schnellere
Transistoren

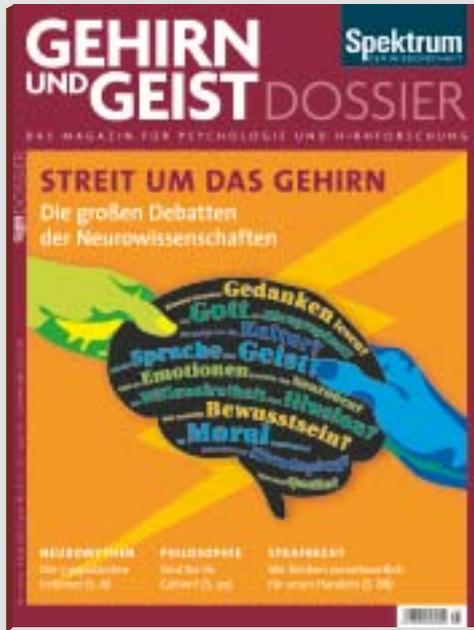
Die Sprache des Gehirns

So entstehen
Aufmerksamkeit und
Erinnerungen

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



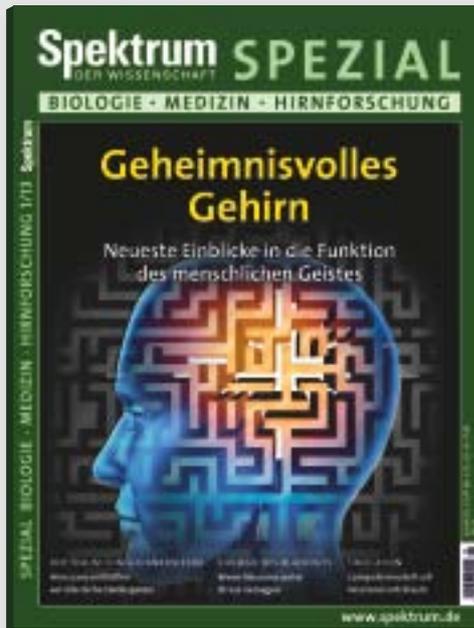
UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Die 7 größten Neuromythen • Der Traum vom Gedankenlesen • Was vom freien Willen übrig blieb • Was es heißt zu fühlen • Schlau auf Rezept? • € 8,90



Ein Unterrichtsfach fürs Wohlbefinden • Hochbegabung: Talente entdecken und fördern • Mathematik: Richtig rechnen lernen von Anfang an • € 8,90; Nachdruck



Komplexitätstheorie: Das Gehirn als Netzwerk • Springende Gene: Was jedes Gehirn einzigartig macht • Biologie des Blackouts • Schizophrenie: Vorboten des Ich-Verlusts • € 8,90



Ernährung: Gesund und lecker • Altern ist was für Mutige • Unsere Knochen und Muskeln – so bleiben sie in Form • Warum schlafen und träumen wir? • € 6,50

AUSGEWÄHLTE
SONDERHEFTE ALS
PDF ODER APP
ERHÄLTICH

www.spektrum.de/lesershop



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



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Paradoxe Zusammenhänge

Die hiesigen Winter fallen derzeit vergleichsweise kalt aus – und zwar wegen der Klimaerwärmung. Wie bitte? Zuerst glaubt man glatt, sich verlesen zu haben. Doch genau diese paradox klingende Schlussfolgerung zieht der New Yorker Atmosphärenwissenschaftler Charles Greene in seinem Artikel ab S. 76. Der wesentliche Grund für die sich seit 2009 häufigen Kälteeinbrüche auf der Nordhalbkugel ist demnach im rasant zunehmenden sommerlichen Abschmelzen des arktischen Meereises zu suchen. Denn diese Entwicklung setzt eine klimatische Kettenreaktion in Gang, die dafür sorgt, dass im Winter häufiger polare Luftmassen in unsere Breiten eindringen können. Zudem spielt speziell in den USA auch das so genannte El-Niño-Phänomen eine wichtige Rolle, das die frostige Tendenz noch massiv verschärfen kann und dann zu katastrophalen Schneestürmen wie dem »Snowmageddon«-Unwetter im Februar 2010 führt.

Manche Skeptiker verwenden die Rückkehr der kalten Winter gern als Beleg dafür, dass die Klimaerwärmung nicht existiert. Das mag auf den ersten Blick sogar einleuchtend erscheinen. Doch Greenes Beitrag entlarvt das als oberflächliche Betrachtungsweise. Er zeigt: Wenn man sich die Mühe macht, die komplexen, ineinandergreifenden Abläufe beim Klima präzise und detailliert zu analysieren, stößt man auf Zusammenhänge, die ein neues Licht auf das Gebiet werfen und auch scheinbar paradoxe Sachverhalte erklären können.

Ein anderer Beitrag im Heft, der weit verbreiteten Erwartungen und Vorstellungen entgegenläuft, betrifft die »Traditionelle Chinesische Medizin«. Der Medizinhistoriker Paul Ulrich Unschuld zeichnet in seinem Artikel ab S. 56 den verblüffenden, kurvenreichen Weg nach, den die TCM im Lauf der 100 Jahre genommen hat. Ich gestehe: Mir war bisher nicht bewusst, dass Chinas Regierende die unter diesem Etikett versammelten Heilmethoden und -rezepte lange als ernsthaftes Hindernis für die Weiterentwicklung des »Reichs der Mitte« zu einem modernen, zum Westen konkurrenzfähigen Staat empfanden – und diesen Ballast der Vergangenheit eigentlich so schnell wie möglich loswerden wollten. Lesen Sie, wieso das Vorhaben gründlich missriet und wie China in der Folge mit einer 180-Grad-Wendung die kommerzielle Gelegenheit am Schopf packte, mit der TCM gutes Geld zu verdienen: dank dem Westen!

Eine anregende Lektüre wünscht Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Unser Titelthema umfasst zwei Artikel. Zuerst beschreiben **Terry Sejnowski** (links) vom Salk Institute for Biological Studies und **Tobi Delbrück** von der Universität Zürich ab S. 22, wie elektrische Impulse im Gehirn Aufmerksamkeit und Gedächtnis steuern: vor allem durch ihre zeitlichen Abfolgen.



Im zweiten Beitrag des Titelthemas forschen **Rodrigo Quian Quiroga**, **Itzhak Fried** und **Christof Koch** (von links nach rechts) dem Konzept der »Großmutterzelle« nach. Ergebnis: Offenbar braucht es zwar nicht nur eine, aber doch vergleichsweise wenige Nervenzellen, um einen Begriff im Gehirn zu kodieren (S. 28).



Wie es – von China völlig ungeplant – zum Siegeszug der »Traditionellen Chinesischen Medizin« im Westen kam, erläutert **Paul Ulrich Unschuld** von der Charité-Universitätsmedizin in Berlin ab S. 56.

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

7000 Jahre alte Käsesiebe • Organische Leuchtdioden ohne Metall • Lepraerreger lässt Stammzellen entstehen • Asteroid Apophis • Runzelfinger greifen besser • Naturkonstanten – wirklich konstant

11 Bild des Monats

Energie aus dem Zentrum

12 Forschung aktuell

Eis in der Gluthölle

Die Raumsonde Messenger hat Wassereis im ewigen Schatten von Merkurkratern gefunden

Saat des Tumors

Neue Ergebnisse bestätigen die entscheidende Rolle von Krebsstammzellen

Heißer als unendlich heiß

Physiker stellten ein Gas mit negativer absoluter Temperatur her

SPRINGER'S EINWÜRFE

Wann wir schreiten

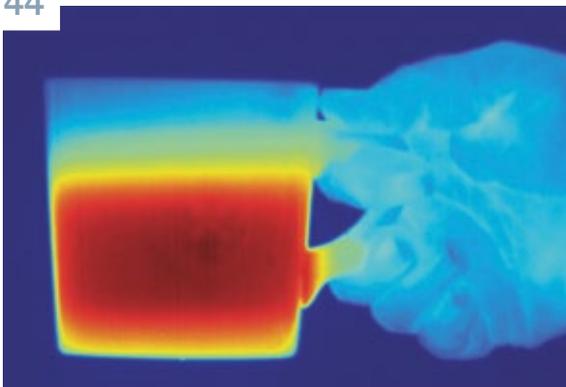
Seit' an Seit'

Rituale prägen nicht nur die Normalität, sondern auch den Aufruhr

34



44



62



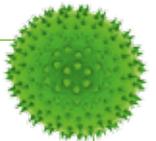
BIOLOGIE & MEDIZIN

SERIE ALLERGIE TEIL 4

34 Der Sinn der Allergie

Noah W. Palm, Rachel K. Rosenstein, Ruslan Medzhitov

Die heftige Immunantwort bei Allergien könnte zur Soforthilfe gegen Tiergifte und Schadstoffe aus der Umwelt entstanden sein.



PHYSIK & ASTRONOMIE

▶ 44 Herschel und das Rätsel der strahlenden Wärme

Jack R. White

Auf die Idee, Licht und Wärme als dasselbe physikalische Phänomen anzusehen, kam erst der Astronom William Herschel. So entdeckte er das Infrarot.

SCHLICHTING!

52 Lautlose Explosionen

H. J. Schlichting

Rotwein auf dem Tischtuch? Eine gute Gelegenheit, um einen komplexen Strukturbildungsprozess zu beobachten.

MENSCH & KULTUR

▶ 56 Die erstaunliche Rückkehr der TCM

Paul U. Unschuld

Chinas Machthaber wollten ihre eigene traditionelle Medizin zu Gunsten moderner westlicher Heilkunst loswerden. Doch dann kam alles anders.

62 In vielen Schritten zur Schrift

Klaus-Dieter Linsmeier

Welche der Kulturen Altamerikas als erste Zeichen nutzte, um Botschaften in Stein zu fixieren, darüber lässt sich lediglich spekulieren. Auch dass nur die Maya die Entwicklung bis zu einem komplexen Schriftsystem konsequent verfolgten, bleibt ein Rätsel.



► **TITELTHEMA**

22 Die Sprache des Gehirns

Terry Sejnowski, Tobi Delbrück

Unser Denkorgan arbeitet äußerst effizient. Dazu nutzt es präzise zeitliche Abfolgen elektrischer Impulse.

28 Wie das Gehirn die Großmutter erkennt

Rodrigo Q. Quiroga, Itzhak Fried, Christof Koch

Speichern wir Begriffe durch ausgedehnte neuronale Netze oder in nur einer einzigen Nervenzelle?

76



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

70 Liebe zwischen Rittern und Bauern

Christoph Pöppe

Wie kann man Punkten, die zufällig auf der Ebene verstreut sind, Teilflächen dieser Ebene zuweisen? Mit einem Algorithmus zur Ehebahnung!

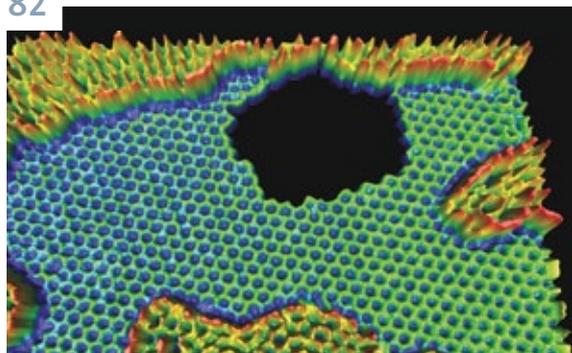
ERDE & UMWELT

► **76 Die Rückkehr der harten Winter**

Charles H. Greene

In den zurückliegenden Jahren gab es in Europa und den USA ungewöhnlich strenge Kälteperioden. Es mag überraschen, aber der Grund dafür ist wohl das verstärkte Abschmelzen des arktischen Meereises.

82



TECHNIK & COMPUTER

► **82 Graphen – Elektronik aus Kohlenstoff**

Keith A. Jenkins

Forscher suchen nach neuen Möglichkeiten, schnellere Transistoren für Mikrochips herzustellen. Große Hoffnungen setzen sie auf die Kohlenstoffverbindung Graphen. Doch einen Wermutstropfen gibt es bereits: Für Computer scheint sie wenig zu taugen.

90 Rezensionen

C. Weiss: Risse in der Zeit • M. Hvistendahl: Das Verschwinden der Frauen • J. Fischer: Affengesellschaft • A. Retzer: Miese Stimmung • F. Freistetter: Der Komet im Cocktailglas • S. Delouvé: Warum verhalten wir uns manchmal merkwürdig und unlogisch? • Die Erdmännchen Gang

97 Wissenschaft im Rückblick

Vom Urmenschen zum Mondkraftwerk

98 Vorschau

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



Whoin mit dem Atom Müll?

Das Titelthema unserer Februarausgabe stellte ein Verfahren vor, das langlebige Radionuklide in ungefährlichere Stoffe umwandeln soll: die Transmutation. Die Technologie ist allerdings keineswegs unumstritten. (»Was tun mit dem nuklearen Abfall?«, Februar 2013, S. 34; »Alchemie oder Alternative?«, S. 42)

Felix Guilino, München: Mit Genuss und Gewinn habe ich die Beiträge über Transmutation gelesen. Vielen Dank dafür! Das Interview lässt meines Erachtens überraschend deutlich erkennen, dass hier Aufwand und Nutzen in keinem vernünftigen Verhältnis stehen und dieser Ansatz fallen gelassen werden sollte.

In dem Zusammenhang noch eine Anmerkung. Wie ich zu meinem Entsetzen erfahren habe, hat man Atom Müll noch bis in die 1980er Jahre einfach im Meer verklappt. Das wirft viele Fragen auf: Wo wurden die Fässer versenkt? Was ist seitdem mit diesem Atom Müll passiert, und was wird damit geschehen? Zurückgeholt wird er wohl kaum. Wäre es prinzipiell möglich, Nuklearmüll wirklich loszuwerden, indem man ihn so im Ozean versenkt, dass er danach im Erdinneren verschwindet, etwa in einer Subduktionszone?

Radioaktiven Müll ins All zu schießen – diese auf den ersten Blick elegante Idee hat man meines Wissens geprüft. Leider ist es dafür erstens viel zu viel Masse; zweitens droht jedes Mal eine Havarie in der Atmosphäre. Man bräuchte ein Schwarzes Loch im Hinterhof ...

Die Navier-Stokes-Gleichungen als Sackgasse

Der Strömungsforscher Eberhard Bodenschatz hofft, bald Turbulenzen präzise berechnen zu können. (»Jetzt gibt es erstmals eine Chance, das Turbulenzproblem zu lösen«, Januar 2013, S. 54)

Helmut Z. Baumert, Ludwigslust: Die Sackgasse, in der sich die Turbulenzforschung recht lange aufhielt, heißt Navier-Stokes-Gleichungen. Sie gehören zur Klasse der singular gestörten Gleichungen. Wenn man hier die Reibung gegen null gehen lässt, was dem Fall des idealen Fluids entspricht, so tritt bei null eine Singularität auf: Der Typ der Differenzialgleichung ändert sich, und damit ändern sich auch die Anforderungen an die Randbedingungen. Diese Singularität fungiert wie eine Mauer, an der alle bisherigen Theorien scheiterten.

Beginnt man eine Turbulenztheorie aber von der Euler-Gleichung her, so ist bekannt, dass deren Lösungen nicht eindeutig sind und man sie physikalisch ergänzen muss. Fügt man aber elementare ideale Wirbelgesetze in quali-

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

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

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

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

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistent: Erika Eschwei

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Verlagsleiter: Richard Zinken

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Harald Floss, Bernhard Gerl, Dr. Rainer Kayser, Christine Kemmet, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner 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 Nachfrage. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70).

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SDW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; 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 Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcombe, 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.



BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe

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

tativer Form hinzu, so erhält man die nötige Einzigkeit, und es ergibt sich zwanglos eine ganz einfache Theorie der neutral geschichteten Turbulenz, die – neben anderem – als besonderen Gag erstmalig die karmansche Konstante als $1/\sqrt{2 \cdot \pi} \sim 0,399$ liefert, wobei π die Kreiszahl ist. Der geschätzte Leser kann all dies hier nachlesen: <http://arxiv.org/abs/1203.5042>.

In der Tat, Herr Bodenschatz hat Recht: Turbulenz wird nicht mehr lange unverständlich bleiben. Es gibt im Umkreis dennoch mehr als genug zu tun, zum Beispiel wenn Temperaturschichtung eine Rolle spielt und das Fluid schwingungsfähig wird, wenn

schwere Teilchen transportiert werden und vieles mehr.

Unerhörte Vorgänge

Die Agrarökologin Angelika Hilbeck prangerte die Methoden der Herstellerfirmen gentechnischer Produkte an. (»Die Technologie wurde viel zu schnell von der Industrie angewendet«, Februar 2013, Spektrum Extra S. 18)

Edith Sachse, Burggrumbach: Glückwunsch an die Redaktion für den Abdruck und Glückwunsch an Angelika Hilbeck für die mutige Darstellung der unerhörten Vorgänge in der Agrotechnik-Forschung!

Zweierlei Maß bei der Antibiotikagabe

Chefredakteur Carsten Könneker wies auf die Gefahren des großzügigen Einsatzes von Antibiotika hin. (»Adipositas und Antibiotika«, Editorial, November 2012, S. 7)

C. Pletrowski, Bredenbeck: Wenn ich lese, wie in der Tiermast mit Antibiotika

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

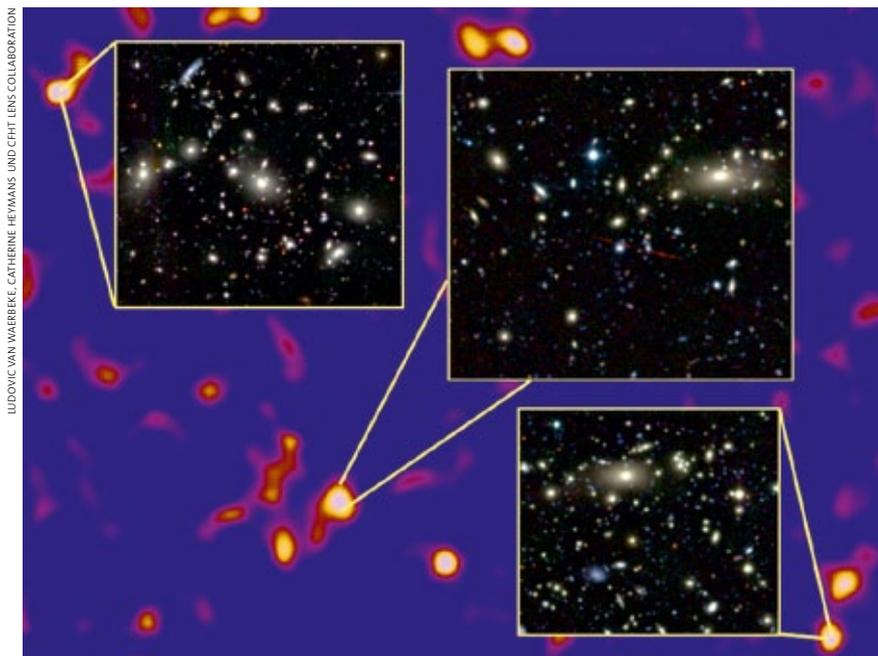
umgegangen wird, dann wird mir ganz anders. Im Gegensatz dazu haben wir bei Infektionen unserer Kinder ganz genau ausgerechnete Saftportionen des Medikaments erhalten, wo ich die Löffel von den Kindern habe extra ablecken lassen, damit auch alles richtig ankommt. Ich weiß noch, wie man meinem Sohn bei einer Mittelohrentzündung zunächst keine Antibiotika verordnen wollte, obwohl er vor Schmerzen weinte (zuerst gab es nur Paracetamol).

Antibiotika für Patienten erst, wenn man praktisch »auf dem Zahnfleisch« geht, und in der Tiermast weiß man scheinbar nicht, wohin damit. Und dazu noch die unerfreulichen Nebenwirkungen des Missbrauchs (möglicherweise Adipositas und Allergien) auf den Menschen!

Erratum

»Die ersten Blicke auf das dunkle kosmische Netz«, Februar 2013, S. 14

Die Himmelskarte, die wir auf S. 15 der Februarausgabe abgebildet haben, zeigt massereiche Galaxienhaufen (eingesetzte optische Bilder) in Regionen hoher Dunkler-Materie-Konzentrationen (gelbe Bereiche). Die Aufnahme unten rechts war aber identisch mit der oben links. Darauf aufmerksam gemacht hat uns Helmut Leffler aus Eschborn. Hier das korrigierte Bild.



Diese Abbildung lässt die Knoten des kosmischen Netzes aus Dunkler Materie erahnen. Gelb steht für hohe Massekonzentration, Blau für niedrige. Im letzten Heft hatten wir eine falsche Darstellung gezeigt (siehe Erratum rechts).

ARCHÄOLOGIE

Käse: Seit 7000 Jahren auf dem Speiseplan

Den ältesten stichhaltigen Beleg für die Herstellung von Käse haben jetzt Forscher um Richard Evershed von der University of Bristol (England) geliefert. Das Team untersuchte durchlöchernte Tonscherben, die bei Ausgrabungen in Polen entdeckt worden

waren und auf ein Alter zwischen 6800 und 7400 Jahren datiert sind. Mit chromatografischen und spektrometrischen Verfahren sowie Isotopenmessungen fanden die Forscher heraus, dass den Scherben Reste von Milchfetten anhaften. An anderen Stücken lässt sich

Bienenwachs nachweisen; es könnte einst dazu gedient haben, das Material Wasser abweisend zu machen.

Wahrscheinlich wurden die durchlöchernten Tonstücke als Siebe verwendet, um geronnene Milchbestandteile von der Molke zu trennen – ein typischer Schritt in der Käseherstellung. Experten vermuten schon seit Jahren, dass es sich bei den Scherben um Teile von Käsesieben handelt, doch ließ sich dieser Verdacht bislang nicht erhärten.

Die Milch von Nutztieren war eine wichtige neue Nahrungsquelle für die Menschen der Jungsteinzeit. Allerdings konnten die meisten damals noch keinen Milchzucker (Laktose) verdauen, wie Erbgutanalysen belegen. Die Milch zu Käse zu verarbeiten, war für sie doppelt vorteilhaft: Erstens ist Käse haltbarer, zweitens enthält er im Vergleich zu Milch wenig Laktose.

Nature 493, S. 522–525, 2013



Bruchstück eines rund 7000 Jahre alten mutmaßlichen Käsesiebs. Die Scherbe ist etwa fünf Zentimeter lang, die Löcher enthalten noch Erdreste. Wahrscheinlich trennten die Menschen der Jungsteinzeit damit geronnene Milchanteile von Molke.

MÉLANIE SAUQUE, UNIVERSITY OF BRISTOL

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Studien und Analysen lesen Sie jeden Donnerstag in

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

- Löwen: Der König verliert sein Reich
- Naturschutz: Die Rückkehr der Riesen
- Geotektonik: Explosive Zeiten

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

TECHNIK

Organische Leuchtdioden ohne Metall

Wissenschaftler um Chihaya Adachi von der Universität Kyushu (Japan) haben organische Leuchtdioden entwickelt, die elektrische Energie hocheffizient in Licht umwandeln und ohne teure Metalle wie Iridium auskommen. Die Technik basiert auf organischen Molekülen mit Ringsystemen, die gegeneinander verdreht sind.

Fließt Strom durch eine Leuchtdiode, sorgt er dafür, dass Farbstoffmoleküle auf höhere Energieniveaus angehoben werden. Einige gehen in einen so genannten Singulettzustand über. Von dort fallen sie rasch in den Grundzustand zurück und senden dabei Licht aus. Die meisten Moleküle werden allerdings in einen so genannten Triplettzustand angeregt, der seine Energie normalerweise als Wärme abgibt und daher nichts zum Leuchten

beiträgt. Durch Einbau eines Metallatoms in das Molekül kann man auch den Triplettzustand zum Aussenden von Licht bewegen; dies geschieht in klassischen organischen Leuchtdioden.

In den neuen Dioden hingegen liegen die beiden Anregungsniveaus energetisch nah beieinander. Infolgedessen reicht bereits bei Zimmertemperatur die Wärmeenergie aus der Umgebung aus, um zahlreiche Moleküle aus dem Triplett- in den Singulettzustand zu befördern. Dies erhöht die Lichtausbeute drastisch, ohne dass Metalle eingesetzt werden müssen. Wie die Forscher schreiben, können sie die Wellenlänge des ausgesendeten Lichts über die chemischen Gruppen an den Ringen einstellen, so dass sich die Dioden etwa für Mehrfarben-LED-Bildschirme eignen.

Nature 492, S. 234–240, 2012

Lepraerreger lässt Stammzellen entstehen

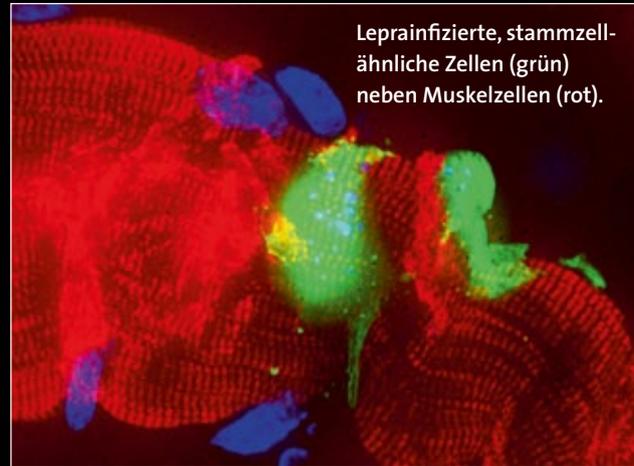
Das Leprabakterium *Mycobacterium leprae* kann bestimmte Zellen des Nervengewebes so umprogrammieren, dass sie Stammzellen ähneln. Das berichten Forscher um Anura Rambukkana von der University of Edinburgh (Schottland). Sie verfolgten die Entwicklung von Schwann-Zellen, die mit Leprabakterien infiziert wurden. Dieser Zelltyp umhüllt Nervenfasern und versieht sie mit einer Myelinscheide, um sie elektrisch zu isolieren.

Sobald die Schwann-Zellen mit den Bakterien in Kontakt kommen, beginnen sie ihre charakteristischen Eigenschaften zu verlieren, wie sich zeigte. Chronisch infizierte Zellen werden zu mesenchymalen Stammzellen, die sich unter anderem zu Muskel- und Skelettzellen weiterentwickeln. Zudem locken sie Makrophagen an, Fresszellen des Immunsystems, und übertragen die Infektion auf sie.

Wenn Leprabakterien in den Körper eindringen, nutzen sie die Schwann-Zellen als Rückzugsort, um der Immunreaktion zu entgehen. Bei chronischem Krankheitsverlauf befallen sie aber auch das Muskelgewebe der Betroffenen. Der jetzt entdeckte Mechanismus erklärt, wie ihnen das gelingt.

Eine wichtige Rolle bei der Rückprogrammierung der Schwann-Zellen scheint das Protein Sox10 zu spielen, das die Aktivität von Genen regelt. Bei einer Lepraerkrankung wird es rasch außerhalb des Zellkerns abgebaut. Womöglich genügt es dem Lepraerreger schon, nur dieses Protein auszuschalten, um die Zellen umzuprogrammieren.

Cell 152, S. 51–67, 2013



Lepra-infizierte, stammzell-ähnliche Zellen (grün) neben Muskelzellen (rot).

MASAKI, T. ET AL., *CELL* 152, S. 51–67, 2013, FIG. 4 B

Kein Weltuntergang durch Asteroiden Apophis

Mindestens bis zum Jahr 2105 stellt der erdnahe Asteroid Apophis keine Gefahr für die Erde dar. Das haben Berechnungen der US-Raumfahrtbehörde NASA ergeben, die sich auf aktuelle Beobachtungsdaten stützen. NASA-Forscher peilten den Himmelskörper, der mehrere hundert

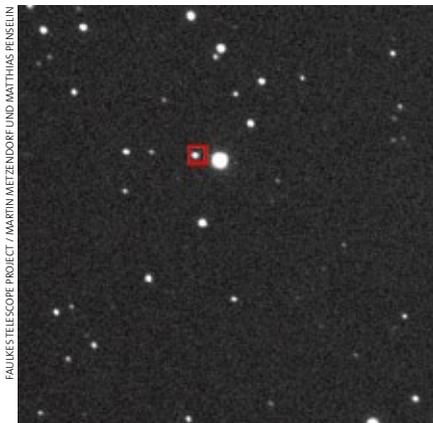
Meter durchmisst, zu Beginn dieses Jahres mit Radarsignalen an, als er sich der Erde bis auf 14,5 Millionen Kilometer näherte. Dabei gelang es ihnen, seine Bahn mit bisher unerreichter Genauigkeit zu bestimmen. Den Ergebnissen zufolge ist praktisch ausgeschlossen, dass er innerhalb der kommenden 90 Jahre mit unserem Heimatplaneten zusammenstößt.

Apophis hatte kurz nach seiner Entdeckung im Jahr 2004 Schlagzeilen gemacht. Damals deuteten erste Bahnberechnungen an, dass er am 13. 4. 2029 mit einer Wahrscheinlichkeit von 2,7 Prozent die Erde treffen könnte. Nachfolgende Untersuchun-

gen ergaben, dass er unserem Heimatplaneten an dem Tag zwar nahe kommen, ihn aber verfehlen wird. Jedoch blieb ein kleines Risiko, er könne bei dem Vorbeiflug auf eine Bahn gelenkt werden, die ihn 2036 mit uns kollidieren ließe. Laut den neuen Daten liegt die Chance dafür aber bei eins zu sieben Millionen – und damit nahe null.

Derweil haben Beobachtungen mit dem europäischen Weltraumteleskop Herschel gezeigt, dass Apophis deutlich weniger Licht reflektiert und rund 20 Prozent größer ist als bislang angenommen. Sein mittlerer Durchmesser beträgt demnach etwa 325 Meter. Falls das stimmt, müssen entsprechend sein Volumen und seine Masse um rund 75 Prozent nach oben korrigiert werden.

Pressemitteilungen der ESA (European Space Agency) und der NASA vom 9. beziehungsweise 10. Januar 2013



FAULKES TELESCOPE PROJECT / MARTIN METZENDORF UND MATTHIAS FENKELIN

Apophis (rot umrahmt) auf einer Aufnahme des Faulkes Telescope South, Australien, vom 8. Januar 2013.

BILOGIE

Runzelfinger greifen besser

Bei längerem Aufenthalt im Wasser werden die Fingerkuppen schrumpelig. Das könnte eine evolutionäre Anpassung sein, die es uns erlaubt, in feuchter Umgebung einen sicheren Griff zu bekommen, spekulieren Forscher um Tom Smulders von der Newcastle University (England). Sie baten 20 Freiwillige darum, nasse Glasmurmeln aus einem wassergefüllten Behälter zu nehmen und in einen anderen zu legen. Dies mussten die Teilnehmer sowohl mit glatten Fingerkuppen bewältigen als auch – nach 30-minütigem Handbad – mit Runzelfingern. In letzterem Fall brauchten sie deutlich weniger Zeit, um die Aufgabe zu erledigen. Sollten sie aber trockene Murmeln bewegen, waren sie mit glatten Fingerkuppen genauso schnell wie mit runzligen. Möglicherweise haben sich die Schrumpelfinger in der

Evolution durchgesetzt, weil sie auf nassen Oberflächen nicht so schnell abrutschen, folgern die Autoren.

Schon in den 1930er Jahren war aufgefallen, dass sich keine Runzelfinger bilden, wenn die Fingernerven beschädigt sind. Es handelt sich demnach nicht um ein passives Aufquellen der Hornhaut im Wasser, sondern um

Runzelfinger könnten sich in der Evolution durchgesetzt haben, weil sich mit ihnen nasse Objekte besser greifen lassen. Allerdings werden auch Zehen im Wasser schrumpelig. Vielleicht bestand der ursprüngliche Vorteil dieser Hautreaktion darin, besser über rutschige Oberflächen laufen zu können.

einen aktiven Prozess, der vom Nervensystem gesteuert wird. Auch japanische Makaken bekommen nach ausgedehnten Warmwasserbädern schrumpelige Finger. In künftigen Studien möchten die Forscher untersuchen, ob noch andere Tiere diese Reaktion zeigen.

Biology Letters 9, 20120999, 2013



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / ALICE KRÜSSMANN

PHYSIK

Naturkonstanten – wirklich konstant

Ob Naturkonstanten tatsächlich immer denselben Wert besitzen, ist eine umstrittene Frage. Eine Teilantwort konnten nun Astronomen um Wim Ubachs von der Universität Amsterdam geben. Sie haben gezeigt, dass sich das Massenverhältnis zwischen Elektron und Proton – eine wichtige Naturkonstante – in den vergangenen sieben Milliarden Jahren

nicht nachweisbar geändert hat. Ihre Messungen waren auf ein Zehnmillionstel genau.

Die Forscher beobachteten das Gravitationslinsensystem PKS 1830-211. Dort steht eine massereiche Galaxie vor einer sehr viel weiter entfernten Lichtquelle. Die Galaxie zeigt sich uns so, wie sie vor sieben Milliarden Jahren aussah. Sie enthält große Mengen an

Methanol, einem Alkohol, der unter anderem in interstellaren Wolken zu finden ist. Das Licht der Hintergrundquelle muss durch die Galaxie hindurch, während es zu uns unterwegs ist. Dabei verschluckt das Methanol bestimmte Wellenlängen und hinterlässt dunkle Absorptionslinien im Frequenzspektrum.

Mit Hilfe des 100-Meter-Radioteleskops in Effelsberg (Nordrhein-Westfalen) wiesen die Astronomen im Spektrum des Gravitationslinsensystems vier Absorptionslinien von Methanol nach, die vor sieben Milliarden Jahren entstanden. Zwei davon hängen in ihrer Stärke empfindlich vom Massenverhältnis zwischen Proton und Elektron ab. Der Vergleich der beobachteten Absorptionslinien mit solchen, die aktuell im Labor erfasst werden, ergab keinen messbaren Unterschied.

Science 339, S. 46–48, 2013

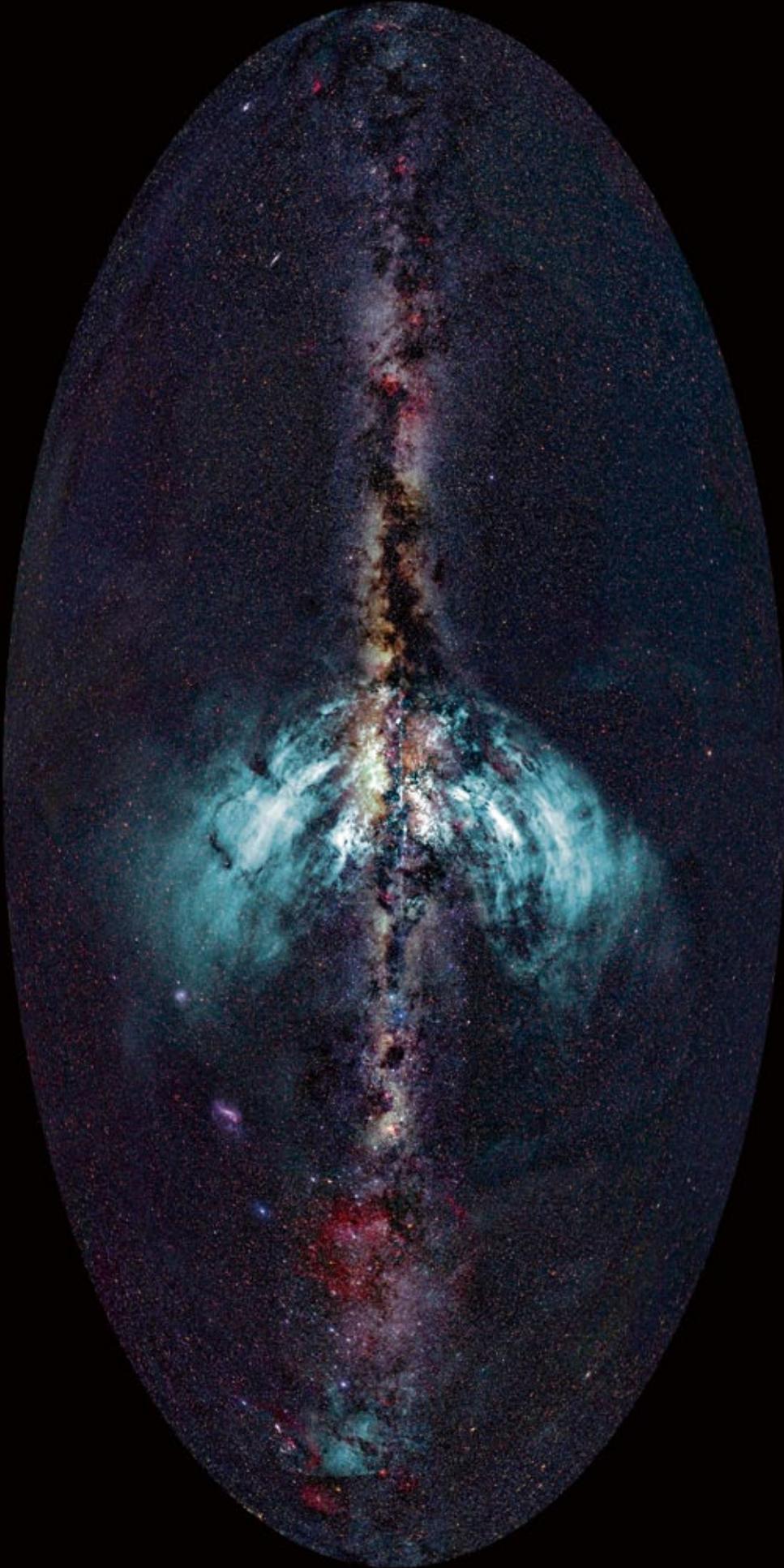


NORBERT JUNKES, MPI FÜR RADIOASTRONOMIE

Die sieben Milliarden Jahre alten Absorptionslinien wurden mit dem Radioteleskop Effelsberg aufgezeichnet. Es gehört zum Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und ist seit mehr als 40 Jahren in Betrieb.

ENERGIE AUS DEM ZENTRUM

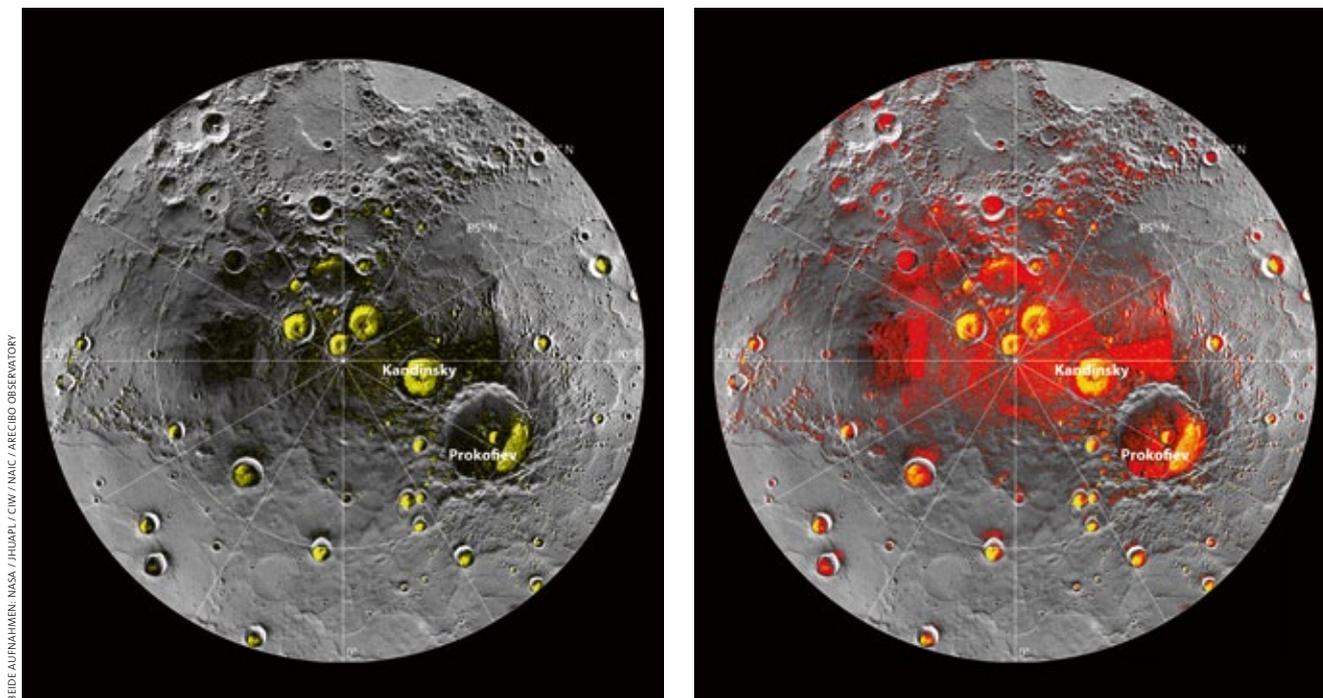
OPTISCHES BILD: UNLWEDER, CENTRAL MICHIGAN UNIVERSITY, BÄRDIS (NACH LOREY,
VON SPASS SURVEY TEAM); FOTONEN: CARRETTI, CSMD, COMPASSING, LE BRESSER, CSMD



Mit Geschwindigkeiten von rund 1000 Kilometer pro Sekunde entströmen der Milchstraße gewaltige Mengen an energiereichen geladenen Teilchen, wie Astronomen jüngst am australischen Parkes-Radioteleskop nachwiesen. Sowohl nach »oben« als auch nach »unten« entfernen sich die Partikel bis zu 25.000 Lichtjahre von der galaktischen Scheibe. In etwa denselben Raumregionen hatte das Weltraumteleskop Fermi 2010 riesige »Blasen« entdeckt, die Gammastrahlung aussenden. Kurz darauf wies

der Planck-Satellit dort: Mikrowellenstrahlung nach. Die neuen Messungen zeigen nun, dass die Strahlung von einem Teilchenstrom ausgeht, der aus dem Zentrum der Galaxis stammt, nicht aber von dem hier beheimateten Schwarzen Loch. Vielmehr speist er sich aus unzähligen Sternexplosionen und -geburten, die in den vergangenen 100 Millionen Jahren im Herzen der Milchstraße stattfanden.

Nature 493, S. 66–69, 2013



BEIDE AUFNAHMEN: NASA / JHUAPL / CIW / NAIC / ARECIBO OBSERVATORY

PLANETENFORSCHUNG

Eis in der Gluthölle

Die Raumsonde Messenger hat Wassereis auf Merkur gefunden – wahrscheinlich ein Relikt von Kometen- und Asteroideneinschlägen, das im ewigen Schatten einiger Krater überdauerte.

VON THORSTEN DAMBECK

Wer sich auf die Suche nach Eis im Sonnensystem begibt, würde wohl kaum zuerst auf Merkur nachsehen. Während die Erde rund 150 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt ist, beträgt der Abstand des sonnennächsten Planeten nur zwischen 46 und 70 Millionen Kilometer; die Temperaturen an seiner Oberfläche erreichen daher bis zu 430 Grad Celsius.

Doch während die Rotationsachse der Erde gegen ihre Bahnebene um 23,5 Grad geneigt ist, sind es bei Merkur weniger als 0,1 Grad. Deshalb gibt es an seinen Polen tiefe Krater, in die nie ein Sonnenstrahl fällt – in ihnen herrscht ewige Kälte. Auswertungen von Daten der NASA-Sonde Messenger – veröffentlicht am 29. November 2012 in mehreren Onlinepublikationen des Fachjournals »Science« – bestätigen nun, worüber Astronomen seit Langem

spekuliert hatten: Am Boden einiger Nordpolkrater des Merkurs ist tatsächlich Wassereis zu finden.

1991 erhielt diese Idee Auftrieb, als mit dem 300-Meter-Radioteleskop von Arecibo (Puerto Rico) an beiden Polen Gebiete entdeckt wurden, die Radarstrahlen besonders stark reflektieren und damit auf Eis hindeuten. Durch Vergleiche mit Fotos, die von der Merkursonde Mariner 10 in den Jahren 1974 und 1975 geschossen wurden, ließen sich manche dieser »radarhellen« Gebiete als große Einschlagkrater identifizieren. Doch Mariner hatte weniger als die Hälfte der Merkursoberfläche abgelenkt, und den Planetenforschern fehlten entscheidende Bilddaten.

Nun aber gibt es neue Fotos. Messenger umkreist Merkur seit März 2011, nachdem die Sonde dem Planeten zuvor drei Kurzbesuche im Vorbeiflug ab-

gestattet hatte (siehe »Reise zum Merkur« in Spektrum der Wissenschaft 5/2011, S. 46). Ihre Aufnahmen bestätigen, dass die radarhellen Stellen der Polregionen in dauerhaft schattigen Gebieten liegen.

Doch sie lieferte noch eindeutigere Hinweise. Der Name der Sonde steht für »Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging«. Messenger deckt also die gesamte Bandbreite der Planetenforschung ab und untersucht die Oberfläche des Himmelskörpers, den Einfluss von Sonne und Weltraum, Merkurs chemische Zusammensetzung und das Höhenprofil des Planeten. Letzteres wird per Ranging bestimmt, also mittels der Laufzeit von Laserlicht zwischen Sonde und Oberfläche. Millionen Laserechos wurden dazu bislang ausgewertet. Das Ranging-Instrument dient aber auch einem weite-

Erste Indizien für Eis auf Merkur fanden Forscher schon vor langer Zeit: 1992 entdeckte das Arecibo-Observatorium polare Regionen, die Radarstrahlen stark reflektierten (ganz links, gelb markiert). Unterlegt man die Daten mit einem Mosaik der Merkuroberfläche, erkennt man, dass sich die »radarhellen« Gebiete zumeist am Grund oder an den Hängen von Einschlagkratern befinden (angegeben sind deren englische Bezeichnungen). Seit März 2011 ist die Sonde Messenger vor Ort (rechts). Sie identifizierte alle Gebiete, die im ewigen Schatten liegen (links, rot markiert) und bestätigte damit die Arecibo-Messungen. Die Aufnahmen zeigen jeweils die Nordpolregion Merkurs.

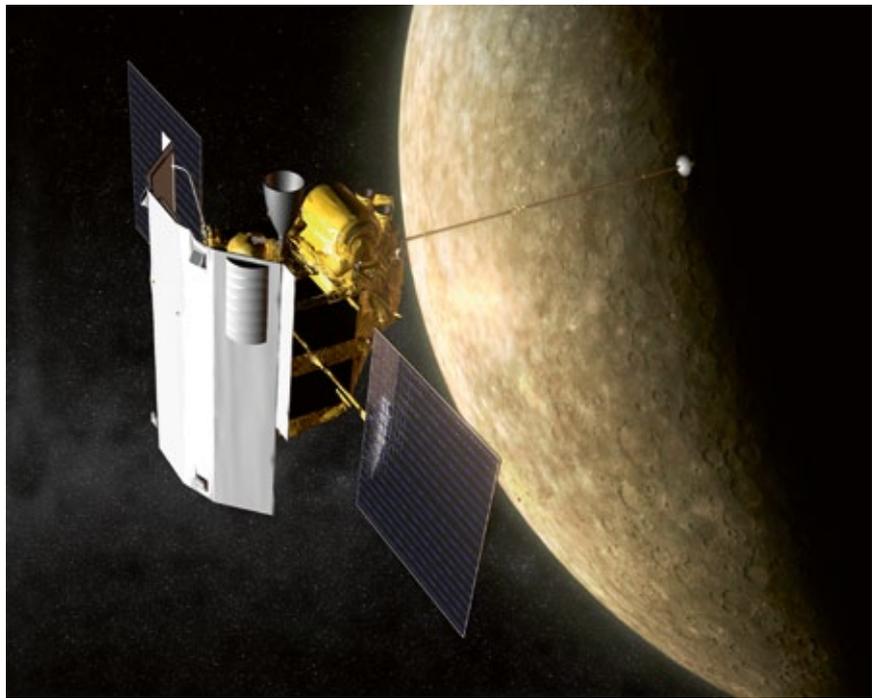


ILLUSTRATION: NASA / JHUAPL / CIW

ren Zweck: Es gestattet den Forschern einen Blick ins Dunkel der Polarkrater, indem es das Reflexionsvermögen des Bodens untersucht.

In dunklen Kratern an Merkurs Nordpol registrierte es dabei besonders helle Reflexe. Laut dem Chefwissenschaftler der Mission, Sean Solomon von der Carnegie Institution of Washington, kommt als Erklärung nur Wassereis in Frage. Auch Jörn Helbert vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) überzeugt der Eisbefund: »Zusammen mit den Radardaten lassen die Lasermessungen kaum einen anderen Schluss zu«, so der Berliner Physiker. Er war an den Publikationen zwar nicht selbst beteiligt, gehört aber dem Wissenschaftsteam der Mission an.

Eine Forschergruppe um David Paige von der University of California, Los Angeles, das die auf Merkur herrschenden Temperaturen mit theoretischen Modellen ermittelte, konnte auch nachweisen, dass die radarhellen Stellen mit jenen Oberflächenregionen zusammenfallen, in denen Temperaturen von unterhalb minus 170 Grad Celsius herrschen und Eis darum nicht im Lauf der Zeit verdampft (sublimiert).

Wie aber gelangte es überhaupt in die dunklen Polkrater? Merkur wurde,

so das Szenario der Wissenschaftler, einst von wasser- und kohlenstoffhaltigen Kometen oder Asteroiden getroffen. Die Wassermoleküle verdampften schnell, gefroren aber erneut, wenn sie anschließend in kältere Regionen gerieten. Auch dort sublimierte das Eis wieder. In einem fortdauernden Zufallsprozess hüpfen die Wassermoleküle also über den Merkur, bis sie schließlich in die polaren Kältefallen tappten. Erst von dort gab es kein Entrinnen mehr.

Dunkles Material aus komplexen organischen Verbindungen

Umgeben sind diese Temperaturminima von etwas wärmeren Zonen, in denen bis zu minus 110 Grad herrschen; hier würde Eis im Verlauf großer Zeiträume allmählich sublimieren. An diesen Stellen findet das Laserinstrument besonders dunkles Bodenmaterial. Die Wissenschaftler halten es für eine Mischung aus komplexen organischen Verbindungen, die ebenfalls mit den einschlagenden Himmelskörpern auf Merkur gelangt waren. Gemeinsam mit den Wassermolekülen bewegten sie sich dann weiter, kamen aber früher als diese zur Ruhe.

Ein weiteres Instrument, das Neutronspektrometer von Messenger, erhär-

tete den Eisbefund zusätzlich. Sobald energiereiche kosmische Strahlung auf die Oberfläche eines atmosphärelosen Himmelskörpers wie Merkur trifft, setzt sie in bis zu einem Meter Tiefe des Gesteins Neutronen frei. Analysiert man deren Energieverteilung, offenbart sich Wasserstoff – etwa in H₂O-Molekülen – in Form einer niedrigeren Neutronenrate. Für sich genommen sind die Messungen des Neutronenspektrometers zwar kein Garant für Eis: »Das Instrument kann keine topografischen Strukturen auflösen«, erklärt Helbert, »sondern misst lediglich mittlere Werte über ein größeres Gebiet. Außerdem gehen viele Parameter und Annahmen in die Analysen ein. Meines Erachtens bleibt daher eine gewisse Unsicherheit.«

Das Messenger-Team vertraut dennoch auf seine Auswertungen. Diese deuten auf Schichten aus fast purem Eis hin, die 10 bis 20 Zentimeter unter der Oberfläche liegen. Wie mächtig die Vorkommen sind, können die Autoren um David Lawrence von der Johns Hopkins University im US-Bundesstaat Maryland nur grob schätzen; die Schichtdicken müssen aber mindestens einige Dutzend Zentimeter betragen. Den Radarmessungen von Arecibo zufolge, bei

denen die Strahlung tiefer in den Boden eindringt, könnten sie aber sogar einige Meter erreichen. Insgesamt taxieren die Forscher den Eisgehalt der nördlichen Polregion auf 20 bis 1000 Milliarden Tonnen.

Nur ein Fundort unter vielen

Wasserfunde im inneren Sonnensystem sind mittlerweile keine Seltenheit mehr. Während die großen Bodeneisvorkommen des Mars schon seit zehn Jahren bekannt sind, präsentierte Thomas Prettyman vom Planetary Science Institute in Tucson, Arizona, zusammen mit Kollegen im Herbst 2012 auch Resultate der US-Sonde Dawn. Mit ihrem Gamma- und Neutronenspektrometer hatte sie den Asteroiden Vesta abgetastet und dabei Hinweise auf wasserhaltige Mineralien auf dessen Oberfläche gefunden.

In den Polregionen des Erdmonds gibt es wahrscheinlich ebenfalls Eis. Es könnte sich dabei allerdings auch

um hydroxylhaltiges Gestein handeln, also um Mineralien, die OH-Moleküle enthalten. Entscheiden lässt sich das per Fernerkundung nur schwer, zumal die vorliegenden Daten mehrdeutig sind. Während Neutronenspektrometer auf Wassereis hindeuten, lieferten Radarmessungen widersprüchliche Ergebnisse. Seit 2009 gibt es jedoch nur noch wenig Zweifel. Damals ließ man die ausgebrannte, tonnenschwere Oberstufe einer Mondsonde gezielt auf den Trabanten abstürzen, so dass sie einen vier Meter tiefen Krater in den Boden des Südpolkraters Cabeus schlug. Die begleitenden spektroskopischen Messungen belegten mit großer Sicherheit, dass er etwa 5,6 Gewichtsprozent Wassereis enthält.

Messengers Auftrag wird wohl ebenfalls mit einem kontrollierten Absturz enden, möglicherweise schon Ende 2013. Eines wird die Sonde aber nicht klären können: ob auch der Südpol des Merkurs Eis beherbergt. Denn wegen

ihrer dort zu hohen Umlaufbahn liefert sie aus dieser Region keine brauchbaren Daten. Ein Nachfolger wartet jedoch bereits in den Startlöchern. Die europäisch-japanische Mission BepiColombo soll 2015 ebenfalls zum Merkur aufbrechen, ihre Ankunft ist für den Beginn des kommenden Jahrzehnts geplant.

Mit auf die Reise gehen wird das Infrarotspektrometer Mertis. Gemeinsam mit einem Kollegen leitet Jörn Helbert das Team, das es in diesen Wochen fertig stellt. »Mit unserem Instrument«, so der DLR-Forscher, »werden wir erstmals direkt die Temperatur auf der Oberfläche ermitteln, indem wir deren thermische Strahlung messen – auch in den Schattenzonen der Krater. So können wir nicht nur Messengers Resultate überprüfen, sondern auch den Südpol für die Eissuche erschließen.«

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und arbeitet als Buchautor und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

MEDIZIN

Krebsstammzellen im Visier

Schon seit längerem spekulieren Forscher über Krebsstammzellen als »Wurzel« von Tumorerkrankungen. Neue Ergebnisse untermauern am Beispiel von Hirn-, Haut- und Darmtumoren, dass diese Zellen tatsächlich eine entscheidende Rolle spielen.

VON GERLINDE FELIX

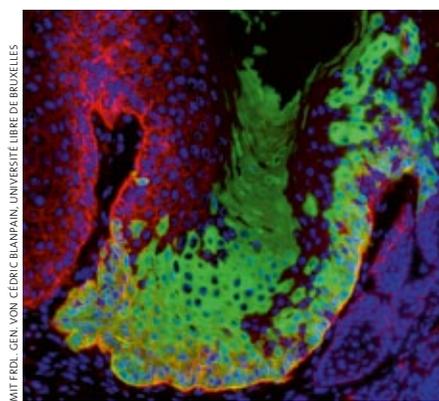
Jeder Mensch hat Stammzellen. Sie schlummern in den Organen, liefern bei Bedarf Nachschub an gesunden Zellen und helfen dem Körper so, sich zu regenerieren. In manchen Organen, etwa im Gehirn, gibt es nur wenige davon. In anderen, beispielsweise der Haut, treten sie häufiger auf. Stammzellen können sich unbegrenzt teilen und zu verschiedenen Zelltypen heranreifen.

Es gibt jedoch auch krankhaft veränderte Zellen, die Stammzellen ähneln, aber Krebs hervorbringen (siehe SdW 2/2013, Extra S. 4). Bis vor etwa 15 Jahren gingen Forscher fest davon aus, Tumo-

ren bestünden aus einer Masse gleichartiger Zellen, die sich ungehemmt teilen. Doch dann fiel kanadischen Genetikern auf: Wenn man menschliche Leukämiezellen in Labormäuse überträgt, lässt nur eine Untergruppe davon die Tiere an Krebs erkranken. Bei ihnen musste es sich also um eine Art Masterzellen handeln, die als einzige in der Lage sind, neue Tumoren hervorzubringen – Krebsstammzellen.

Seither erforschen Wissenschaftler auf der ganzen Welt dieses Thema. Zusammengenommen deuten ihre Erkenntnisse darauf hin, dass Tumoren hierarchisch organisiert sind, vergleich-

bar einer Pyramide. Die Krebsstammzellen stehen dabei an der Spitze: Sie erneuern sich selbst, bringen aber auch sämtliche anderen Zelltypen des Tumors hervor und bauen so die Geschwulst auf. Strahlen- und Chemotherapien lassen den Tumor zwar häufig schrumpfen. Doch nach Monaten oder Jahren kehrt er oft zurück – und erweist sich diesmal als resistent gegenüber der Behandlung. Nimmt man an, dass die Krankheit von Krebsstammzellen ausgeht, überrascht dies nicht, denn sowohl die Strahlenbehandlung als auch die Chemotherapie zerstören vorwiegend Zellen, die sich häufig teilen.



MIT FROLD GEN VON CEDRIC BLANPAIN, UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

Nachkommen einer Tumorstammzelle. Wissenschaftler der Université Libre de Bruxelles (Belgien) benutzten eine genetische Markierungstechnik, um Krebsstammzellen in Hauttumoren von Mäusen zu kennzeichnen. Alle Zellen, die auf dem Bild grün erscheinen, also große Teile des Tumors, stammen von einer einzigen Krebsstammzelle ab.

Krebsstammzellen sitzen jedoch tief verborgen in schützenden Nischen, sind unter normalen Umständen wenig aktiv und teilen sich selten. Zudem verfügen sie häufig über leistungsfähige Mechanismen, um Zellgifte aus ihrem Inneren herauszubefördern und Schäden an ihrem Erbgut zu reparieren. Deshalb können die konventionellen Therapien ihnen wenig anhaben.

Das bedeutet aber auch, dass man Tumorerkrankungen bei der Wurzel packen kann, wenn man gezielt die Krebsstammzellen angreift. Genau diesen Therapieansatz erforschen Wissenschaftler nun seit Jahren. Doch mit jedem neuen Detail, das ans Licht kommt, wird deutlicher, wie komplex das Geschehen auf zellulärer Ebene ist. »Es gibt wohl verschiedene Arten von Krebsstammzellen, und alle sind hochgefährlich«, sagt Andreas Trumpp. Er leitet die Abteilung »Stammzellen und Krebs« am Deutschen Krebsforschungszentrum und ist Geschäftsführer des Heidelberger Instituts für Stammzelltechnologie und Experimentelle Medizin (HI-STEM).

Kürzlich erschien im Fachblatt »Nature« eine Studie unter der Leitung von Luis Parada vom Southwestern Medical Center in Dallas, Texas (*Nature* 488, S. 522, 2012). Sie untermauerte das Krebsstammzellkonzept am Beispiel von Glioblastomen, aggressiven Hirntumoren bei Erwachsenen. An genetisch veränderten Mäusen, die spontan Hirntumoren ausbilden, konnte Paradas Team zeigen, dass einige Tumorzellen Eigenschaften haben, die denen von Stammzellen ähneln. Von dieser speziellen Untergruppe stammen die übrigen Zellen

des Tumors ab, wie die Untersuchungen belegten. Zudem beobachteten die Forscher, dass genau diese Untergruppe sehr resistent gegenüber Substanzen ist, die Zellwachstum und Zellteilung hemmen. Sie kann eine Chemotherapie also mit großer Wahrscheinlichkeit überleben und den Tumor nach der Behandlung zurückkehren lassen.

Gezielter Schlag gegen den Krebs

Das Krebswachstum in der Maus lässt sich eindämmen, wenn man die stammzellähnlichen Tumorzellen vernichtet. Parada und seinen Kollegen gelang dies mit einem experimentellen Trick. Sie veränderten die Zellen so, dass jene, die für Stammzellen typische Oberflächenproteine trugen, sich mit dem Arzneistoff Ganciclovir zerstören ließen. Der Stoff wird normalerweise gegen Herpesviren eingesetzt. Nachdem die Forscher die mutmaßlichen Krebsstammzellen mit Ganciclovir eliminiert hatten, beseitigten sie noch die meisten übrigen Tumorzellen mittels Chemotherapie. Diese kombinierte Behandlung führte zu einem dramatisch eingeschränkten Wachstum des Tumors. Allerdings stellt die Methode keinen Therapieansatz dar, sondern demonstriert nur die Bedeutung der stammzellähnlichen Tumorzellen.

Niederländische Forscher um Hans Clevers von der Universität in Utrecht haben kürzlich herausgefunden, dass Stammzellen bereits in Darmpolypen der Maus – einer möglichen Vorstufe für Darmkrebs – aktiv sind (*Science* 337, S. 730, 2012). Sie machen fünf bis zehn Prozent der Polypenzellen aus. Clevers und sein Team wiesen nach, dass die

NICHTS BRINGT SIE SO NAH HERAN

WIE IHRE GANZ
PERSÖNLICHE EXPEDITION

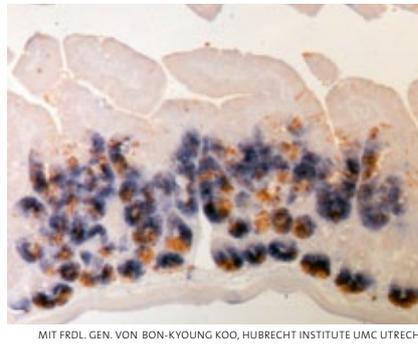
MS HANSEATIC · MS BREMEN
EXPEDITIONSKREUZFAHRTEN



Hapag-Lloyd
Kreuzfahrten

Große Momente. Ganz exklusiv.

Schnitt durch einen Darmtumor der Maus. Zellen mit Stammeigenschaften sind blau angefärbt. Braun erscheinen hingegen die so genannten Paneth-Zellen: Drüsenzellen, die im Dünndarm, Mastdarm und Magen auftreten. Die Paneth-Zellen bilden eine Nische für die Tumorstammzellen.



Polypen aus Zellen heranwachsen, in denen die gleichen Gene aktiv sind wie in normalen Stammzellen des Darms.

Cedric Blanpain von der belgischen Universität Libre de Bruxelles und seinen Mitarbeitern gelang es zudem, auch in Mäusen, die an Hautkrebs erkrankt waren, eine Untergruppe von Tumorzellen mit Stammeigenschaften zu lokalisieren (*Nature* 488, S. 527, 2012). Die Forscher kennzeichneten einzelne Krebszellen mit Hilfe einer genetischen Markierungstechnik und verfolgten ihre weitere Entwicklung während des Tumorwachstums. Dabei zeigte sich, dass Papillome – gutartige Geschwulste der Haut oder Schleimhaut, die eine Vorstufe von Hautkrebs darstellen können – aus zwei Zelltypen bestehen. Der eine stellt das Wachstum nach gewisser Zeit ein, der andere hingegen kann sich unbegrenzt teilen und bringt die Hauptmasse des Tumors hervor.

Eine weitere Studie, die unlängst im Fachmagazin »Oncogene« erschien, beleuchtet die Wechselwirkungen zwischen Krebsstammzellen und Hormonen (*Oncogene* 10.1038/onc.2012.275, 2012). Den Untersuchungen zufolge ist

das Hormon Progesteron indirekt dazu in der Lage, Brustkrebszellen in einen stammzellähnlichen Zustand zurückzusetzen. In diesem Status sind sie resistenter gegenüber Chemotherapie, was die Tumorerkrankung deutlich gefährlicher macht. »Bei Leukämien und beim Prostatakarzinom kommt es sogar vor, dass Krebsstammzellen die Nischen für adulte Stammzellen quasi überfallen und einnehmen«, erläutert Trumpp. Dort seien sie dann weitgehend gefeit vor therapeutischen Eingriffen und lauerten auf ihre nächste Chance zur Tumorbildung.

Zudem, so betont Trumpp, verändern sich Krebsstammzellen im Lauf der Zeit. Je weiter eine Krebserkrankung fortschreite, umso mehr Mutationen sammelten sich in ihnen an. Das ließe neue Krebsstammzellen entstehen, die gegenüber ihren Vorgängern bestimmte Wachstums- oder Resistenzvorteile haben könnten, so dass sie sich besser vermehren als diese. »Neuere Erkenntnisse deuten an, dass es in einem fortgeschrittenen Tumor nicht nur eine Gruppe von Zellen gibt, die von einem gemeinsamen Vorgänger abstammen,

sondern viele solche Gruppen, die miteinander konkurrieren«, sagt Trumpp. »Es handelt sich um so genannte Subklone, an deren Spitzen genetisch verschiedene Krebsstammzellen stehen.« Laut Martin Sprick, einem Mitarbeiter von Trumpp am HI-STEM, können therapeutische Eingriffe diese Evolution der Krebsstammzellen in eine gänzlich unerwünschte Richtung lenken. »Vielleicht macht die Chemotherapie die Krebsstammzellen erst richtig fit, weil sie per Selektion die widerstandsfähigsten und am besten geschützten begünstigt«, spekuliert er.

Aus den Krebsstammzellen scheinen auch die Tochtergeschwülste (Metastasen) des Tumors hervorzugehen. Aktuelle Erkenntnisse deuten darauf hin, dass irgendwann in der Entwicklung des Tumors Metastasen bildende Krebsstammzellen entstehen. Sie sitzen zunächst in der Nähe des Primärtumors, und zwar auf der Innenseite von Blutgefäßen, die ihn versorgen. Dort lassen sie sich in geschützten Nischen aus gefäßauskleidenden Zellen (Endothelzellen), Immunzellen und Bindegewebskomponenten nieder und werden von den Endothelzellen mit Botenstoffen und Wachstumsfaktoren versorgt. Irgendwann verlassen die Metastasen bildenden Stammzellen ihre Nische und wandern in andere Organe ein, um dort Tochtergeschwülste aufzubauen. Diese Fähigkeit haben »normale« Krebsstammzellen nicht.

All dies lässt es dringend geboten erscheinen, medizinische Verfahren zu entwickeln, die sich gezielt gegen Krebsstammzellen richten. Ein Ziel, auf das Trumpp schon lange hinarbeitet. Seine Mitarbeiterin Marieke Essers und er haben gezeigt, dass der körpereigene Botenstoff Interferon-alpha Leukämie-stammzellen dazu bringen kann, ihre Nische zu verlassen und sich zu teilen. Das macht sie anfällig für eine Chemotherapie. Allerdings müsse diese Methode noch weiterentwickelt werden, bevor man sie an Patienten anwenden könne, betont Trumpp.

Woher kommen Krebsstammzellen?

Noch ist unklar, ob Krebsstammzellen durch Entartung aus normalen Stammzellen entstehen oder aus bereits ausgereiften Zellen hervorgehen, die durch Mutationen erneut Stammeigenschaften erlangen. Andreas Trumpp vom Deutschen Krebsforschungszentrum und seine Mitarbeiter haben in den vergangenen Jahren das Blut bildende System untersucht und dabei Hinweise auf den ersten Mechanismus gefunden. Demnach können bestimmte genetische Veränderungen normale Stammzellen in Krebsstammzellen verwandeln. Eine wichtige Rolle dabei scheint das *MYC*-Gen zu spielen, das die Aktivität anderer Gene verstärkt. Wenn es mutiert ist, kann sich eine Blutstammzelle so verändern, dass sie unentwegt bösartige Tochterzellen ins Blut entlässt und Leukämie verursacht.

Gerlinde Felix

Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Markt Wartenberg.

Kälter als kalt und heißer als unendlich heiß

Physiker stellen ein Gas mit negativer absoluter Temperatur her. Das Faszinierende daran: Es ist heißer, als jedes gewöhnliche Gas werden kann.

VON OLIVER MORSCH

Das ein Thermometer bei klirrender Kälte Minusgrade anzeigt, liegt daran, dass die Celsiusskala nur über relative Temperaturen Auskunft erteilt. Der schwedische Astronom Anders Celsius nahm 1743 den Gefrier- und den Siedepunkt von Wasser und zerlegte den Abstand dazwischen in 100 gleich große Teile. Gegenüber den bis dahin verbreiteten ungenauen Messskalen, die als Referenzpunkte beispielsweise den jeweils kältesten und heißesten Tag eines Jahres in Florenz festlegten, brachte das einen enormen Fortschritt.

Celsius' Skala ließ sich beliebig erweitern, sowohl zu höheren Temperaturen hin als auch unter null Grad zu negativen. Wie weit nach unten die Celsiusskala fortgesetzt werden kann, wurde aber erst gegen Mitte des 19. Jahrhunderts klar. Damals erklärten Physiker die Temperatur als ungeordnete Bewegung etwa von Molekülen in einem Gas und führten damit die absolute Temperaturskala ein. Je langsamer sich die Moleküle bewegen, desto kälter ist das Gas. Am absoluten Nullpunkt bei $-273,15$ Grad Celsius stehen schließlich alle Gasteilchen vollkommen still. Tiefere Temperaturen als null Kelvin sind also auf diese Weise nicht denkbar, denn weniger als gar nicht können sich Atome oder Moleküle nun mal nicht bewegen – eigentlich. Physikern um Immanuel Bloch und Ulrich Schneider vom Max-Planck Institut für Quantenoptik in Garching sowie der Ludwig-Maximilians-Universität München ist es aber nun erstmals gelungen, dennoch ein Gas mit einer Temperatur zu erzeugen, die unter dem absoluten Nullpunkt liegt (*Science* 339, S. 52–55, 2013).

Dass Atome nicht stiller als still stehen können, gilt natürlich weiterhin. Doch ist für die Temperatur eines Gases

nicht nur entscheidend, wie schnell sich seine Teilchen im Mittel bewegen, sondern auch, wie die einzelnen Geschwindigkeiten unter ihnen verteilt sind. Könnte man für jedes Gasteilchen dessen Geschwindigkeit – und damit seine Bewegungsenergie – ermitteln, so ließe sich eine Energiestatistik erstellen, die zeigt, wie viele Teilchen jeweils eine ganz bestimmte Energie besitzen (siehe Grafik).

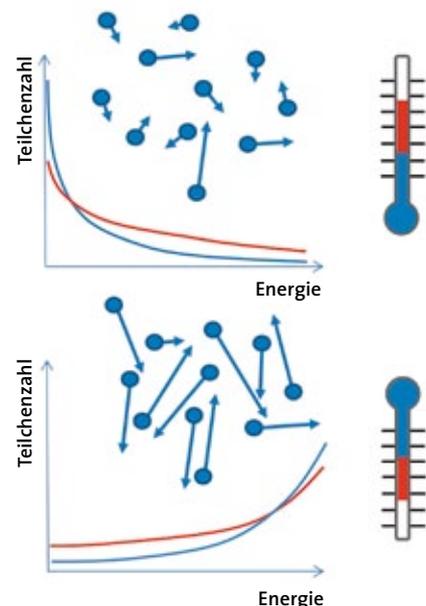
Die Energieverteilung steht Kopf

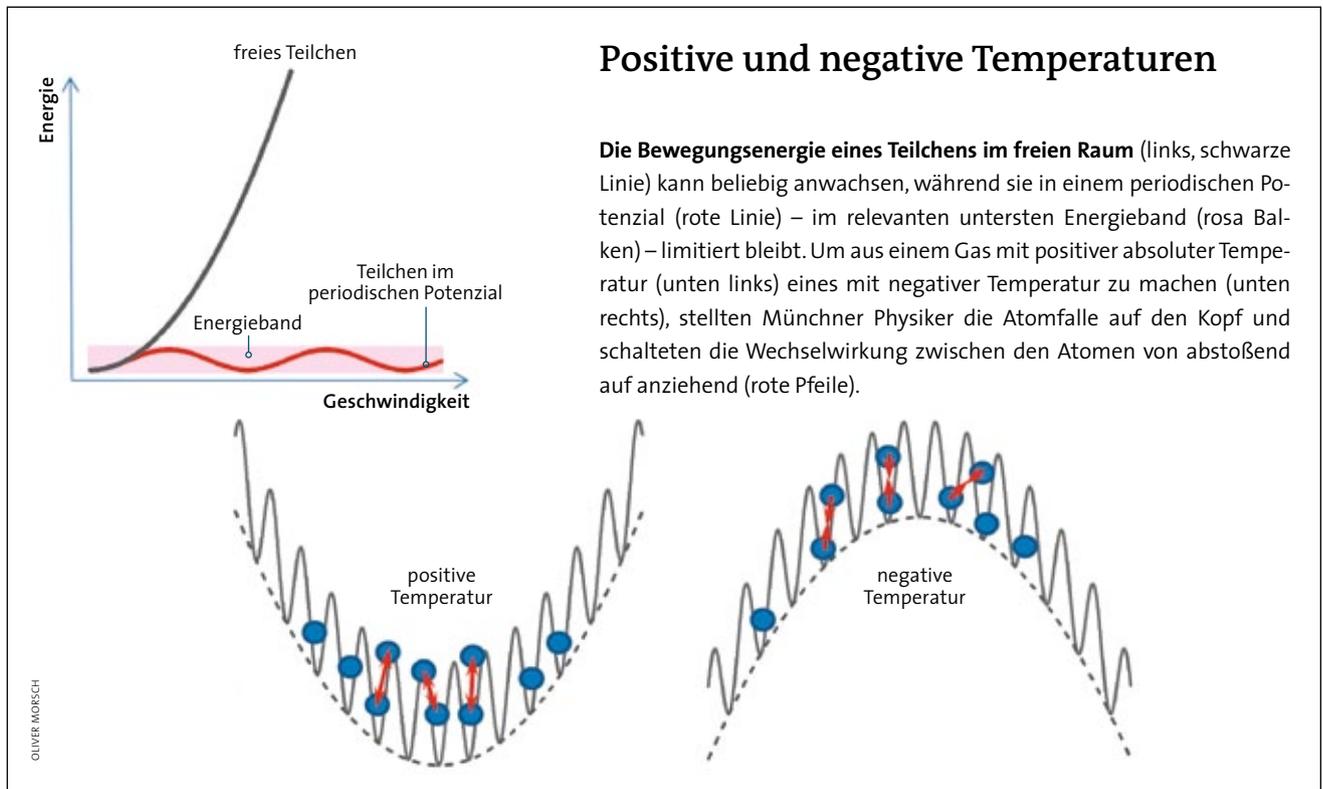
So fände man für ein kaltes Gas sehr viele Teilchen mit geringer und nur sehr wenige mit hoher Energie. Für ein heißes Gas wäre die gleiche Verteilung insgesamt zu höheren Energien hin verschoben und etwas weniger unausgewogen. In beiden Fällen kommen jedoch mehr Teilchen in den tieferen Energieklassen vor als in den höheren, wobei sich der Unterschied mit ansteigender Temperatur nivelliert. Erst in einem theoretisch unendlich heißen Gas wären alle Energien gleich wahrscheinlich. Wollte man ein solches Gas noch weiter erhitzen, müssten mehr Teilchen bei höheren als bei niedrigen Energien zu finden sein – die Energieverteilung wäre also genau umgekehrt wie bei einem normalen Gas. Das aber würde theoretisch einer negativen Temperatur entsprechen. Paradoxerweise wäre also ein Gas mit negativer Temperatur heißer als unendlich heiß.

Das klingt zwar absurd, doch genau einen solchen eigenartigen Zustand

Energieverteilung eines Gases mit positiver (oben) und negativer absoluter Temperatur (unten): In beiden Fällen folgt die Energieverteilung einem Exponentialgesetz. Die Länge der Pfeile zeigt die Geschwindigkeit der Teilchen an.

konnten die Münchner Forscher jetzt in ihrem Laborexperiment herstellen. Dazu fingen sie zunächst Kaliumatome mit Hilfe von Laserstrahlen ein, kühlten sie auf wenige milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt ab und manipulierten die Partikel dann auf raffinierte Weise: Um die Temperatur des Gases negativ werden zu lassen, mussten die Forscher dafür sorgen, dass sich die Energieverteilung der Atome umkehrt und damit mehr Teilchen mit hohen als mit niedrigen Energien vorkommen. Ein solches Unterfangen kann aber nur gelingen, wenn die maximale Energie der Teilchen begrenzt ist – sonst bräuchte man für diese Operation unendlich viel Energie. Auch muss dabei die potenzielle Energie des Gases berücksichtigt werden, die dadurch entsteht, dass die Atome in einer Falle aus Lichtfeldern gefangen sind. Zudem besitzen die Atome noch eine Wechselwirkungsenergie, die entsteht, wenn sie miteinander kollidieren und sich dabei gegenseitig abstoßen.





Positive und negative Temperaturen

Die Bewegungsenergie eines Teilchens im freien Raum (links, schwarze Linie) kann beliebig anwachsen, während sie in einem periodischen Potenzial (rote Linie) – im relevanten untersten Energieband (rosa Balken) – limitiert bleibt. Um aus einem Gas mit positiver absoluter Temperatur (unten links) eines mit negativer Temperatur zu machen (unten rechts), stellten Münchner Physiker die Atomfalle auf den Kopf und schalteten die Wechselwirkung zwischen den Atomen von abstoßend auf anziehend (rote Pfeile).

Um all dies zu erreichen, wendeten die Physiker eine Reihe von Tricks an. Der erste bestand darin, die Kaliumatome einem »periodischen Potenzial« auszusetzen. Ähnliches geschieht in der periodisch geordneten Anordnung von Atomen in einem Kristall, wo sich die Elektronen zwischen den aufgereihten Atomkernen bewegen. Der schweizerische Physiker Felix Bloch (1905–1983) berechnete bereits 1928 mit Hilfe der Quantenmechanik die Bewegung der Elektronen in einem solchen Kristallgitter und kam zu einem erstaunlichen Ergebnis.

Anders als im freien Raum, wo Teilchen beliebige Geschwindigkeiten und Bewegungsenergie haben können, sind in einem periodischen Potenzial die möglichen Energiezustände in so genannte Bänder aufgeteilt (siehe Grafik oben). Die Elektronen können dann in der Regel nur Energiewerte annehmen, die innerhalb der Grenzen eines solchen Bands liegen – die Energiezonen außerhalb sind für sie verboten. Das erklärt zum Beispiel, warum manche Stoffe elektrischen Strom leiten und andere nicht. Die Existenz der – endlichen – Energiebänder garantiert, dass es eine

Obergrenze für die Bewegungsenergie gibt und sich die Atome energetisch an dieser ansammeln können.

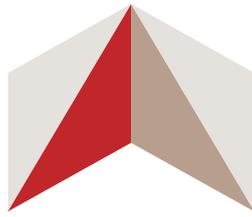
Der Trick mit der umgekehrten Salatschüssel

Mit Hilfe eines zweiten Tricks rückten die Forscher der potenziellen Energie in der Atomfalle zu Leibe, in der sie die Kaliumatome gespeichert hatten. Das Potenzial einer solchen Falle kann man sich etwa vorstellen wie eine Salatschüssel, wobei ein Atom in der Mitte der Schüssel eine niedrige, eines zum Rand hin aber eine hohe potenzielle Energie aufweist. Befinden sich alle Atome am Schüsselboden, so ist ihre gesamte potenzielle Energie minimal. Nach oben hingegen ist sie theoretisch unbegrenzt, wenn man annimmt, dass die Schüssel beliebig groß sein kann. Will man diese Verhältnisse umkehren (und nur so bekommt man negative Temperaturen), braucht man die Schüssel sozusagen nur auf den Kopf zu stellen: Jetzt haben die Atome auf dem »Gipfel« des Schüsselhügels die höchste Lageenergie, nach unten jedoch gibt es dann prinzipiell keine Begrenzung. Im Labor lässt sich eine solche Situa-

tion leicht herstellen, indem man für die Atomfalle Laserstrahlen bestimmter Wellenlängen wählt.

Schließlich musste, Trick Nummer drei, auch noch die Wechselwirkungsenergie der gefangenen Teilchen von Abstoßung in Anziehung verkehrt werden. In einem normalen Gas stoßen sich die Atome und Moleküle gegenseitig ab, wenn sie sich zu nahe kommen. Komprimiert man das Gas, steigt die Wechselwirkungsenergie immer mehr an – im Prinzip bis ins Unendliche. Dehnt sich das Gas dagegen aus, so kollidieren die Teilchen immer seltener, und die entsprechende Energie sinkt gegen null. Um auch diese Energie nach oben zu begrenzen, setzten die Münchner Forscher die Kaliumatome einem Magnetfeld aus, unter dessen Einfluss die Atome einander bei Kollisionen nicht mehr abstießen, sondern sogar anzogen. Eine starke Kompression hätte in einem solchen Gas zur Folge, dass die Wechselwirkungsenergie unendlich negativ wird, wogegen nun die Obergrenze bei null liegt.

Die Kombination dieser drei Techniken führte die Forscher schließlich zum Erfolg. Nachdem sie das Gas aus



GEORG VON HOLTZBRINCK PREIS FÜR WISSENSCHAFTSJOURNALISMUS

AUSSCHREIBUNG 2013

Der Preis wurde anlässlich des 150jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung wissenschaftlicher Sachverhalte, insbesondere aus den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis für Bewerber, die nicht älter als 29 Jahre sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit 5.000 EUR dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 EUR dotiert.**

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de.

Bewerben Sie sich mit drei Arbeitsproben und einem Kurzlebenslauf bis zum 1. April 2013.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
der Verlagsgruppe
Georg von Holtzbrinck GmbH

Taubenstraße 23
10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20
Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de
www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (Vorsitz)
Vorsitzender der Geschäftsführung,
Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck GmbH

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER
Sprecher der Unternehmensleitung,
Boehringer Ingelheim GmbH

ULRICH BLUMENTHAL
Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

PROF. DR. ANGELA FRIEDERICI
Direktorin, Max-Planck-Institut für
Kognitions- und Neurowissenschaften

PROF. DR. PETER GRUSS
Präsident, Max-Planck-Gesellschaft zur
Förderung der Wissenschaften e.V.

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

DR. CARSTEN KÖNNEKER
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG
Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER
Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber ZEIT Wissen

RANGA YOGESHWAR
Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co.“,
„Wissen vor acht“ u. a.

Wann wir schreiten Seit' an Seit'

Rituale prägen nicht nur die Normalität, sondern auch den Aufruhr.

Niemand sah den »arabischen Frühling« kommen. Von einem Tag auf den anderen ergossen sich im Dezember 2010 Menschenmassen auf die Straßen von Tunis, und kurz darauf besetzten junge Ägypter den zentralen Platz Kairos. In rhythmischen Sprechchören forderten die Aufständischen den Sturz der Regierung. Der Aufruhr erfasste nicht nur Tunesien und Ägypten, sondern steckte auch die Nachbarländer Libyen und Syrien an, wo es zu blutigen Bürgerkriegen kam.

Irgendwann mündet jeder Aufstand in einen neuen Status quo. In der arabischen Welt werden ihn anscheinend islamische Organisationen prägen. Gespannte Ruhe wird wieder einkehren, eine prekäre rituelle Normalität, die jedoch – wie jüngst in Kairo – jederzeit erneut in Proteste und Aufstände umschlagen kann.

Um solche Phasenwechsel des gesellschaftlichen Aggregatzustands zu verstehen, bemüht der britische Anthropologe Harvey Whitehouse den Begriff des Rituals. Ob als kollektives Kirchengebet oder als schmerzhafter Initiationsritus: Rituale schaffen Gemeinsamkeit; sie sind der Kitt, der ganze Zivilisationen zusammenhält – auch in Zeiten des Umbruchs (*Nature* 493, S. 470, 2013).

Auf Grund jahrelanger Feldforschungen unterscheidet Whitehouse zwei Ritualtypen, die er »imagistisch« und »doktrinär« nennt (siehe seinen Artikel »Der Sinn von Ritualen« in *Spektrum Spezial* 1/2011, S. 56). Die doktrinäre Variante passt zu den stabilen, mehr oder weniger friedlichen Zivilisationsphasen, wie wir sie kennen, in denen sich gewöhnlich eine Buchreligion etabliert hat; diese regelt markante Fixpunkte im Leben wie Taufe / Beschneidung, Initiation, Hochzeit und Begräbnis. Hingegen gehören imagistische Rituale eher zu Zeiten der Unruhe. Sie verbreiten selbst Angst und Schrecken; ihre traumatisierenden Zeremonien dienen als Gegenzauber gegen die Furcht vor übermächtigen Gewalten.

Derzeit leitet Whitehouse ein interdisziplinäres Team von Forschern aus zwölf britischen, amerikanischen und kanadischen Universitäten. Sie haben beispielsweise untersucht, welche Rituale die libyschen Aufständischen einsetzten, um sich Mut zu machen, bevor sie in den Kampf gegen den militärisch haushoch überlegenen, aber moralisch schwächeren Gegner zogen. Offenbar wirkten ihre imagistischen Rituale – in die Luft schießen, im Chor Racheschwüre schreien – stärker als das doktrinäre Gegenstück, mit dem das wankende Gaddafi-Regime die regulären Truppen auf den vermeintlich unangefochtenen Herrscher einzuschwören suchte.

Wenn Whitehouse Recht hat und Rituale Menschengruppen vereinen und zusammenhalten sollen, dann funktionieren sie in Krieg und Frieden offenbar konträr. Die imagistische Kriegsvariante setzt für den Zusammenhalt die Furcht als Mittel ein. Sie droht dem Einzelnen: Wenn du uns verlässt, dann ist es um dich geschehen. Hingegen arbeitet die doktrinäre Friedensversion mehr mit Zuckerbrot als mit Peitsche. Sie beschwört ein Gefühl der mitmenschlichen Wärme, das verlockend wirkt und den Gedanken, sich selbstständig zu machen, erst gar nicht aufkommen lassen soll.

Historisch betrachtet sind laut Whitehouse imagistische Rituale älter als doktrinäre. Er ordnet erstere eher dem zivilisatorisch früheren Nomadenstadium zu, während sich letztere erst mit der Sesshaftigkeit der Viehzüchter und Ackerbauern etabliert hätten. Das legt den Gedanken an einen geschichtlichen Fortschritt nahe. Mündet der Reigen gesellschaftlicher Phasenübergänge nach der endgültigen Vertreibung auch der letzten Tyrannen also irgendwann in einen paradiesischen Endzustand, in dem freundliche Rituale der Menschheit dauerhaften Frieden bescheren?



Michael Springer

Kaliumatomen abgekühlt hatten, fingen die Physiker die Atome in einem periodischen Lichtgitter ein. Gleich darauf stellten sie die Atomfalle aus Laserstrahlen »auf den Kopf« und schalteten mit Hilfe des Magnetfelds die Wechselwirkung zwischen den Atomen von abstoßend auf anziehend. Eine anschließende Messung der Energieverteilung ergab, dass das Gas nun tatsächlich eine negative absolute Temperatur besaß.

Gibt es eine kosmische Verbindung zur Dunklen Energie?

Was kann man mit derart exotischen Gasen anstellen? Zum einen werden Forscher Gase mit negativen absoluten Temperaturen und deren verblüffende Eigenschaften jetzt im Labor studieren können. So sollte zum Beispiel der Druck eines solchen Gases ebenfalls negativ sein: Während sich ein Gas bei positiven Temperaturen durch seinen Druck immer weiter ausdehnt, solange man es nicht in einen Behälter sperrt, zieht es sich bei negativen absoluten Temperaturen spontan zusammen.

Kurioses sollte passieren, wenn man Gase mit negativer und positiver absoluter Temperatur in Kontakt bringt. Energie würde dann vom Gas mit negativer zu dem mit positiver Temperatur fließen, ganz egal, wie hoch die positive Temperatur ist – denn das Gas mit negativer Temperatur ist, wie bereits gesagt, immer noch heißer.

Nicht völlig undenkbar ist zudem, dass dieses Phänomen auch in der Kosmologie eine Rolle spielen könnte. Denn ein negativer Druck wäre eine wichtige Eigenschaft der Dunklen Energie, dem großen Mysterium der Kosmologie. Damit wird üblicherweise die sich beschleunigende Ausdehnung des Universums erklärt. Eine derartige Querbeziehung zwischen Laborphysik und dem Kosmos wäre ungeheuer spannend.

Oliver Morsch arbeitet als Physiker an der Università degli Studi di Pisa und dem Istituto Nazionale di Ottica, wo er sich vor allem mit ultrakalten Atomen und Quantenkontrolle beschäftigt.

DER SPIEGEL

Heft
€ 7,80

NR. 1 | 2013

GESCHICHTE



Österreich 4,20 Schweiz 4,50 Italien 4,50 Russland 4,20 Frankreich 4,20 Spanien 4,20 Portugal 4,20 Polen 4,20 Skandinavien 4,20 Lateinamerika 4,20 Türkei 4,20 Japan 4,20
Dänemark 4,20 Schweden 4,50

PRINTED IN GERMANY

INDIEN
Das Juwel der
Krone

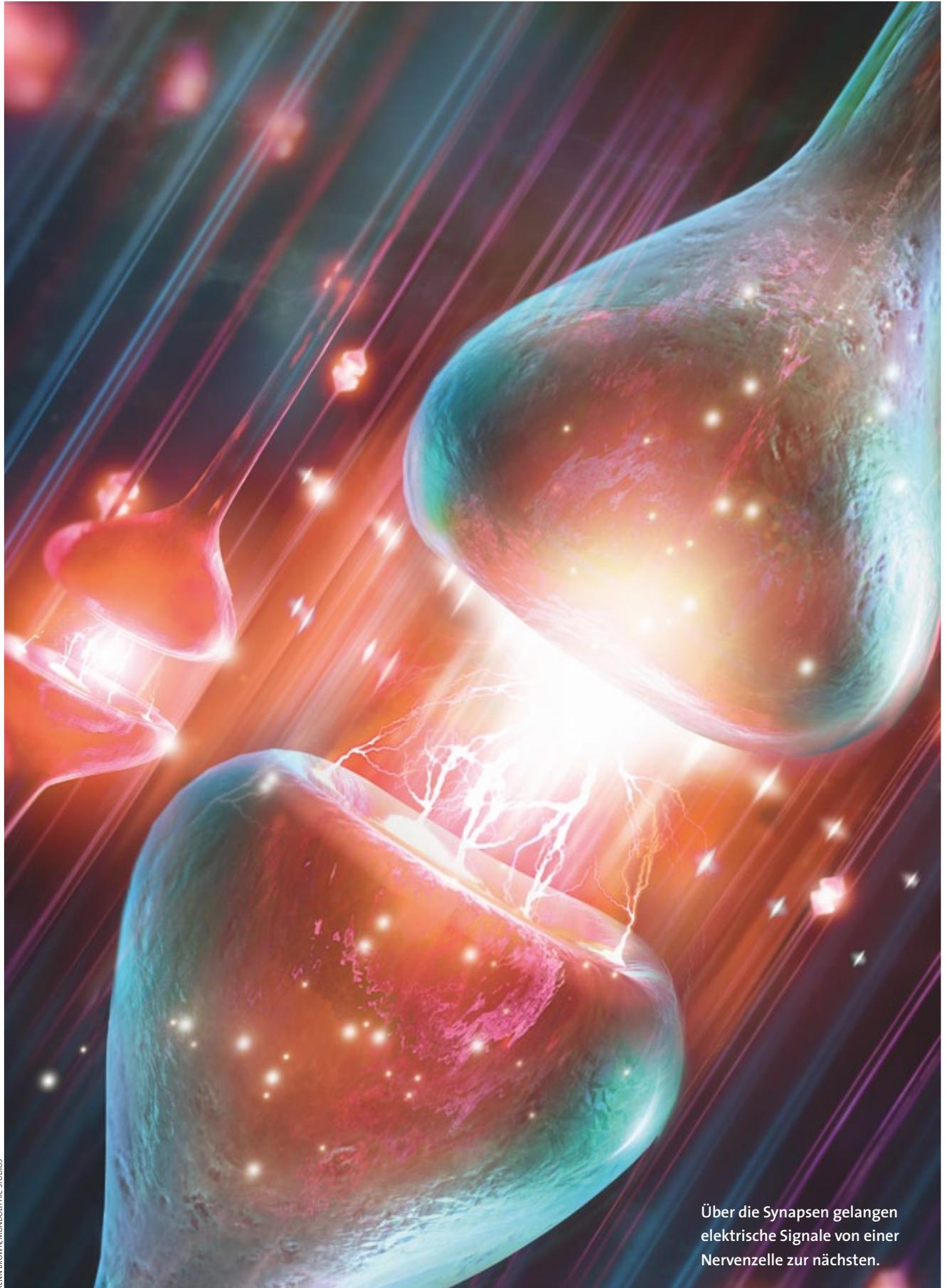
SEEMACHT
Herrscherin
über die Ozeane

COMMONWEALTH
Was vom Weltreich
übrig blieb

AMERIKA Wie sich die Kolonien vom Mutterland lossagten

QUEEN VICTORIA Die flammende Imperialistin

JAMES COOK Abenteuer in der Südsee



KENN BROWN / MONDO DIGITAL STUDIOS

Über die Synapsen gelangen elektrische Signale von einer Nervenzelle zur nächsten.

TITELTHEMA: NEUROWISSENSCHAFT

Die Sprache des Gehirns

Wie verständigen sich die einzelnen Teile unseres Denkkorgans miteinander? Offenbar spielen hier nicht nur die bloßen elektrischen Impulse eine entscheidende Rolle, sondern auch deren zeitliche Abfolgen. Dieses »Spike-Timing« beeinflusst sogar Aufmerksamkeit und Lernen – und ermöglicht die äußerst effiziente Arbeitsweise des Gehirns.

Von Terry Sejnowski und Tobi Delbrück

Internet-Suchmaschinen oder modernste Roboter verarbeiten ungeheure Informationsmengen in kürzester Zeit – aber das menschliche Gehirn ist ihnen noch immer weit überlegen. Mit seiner Hilfe können wir in Sekundenbruchteilen auf einen schier unbegrenzten Vorrat an Erfahrungen und Emotionen zurückgreifen. Wir erkennen augenblicklich das Gesicht eines Verwandten oder Freundes, egal ob es gerade hell oder dümmrig ist, ob von vorn oder von der Seite – eine Aufgabe, mit der sich selbst das höchstentwickelte elektronische Sehsystem aktuell noch sehr schwer tut. Eine weitere Spezialität unseres Gehirns ist Multitasking: So können wir problemlos ein Taschentuch aus unserer Jackentasche holen und unsere Stirn abwischen, während wir ein Gespräch führen. Ein Elektronenhirn, das einem Roboter die gleiche Kombination von Verhaltensweisen ermöglicht, liegt bis heute in weiter Ferne.

Wie schafft unser Gehirn das? Hinzu kommt ja noch die ungeheure Komplexität der neuronalen Netzwerke im Schädel jedes Menschen. Mit Billionen von Verbindungen zwischen Milliarden von Gehirnzellen entspricht sie für jede einzelne Person grob der des gesamten Internets! Eine Antwort liefert die ausgeprägte Energieeffizienz des Gehirns: Wenn eine Nervenzelle mit einer anderen kommuniziert, benötigt das gerade mal ein Millionstel der Energie, die ein digitaler Computer für eine entsprechende Aufgabe verbraucht. Vermutlich hat die Evolution das menschliche Denkkorgan auf eine immer sparsamere Energienutzung hin optimiert.

Doch das Gehirn besitzt auch viele eingebaute Beschränkungen. So antwortet eine Nervenzelle der Großhirnrinde auf das Signal einer anderen Zelle innerhalb von tausendstel Sekunden durch Abfeuern eines Impulses – geradezu ein Schnecken tempo im Vergleich zu einem Computertransistor, der nur einige milliardstel Sekunden braucht, um zu reagieren. Zudem erweist sich das neuronale Netzwerk als wenig zuverlässig: Sendet eine Hirnrindenzelle ein Signal zu einer anderen, wird es normalerweise nur mit rund 20-prozentiger Wahrscheinlichkeit ans Ziel gelangen – und

mit einer noch viel geringeren, wenn die angepeilte Zelle nicht direkt mit dem Ausgangsneuron verbunden ist.

Noch verstehen Neurowissenschaftler nicht wirklich, wie das Gehirn all den in ihm kursierenden Signalen sinnvolle Informationen entnimmt. Wir beide sowie einige andere Forscher haben jedoch in letzter Zeit beträchtliche Fortschritte auf diesem Gebiet gemacht. Für unsere Untersuchungen richteten wir unsere Aufmerksamkeit auf die Frage, wie das Gehirn die zeitliche Abfolge (»Timing«) der elektrischen Impulse (»Spikes«) nutzt, um Information zu kodieren und schnell anspruchsvolle Rechenaufgaben zu lösen. Denn eine Gruppe von Spikes, die fast gleichzeitig erfolgen, kann viel mehr Information transportieren als eine vergleichbar große Anzahl unsynchronisierter Signale.

Weitere Erkenntnisse auf diesem Gebiet könnten nicht nur tiefe Einblicke in den komplexesten bekannten Mechanismus im Universum vermitteln, sondern auch zu völlig neuen Typen von Computern führen. Schon jetzt konstruieren Forscher »neuromorphe« elektronische Schaltkreise, die bestimmte Aspekte der Netzwerke im Gehirn nachahmen. Heute können wir Geräte mit einer Million elektronischer

AUF EINEN BLICK

GUTES TIMING

1 Das menschliche Gehirn, ein Klumpen von drei Pfund Nervengewebe, kann nach wie vor viel besser als jeder Roboter wahrnehmen, planen und Handlungen initiieren. Es erreicht dies unter anderem durch sorgfältige **zeitliche Abstimmung der elektrischen Signale zwischen den Nervenzellen**.

2 Wenn wir etwas anschauen, beginnt eine Gruppe von Neuronen in engem zeitlichem Abstand zu feuern. Auch andere Leistungen des Gehirns beruhen auf diesem **»Spike-Timing«**, etwa **Aufmerksamkeit** und das Abspeichern von **Erinnerungen**.

3 Die Erforschung des Timings von Nervenimpulsen wird ein besseres Verständnis unseres Denkens und Verhaltens ermöglichen. Außerdem hilft sie bei der **Entwicklung neuer Computer** und weiterer elektronischer Geräte, die – wie das Gehirn – wesentlich effizienter funktionieren als konventionelle digitale Apparate.

Neurone bauen; noch größere Systeme sind in Planung. Das Ziel sind Computer, die viel schneller arbeiten als aktuelle Rechner, jedoch nur einen Bruchteil der Energie verbrauchen (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2012, S. 92).

Wie viele andere Neurowissenschaftler benutzen wir als Experimentierfeld das visuelle System, unter anderem weil seine grundlegende Verschaltung gut bekannt ist. Schon lange vermuten Forscher, dass das Timing der Signale dort und anderswo im Gehirn eine Schlüsselrolle bei der Entscheidung spielt, ob eine durch das neuronale Netzwerk laufende Information wichtig ist. Doch viele Jahrzehnte haben sie diese Ideen vernachlässigt, weil das Timing nur dann aussagekräftig ist, wenn dabei einzelne Gehirnteile verglichen werden – und es ihnen schwerfiel, die Aktivität von mehr als einem Neuron auf einmal zu erfassen. In jüngster Zeit haben aber die Entwicklung von Computermodellen des Nervensystems sowie neue Erkenntnisse der experimentellen und theoretischen Neurowissenschaft das Interesse am Timing als Kommunikationsform zwischen Gehirnzellen neu angefacht.

Neurone erhalten alle möglichen Arten von Informationen auf verschiedenen Zeitskalen. Ein gerade einmal Mikrosekunden dauerndes Signal vom rechten Ohr muss beispielsweise mit dem leicht verschobenen Input des linken Ohrs abgeglichen werden. Solche äußerst schnellen Antworten stehen in krassem Kontrast zum trägen Strom der Hormone im Blutkreislauf. Doch die wichtigsten Signale für unsere Untersuchungen sind die Spikes oder Aktionspotenziale: rasche Anstiege in der Spannung, die zwecks Kommunikation zwischen Neuronen innerhalb einiger Millisekunden ablaufen. Eine Nervenzelle feuert einen Impuls ab, wenn sie mehr Inputs erhält, die sie dazu anregen, als solche, die dies unterdrücken. Ist die Entscheidung gefallen, wandert ein Aktionspotenzial vom Zellkörper aus entlang dem Axon (einem am Ende verzweigten Fortsatz der Zelle) bis zu dessen Spitze. Dort geben Synapsen das Signal chemisch weiter – jene Kontaktstellen, die Axone mit den nachgeschalteten Nervenzellen verbinden.

In der Netzhaut des Auges verarbeiten verschiedene, in Schichten angeordnete Zelltypen die eintreffenden visuellen Informationen. Pro Auge reagieren 100 Millionen Fotorezeptoren auf sich verändernde Lichtmuster, indem sie Impulse zu anderen Neuronen in der Netzhaut senden. Nachdem die Signale auf diese Weise durch mehrere Schichten weitergereicht wurden, wandeln eine Million so genannter retinaler Ganglienzellen sie schließlich in eine Abfolge von Aktionspotenzialen um, die über Axone in andere Gehirnregionen gelangen. Diese senden ihrerseits wieder Signale an weitere Bereiche, die letztlich die bewusste Wahrnehmung hervorrufen. Jedes Axon kann mehrere hundert Spikes pro Sekunde weiterleiten, meistens sind es allerdings nur wenige. Alles, was wir von der sichtbaren Welt wahrnehmen – die Formen, Farben und Bewegungen um uns herum –, ist in diesen Strömen aus Aktionspotenzialen mit unterschiedlichen Zeitabständen dazwischen kodiert.

Um verstehen zu können, was im Gehirn abläuft, muss man die Aktivität vieler einzelner Neurone gleichzeitig

überwachen. Genau das stellte die Forscher aber lange Zeit vor eine echte Herausforderung. Doch 2010 berichteten E.J. Chichilnisky vom kalifornischen Salk Institute for Biological Studies in La Jolla und seine Kollegen, dass sie die gewaltige Aufgabe gemeistert hatten, alle Aktionspotenziale von hunderten benachbarten Ganglienzellen in der Netzhaut von Affen auf einen Schlag zu registrieren. Das ermöglichte es, exakt jene Fotorezeptoren ausfindig zu machen, die Informationen an spezifische Ganglienzellen weiterleiten. Die zunehmende Fähigkeit zur simultanen Erfassung der Aktivität vieler Nervenzellen sollte dabei helfen, die Bedeutung der kodierten Gehirnsignale zu entschlüsseln.

Der zeitliche Ablauf des Feuerns von Neuronen enthält wichtige Informationen

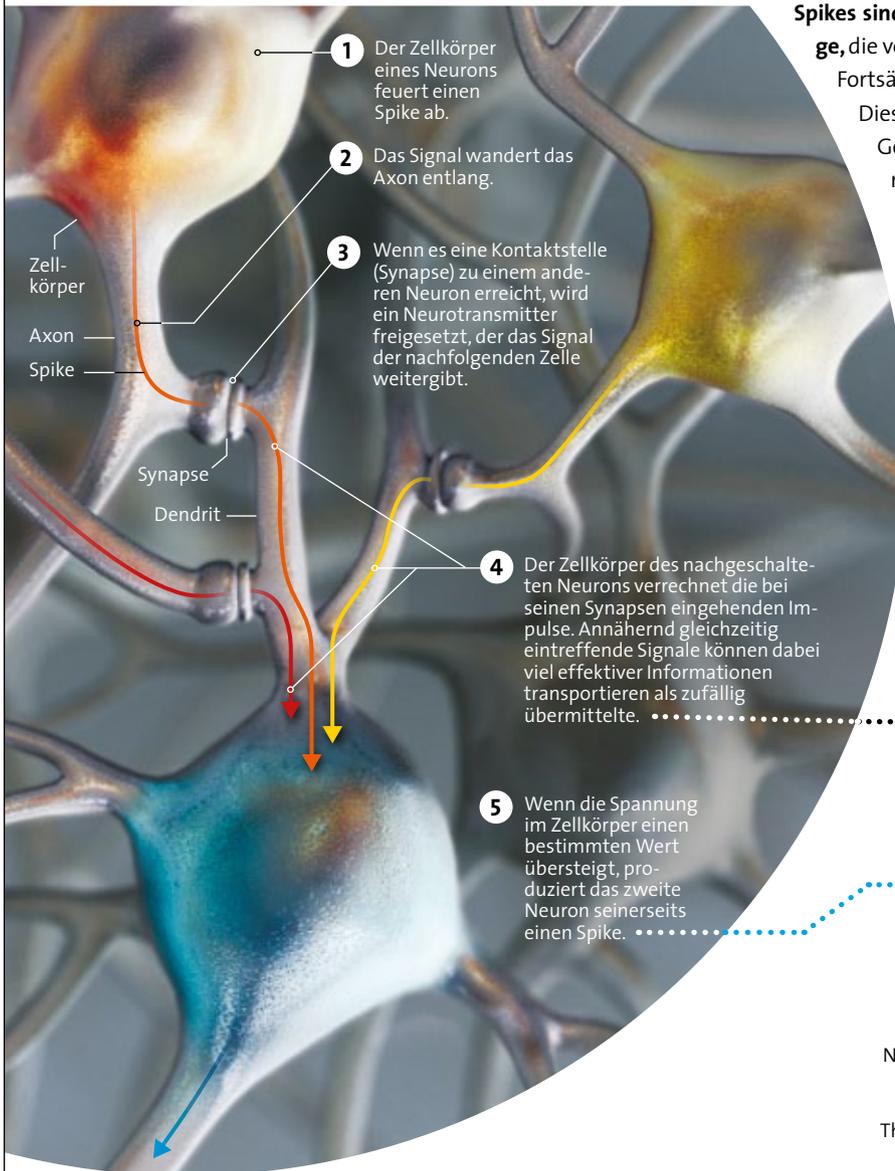
Um dieses Ziel zu erreichen, haben Forscher in den letzten Jahren mehrere Methoden eingesetzt. Eine davon zählt die Spikes jedes Axons in einem gewissen Zeitraum: je höher die Feuerrate, desto stärker das Signal. Die zeitlichen Schwankungen in der Feuerrate enthalten Informationen – etwa über die räumliche Anordnung von Dingen, Bereiche unterschiedlicher Lichtkontraste und Bewegungen, wobei für jedes dieser Merkmale bestimmte Gruppen von Neuronen im visuellen System zuständig sind.

Auch wenn zwei Neurone in engem zeitlichem Zusammenhang feuern, vermittelt das Information. Ganglienzellen in der Netzhaut reagieren etwa äußerst empfindlich auf Lichtstärkenunterschiede und senden daraufhin Aktionspotenziale an andere Teile des Gehirns. Wenn viele Ganglienzellen fast gleichzeitig feuern, vermutet das Gehirn, dass sie auf ein Merkmal ein und desselben Objekts antworten. Horace Barlow, Neurowissenschaftler an der University of Cambridge, spricht hier von »verdächtig wirkenden Zufällen«. Barlow bezog sich dabei auf die Beobachtung, dass sich jede Zelle in der Sehrinde (visueller Kortex) durch ein spezifisches physikalisches Merkmal eines Objekts aktivieren lässt, etwa seine Farbe oder seine Orientierung im Raum. Wenn mehrere dieser Zellen zur selben Zeit feuern, hält das Gehirn die Signale anscheinend für besonders beachtenswert, denn die Wahrscheinlichkeit für ein zufälliges Zusammentreffen ist sehr gering.

Elektroingenieure versuchen mit Hilfe solcher Erkenntnisse Geräte zu bauen, die das Prinzip der zeitlichen Koordination von Spikes nutzen, um effizienter als bisher visuelle Signale aufzuzeichnen. Tobi Delbrück hat eine Videokamera entwickelt, die auf Veränderungen in der Helligkeit in einer Szene mit Spikes reagiert. Damit lassen sich sehr schnell bewegte Objekte verfolgen, und das bei minimalen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Hardware (siehe Kasten auf S. 26).

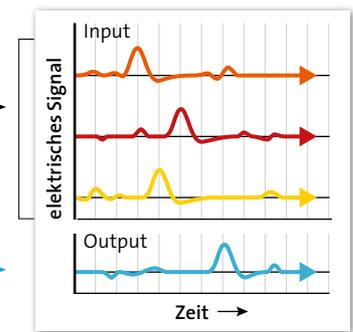
Neue Forschungsergebnisse bestätigen die Ansicht, dass die Sehrinde anhand zeitlicher Hinweise versucht, visuelle Informationen zu deuten. Die Ganglienzellen der Netzhaut projizieren allerdings nicht direkt in die Großhirnrinde, sondern leiten ihre Signale zunächst zum Thalamus tief im Inneren des Gehirns. Erst diese Region aktiviert ihrerseits Millionen von Zellen in der Sehrinde am Hinterkopf, bevor

Nachrichtenversand auf die Schnelle



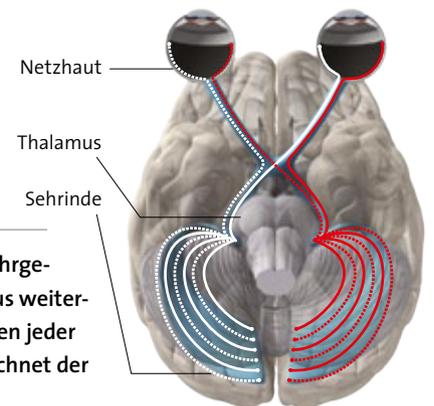
Spikes sind millisekundenlange Spannungsanstiege, die von den Zellkörpern der Neurone aus über Fortsätze (Axone) zu anderen Zellen laufen. Diese Kommunikationssignale benutzt das Gehirn, um unmittelbar auf ein Ereignis zu reagieren. Laut neuer Forschungsergebnisse ermöglicht die präzise zeitliche Abstimmung von Spikes dem ausgedehnten Netzwerk von Gehirnzellen mit Billionen von Verbindungen eine höchst effiziente Arbeitsweise.

Spikes, die innerhalb eines sehr kleinen Zeitfensters von wenigen Millisekunden bei einem Neuron eintreffen – unten dargestellt als farbige Zacken –, können diese Zelle zum Feuern bringen.



WAS DIE AUGEN DEM GEHIRN ERZÄHLEN

Beim Sehen produzieren zunächst Zellen der Netzhaut Spikes als Reaktion auf ein wahrgenommenes Objekt. Die Signale werden daraufhin an die Umschaltstation im Thalamus weitergeleitet und dann an den visuellen Kortex (Sehrinde). Richtig getimte Spikes, von denen jeder ein Merkmal des Objekts darstellt wie etwa Farbe oder räumliche Orientierung, verrechnet der Kortex schließlich zu einem zusammenhängenden Bild des gesamten Objekts.



ILLUSTRATIONEN: EMILY COOPER

dann die Informationen zur bewussten Interpretation in weitere, übergeordnete Gehirnareale gesendet werden.

Um herauszufinden, welche Spikemuster am effektivsten Zellen im visuellen Kortex anschalten, kann man die Verbindungen zwischen den Relaisneuronen im Thalamus zu den so genannten »dornentragenden Sternzellen« in der mittleren Schicht der Sehrinde untersuchen. 1994 rekonstruierten Kevan Martin, jetzt am Institut für Neuroinformatik der Uni-

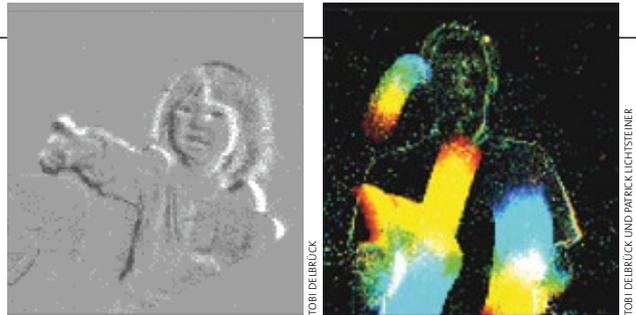
versität Zürich, und seine Kollegen die Kontakte des Thalamus mit der Großhirnrinde und entdeckten, dass sie nur sechs Prozent aller Synapsen der dornentragenden Sternzellen ausmachen. Wie aber gelangen über dieses schwache Hereintröpfeln visueller Signale zuverlässig Informationen zu Neuronen in allen Schichten des Kortex?

Die Nervenzellen der Großhirnrinde reagieren äußerst empfindlich auf Schwankungen des Eingangssignals und

Eine völlig neuartige Kamera

Konventionelle digitale Videokameras sind erstaunlich ineffizient. Sie schießen einige Dutzend Einzelbilder pro Sekunde mit oftmals Millionen von Bildpunkten, um die sich verändernden Lichtintensitäten zu erfassen, aus denen eine visuelle Szene besteht. Die Kameras erzeugen also eine enorme Menge an Daten, deren Verarbeitung viel Zeit in Anspruch nimmt.

Tobi Delbrück hat mit seinen Kollegen am Institut für Neuroinformatik der Universität Zürich einen neuen Kameratyp entwickelt, der teilweise die Art und Weise nachahmt, wie unsere Netzhaut Bilder für das Gehirn kodiert. Wie diese registriert die Kamera, Dynamic Vision Sensor oder DVS genannt, nur solche Elemente, die sich von einem Einzelbild zum nächsten verändern, und braucht dafür nur eine geringe Datenmenge. Die Pixel im DVS verhalten sich ein wenig wie retinale Ganglienzellen: Sie senden einen elektrischen Impuls aus, wenn sich die Helligkeit ändert. Die Kamera kann eine Schwankung der Lichtinten-



Der »Dynamic Vision Sensor« registriert Änderungen der Helligkeit (links). Das rechte Bild zeigt einen Jongleur. Rot markiert sind die neuesten Bewegungen, blau vorherige.

sität in nur einer Mikrosekunde aufzeichnen, weshalb der DVS sehr schnelle Bewegungen besser verfolgen kann als die im Millisekundenbereich arbeitenden normalen Kameras.

Wegen des reduzierten, aber informationsdichten Datenstroms ist das DVS ideal als Überwachungskamera einsetzbar: als Detektor für alles, was sich bewegt, etwa ein Auto oder eine ältere Person, die ausrutscht und hinfällt. Es wurde schon in einen Roboter eingebaut, der auf ein Tor geschossene Bälle abwehrt, sowie in einen anderen, der Stifte balanciert; in ein Auto, das einer auf die Straße gemalten Kreidelinie folgt; und in Sensoren, die Teilchen in bewegten Flüssigkeiten verfolgen oder menschliche Gesten interpretieren. Eine Forschergruppe am Weill Cornell Medical College stellte kürzlich eine künstliche Netzhautprothese vor, die Licht nach dieser Methode verarbeitet.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Mehr Informationen über die Kamera
finden Sie als Video auf

www.spektrum.de/dvs-kamera

können darauf in nur wenigen Millisekunden mit einem Aktionspotenzial antworten. 2010 hat Terry Sejnowski zusammen mit Hsi-Ping Wang und Donald Spencer vom Salk Institute sowie Jean-Marc Fellous von der University of Arizona ein detailliertes Computermodell einer dornentragenden Sternzelle entwickelt. Damit wies er nach: Zwar feuert diese Zelle noch nicht, wenn sie ein einzelnes Aktionspotenzial von nur einem Axon erhält. Doch bereits auf Inputs von lediglich vier Axonen aus dem Thalamus antwortet sie zuverlässig, sofern die Aktionspotenziale von allen vier innerhalb weniger Millisekunden aufeinander folgen. Kommen solche Impulse vom Thalamus, genügt es, wenn nur ein kleiner Teil der Neurone im visuellen Kortex feuert, um Umrisse und Beschaffenheit eines Objekts darzustellen. Dabei gibt es für jede dornentragende Sternzelle einen bestimmten visuellen Reiz, der starke Aktivität auslöst, wie zum Beispiel die Kante eines Objekts mit einem bestimmten Orientierungswinkel.

In den 1960er Jahren machten David Hubel von der Harvard Medical School und Torsten Wiesel, jetzt an der Rockefeller University, eine wegweisende Entdeckung: Jedes Neuron in der Sehrinde reagiert nur dann stark auf seinen bevorzugten visuellen Stimulus, wenn er auf einen bestimmten Teil der Netzhaut trifft, das »rezeptive Feld« der Zelle. Neurone, die auf Reize im zentralen Bereich der Retina reagieren, haben das kleinste rezeptive Feld – nur etwa so groß wie ein e

in diesem Text. Man kann sich das so vorstellen, als würden diese Neurone die Welt durch Strohhalme hindurch betrachten. In den 1980er Jahren zeigte dann John Allman vom California Institute of Technology, dass visuelle Stimulation außerhalb des rezeptiven Felds eines Neurons dessen Feuerrate modifizieren kann. Das stellt einen Zusammenhang her zwischen der speziellen Eigenschaft, auf die eine Zelle reagiert, und der weiteren visuellen Umgebung.

Reize in der Region um ein rezeptives Feld beeinflussen ebenfalls die Genauigkeit des Spike-Timings – und zwar dramatisch. David McCormick, Jamie Mazer und ihre Kollegen von der Yale University spielten einer Katze immer wieder denselben Filmausschnitt vor und registrierten dabei die Antworten einzelner Neurone im visuellen Kortex des Tiers. Wenn sie das Bild so verkleinerten, dass es vollständig in das rezeptive Feld bestimmter Neurone fiel, wiesen deren Signale ein zufällig variierendes und ungenaues zeitliches Muster auf. Bei einem breiteren Filmbild, das auch die Umgebung des jeweiligen rezeptiven Felds erreichte, produzierten die Neurone weniger, dafür aber zeitlich präzise Spikes.

Die zeitliche Abfolge von Aktionspotenzialen spielt für andere Funktionen des Nervensystems ebenfalls eine Rolle. So scheint das synchronisierte Timing von Spikes – wobei jeder davon eine Eigenschaft eines Objekts darstellt, etwa Farbe oder Orientierung – dafür zu sorgen, dass aus diesen

einzelnen Elementen ein Bild entsteht. Ein Spike für »rosarot« zusammen mit einem für »runde Konturen« ermöglicht es demnach dem visuellen Kortex, die Vorstellung eines Blumentopfs zu erzeugen.

Auch die Aufmerksamkeit, ein zentraler Aspekt der Kognition, könnte auf Abfolgen synchronisierter Spikes beruhen. Solche zeitlich aufeinander abgestimmten Impulse scheinen die Bedeutung einer bestimmten Wahrnehmung oder einer Erinnerung zu betonen. Robert Desimone, jetzt am Massachusetts Institute of Technology, und seine Kollegen wiesen nach: Schenken Affen einem bestimmten Reiz ihre Aufmerksamkeit, steigt die Anzahl der Hirnrindenzellen, die synchronisierte Spikes im so genannten Gamma-Frequenzband (30 bis 80 Hertz) des EEG produzieren, sowie auch ihre Feuerrate. Und Pascal Fries vom Ernst Strüngmann Institut in Frankfurt konnte demonstrieren, dass sogar weit entfernte Hirnrindenregionen in diesem Frequenzbereich miteinander kommunizieren.

Fehlerhaftes Timing bei Schizophrenie

Für das Gamma-Frequenzband interessieren sich auch Forscher, die Patienten mit Schizophrenie und Autismus untersuchen. Denn im EEG zeigen solche Menschen diese Art von Signalübertragung in deutlich geringerem Ausmaß. David Lewis von der University of Pittsburgh, Margarita Behrens vom Salk Institute und andere konnten das auf einen Typ von Hirnrindenneuron zurückführen, den man Korbzelle nennt und der an der Synchronisierung von Spikes zwischen benachbarten Schaltkreisen beteiligt ist. Ein Ungleichgewicht bei entweder der Hemmung oder der Erregung der Korbzellen scheint die synchrone Aktivität im Gammaband zu verringern und erklärt daher möglicherweise einige körperliche Merkmale dieser neuronalen Störungen. So können Patienten mit Schizophrenie verschiedene optische Täuschungen wie die »Tilt-Illusion« nicht wahrnehmen, bei der man die Neigung einer Linie auf Grund der unterschiedlichen Neigung der daneben verlaufenden Linien falsch einschätzt. Und vergleichbare Veränderungen in Schaltkreisen des präfrontalen Kortex könnten die Denkstörungen verursachen, die mit Schizophrenie einhergehen.

Für das Abspeichern von Erinnerungen scheint die zeitliche Koordination der Spikes genauso wichtig zu sein wie die Feuerrate. Synchronisierte Aktionspotenziale in der Großhirnrinde verstärken die Synapsen – ein wichtiger Vorgang beim Bilden von Langzeiterinnerungen. Forscher sprechen von verstärkten Synapsen, wenn neuronale Aktivität des vor der Synapse liegenden Neurons die Zelle dahinter zu gesteigertem Feuern anregt. 1997 entdeckten Henry Markram und Bert Sakmann, damals am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg, einen Verstärkungsprozess, der heute als »spike-timing-dependent plasticity« (STDP; deutsch: vom Spike-Timing abhängige Plastizität) bekannt ist: Trifft an einer Synapse ein Signal mit einer Frequenz im Gammabereich ein und das nachgeschaltete Neuron produziert innerhalb von zehn Millisekunden einen Spike, feuert

letztere Zelle danach vermehrt. Umgekehrt nimmt die Stärke der Synapse ab, wenn das zweite Neuron innerhalb von zehn Millisekunden vor dem ersten feuert.

Die zentrale Rolle synchroner Spikes für das Gedächtnis bestätigen auch Forschungen von György Buzsáki von der New York University und anderen über den Hippocampus. Dieser Gehirnbereich ist entscheidend beteiligt, wenn wir uns an Objekte und Ereignisse erinnern. Die Aktivität von Neuronen im Hippocampus sowie jenen Bereichen der Hirnrinde, mit denen er zusammenarbeitet, hängt stark von synchronen Schwankungen der Hirnströme in einem Frequenzbereich von vier bis acht Hertz ab. Diese so genannten Thetawellen finden sich zum Beispiel bei einer Ratte, während sie in einem Laborversuch ihren Käfig erkundet. Sie können die zeitliche Abfolge von Spikes koordinieren und zudem die Synapsen dauerhaft beeinflussen, was zu langfristigen Veränderungen beim Feuern von Neuronen führt.

Die Neurowissenschaft steht heute an einem Wendepunkt: Neu entwickelte Methoden zur gleichzeitigen Messung der Spikes tausender Neurone helfen, die entscheidenden Muster im Spike-Timing zu enthüllen. Zudem können Forscher inzwischen dank der Optogenetik – die genetisch manipulierte Neurone mittels Licht gezielt aktiviert (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 22) – höchst selektiv Nervenzellen in der Hirnrinde an- oder ausschalten. Damit lässt sich feststellen, wie neuronale Signale das Verhalten von Versuchstieren kontrollieren. Diese und andere Techniken werden uns dabei behilflich sein, die elektrischen Gespräche im Gehirn zu belauschen und mehr über den geheimen Code zu erfahren, den es dafür einsetzt. Wenn wir diesen Code entschlüsseln, können wir auch ernsthaft damit beginnen, Maschinen zu entwickeln, die eine ähnlich hohe Effizienz besitzen wie dieses faszinierende Organ. ~

DIE AUTOREN



Terry Sejnowski (links) forscht am Howard Hughes Medical Institute und hat den Francis-Crick-Lehrstuhl am Salk Institute for Biological Studies inne, wo er das Computational Neurobiology Laboratory leitet. **Tobi Delbrück** ist Professor am

Institut für Neuroinformatik der Universität Zürich.

QUELLE

Liu, S., Delbrück, T.: Neuromorphic Sensory Systems. In: Current Opinion in Neurobiology 20, S. 288–295, 2010

WEBLINKS

www.podcast.ethz.ch/podcast/episodes/?id=607
Terry Sejnowskis Wolfgang-Pauli-Lectures über neuronale Kommunikation (auf Englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182485



Manche Neuroforscher neigten in den letzten Jahren zu Schubladen-denken: Speichert das Gehirn alle möglichen Begriffe über einzelne Neurone?

TITELTHEMA: GEDÄCHTNIS

Wie das Gehirn die Großmutter erkennt

Jeder Begriff wird im Gehirn durch bestimmte Neurone repräsentiert. Doch wie viele Zellen sind dafür nötig? Reicht am Ende eine einzige »Großmutterzelle« aus, um die Erinnerung an eine Person zu speichern, oder braucht es riesige Netzwerke von Milliarden Neuronen? Jetzt zeigt sich: Die Antwort liegt, wie so oft, in der Mitte.

Von Rodrigo Quijan Quiroga, Itzhak Fried und Christof Koch

Zu dem brillanten russischen Neurochirurgen Akakij Akakijewitsch kam ein Patient, der die Erinnerung an seine unglaublich dominante Mutter auflösen wollte. Bereitwillig öffnete Akakijewitsch das Gehirn des Patienten und entfernte mehrere tausend Neurone, die insgesamt den Begriff von dessen Mutter erzeugten. Als der Patient aus der Narkose erwachte, hatte er jegliche Kenntnis von ihr, ob gut oder schlecht, verloren. Berauscht von dem Erfolg, wandte sich Akakijewitsch einem weiteren Projekt zu – der Suche nach Zellen, die mit der Erinnerung an die Großmutter zusammenhängen.

Natürlich ist die Geschichte frei erfunden. Der Kognitionswissenschaftler Jerome Lettvin (1920–2011) erzählte sie 1969 seinen Studenten am Massachusetts Institute of Technology, um eine provokante Idee zu illustrieren: Schon rund 18 000 Neurone reichten seiner Ansicht nach aus, damit wir einen bestimmten Verwandten, irgendeine andere uns bekannte Person oder ein Alltagsobjekt bewusst wahr-

nehmen, in Gedanken fassen und uns daran erinnern könnten. Lettvin hat seine kühne Hypothese nie bewiesen, und seit gut 40 Jahren diskutieren Forscher, meist nicht ganz ernsthaft, über die Idee der »Großmutterzelle«.

Die Vorstellung, dass Neurone Erinnerungen in so hochspezifischer Weise speichern, geht letztlich auf den amerikanischen Philosophen und Psychologen William James (1842–1910) zurück. Er sprach von »pontifical cells« (»päpstlichen« Leit- oder Führungszellen), die mit unserem Bewusstsein zusammenhängen sollten. Doch die Existenz solcher Zellen widerspricht der herrschenden Meinung, wonach bei der Wahrnehmung jedes speziellen Individuums oder Objekts viele Millionen oder gar Milliarden von Nervenzellen zusammenspielen; der britische Neurophysiologe und Nobelpreisträger Charles Scott Sherrington (1857–1952) sprach 1940 von »einer millionenfachen Demokratie«. Demnach ist die Aktivität einer einzelnen Nervenzelle irrelevant; erst das Zusammenwirken sehr großer Neuronenverbände erzeugt Bedeutung.

AUF EINEN BLICK

SPARSAMES SPEICHERN

1 Seit Jahrzehnten debattieren Neurowissenschaftler darüber, wie **Erinnerungen** gespeichert werden. Eine radikale Hypothese besagt, dass **einzelne Neurone** ausreichen, den Begriff etwa der eigenen Großmutter oder eines Filmstars zu repräsentieren.

2 Der Gegenhypothese zufolge ist jeder Gedächtnisinhalt über **Millionen Neurone** großflächig im Gehirn verteilt.

3 Wie neue Experimente belegen, liegt die Wahrheit dazwischen: Erinnerungen werden durch relativ kleine Zellgruppen vor allem im **Hippocampus** kodiert, die viele Aspekte eines Objekts repräsentieren.

Filmstarneurone

Vor einigen Jahren untersuchten wir – zusammen mit Gabriel Kreiman, der nun an der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts) lehrt, und Leila Reddy, jetzt am Centre de Recherche Cerveau et Cognition in Toulouse (Frankreich) – den Hippocampus eines Patienten. Diese Hirnregion ist an Gedächtnisprozessen beteiligt. Wir entdeckten dort ein Neuron, das sehr stark auf ganz unterschiedliche Fotografien der Schauspielerin Jennifer Aniston reagierte, aber nicht auf Dutzende andere Berühmtheiten, Orte oder Tiere. Bei einem anderen Patienten feuerte ein Neuron im Hippocampus ausschließlich beim Anblick von Bildern der Schauspielerin Halle Berry – und selbst dann,

wenn nur ihr Name auf dem Bildschirm erschien. Ein anderes Neuron antwortete selektiv auf Bilder der in den USA populären Talkmasterin Oprah Winfrey sowie auf ihren per Computer schriftlich oder akustisch dargebotenen Namen. Eine weitere Zelle feuerte beim Konterfei von Luke Skywalker, dem jugendlichen Helden aus »Star Wars«, und bei seinem geschriebenen oder gesprochenen Namen.

Für solche Beobachtungen müssen Forscher die Aktivität einzelner Neurone direkt messen. Herkömmliche bildgebende Verfahren wie die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI) geben die Aktivität im gesamten Gehirn wieder, während eine Versuchsperson eine vorgegebene Aufgabe ausführt. Damit lässt sich nur der Gesamtenergieverbrauch einiger Millionen Zellen verfolgen, nicht aber das Verhalten von kleinen Neuronengruppen oder gar von einzelnen Zellen. Um die von Einzelneuronen ausgesandten elektrischen Impulse zu registrieren, müssen Mikroelektroden ins Gehirn gepflanzt werden, die dünner sind als ein menschliches Haar.

Renaissance der Großmutterzelle

Diese invasive Technik ist nur bei der Behandlung bestimmter Hirnerkrankungen zulässig, insbesondere bei Epilepsie. Wenn sich die Krampfanfälle nicht medikamentös kontrollieren lassen, sind chirurgische Eingriffe eine Option. Das Ärzteteam sucht den Ursprung der Krämpfe, den so genannten Fokus der Epilepsie, um ihn dann chirurgisch zu entfernen. Für die Suche kommen zunächst nicht invasive Methoden zum Einsatz: klinische Untersuchungen, bildgebende Verfahren sowie Elektroenzephalografie (EEG). Letztere zeigt bei einem Krampfanfall eine Vielzahl epileptischer Entladungen, die im Gleichtakt ablaufen. Falls sich der Fokus mit diesen Methoden nicht genau lokalisieren lässt, können Neurochirurgen Elektroden tief im Kopf des Patienten verankern, um im Krankenhaus die Hirntätigkeit mehrere Tage kontinuierlich zu verfolgen und die beobachteten Anfälle zu analysieren.

Manchmal bitten Wissenschaftler die Patienten, sich in dieser Phase für Forschungszwecke zur Verfügung zu stellen: Während ihre Hirntätigkeit aufgezeichnet wird, sollen sie verschiedene kognitive Aufgaben ausführen. Wir haben an der University of California in Los Angeles eine einzigartige Technik entwickelt, bei der wir flexible Elektroden mit winzigen Mikrodrähten in den Schädel pflanzen. Diese Technik bietet die außergewöhnliche Möglichkeit, die Aktivität einzelner Neurone tagelang zu verfolgen, während die Patienten Bilder auf einem Laptop betrachten, Erinnerungen wachrufen oder andere Aufgaben ausführen. Auf diese Weise entdeckten wie die Jennifer-Aniston-Neurone und erweckten damit die einst von Lettvins Anekdote angestoßene Debatte zu neuem Leben.

Sind solche Neurone die lange umstrittenen Großmutterzellen? Zunächst müssen wir genauer definieren, was wir meinen. Eine extreme Version der Hypothese besagt, dass ein einziges Neuron auf einen und nur einen Begriff reagiert. Doch es drängt sich der Schluss auf, dass es mehr davon ge-

ben muss – denn die Chance, unter Milliarden Zellen genau die richtige zu erwischen, ist verschwindend klein. Wäre außerdem nur ein Neuron für das gesamte Konzept zuständig, würde jede Erinnerung daran spurlos verschwinden, sobald die Zelle durch Krankheit oder Unfall verloren geht – eine sehr unwahrscheinliche Annahme.

Eine weniger extreme Definition postuliert nicht bloß eine einzige Großmutterzelle, sondern viele Neurone, die selektiv auf einen Begriff ansprechen. Diese Hypothese ist zwar plausibel, lässt sich aber nur schwer beweisen – wenn überhaupt. Wir können nicht jedes mögliche Konzept ausprobieren, um zu belegen, dass das Neuron ausschließlich auf Jennifer Aniston reagiert und nicht auch noch auf etwas anderes. Tatsächlich finden wir oft Zellen, die auf mehr als einen Begriff ansprechen.

Zum Beispiel wiederholten wir einen Tag nach der Entdeckung des auf Jennifer Aniston reagierenden Neurons das Experiment mit zahlreichen Bildern, die mit ihr in Zusammenhang standen, und fanden, dass die Zelle auch auf Lisa Kudrow ansprach, die neben Aniston durch die Fernsehserie »Friends« berühmt geworden war. Das Luke-Skywalker-Neuron feuerte auch bei Yoda, dem kleinwüchsigen Jedi aus »Star Wars«. Eine andere Zelle reagierte auf zwei Basketballspieler, eine weitere auf einen der Autoren und andere Kollegen, die mit dem Patienten regelmäßigen Kontakt hatten, und so fort. Man kann diese Neurone dennoch Großmutterzellen nennen, wenn man akzeptiert, dass sie auf breitere Konzepte reagieren – auf die zwei Blondinen aus »Friends«, die Helden aus »Star Wars«, die Basketballspieler oder die an den Experimenten beteiligten Forscher. Diese erweiterte Definition verwandelt die Diskussion darüber, ob es sich hier um Großmutterzellen handelt, in eine Auslegungsfrage.

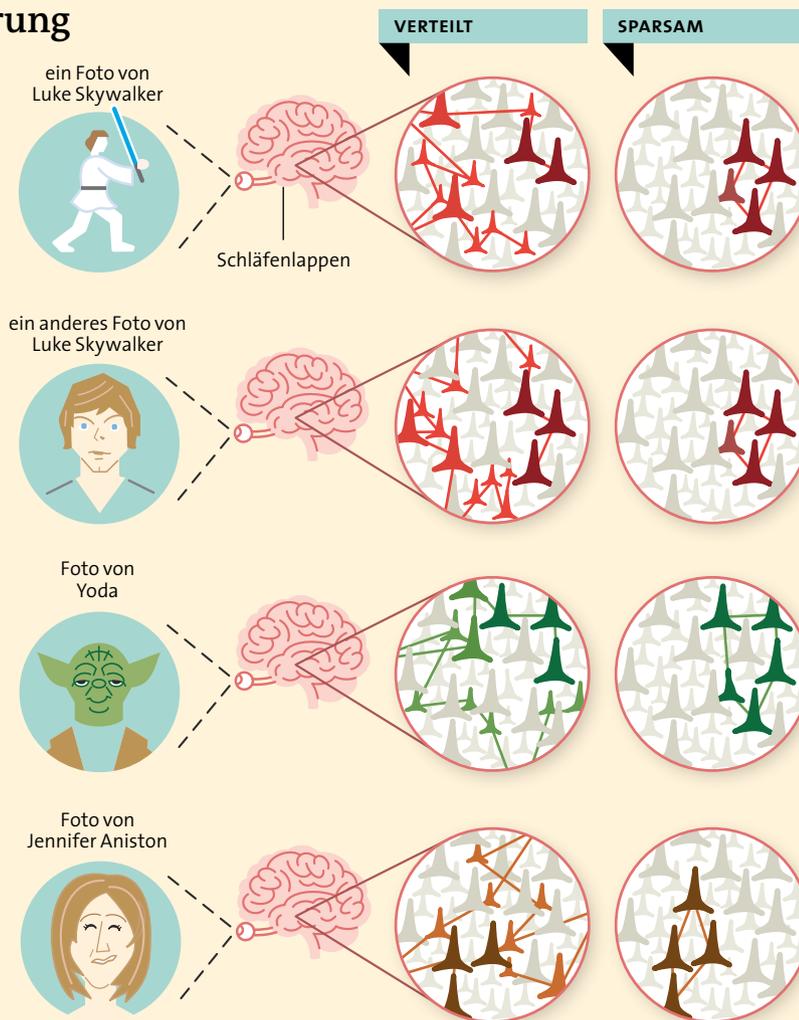
Welche Eigenschaften haben die so genannten Jennifer-Aniston-Neurone? Erstens reagieren sie sehr selektiv; jede Zelle feuert nur bei ganz bestimmten Bildern von Berühmtheiten, Politikern, Verwandten, Sehenswürdigkeiten und so fort. Zweitens reagiert ein solches Neuron in gleicher Weise bei unterschiedlichen Bildern derselben Person und sogar bei deren geschriebenem oder gesprochenem Namen. Es scheint zu sagen: »Ich weiß, dass das Jennifer Aniston ist, egal wie ihr sie mir präsentiert, in einem roten Kleid, im Profil, ob ihr ihren Namen hinschreibt oder ihn laut ausspricht.« Die Zelle spricht also offenbar auf den Begriff an – auf jede Darstellung des Objekts selbst. Darum sollten die Großmutterneurone besser Begriffszellen genannt werden. Sie feuern zwar manchmal bei mehr als einem Begriff, aber dann sind die Begriffe meist eng miteinander verwandt.

Wie werden Begriffe kodiert?

Um zu verstehen, wie sich eine kleine Anzahl von Zellen auf einen bestimmten Begriff spezialisiert, muss man etwas darüber wissen, wie das Gehirn überhaupt Bilder der unzähligen uns umgebenden Objekte und Personen erfasst und speichert. Die von den Augen aufgenommenen Informationen wandern zunächst über den Sehnerv zum primären

Varianten der Kodierung

Derzeit streiten Neurowissenschaftler heftig darüber, wie das Gehirn Gedächtnisinhalte speichert. Einer Theorie zufolge wird die Repräsentation einer einzelnen Erinnerung – beispielsweise das Bild von Luke Skywalker – über Millionen oder gar Milliarden Neurone verteilt aufbewahrt. Doch in den letzten Jahren hat eine andere Hypothese an Glaubwürdigkeit gewonnen. Demnach bilden relativ wenige – einige tausend – Neurone die »sparsame« Repräsentation eines Begriffs. Jedes von etwa 20 000 Neuronen reagiert auf das Bild von Luke, ob es ihn nun in Nahaufnahme zeigt oder aus größerer Entfernung. Einige, aber nicht alle Zellen aus derselben Zellgruppe feuern auch bei dem Bild von Yoda, einem weiteren Sternenkrieger. Eine komplett andere Gruppe wird aktiv, sobald Jennifer Aniston erscheint.



STEPHEN SAWAGE

visuellen Kortex im Hinterkopf. Dort reagieren Neurone auf winzige Details des Gesamtbilds, als würde jede dieser Zellen wie ein Pixel in einem digitalen Bild aufleuchten oder als wäre sie ein Farbpunkt in einem pointilistischen Gemälde des französischen Künstlers Georges Seurat (1859–1891).

Ein Neuron reicht nicht aus, um festzustellen, ob das Detail zu einem Gesicht gehört, zu einer Teetasse oder zum Eiffelturm. Jede Zelle ist Teil eines Ensembles, das insgesamt ein zusammengesetztes Bild erzeugt – ähnlich wie die Pinseltupfer, die zusammen Seurats Gemälde »Ein Sonntagnachmittag auf der Insel La Grande Jatte« ergeben.

Dabei muss das Gehirn die Sinnesdaten so verarbeiten, dass es ein Objekt erkennen und dieses mit bereits Bekanntem vereinen kann. Vom primären visuellen Kortex wandern die durch ein Bild ausgelösten Nervenimpulse über mehrere Zwischenstationen der Hirnrinde zu weiter vorn liegenden Regionen. Einzelne Neurone in den höheren visuellen Zentren reagieren nicht auf Bilddetails, sondern auf ganze Gesichter und Objekte. Von diesen Zellen reicht schon eine aus,

um zu erkennen, dass das Bild ein Gesicht darstellt und nicht den Eiffelturm. Wenn wir das Bild ein wenig variieren, es verschieben oder seine Beleuchtung ändern, kümmert das die Neurone nicht besonders; ihr Erregungsmuster bleibt mehr oder weniger gleich. Diese Eigenschaft ist als visuelle Invarianz bekannt.

Nervenzellen der höheren visuellen Regionen senden ihre Informationen in den für Gedächtnisfunktionen zuständigen Hippocampus und die ihn umgebende Hirnrinde des mittleren Schläfenlappens, wo wir die Jennifer-Aniston-Neurone entdeckten. Im Hippocampus feuern die Zellen viel spezifischer als in der höheren Sehrinde. Jedes dieser Neurone spricht auf eine bestimmte Person an, genauer gesagt auf ihren Begriff: nicht nur auf das Gesicht und andere Unterscheidungsmerkmale, sondern auch auf eng zugehörige Attribute wie den Namen der Person.

Wir versuchten herauszufinden, wie viele individuelle Neurone feuern, um einen bestimmten Begriff darzustellen: eines, ein Dutzend, tausende oder gar Millionen? Anders ge-

sagt: Wie aufwändig oder sparsam werden Konzepte repräsentiert? Natürlich können wir diese Zahl nicht direkt messen, denn wir können unmöglich die Aktivität sämtlicher Neurone in einem vorgegebenen Gebiet aufzeichnen. Wir schätzten mit statistischen Methoden, dass ein bestimmter Begriff nicht mehr als eine Million Neurone zum Feuern bringt – das heißt ein Tausendstel aller Zellen im mittleren Schläfenlappen. Doch da wir bei unseren Forschungen Bilder von Gegenständen verwenden, mit denen die Patienten besonders gut vertraut sind – was mehr Reaktionen auslöst –, markiert diese Zahl eher einen Höchstwert. Die zur Repräsentation eines Begriffs nötige Zellmenge ist wohl 10- bis 100-mal kleiner; sie nähert sich damit tatsächlich den 18 000 Neuronen pro Begriff, über die Lettvin seinerzeit spezialisierte.

Man könnte allerdings einwenden: Wir besitzen doch gar nicht genug Neurone, um alle möglichen Konzepte und deren Variationen zu repräsentieren. Also kann das Gehirn gar nicht sparsam kodieren, sondern muss die Begriffe durch sehr große Neuronenverbände darstellen. Oder wäre unser Arsenal an Hirnzellen beispielsweise umfangreich genug, um eine lächelnde, strickende, Tee trinkende oder an der Bushaltestelle wartende Großmutter zu speichern sowie Luke Skywalker als Kind wie auch als Sternenkrieger, und so weiter?

Um die Frage zu klären, sollten wir zunächst bedenken, dass ein Mensch normalerweise nicht mehr als 10 000 verschiedene Begriffe gespeichert hat. Das ist nicht viel im Vergleich zu der Milliarde Nervenzellen, aus denen der mittlere Schläfenlappen besteht. Außerdem sprechen gute Gründe für die sparsame Kodierung: Die Neurone im mittleren Schläfenlappen kümmern sich gar nicht um unterschiedliche Aspekte desselben Konzepts – ihnen ist egal, ob Luke Skywalker sitzt oder steht. Sie interessiert nur, ob ein Reiz überhaupt etwas mit Luke zu tun hat. Damit reagieren sie auf den Begriff an sich, nicht auf die Art seiner Präsentation. Je abstrakter der Begriff, desto besser: Indem das Neuron auf alle Aspekte von Luke anspricht, muss es weniger Information kodieren und kann höchst selektiv reagieren – nur auf Luke, nicht auf Jennifer.

Computersimulationen, die Stephen Waydo als Doktorand bei Christof Koch am California Institute of Technology durchführte, stützen diese Ansicht. Ausgehend von einem detaillierten Modell der visuellen Verarbeitung programmierte Waydo ein lernfähiges neuronales Netzwerk, das viele Bilder von Flugzeugen, Autos, Motorrädern und Gesichtern

zu erkennen vermochte. Das Programm war dabei nicht auf Hinweise eines Lehrers angewiesen, der erklärt »Das ist ein Flugzeug und das ein Auto«, sondern fand selbstständig die richtigen Antworten. Dies gelang ihm auf Grundlage der Annahme, die immense Vielfalt möglicher Bilder beruhe auf einer kleinen Anzahl von Objekten, und jedes davon würde von einer kleinen Untergruppe simulierter Neurone repräsentiert. Damit lernte das Netzwerk, Personen und Objekte zu unterscheiden, selbst wenn sie in unterschiedlicher Weise dargestellt wurden.

Warum es Begriffszellen gibt

Unsere Forschung hängt eng mit der Frage zusammen, wie das Gehirn die Außenwelt interpretiert und Wahrnehmungen in Gedächtnisinhalte übersetzt. Entscheidende Einsicht brachte der berühmte Fall des Patienten H.M. aus dem Jahr 1953, der an schwerer Epilepsie litt. Als verzweifelte Maßnahme gegen seine Krämpfe entfernte ein Neurochirurg den Hippocampus sowie angrenzende Regionen in beiden Hirnhälften. Nach dem Eingriff vermochte H.M. noch immer Personen und Objekte zu erkennen und sich an Ereignisse vor der Operation zu erinnern, doch überraschenderweise konnte er keine neuen dauerhaften Erinnerungen mehr bilden. Ohne den Hippocampus vergaß er sofort alles, was ihm geschah. In dem Film »Memento« aus dem Jahr 2000 leidet die Hauptfigur an einer ähnlichen neurologischen Krankheit.

Wie der Fall zeigt, ist der mittlere Schläfenlappen – und insbesondere der Hippocampus – nicht für die Wahrnehmung nötig, aber unentbehrlich, um Kurzzeiterinnerungen ins Langzeitgedächtnis zu übertragen. Daraus schließen wir, dass die dort sitzenden Begriffszellen Bewusstseinsinhalte – all das, was durch Sinnesdaten oder Vorstellungen ausgelöst wird – in langfristige Erinnerungen übertragen, die später in anderen Regionen der Hirnrinde gespeichert werden. Wir glauben, dass unser Patient das Jennifer-Aniston-Neuron nicht benötigte, um die Schauspielerin zu erkennen oder sich daran zu erinnern, wer sie war. Vielmehr brauchte er es, um sich ihrer bewusst zu werden und neue mit ihr zusammenhängende Gedächtnisinhalte zu erzeugen, damit er sich später an ihr Bild erinnern konnte.

Unser Gehirn nutzt anscheinend eine kleine Anzahl solcher Zellen, um viele Aspekte eines Dings in einem einheitlichen Begriff zusammenzufassen – eine sparsame und unveränderliche Repräsentation. Die Tätigkeit der Begriffszellen erklärt weit gehend, wie wir uns erinnern: Wir merken uns Jennifer oder Luke in all ihren Verkleidungen, aber nicht jede einzelne Pore auf ihrem Gesicht. Wir müssen – und wollen – uns nicht an jedes kleinste Detail jedes Erlebnisses erinnern.

Wir brauchen uns nicht unzählige nebensächliche Kleinigkeiten zu merken, sondern müssen das Wesentliche einer speziellen Situation erfassen, an der für uns bedeutsame Personen und Begriffe beteiligt sind. Wenn wir im Café zufällig einem Bekannten begegnen, ist es wichtiger, ein paar hervorstechende Ereignisse des Treffens im Gedächtnis zu behalten, als später genau zu wissen, wie er gekleidet war, was er



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Hirnforschung«
finden Sie unter

www.spektrum.de/gehirn

wortwörtlich sagte oder wie die Kaffeetrinker im Hintergrund aussahen. Die Begriffszellen feuern bei für uns persönlich relevanten Dingen, weil wir vorzugsweise Erlebnisse mit uns vertrauten Personen und Objekten abspeichern und uns nicht die Mühe machen, Erinnerungen an unwichtige Dinge zu produzieren.

Gedächtnisinhalte sind viel mehr als einzelne isolierte Begriffe. Eine Erinnerung an Jennifer Aniston umfasst eine Reihe von Ereignissen, an denen sie – beziehungsweise ihre Figur in »Friends« – teilnimmt. Ein kompletter Gedächtnisinhalt verknüpft unterschiedliche Konzepte: beispielsweise Jennifer Aniston in Verbindung mit der Vorstellung der Familie, die auf dem Sofa sitzt, Eiskreme löffelt und die TV-Serie anschaut.

Sind zwei Begriffe miteinander verwandt, feuern jene Neurone, die den einen kodieren, wahrscheinlich auch bei dem anderen. Diese Hypothese liefert eine physiologische Erklärung dafür, wie Hirnzellen Assoziationen bilden. Die Reaktion auf verwandte Inhalte stellt offenbar die Grundlage dar für die Bildung episodischer Gedächtnisinhalte – die spezielle Ereignisabfolge während der zufälligen Begegnung im Café – oder für den Bewusstseinsstrom, der spontan von einem Konzept zum anderen wandert. Wir sehen Jennifer Aniston und erinnern uns an Fernsehen, Sofa und Eiskreme – verwandte Begriffe, die der Erinnerung an eine Folge von »Friends« zu Grunde liegen. Ein ähnlicher Prozess verbindet etwa auch verschiedene, in unterschiedlichen Hirnregionen gespeicherte Aspekte des Begriffs, der Geruch, Form, Farbe und Struktur einer Rose vereint.

Angesichts der offensichtlichen Vorteile, die das Speichern komplexer Erinnerungen in Form abstrakter Begriffe hat, erhebt sich die Frage, warum diese Begriffe im mittleren Schläfenlappen sparsam repräsentiert sein müssen. Eine Antwort liefern Computersimulationen, denen zufolge das nötig ist, damit schnelle Assoziationen entstehen.

Die technischen Details sind kompliziert, aber die Grundidee ist ganz einfach. Angenommen, unser Bekannter im Café wäre durch eine sehr große Zahl weit übers Gehirn verteilter Neurone – also nicht sparsam – repräsentiert, wobei jede Zelle ein winziges Detail der Person darstellt. Und für das Café gäbe es eine andere weit verteilte Repräsentation. Um Person und Café zu verbinden, müsste das Gehirn Beziehungen zwischen den Details beider Konzepte herstellen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Details nicht mit anderen zu vermengen – schließlich ähnelt das Café einem gemütlichen Buchladen, und unser Freund sieht ein wenig wie ein weiterer Bekannter aus.

Solche Verbindungen mit weit verteilten großen Netzwerken zu erzeugen, ist sehr zeitaufwändig und kann Erinnerungen durcheinanderbringen. Sparsame Netze arbeiten hingegen schnell und einfach: Sie müssen nur wenige Bezüge zwischen den das jeweilige Konzept repräsentierenden Zellgruppen herstellen, indem sie einige Neurone dazu bringen, auf beide Begriffe zu reagieren. Ein weiterer Vorteil der sparsamen Repräsentation ist, dass man etwas Neues hinzufügen

kann, ohne das gesamte Netz grundlegend zu verändern. Mit verteilten Netzen ist das viel schwieriger zu erreichen, weil das Hinzufügen eines neuen Konzepts die Grenzen überall im Netzwerk verschiebt.

Begriffszellen verbinden Wahrnehmung und Gedächtnis. Sie liefern eine abstrakte und sparsame Repräsentation semantischen Wissens – Menschen, Orte, Objekte, all die bedeutsamen Begriffe, aus denen unsere private Welt besteht. Sie bilden die Bausteine für Erinnerungen an Tatsachen und Ereignisse unseres Lebens. Ihr elegantes Kodierungsverfahren erlaubt unserem Geist, zahllose unwichtige Details beiseitezulassen und Bedeutungen herauszufiltern, die sich für neue Assoziationen und Erinnerungen eignen. Sie speichern nur jene Erfahrungen, die es wert sind, aufbewahrt zu werden.

Damit bilden Begriffszellen eine wichtige materielle Basis für kognitive Fähigkeiten. Sie sind die Hardwarekomponenten von Gedanken und Erinnerungen – auch wenn sie letztlich nicht ganz dasselbe sind wie Levitts Grußmutterneurone. ~

DIE AUTOREN



Rodrigo Quiroga (links) ist Professor an der University of Leicester (Großbritannien) und Direktor des

dortigen Bioengineering Research Center. **Itzhak Fried** (Mitte) ist Professor an der University of California in Los Angeles und leitet an der dortigen David Geffen School of Medicine das Epilepsie-Chirurgieprogramm. **Christof Koch** ist Professor für kognitive und Verhaltensbiologie am California Institute of Technology in Pasadena sowie leitender Wissenschaftler am Allen Institute for Brain Science in Seattle (US-Bundesstaat Washington).

QUELLEN

Quiroga, R. Q.: Concept Cells: The Building Blocks of Declarative Memory Functions. In: Nature Reviews Neuroscience 13, S. 587–597, 2012

Quiroga, R. Q. et al.: Explicit Encoding of Multimodal Percepts by Single Neurons in the Human Brain. In: Current Biology 19, S. 1308–1313, 2009

Suthana, N., Fried, I.: Percepts to Recollections: Insights from Single Neuron Recordings in the Human Brain. In: Trends in Cognitive Sciences 16, S. 427–436, 2012

LITERATURTIPP

Quiroga, R. Q.: Borges and Memory: Encounters with the Human Brain. MIT Press, Cambridge 2012
In einer Kurzgeschichte des argentinischen Schriftstellers Jorge Luis Borges (1899–1986) findet Quiroga erstaunliche Vorahnungen modernster Gedächtnisforschung.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182490

Der Sinn der Allergie

Die heftige Immunantwort bei Allergien könnte zur akuten Hilfe gegen Tiergifte und Schadstoffe aus der Umwelt entstanden sein.

Von Noah W. Palm, Rachel K. Rosenstein und Ruslan Medzhitov

Unser Immunsystem schützt uns vor den unterschiedlichsten Krankheitserregern, von winzigen Viren bis zu meterlangen Bandwürmern. Je nach Art der Gefahr verfügt es über dazu passende Abwehrstrategien. Gegen Viren, Bakterien, Pilze und Einzeller dienen Immunreaktionen vom so genannten Typ 1: Sie zielen überwiegend darauf ab, den Erreger oder infizierte Zellen direkt zu töten. Dabei greifen angeborene und erworbene (adaptive) Mechanismen ineinander. Bei der erworbenen Typ-1-Abwehr sind bestimmte Immunzellen (T-Helferzellen und zytotoxische T-Zellen) sowie verschiedene Klassen von Antikörpern (Immunglobuline) beteiligt.

Gegen Würmer und andere vielzellige Parasiten, etwa Zecken, wehrt sich der Körper vor allem mit Immunreaktionen vom Typ 2. Dabei treten Helferzellen vom Typ 2 (TH2) in Aktion, außerdem IgE- und IgG1-Antikörper. Es gilt, die Parasiten gewaltsam aus dem Organismus hinauszubefördern beziehungsweise von der Haut zu entfernen, etwa durch

Husten oder Erbrechen respektive durch die Verstärkung von Haut und Schleimhäuten als Barrieren. Hierbei hilft ebenfalls das angeborene Immunsystem, das außerdem verschiedene Immunzellen auf den Plan ruft. Diese zweite Art von Abwehrreaktionen kann aber auch bei anderen Faktoren auftreten, die keine Infektion erzeugen: Allergenen.

Nach weit verbreiteter Ansicht entstehen solche allergischen Reaktionen auf Grund entgleister Mechanismen für die Wurmbabwehr (siehe SdW 12/2012, S. 34). Doch unseres Erachtens erfüllt die Typ-2-Immunantwort weitere Funktionen. Sie entwickelte sich demnach nicht nur zum Schutz gegen Würmer, sondern auch als schnelle Maßnahme gegen verschiedene gefährliche Stoffe, mit denen wir in Berührung kommen können (siehe Kasten S. 37). Das mögen Pflanzen- und Tiergifte sein sowie Gewebe auflösende Substanzen, die bei Bissen oder Stichen in den Körper gelangen. Verschiedene Reizstoffe, diverse Gifte und körperfremde Verbindungen – so genannte Xenobiotika – aus der Umwelt fallen wohl ebenfalls darunter. Wegen dieser Bandbreite dürfte der Organismus viele Signalwege bereithalten, die in solchen Fällen Typ-2-Immunreaktionen aktivieren.

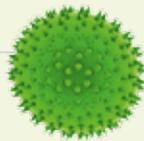
Diesen Reaktionen dürfte die Strategie gemeinsam sein, Haut und Schleimhäute, glatte Muskulatur und Blutgefäße beim unerwünschten Kontakt mit einem Xenobiotikum so zu beeinflussen, dass die natürlichen Barrieren rasch verstärkt und die Schadstoffe schnellstens hinausbefördert werden. Allergien treten auf, falls solche an sich hilfreichen Maßnahmen überschießen. Dann läuft und juckt die Nase, die Haut brennt und bekommt Pusteln, vielleicht tritt auch Heufieber auf, und so weiter. Im Extremfall bricht der Kreislauf zusammen: Der Patient erleidet einen anaphylaktischen Schock. Im Gegensatz zu anderen Immunerkrankungen treten Allergien ausschließlich an Geweben auf, die direkten Umweltkontakt haben.

Dass die Ansicht, die ungewollte Typ-2-Antwort richte sich normalerweise gegen Wurmbefall, nicht befriedigt, hat mehrere Gründe. Nur wenige der bekannten Allergene äh-

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

ALLERGIEN – GEISSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

- | | | |
|--------|--|---------------|
| Teil 1 | ▶ Eine Allergikerkarriere
▶ Allergien auf dem Vormarsch
▶ Wenn im Essen der Tod lauert
▶ Was tun gegen Neurodermitis? | Dezember 2012 |
| Teil 2 | ▶ Aus dem Bauch heraus
▶ Blick ins Erbgut
▶ Risse in der Mauer | Januar 2013 |
| Teil 3 | ▶ Impfen gegen Allergien
▶ Der Mensch im Zentrum
▶ Frischer Wind in der Asthmaforschung | Februar 2013 |
| Teil 4 | ▶ Der Sinn der Allergie | März 2013 |



nen chemisch gesehen Substanzen von größeren Parasiten, gegen die sich der Körper wehrt, darunter Chitin. Und eine anaphylaktische Reaktion auf ein Allergen erfolgt gewöhnlich binnen Minuten, also extrem schnell. Warum sollte ein Parasit derart unverzüglich bekämpft werden müssen? Sogar bei Bakterien oder Viren, die sich im Körper viel schneller vermehren, lässt sich der Organismus Stunden oder Tage Zeit. Überdies ist bei einer allergischen Überempfindlichkeitsreaktion wesentlich, dass IgE-Antikörper bestimmte Immunzellen aktivieren: Mastzellen und basophile Granulozyten. Zwar finden sich bei Wurmbefall mehr IgEs im Blut, jedoch zeigten Experimente mit Mäusen und auch mit Menschen,

dass die Immunität gegen solche Parasiten selbst dann besteht, wenn man diese Antikörper entfernt. Und nicht zuletzt umfassen Allergene ein unglaubliches Spektrum an Stoffen verschiedenster Herkunft. Ob Pollen, Meeresfrüchte, Erdnüsse, Bienengift, Latex, Penizillin oder Nickel – chemisch oder strukturell haben diese Auslöser eigentlich nichts gemeinsam.

Gefährliche Stoffe wie das Gift eines Skorpions muss der menschliche Körper schnellstmöglich bekämpfen – eine Leistung, die das Immunsystem vollbringt.

DREAMSTIME / NICO SMIT



Viel plausibler als das Parasitenmodell ist die These, dass sich der Körper mit der Immunreaktion gegen gefährliche Fremdstoffe wehrt, also etwa gegen Umweltgifte und äußere Schadstoffe, aber auch gegen giftige Bisse und dergleichen. Diese These kam schon vor Jahrzehnten auf, wurde von anderen Forschern aber kaum beachtet. Demnach wäre die Allergieantwort in Notfällen durchaus nützlich.

Alle Allergene, so verschieden sie sind, rufen eine Typ-2-Immunantwort hervor. Äußerlich gesehen ist das nach derzeitigen Erkenntnissen ihre einzige Gemeinsamkeit. Weil sie sich sonst in kein einheitliches Schema bringen lassen, gibt es bisher nur die rein pragmatische Definition, wonach Allergene einfach Substanzen sind, die eine Allergiereaktion erzeugen. Wir glauben aber, dass die unterschiedlichen Klassen von Allergenen den Blick auf das Wesentliche verstellen. Denn ob Luftschadstoffe oder gefährliche biologische Substanzen, Insekten- oder Schlangengifte: Sie alle können dem Körper schaden, unter Umständen beträchtlich. Daher dürften sich in der Evolution grundlegende Mechanismen herausgebildet haben, die solche Gefahren rasch erkennen und sie unverzüglich bekämpfen.

Wenn es auf Minuten ankommt

Tiergifte sind meist ein komplexes Gemisch aus Enzymen, Peptiden und kleinen Molekülen. Sie dienen zur Nahrungsbeschaffung oder Verteidigung. Quer durch das Tierreich nutzen unzählige Arten solche Stoffe, unter anderem Nesseltiere, Insekten und Spinnen, auch viele Amphibien und Reptilien. Vielfach wird dem Opfer ein Biss oder Stich verpasst. Schon die direkten Gewebe- und Organschäden durch das Gift selbst sind mitunter lebensbedrohlich. Mindestens ebenso gefährlich ist es, wenn die Substanzen eine schwere TH2- und IgE-Reaktion auslösen und auf diesem Weg einen anaphylaktischen Schock. Das mag allerdings eine Überreaktion sein, denn womöglich entstanden allergische Reaktionen auf Tiergifte ursprünglich gerade dafür, den Organismus gegen deren unmittelbare Schädigung zu schützen. Auch beim septischen Schock mit Kreislaufzusammenbruch reagiert der Gesamtorganismus übermäßig auf einen Erreger – unter Beteiligung eines eigentlich sinnvollen Abwehrmechanismus. Dies könnte erklären, wieso sich die Ereignisse im Körper manchmal geradezu überschlagen – bei einem tödlichen Gift kommt es auf Minuten, ja Sekunden an.

Der Speichel von Blut saugenden Zecken, Moskitos und dergleichen enthält zersetzende Substanzen, die solchen Tieren die Blutaufnahme erleichtern. Molekular und auch in ihren Eigenschaften ähneln diese Stoffe oft Tiergiften, da sie ebenfalls umgewandelten Speicheldrüsen entstammen, und sie können die gleichen Immunreaktionen auslösen. Solche Blutsauger übertragen zudem nicht selten schwere Krankheiten, etwa Borreliose oder Malaria. Eine sehr rasche

Allergiereaktion vermag dies bei Zecken nachweislich zu verhindern, indem sie deren Blutmahlzeit unterbindet. Übrigens verwenden auch im Körper lebende Würmer Speichelstoffe, um sich Gewebe des Wirts als Nahrung zugänglich zu machen.

Auch viele pflanzliche Substanzen können uns gefährlich werden, manche schon bei Haut- oder Schleimhautkontakt. Man denke nur an den nordamerikanischen Giftfeu, der Ausschlag erzeugt, oder an den Wirkstoff von Rizinus, der

schweren Durchfall bewirkt. Und auch sonst hält unsere Umwelt vielerlei natürliche und künstliche Fremdstoffe bereit, bis hin zu Medikamenten. Grundsätzlich lassen sich bei den Xenobiotika zwei Klassen unterscheiden,

»Manche Fremdstoffe, Xenobiotika, verändern Aussehen und Funktion von Proteinen – mit allerlei toxischen Effekten«

weil sie an verschiedenen Orten und auf verschiedene Weise angreifen. Hydrophobe, also »Wasser abweisende« Xenobiotika können in Zellen eindringen, sich dort anreichern und dann toxisch wirken. In den Zellen, insbesondere in der Leber, gibt es etliche Sensoren dafür, also molekulare Detektoren. Vor allem das Cytochrom-P450-System inaktiviert hydrophobe Fremdstoffe, und letztlich scheiden wir die Überreste mit dem Urin aus. Allerdings kommt es vor, dass die Entgiftung nicht ausreichend funktioniert. In solchen Fällen kann ein Schadstoff eine Allergiereaktion auslösen.

Die zweite Klasse von potenziell gefährlichen Fremdstoffen sind so genannte Haptene: sozusagen unvollständige Antigene – reaktionsfähige Moleküle oder Ionen, die sich mit Proteinen verbinden. In diese Klasse gehört Nickel oder das Unkrautmittel Atrazin. Diese Xenobiotika verändern Aussehen und Funktion von Proteinen, mit allerlei toxischen Effekten. Außerdem werden die beteiligten Proteine nun immunogen: Es entstehen IgG1-Antikörper, welche die betreffenden Proteine beseitigen helfen. Haptene können auch bestimmte Entzündungsreaktionen auslösen (indem sie in Immunzellen so genannte Inflammasomen, Proteinkomplexe, aktivieren). Und Hautkontakt mit solchen Molekülen bedingt unter Umständen eine Überempfindlichkeit gegen

AUF EINEN BLICK

ALLERGISCHE REAKTION

1 Auf die verschiedensten Allergene antwortet der Körper mit auffallend **einheitlichen Maßnahmen**. Auch das Immunsystem reagiert stets auf die gleiche Art.

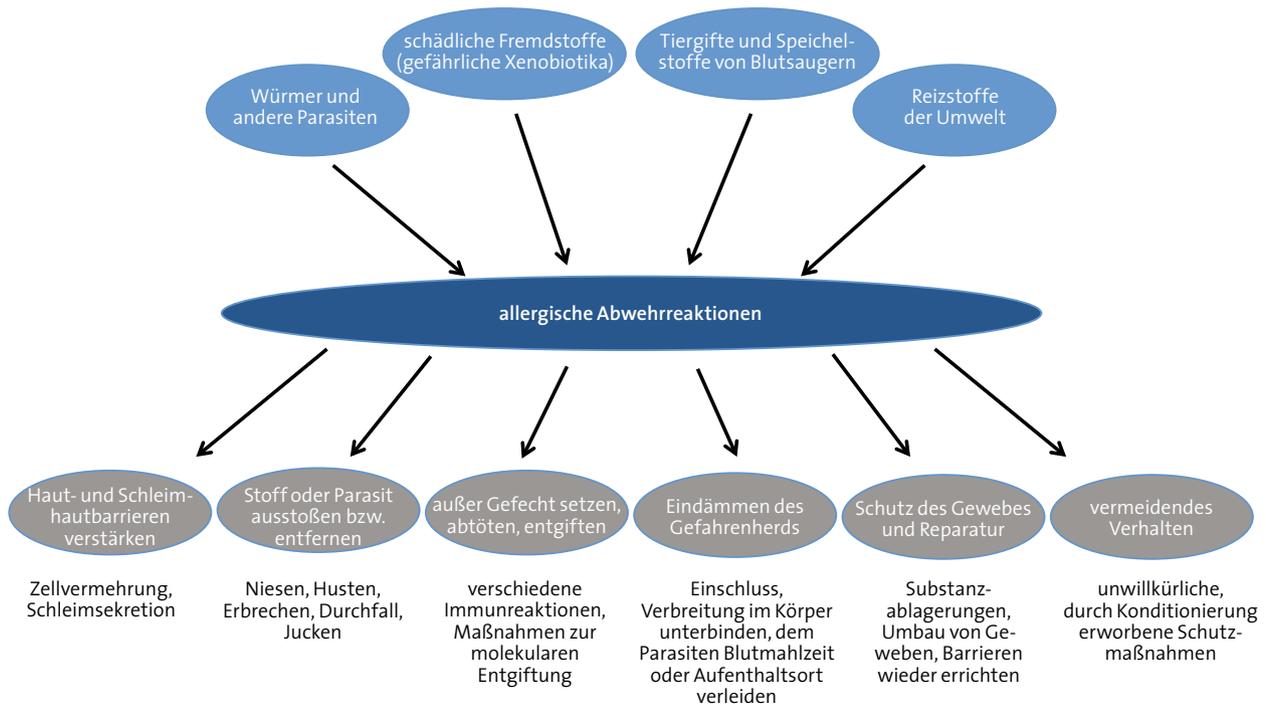
2 Zu Grunde liegt wahrscheinlich ein generelles Ziel: toxische Stoffe, Gifte, potenziell **gefährliche Fremdstoffe** und Parasiten schleunigst abzuwehren und wieder loszuwerden – daher die heftige Reaktion.

3 Wahrscheinlich finden Allergiereaktionen unbemerkt auch bei gesunden Menschen statt. Doch selbst heftige Überreaktionen sind **evolutionär** gesehen hilfreich – weil sie dem Menschen potenzielle Gefahren zeigen.

Große Bandbreite – gleiches Ziel

Die Störenfriede, die eine Allergiereaktion auslösen können, fallen in vier übergeordnete Klassen: Parasiten, aggressive Xenobiotika (Fremdstoffe etwa von Pflanzen), Tiergifte im weiten Sinn sowie Reizstoffe in der Umwelt, etwa Rußpartikel. Viele

Maßnahmen ermöglichen, sich auch ohne Symptome bald wieder von Toxinen oder Parasiten zu befreien. Die immunologische Sensibilisierung gegen das Allergen verhilft uns zusätzlich zu einer Palette von raschen Gegenmaßnahmen.



PALM, N.W. ET AL. ALLERGIC HOST DEFENCES. IN: NATURE 484, S. 465–472, 2012, FIG. 1

sie. Zwar handelt es sich dabei vor allem um eine Immunreaktion vom Typ 1. Doch wenn die Hautbarriere löchrig wird, kommt eine hauptsächlich Typ-2-gestützte Immunantwort zu Stande, quasi als Schutzmaßnahme gegen die Haptene.

Medikamentenallergien dürften mit Mechanismen zusammenhängen, die sich gegen schädliche Xenobiotika richten. Zum Beispiel entwickeln manche Menschen eine Penzillinallergie, weil ihr Stoffwechsel das Antibiotikum in eine reaktionsfähige Substanz umwandelt, die sich mit Proteinen verbinden kann. Allerdings findet dieser Umbau bei den meisten Leuten kaum in größerem Umfang statt, und anfänglich wirkt zudem anscheinend nur die veränderte Form, das Hapten, immunogen. Trotzdem kann mit der Zeit unter Umständen auch die Ausgangsform Reaktionen auslösen, wenn jemand für das Hapten sensibilisiert ist.

Auf solche Art entstehen vermutlich viele Überempfindlichkeiten gegen Arzneimittel. Allgemeiner gesagt erzeugen kleine Moleküle wohl deswegen Allergiereaktionen, weil sie entweder selbst Schaden anrichten, mag der noch so gering sein, oder weil sie einer giftigen Substanz ähneln, obgleich sie selbst harmlos sind.

Zu den Reizstoffen der Umwelt zählen zum Beispiel auch Stäube und Rußpartikel sowie milde Detergenzien, die in Rei-

nigungs- und Waschmitteln enthalten sind. Auf dergleichen reagiert der Körper mit Husten oder Niesen, auch mit Juckreiz. Das hilft meist gut, den Störenfried zu entfernen. Jedoch kann eine intensive oder anhaltende wiederholte Exposition bei entsprechend disponierten Menschen eine Allergie bedingen, bis hin zu Asthma oder Hautschäden.

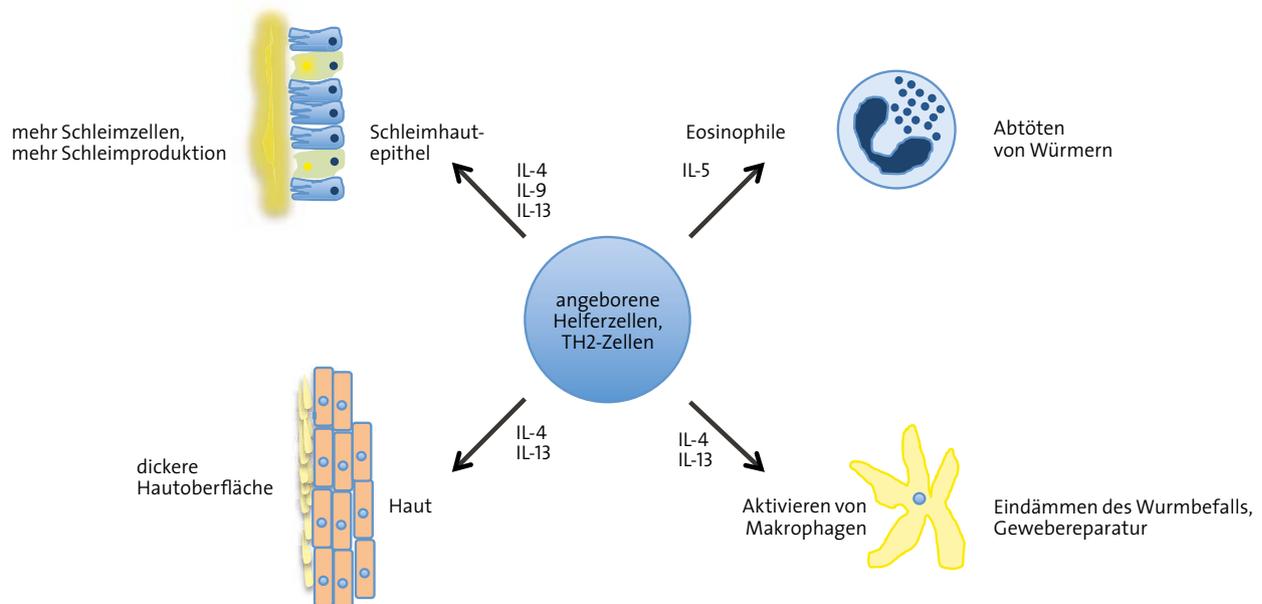
Augenscheinlich greifen derartige Reizstoffe die Haut beziehungsweise die Schleimhäute von Atemwegen oder Verdauungstrakt an. Unter ihnen ist eine große Anzahl ganz verschiedenartiger Substanzen. Die Forscher vermuten aber, dass sich über die Hälfte der wichtigeren bekannten Allergene an Lipide (Fettverbindungen) anlagern. Möglicherweise bedingt das die Reizwirkung, denn Lipide in Verbindung mit diesen Substanzen wirken ihrerseits wie ein mildes Detergens und somit potenziell hautschädlich.

Wie schon erwähnt, schützt sich der Organismus gegen die verschiedenen Gifte und Schadstoffe im Prinzip auf gleiche Weise wie gegen Parasiten. Es leuchtet ein, dass eine Verstärkung der Haut- oder Schleimhautbarriere auch gegen Fremdstoffen hilft. Nicht nur Parasiten können sich dann schwerer festsetzen und haben mehr Mühe, einzudringen. Ebenso können dann toxische oder reizende Stoffe weniger anrichten. Die Oberhaut wird dicker, da ihre Zellzahl

Zwei Immunmodule für viele Zwecke

Die Immunabwehr vom Typ 2 spannt viele Akteure ein:

Einige wichtige Beteiligte, die helfen, Hautbarrieren zu verstärken, Würmer zu bekämpfen und Gewebe wieder zu reparieren



zunimmt. Die Schleimhaut wird durch Zellvermehrung robuster. Zudem verstärkt sich die Schleimproduktion: Schleim bildende so genannte Becherzellen an den Oberflächen des Atem- und Magen-Darm-Trakts vermehren sich und sondern auch zusätzliche Abwehrmoleküle ab.

Solche Veränderungen gehen natürlich auf Kosten der normalen Hautfunktionen, etwa Gasaustausch oder Nährstoffaufnahme, und sollten deswegen nur vorübergehend erfolgen. Doch zu den anhaltenden Allergiesymptomen gehört eine übermäßige Schleimproduktion. Der bisher am besten verstandene Auslöser für die entsprechenden Entzündungen und Atemwegsbeschwerden ist ein so genanntes Zytokin: der Immunbotenstoff Interleukin 13 (IL-13), den verschiedene Immunzellen bilden können, wenn Epithelzellen sie dazu anregen, also die an sich schützenden Haut- und Schleimhautzellen. Das Interleukin veranlasst die Becherzellvermehrung und erhöhte Schleimproduktion. Wieso die Epithelzellen das tun, ist noch nicht ganz klar. Zumindest scheinen aber Zellschäden dafür wichtig zu sein. Und auch Mastzellen des Immunsystems können zu solchen Reaktionen beitragen. Des Weiteren wissen Forscher schon einiges darüber, wie Epithelzellen dabei helfen, die Abwehrbarrieren zu verstärken, und wie dies mit der Ausreifung von TH2-Zellen und mit Neurodermitis zusammenhängt.

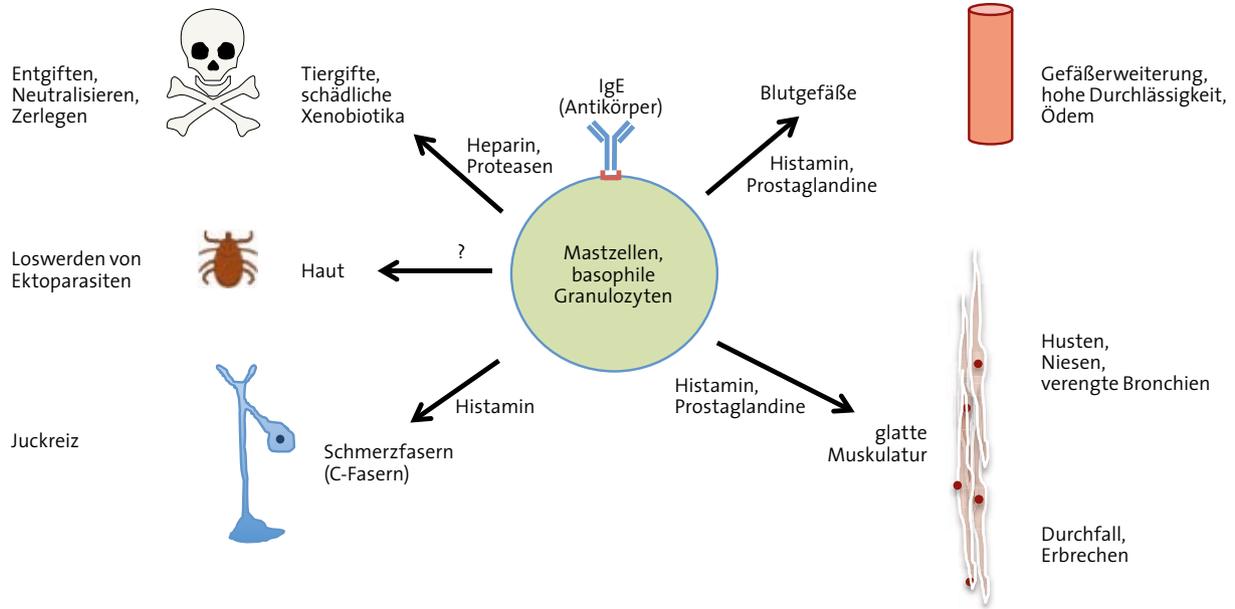
Die Palette an Maßnahmen, den Parasiten oder Fremdstoff wieder zu beseitigen, reicht von Niesen und Husten bis zu Durchfall und Erbrechen. Mitwirkende sind Nervenreflexe und von Mastzellen ausgeschüttetes Histamin, das lokal

auf die glatte Muskulatur wirkt. In den Atemwegen befördern zudem die Flimmerhärchen im Verein mit Schleim unerwünschte Stoffe wieder hinaus. Jucken oder Brennen auf der Haut führt dazu, dass man einen Plagegeist abkratzt oder eine hautreizende Substanz entfernt. Die unangenehme Empfindung vermitteln schmerzempfindliche Nervenendigungen, die auf von Mastzellen freigesetztes Histamin ansprechen.

Eine ganze Palette molekularer Maßnahmen zur Entgiftung und zügigen Abwehr

Zu den biochemischen Abwehrstrategien gehört die Entgiftung. Das bedeutet, toxische Stoffe zu neutralisieren oder abzubauen und auszuscheiden. Der Blutverdünnungsfaktor Heparin und Proteasen (eiweißzersetzende Enzyme) aus Mastzellen können verschiedene Tiergifte neutralisieren und zersetzen. Gegen sie nützen auch IgG1-Antikörper, die vermutlich die schädlichen Proteine angreifen. Wahrscheinlich werden allergieauslösende Xenobiotika, also Fremdstoffe aller Art, ebenfalls entgiftet. Welche Vorgänge der Immunabwehr und des Stoffwechsels daran teilnehmen, zeichnet sich allerdings erst teilweise ab. Erstaunlicherweise vermag der Körper mitunter im Gewebe parasitierende Wurmeier und Larven abzutöten, ja in bestimmten Lebensphasen der Würmer sogar diese selbst, auch wenn das größere Gewebserstörungen mit sich bringen kann. Dabei treten spezielle weiße Blutzellen in Aktion, so genannte eosinophile Granulozyten.

Komponenten, die Entgiftungs- und Abbauprozesse vorantreiben sowie die Resistenz gegen Toxine steigern



PALM, N.W. ET AL.: ALLERGIC HOST DIFFERENCES. IN: NATURE, 484, S.465-472, 2012, FIG. 2A+B

Wenn alle bisher erwähnten Maßnahmen die Störenfriede nicht beseitigen können, muss der Organismus zumindest versuchen, die Bedrohung so weit wie möglich einzudämmen. Nun gilt es zu verhindern, dass sich Parasit, Gift oder Reizstoff im Körper ausbreiten. Histamin und das Enzym Chymase machen Wände von Blutgefäßen durchlässiger, lassen Flüssigkeits-Zell-Gemische austreten oder das Blut gerinnen. So verteilt der Blutkreislauf das Gift nicht sofort im ganzen Körper. Teils werden Substanzen oder Parasiten in Granulomen eingeschlossen, und Kollagenablagerungen bilden Verbreitungsbarrieren. Und schließlich verleiden alle möglichen Stoffe, die von Immunzellen abgegeben wurden, Zecken oder inneren Parasiten den Appetit oder die Lust, dort zu leben. Allerdings gehören diese Prozesse auch zu den Begleiterscheinungen von Allergien.

Wenn sich der Körper gegen Gifte, Reizstoffe oder Parasiten wehrt, werden meist Reparaturmaßnahmen nötig. Manche davon haben bei Allergien unerwünschte Folgen. Insbesondere Makrophagen und Bindegewebszellen koordinieren Wiederherstellungsprozesse über Wachstumsfaktoren und das Ablagern extrazellulärer Matrix. Andere weiße Blutzellen fördern die Reparatur des Lungenepithels. Manche Forscher vermuten, die Immunschiene vom Typ 2 diene großteils dazu, dass die Gewebe Parasitenschäden besser tolerieren

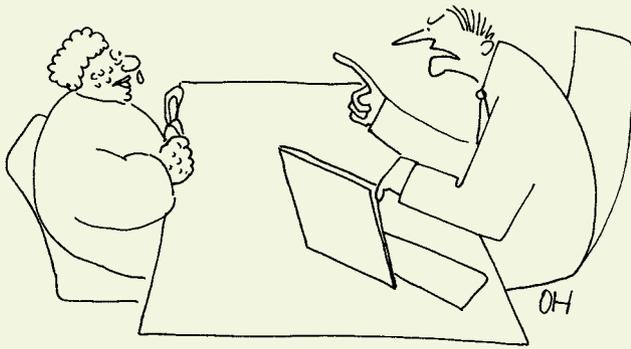
und leichter beheben können. Gleiches dürfte für Zerstörungen durch Gifte oder Allergene gelten. Ausgiebige Reparaturen bringen allerdings manchmal Folgeschäden mit sich, wie etwa bei Asthma Gewebsveränderungen und Fibrosen in der Lunge.

Welche Symptome bei einer Allergie auftreten, hängt jeweils davon ab, welche der genannten Abwehrmechanismen angekurbelt werden. Trotzdem lassen sich diese in zwei übergeordnete Kategorien einteilen – beides Bausteine (Module) der Typ-2-Immunität, die auch gegen Würmer, Giftstoffe und Xenobiotika zum Einsatz kommen (siehe Kasten oben).

Im einen Fall stehen Helferzellen der angeborenen Immunität – »angeborene« Lymphoidzellen (ILCs) – sowie ihre Gegenstücke der erworbenen (adaptiven) Immunität, die TH2-Zellen, im Zentrum. Sie bilden IL-13 und sorgen so dafür, dass sich Schleimzellen vermehren und viel Flüssigkeit sowie andere Stoffe ausscheiden. Manche Wachstumsfaktoren der Lymphoidzellen ermöglichen Schleimhautreparaturen, während andere wahrscheinlich die Außenhaut verdicken und verstärken. Die Forscher haben inzwischen eine Reihe weiterer Immunzelltypen und Signalfaktoren ausgemacht, die an den recht komplexen Prozessen teilhaben. Die Aktivität der Lymphoidzellen geht auf Signale von den Epithelien mittels bestimmter Zytokine zurück, während TH2-

»Zumindest muss der Organismus versuchen, die Bedrohung einzudämmen, so dass sich Gift oder Parasit nicht weiter ausbreiten können«

WENN MAN EINE NUSSALLERGIE HAT,
DARF MAN NATÜRLICH AUCH NICHT
AN NÜSSE DENKEN, FRAU WORMSER!



Zellen Zytokine erst produzieren, wenn das Immunsystem die betreffenden Antigene ausgemacht hat.

Die andere Kategorie basiert auf Aktivitäten von so genannten Mastzellen und basophilen Granulozyten. Tiergifte und Proteaseallergene (enzymatische Stoffe, etwa von Milben) aktivieren diese Zellen direkt. Entscheidend für die extreme Allergenempfindlichkeit und rasche Reaktion dieses Bausteins ist aber, dass Rezeptoren auf ihnen durch das Immunglobulin IgE angeregt werden. Treffen auf den Zellen IgE und Allergen zusammen, schütten die Mastzellen schlagartig größere Mengen verschiedener gespeicherter Wirkstoffe aus, darunter Histamin und andere entzündungsfördernde Gewebshormone, etwa Leukotriene und Prostaglandine, den neuronalen Botenstoff Substanz P und verschiedene Proteasen. Die heftige Reaktion, bei der sich die Bronchien zusammenziehen, der Darm sehr aktiv wird und die Blutgefäße weit und durchlässig werden, ist für Allergien typisch. Dass sie eigentlich als Notwehr gegen Gifte entstand, erscheint einleuchtend.

Diese beiden Arten der allergischen Immunantwort arbeiten zwar in manchen Situationen unabhängig voneinander, funktionell sind sie jedoch nicht völlig entkoppelt. Vielmehr können sie sich gegenseitig anregen.

Bevor all diese Reaktionen erfolgen, muss der Organismus den Fremdkörper oder Schadstoff aber erst einmal erkennen. Wie macht er das? Angesichts der Vielzahl von Reizen, auf die unsere Typ-2-Immunität anspricht, müssten dafür wohl Mechanismen existieren. Im Prinzip gibt es drei übergeordnete Möglichkeiten: Immunkomponenten detek-

tieren die fremde Struktur durch Mustererkennung an ihren äußeren Merkmalen als etwas Falsches, Unpassendes; sie stoßen auf angerichtete Schäden; oder sie erspüren den Fremdkörper indirekt anhand von Indizien.

Molekulare Strukturen des Feindes zu erkennen, ist eine wichtige und offenbar evolutionär sehr alte Eigenschaft der angeborenen Immunität vom Typ 1. Sie bemerkt dadurch viele Mikroerreger auf Anhieb und kann die Abwehrphalanx rasch auf den Plan rufen. Die »moderner« Mechanismen der erworbenen Immunität müssen im Grunde nur im Notfall greifen, wenn die angeborenen nicht ausreichen. Für Immunreaktionen vom Typ 2 gegen Parasiten und Gifte, um die es hier geht, ist eine solche Mustererkennung jedoch weniger geeignet.

Mikroorganismen und auch Viren verwenden in vielem für sie charakteristische, also bei ihnen verbreitete (»konservierte«) Moleküle, die bei Vielzellern nicht vorkommen. Für sie konnten größere Organismen in der Evolution generelle Erkennungsschemata ausbilden. Doch Würmer und andere vielzellige Parasiten stehen uns evolutionär so nah, dass nur ganz wenige ihrer grundlegenden Stoffwechselprodukte für eine sofortige molekulare Unterscheidung in Frage kommen, darunter Chitin, der Hauptbaustein im Außenskelett vieler wirbelloser Tiere. Würmer stellen zwar für verschiedenste Zwecke besondere Glykoproteine her, allerdings unterscheiden die sich oft von Art zu Art und sind teils zum Überleben des Parasiten nicht einmal wichtig. Ein paar

»Würmer stehen uns evolutionär zu nah, als dass unsere angeborene Immunität ihre Stoffwechselprodukte unbedingt als fremd erkennt«

Beispiele für solche Mustererkennung bei Allergien und Parasiten gibt es dennoch, etwa für Hausstaubmilben, Eier von Schistosomen (parasitischen Saugwürmern), bei Nickelallergie oder Überempfindlichkeit

gegen Erdnüsse. In manchen Fällen, etwa bei Nickel, ist die Reaktion wohl eher Zufall und physiologisch gar nicht vorgesehen.

Wichtiger als das Prinzip der angeborenen Mustererkennung dürfte bei Allergien sein, dass der Organismus den Störenfried an seinem Verhalten und dessen Auswirkungen auf die Gewebe bemerkt. Oft rufen fremde Enzyme eine TH2-Antwort hervor. Das kann eine bestimmte Protease sein wie bei Hausstaubmilben oder Papayas, eine Phospholipase in Bienengift oder eine RNase bei Schistosomeneiern. Auch nichtenzymatische Fremdstoffe werden sicherlich an ihrer Wirkung erkannt. Im Übrigen erzeugen Gewebsschäden schon selbst eine Typ-2-Immunantwort, sogar bei rein mechanischen Hautverletzungen. Bei einem chirurgischen Eingriff steigt der IgE-Spiegel, nicht jedoch der anderer Immunglobuline. Absterbende Zellen des Lungenepithels fördern allergische Entzündungsprozesse. Die IgE-Schiene wird auch bei einigen Giften aktiv, selbst bei winzigen Mengen, etwa im Fall des Rizinuswirkstoffs.

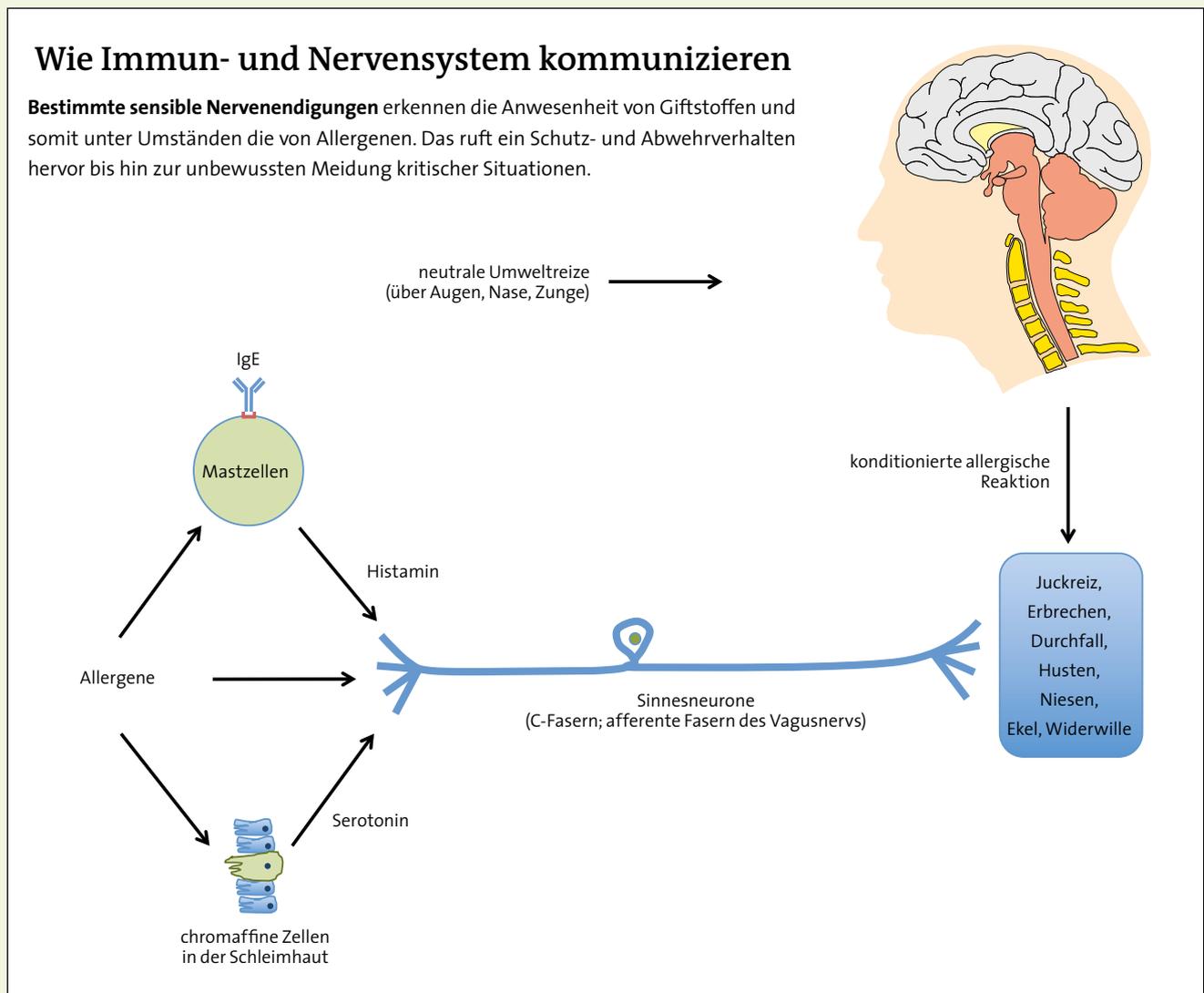
Manche Gefahren entdeckt das Immunsystem offenbar an indirekten Kennzeichen, und teils sogar im Voraus am Geschmack oder Geruch. Das betrifft wohl nicht nur Erreger, sondern auch einige Umweltgifte. Vielleicht dienen gewisse eigentlich ungiftige Allergene als Anzeiger für Schadstoffe. Natürlich kann solch ein Warnsystem mitunter Fehlalarm geben, denn die Detektion über Indizien ist zwangsläufig fehleranfälliger. Trotzdem ist sie wichtig, da sie hilft, Gifte zu meiden oder schnell wieder auszuspucken.

Heuschnupfenanfälle schon beim Anblick von Blumenbildern

Merkwürdigerweise müssen manche Menschen, die gegen eine bestimmte Pflanze allergisch sind, schon niesen, wenn sie nur ein Foto davon sehen. Offensichtlich liegt dann eine Konditionierung vor, also eine erlernte Assoziation. Ärzte haben das Phänomen schon vor über 100 Jahren beschrieben. Nicht nur Bilder, auch harmlose Riech- oder Geschmackseindrücke können Allergiereaktionen auslösen. Das mag zunächst verwundern, doch offenbar kommunizieren das Nerven- und das Immunsystem in dem Fall miteinander.

Bestimmte Schmerzfasern (so genannte C-Fasern) lassen sich sowohl von Signalmolekülen aktivieren, die Gewebsschäden anzeigen, als auch von aggressiven Allergenen, etwa Reizstoffen, Chlor, reaktiven Sauerstoffverbindungen und Umweltschadstoffen. Diese Nervenendigungen geben selbst entzündungsfördernde Substanzen ab – und bringen damit Mastzellen des Immunsystems dazu, ihrerseits kräftig Wirkstoffe auszuschütten. Das verbindet also Gewebsschäden mit allergischen Entzündungen.

Womöglich werden in wurmbefallenen Geweben ebenfalls C-Fasern aktiviert. Zudem können in den Epithelien manche Drüsenzellen, die Botenmoleküle produzieren, Reiz- und Schadstoffe wahrnehmen. Daraufhin in Darm oder Lunge ausgeschüttetes Serotonin beispielsweise regt Fasern des Vagusnervs an, die zum Gehirn führen. Hierüber kommen dann Erscheinungen wie Erbrechen, Niesen oder Durchfall zu Stande. Und nicht zuletzt reagieren C-Fasern außerdem auf Histamin und weitere Signalstoffe von Mastzellen, was den Juckreiz erklärt. Somit stellen die Mastzellen in Verbindung mit IgE-Antikörpern eine Eingangspforte für Nervenempfindungen dar (siehe Kasten unten).



All das erklärt allerdings noch nicht, wieso schon bei winzigsten Mengen eines Allergens oftmals heftigste Reaktionen auftreten. Solche geringen Spuren können dem Körper unmöglich schaden. Vermutlich soll dies jedoch dazu dienen, bei Schadstoffen in der Umgebung, also unter anderem in Luft, Wasser und Nahrung, Alarm zu schlagen. Zuerst muss der Körper dazu Erfahrung mit dem Gift oder Reizstoff machen und spezifische IgE-Antikörper dagegen entwickeln. Dadurch baut sich ein spezifisches Gedächtnis auf – und wegen dieser Sensibilisierung reagiert das Immunsystem später schon auf kleinste Spuren kräftig. Solch eine allergische Antwort bewirkt zweierlei: zum einen Abwehr, Bekämpfung und Beseitigung des Feindes mit allen verfügbaren körperlichen Möglichkeiten, zum anderen aber auch, Ort oder Sache, die einem solche Schwierigkeiten bereiten, künftig zu meiden. Die wiederholte Erfahrung kann sogar bedingen, dass sich ein unbewusstes Gedächtnis aufbaut und wir fortan reflexhaft auf die Situation ansprechen, so dass uns schon beim Anblick eines Nahrungsmittels unwohl oder in einer bestimmten Umgebung mulmig zu Mute wird. Eine Reihe von Tierstudien stützt diese Annahmen.

Eine Allergie unterscheidet sich von anderen Krankheiten darin, dass sie überhaupt nur in Gegenwart des Allergens auftritt. Die beste medizinische Maßnahme ist deswegen, den Stoff komplett zu meiden. Wenn das gelingt, hat der Patient keinerlei Symptome. Auch das spricht für unsere These, dass Allergiereaktionen dazu da sind, für eine zuträgliche Umwelt zu sorgen.

Verschiedene Aspekte bleiben bei unserer Hypothese noch zu klären. So wissen wir nicht, ob es überhaupt Allergene gibt, die an sich als Substanz wirklich harmlos sind. In solchen Fällen wäre die Allergiereaktion ohne jeden Vorteil und eine reine Entgleisung der Immunabwehr, was unserer These widerspricht. Ob ein Allergen wirklich gar kein Schadenspotenzial besitzt, lässt sich allerdings nur schwer prüfen.

Die Mediziner verstehen zudem noch nicht, wieso manche Personen etwa eine Erdnuss- oder Pollenallergie entwickeln und andere nicht. Mit Sicherheit hängt das unter anderem mit genetischen Prädispositionen zusammen, aber so einfach stellen sich die Zusammenhänge trotzdem nicht dar. Schon gar nicht lässt sich die Allergiehäufung in den letzten Jahrzehnten allein genetisch begreifen. Und wieso kann eine Überempfindlichkeit praktisch in jedem Lebensalter plötzlich auftreten und prinzipiell auch irgendwann wieder verschwinden?

Vielleicht kann sich eine Allergie ausbilden, wenn ein Giftstoff zufällig mit einer harmlosen Substanz (einem bislang neutralen Allergen) zusammentrifft. Dann könnte Ersterer quasi als Adjuvans, als Stimulator der Immunabwehr, dienen, das heißt sie für den neuen Stoff sensibilisieren. Einfluss hat

»Zweck von allergischen Reaktionen: Die schlechten Erfahrungen sollen zukünftig dafür sorgen, solche Situationen fortan zu meiden«

aber wohl ebenso, in welchem Grad ein Schadstoff einem Menschen überhaupt zusetzt, wie gut der sich also dagegen zu wehren vermag. Angenommen, eine Person verfügt über effektive physiologische Entgiftungsmechanismen und erichtet außerdem wirksame Hautbarrieren. Bei einer anderen dagegen funktioniert die Entgiftung nicht so gut – aus

genetischen Gründen oder vielleicht nur im Augenblick. Sie ist deswegen mehr oder ganz auf Zell- und Schleimbarrieren angewiesen. Unter Umständen hält das den Schadstoff tatsächlich fern, doch die Maßnahmen können

sich als Allergie manifestieren. Ähnlich scheint es sich zu verhalten, wenn ein wichtiges beteiligtes Molekül genetisch bedingt fehlt, etwa bei Neurodermitis ein Baustein der Haut. Die Erkrankung ist dann Folge von Kompensationsbemühungen.

Über langfristige gesundheitliche Einflüsse von Allergien wissen wir noch sehr wenig. So fördern manche Umweltschadstoffe mit allergenem Potenzial Krebs, und einigen Studien zufolge scheinen Allergiker ein verringertes Risiko für bestimmte Krebsarten zu besitzen. Letztlich könnten unterschwellige Allergiereaktionen bei allen Menschen vorkommen – als etwas ganz Natürliches, ja sogar Lebensnotwendiges. ∞

DIE AUTOREN



Noah W. Palm, Rachel K. Rosenstein und Ruslan Medzhitov (von links) forschen an der medizinischen Fakultät der

Yale University in New Haven (Connecticut) im Department of Immunobiology des Howard Hughes Medical Institute.

QUELLEN

- Karp, C.L.:** Guilt by Intimate Association: What Makes an Allergen an Allergen? In: *The Journal of Allergy and Clinical Immunology* 125, S. 955–962, 2010
- Li, J., Uetrecht, J.P.:** The Danger Hypothesis Applied to Idiosyncratic Drug Reactions. In: *Handbook of Experimental Pharmacology* 196, S. 493–509, 2010
- Profet, M.:** The Function of Allergy: Immunological Defense Against Toxins. In: *The Quarterly Review of Biology* 66, S. 23–62, 1991

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182483

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 adaptiert nach: *Nature* 484, S. 465–472

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Was können die Pflanzen der Zukunft?
Mit welchen Pflanzen ernähren wir die Welt?
Wie wichtig ist die Grüne Gentechnik?

Do **11.04.2013/19.00 / HANNOVER**

FARBE DER HOFFNUNG? –

Grüne Gentechnik und ihre Versprechen

MIT **Prof. Dr. Christian Jung** Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung, Universität Kiel, **Dr. Angelika Hilbeck** Institut für Integrative Biologie, ETH Zürich, **Prof. Dr. Stefan Vidal** Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Universität Göttingen, **Prof. Dr. Michael Schmitz** Professur für Agrar- und Entwicklungspolitik, Universität Gießen
MODERIERT VON **Dr. Daniel Lingenhöhl** Redaktionsleiter Spektrum Online

VERANSTALTUNGSORT Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de

MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Herschel und das Rätsel der strahlenden Wärme

Auf die Idee, Licht und Wärme als dasselbe physikalische Phänomen anzusehen, waren die Naturforscher lange nicht gekommen. Erst Ende des 18. Jahrhunderts ersann der deutsch-britische Astronom Friedrich Wilhelm Herschel die entscheidenden Experimente. So kam er dem Infrarot auf die Spur.

Von Jack R. White

Friedrich Wilhelm Herschel hat die Infrarotstrahlung entdeckt – so steht es in den meisten Nachschlagewerken und Lehrbüchern der Physik. Doch das ist streng genommen nicht korrekt. Vor allem trivialisiert es die wirkliche Leistung des großen Astronomen. Diese ging über den Nachweis einer unsichtbaren Strahlung hinaus, denn Herschel fand mit seinen Experimenten auch die ersten belastbaren Hinweise darauf, dass Licht und infrarote Strahlung ein und dasselbe Phänomen sind – elektromagnetische Strahlung, wie wir heute wissen.

Das elektromagnetische Spektrum reicht von den Gammastrahlen, deren Wellenlängen kleiner sind als der Durchmesser von Atomen, bis hin zu Tausende von Kilometern langen Radiowellen. Von diesem gewaltigen Bereich kann das menschliche Auge nur einen winzigen Ausschnitt wahrnehmen, den Wellenlängenbereich von 0,4 bis 0,7 Mikrometern. Er hat sein Zentrum etwa dort, wo das Strahlungsspektrum der Sonne den höchsten Wert annimmt, die Sonne also ihre größte Leistung abstrahlt. Unsere Haut fühlt darüber hinaus noch einen zweiten Ausschnitt des Spektrums, die Wärme- oder Infrarotstrahlung. Deren Wellenlängen schließen an die

längeren des optischen Lichts an und reichen bis zu einem Millimeter.

Zwei gewichtige Indizien aus unserer Alltagserfahrung sprechen allerdings dagegen, dass es sich bei Licht und Wärmestrahlung um dasselbe Phänomen handelt. Erstens empfangen wir die beiden Strahlungsarten mit unterschiedlichen Sinnen. Zweitens treten Licht und Infrarotstrahlung nicht immer gemeinsam auf: Die meisten Lichtquellen senden zwar auch Wärmestrahlung aus, aber nicht alle Wärmequellen leuchten. Ein vertrautes Beispiel ist ein elektrischer Grill, der zwar heiß ist, aber nicht heiß genug, um sichtbar zu glühen. Diese Unterschiede sind vermutlich der Grund dafür, dass Naturforscher trotz vieler Experimente jahrhundertlang keinen Zusammenhang zwischen Licht und Wärmestrahlung hergestellt haben.

Das gelang erst dem 1738 geborenen Friedrich Wilhelm – oder englisch: William – Herschel. Nachdem er 1757 vor französischen Truppen aus Hannover nach England geflohen war, arbeitete Herschel dort zunächst als Musiker, später aber als Astronom. Ab Mitte der 1770er Jahre konzentrierte er sich auf den Teleskopbau. Sein Interesse an der »strahlenden Wärme« erwachte durch seine Suche nach geeigneten Filtern für eine sichere Beobachtung der Sonne. Die aufschlussreichsten Informationen über Herschels Versuche finden sich in seinen Originalarbeiten. Er scheint viele Anmerkungen und Daten direkt aus den Laboraufzeichnungen in seine Publikationen übernommen zu haben, weshalb sie noch heute frisch und authentisch wirken. Nachdem er mit verschiedenen Kombinationen aus gefärbten und geschwärzten Gläsern experimentiert hatte, schrieb er in einer 1794 bei der britischen Royal Society eingereichten Arbeit über seine Erkenntnisse:

»Bemerkenswert erschien, dass ich Wärme empfand, aber wenig Licht hatte, wenn ich einige davon benutzte. Andere dagegen gaben mir viel Licht, aber kaum eine Wärmeempfindung.«



Friedrich Wilhelm Herschel (hier ein Kupferstich von F. Müller nach Friedrich Rehberg, um 1820) war einer der herausragenden Astronomen seiner Zeit. Er entwickelte leistungsfähige Teleskope und entdeckte den Planeten Uranus sowie die Infrarotstrahlung. In England, wo er ab 1757 lebte, wurde er 1782 von Georg III. zum King's Astronomer ernannt.

Diese Beobachtung führte Herschel zu dem Gedanken, dass »die Fähigkeit, Körper zu erwärmen, sehr unterschiedlich verteilt ist« unter den verschiedenen Farben. Und wenn sich ihr Vermögen unterscheidet, Körper zu erwärmen, so Herschel weiter, dann vielleicht auch ihr Vermögen, Körper zu beleuchten. Er vermutete, dass es eine bestimmte Farbe gäbe, bei der man am besten sehen könne – und eine andere Farbe, die maximal wärmt. Diese beiden Farben würden ihm helfen, einen optimalen Filter für die Sonnenbeobachtung zu finden.

Um seine Hypothesen zu überprüfen, baute Herschel ein Instrument, mit dem er die Stärke von Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen messen konnte. Dessen drei Komponenten waren ein Prisma, durch welches das aus einem Südfenster einfallende Licht in seine Farben zerlegt wurde und auf den Messtisch fiel; ein Stück Karton mit einem Schlitz, der jeweils nur Licht einer Farbe hindurchließ; und Quecksilber-

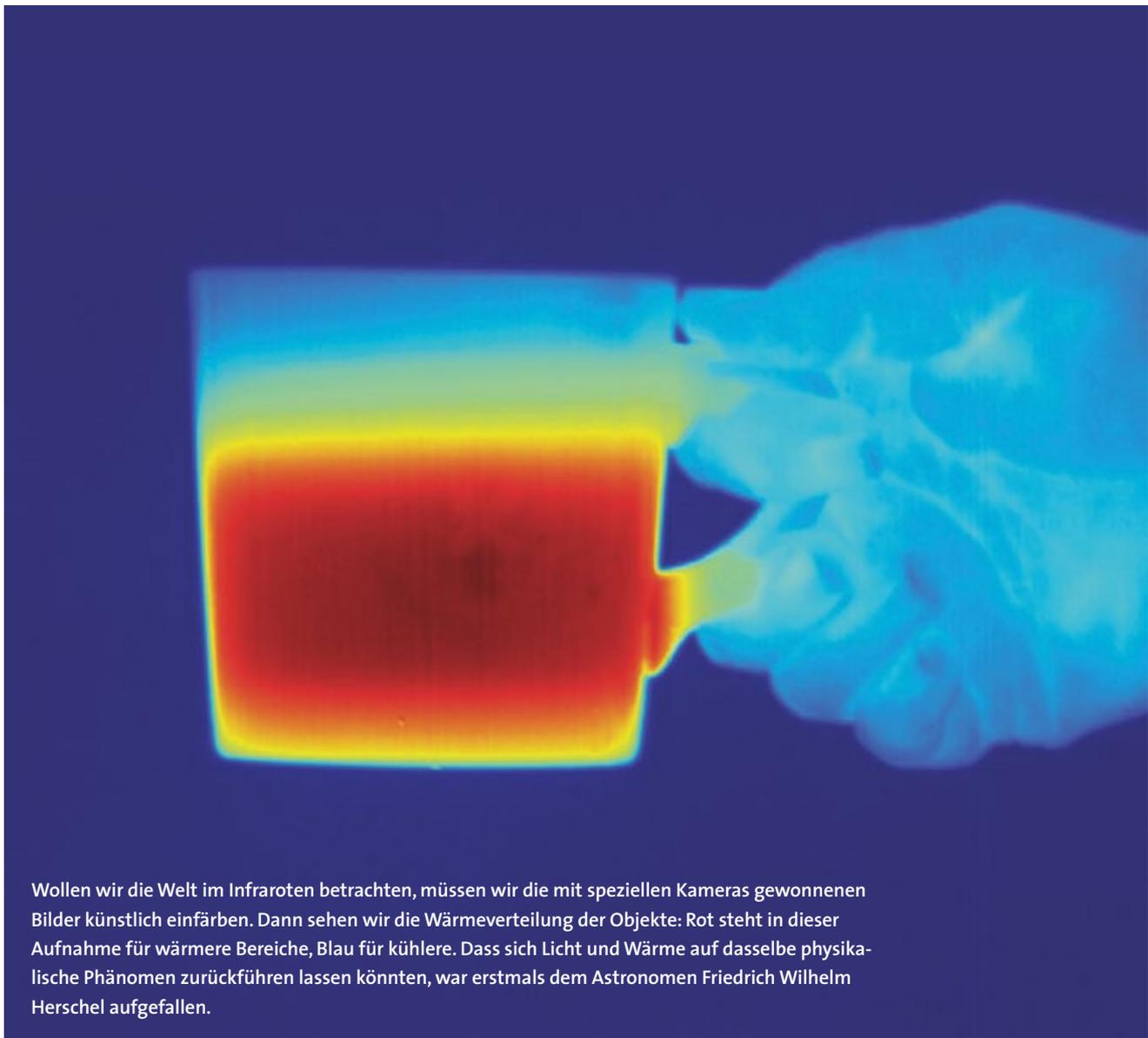
AUF EINEN BLICK

DIE VERMESSUNG DES UNSICHTBAREN

1 **Licht und Wärmestrahlung** sind nicht dasselbe Phänomen – zumindest ist das unsere Alltagserfahrung. Wir nehmen beide Strahlungsarten **mit unterschiedlichen Sinnen** wahr; zudem treten sie nicht immer gemeinsam auf.

2 Erst Friedrich Wilhelm Herschel (1738–1822) vermutete, dass Wärme aus **»unsichtbarem Licht«** bestehen könnte. Zur Prüfung dieser Hypothese entwickelte er Experimente weiter, die einst Isaac Newton ersonnen hatte.

3 Letztlich zog der deutsch-britische Astronom aus seinen Daten zwar die falschen Schlüsse. Dennoch erreichte er weit mehr, als »nur« die **Infrarotstrahlung** zu entdecken.



Wollen wir die Welt im Infraroten betrachten, müssen wir die mit speziellen Kameras gewonnenen Bilder künstlich einfärben. Dann sehen wir die Wärmeverteilung der Objekte: Rot steht in dieser Aufnahme für wärmere Bereiche, Blau für kühlere. Dass sich Licht und Wärme auf dasselbe physikalische Phänomen zurückführen lassen könnten, war erstmals dem Astronomen Friedrich Wilhelm Herschel aufgefallen.

JACK R. WHITE



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Weltraumteleskop »Herschel« kostenfrei heruntergeladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/herschel

Eine Anleitung zum Modellnachbau unter:
www.wissenschaft-schulen.de/herschel/modell



thermometer, deren Kolben geschwärzt waren, damit sie die Strahlung besser absorbierten. Im Jahr 1800 waren Thermometer allerdings noch keine alltäglichen Gegenstände. Herschel besaß nur ein einziges und musste sich zwei weitere von einem Kollegen ausleihen. Eines davon platzierte er im Licht, die zwei anderen als Kontrollinstrumente abseits im Dunkeln. Denn er wusste, dass es »Ursachen gibt, die verschieden wirken« und die Gleichgewichtstemperatur der Thermometer beeinflussen; heute würden wir sagen: Wärmeleitung und Konvektion. Durch die Vergleichsmessungen wollte er diese Ursachen ausschalten und quantitativ die Erwärmung allein durch die Strahlung erfassen.

An einem sonnigen Tag führte Herschel schließlich seine Messungen durch. Es war kühl im Raum – das Vergleichsthermometer zeigte eine Temperatur von 43,5 Grad Fahrenheit, das sind 6,4 Grad Celsius. Der Forscher ging systematisch vor und platzierte das Messthermometer nacheinander in allen Farbbändern. Vor jeder Ablesung wartete er zehn Minuten ab, damit sich ein Gleichgewicht einstellen konnte. Rotes Licht lieferte durchschnittlich zusätzliche 3,8 Grad Celsius, Grün 1,8 und Violett 1,1. Herschel sah seine Hypothese bestätigt:

»Damit ist bewiesen, dass die Fähigkeit der prismatischen Farben zur Erwärmung weit davon entfernt ist, gleichmäßig verteilt zu sein, und die roten Strahlen sind in dieser Hinsicht besonders bedeutend.«

Herschel hätte zufrieden sein können, doch seine Neugier war geweckt

Als Nächstes wollte Herschel herausfinden, bei welcher Farbe die Beleuchtungsstärke maximal ist. Durch ein Mikroskop mit 27-facher Vergrößerung betrachtete er dazu eine Vielzahl kleiner Objekte. Anhand der Helligkeit und Klarheit des wahrgenommenen Bildes beurteilte er dann die herrschende Bestrahlungs- oder Beleuchtungsstärke (illumination oder illuminating power) und auch die Auflösung, die er Unterscheidbarkeit (distinctness) nannte. Hinsichtlich Letzterer kam er zu keinem endgültigen Schluss, wohl aber hinsichtlich der Bestrahlungsstärke:

»Das Maximum der Beleuchtung liegt im kräftigsten Gelb oder schwächsten Grün. Das Grün selbst ist nahezu ebenso hell wie Gelb, aber vom vollen tiefen Grün aus fällt die Stärke der Beleuchtung sehr merklich ab.«

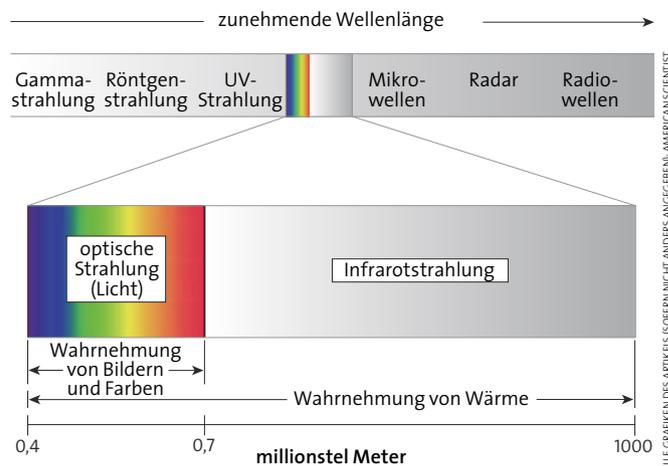
Gelbgrün liegt nahe bei der Wellenlänge, bei der die Bestrahlungsstärke der Sonne ihr Maximum besitzt, und ist zugleich genau derjenige Ausschnitt des Spektrums, in dem die Empfindlichkeit des menschlichen Auges am größten ist. Herschel hätte sich mit diesen Ergebnissen zufriedengeben und einen optimalen Sonnenfilter entwickeln können. Doch seine Neugier war geweckt. Zwar hatte er seine Hypothese bestätigt, dass die Erwärmung von der Farbe abhängt. Aber anders als von ihm erwartet, stieß er nicht auf ein Maximum, sondern auf einen Trend: Die Temperaturen stiegen vom blauen zum roten Ende des Spektrums immer weiter an. Es drängte Herschel, diesen Trend weiterzuverfolgen. Konnte es sein, dass das Maximum außerhalb des sichtbaren Bereichs lag? Dann müsste die Erwärmung eine andere Ursache haben als das Licht. Herschel verwendete den Ausdruck »unsichtbares Licht«, wobei ihm dieser Widerspruch in sich durchaus bewusst war:

»Außerdem komme ich zu dem Schluss, dass das volle Rot noch nicht das Maximum der Wärme ist. Dieses liegt möglicherweise sogar ein wenig jenseits der sichtbaren Lichtbrechung. In diesem Fall bestünde die strahlende Wärme zumindest teilweise, wenn nicht sogar hauptsächlich aus, wenn mir der Ausdruck erlaubt ist, unsichtbarem Licht. Das bedeutet, aus Strahlen, die von der Sonne kommen, aber einen Impuls besitzen, der sie für das Sehvermögen ungeeignet macht.«

Der Begriff des Impulses ist dabei kein Vorgriff auf die Quantenphysik, sondern als Bezug auf Newtons Theorie des korpuskularen Lichts zu verstehen. Herschel wunderte sich allerdings weniger über die Existenz unsichtbarer Strahlen als darüber, dass diese sich so verhielten wie sichtbares Licht:

»Ich muss nun anmerken, dass meine vorgenannten Experimente ohne jeden Zweifel belegen, dass strahlende Wärme, ebenso wie Licht, ob es sich um dieselben oder verschiedene

DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM

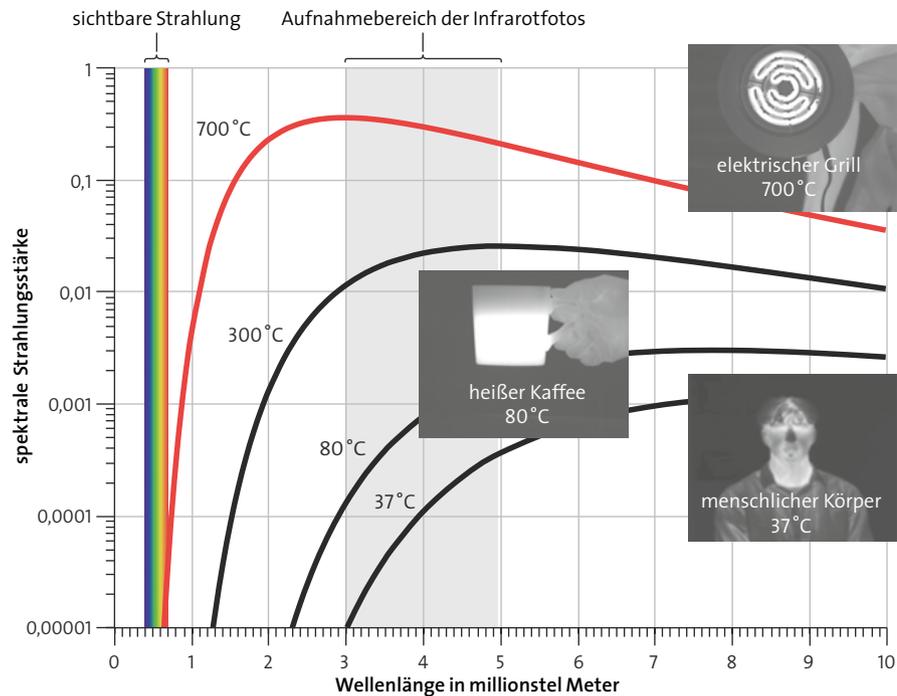


ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS (SO FERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): AMERICAN SCIENTIST

Mit den Augen nehmen wir nur einen winzigen Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum wahr. Die Wärme, die wir mit unserer Haut spüren, stammt teils ebenfalls aus diesem Wellenlängenbereich, vor allem aber aus dem infraroten Spektrum.

Erhitzen bis zur Sichtbarkeit

Erst ab einer Temperatur von etwa 700 Grad Celsius (rote Linie) ist die Wärmestrahlung von Objekten auch im sichtbaren Spektralbereich so intensiv, dass das menschliche Auge sie wahrnimmt. Es gilt: Je höher die Temperatur eines Objekts, desto stärker ist die von ihm ausgehende Strahlung (die Kurve im Diagramm verschiebt sich nach oben) und desto niedrigere Wellenlängen tragen zu ihr bei (Kurve verschiebt sich nach links). Die spektrale Strahlungsstärke gibt die bei einer bestimmten Wellenlänge pro Fläche abgestrahlte Leistung an.



Agenzien handelt, sich nicht nur brechen lässt, sondern auch den Gesetzen der Dispersion folgt, die sich aus ihrer anderen Brechbarkeit ergeben.«

Wenn Licht und strahlende Wärme die gleichen optischen Eigenschaften besitzen, wenn sie sich bei ihrer Wechselwirkung mit Materie also gleich verhalten, könnte das ein Hinweis darauf sein, dass es sich bei beiden um ein und dasselbe Phänomen handelt?

»Muss uns das nicht zu der Vermutung führen, dass strahlende Wärme aus Lichtpartikeln besteht, deren Impulse in einem bestimmten Bereich liegen? Und dass dieser Bereich des Impulses auf beiden Seiten der Brechbarkeit etwas weiter reicht als der des Lichts?«

Diese Fragen beschäftigten Herschel für den Rest des Jahres. Er arbeitete schnell. Schon neun Tage nachdem er seine erste Arbeit geschrieben hatte und noch zehn Tage bevor er diese offiziell vorstellte, schickte er eine zweite, kürzere Arbeit an die Royal Society: »Experimente zur Brechbarkeit der unsichtbaren Strahlen der Sonne«. Dieser Titel war ein Echo auf das II. Theorem der II. Proposition in Newtons Werk »Opticks« von 1730: »Das Licht der Sonne besteht aus unterschiedlich brechbaren Strahlen.«

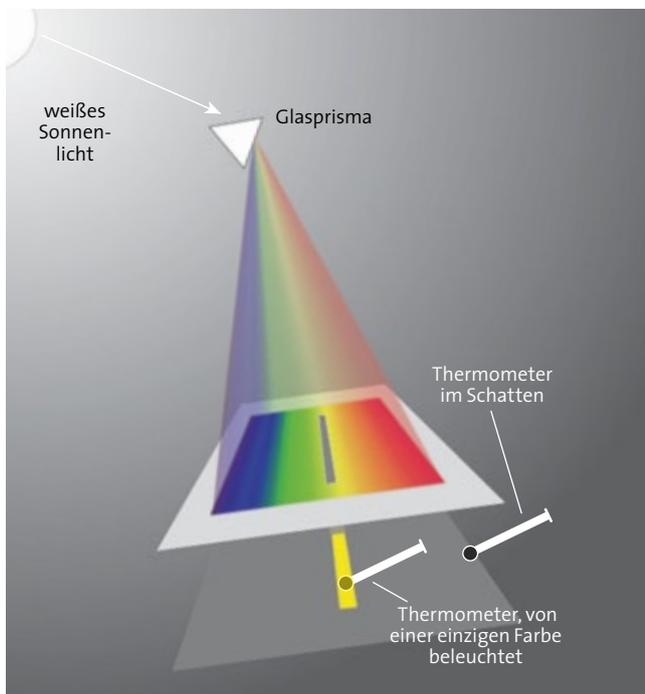
Herschel war von Newton stark beeinflusst. Auch dieser hatte ein Prisma in einem Fenster verwendet, um Farben auf eine Wand zu projizieren. Herschel übernahm seine qualitative Methode zur Betrachtung des Spektrums und machte aus ihr ein quantitatives Instrument. Durchaus zu Recht könnte er dabei das Gefühl gehabt haben, Newtons Arbeit fortzuführen, denn er dehnte das Konzept der unterschiedlichen Brechbarkeit von den Farben des sichtbaren Lichts auf die unsichtbare Strahlung aus.

Dazu modifizierte Herschel seinen Versuchsaufbau so, dass er auch die Temperatur in dem dunklen Bereich messen konnte, der jenseits der Farbe Rot lag. Er zog fünf parallele Linien, jeweils im Abstand von einem halben Zoll, wobei die erste genau am Rand des roten Lichts lag. Auf diesen Linien maß er die Temperatur und folgte so dem Aufwärtstrend bis zum Maximum und darüber hinaus. Man merkt Herschels zweiter Arbeit seine Begeisterung und sein Vertrauen in die Ergebnisse an. Bei der Beschreibung seiner Experimente trifft er nur wenige Feststellungen, die nicht verlässlich von den Daten gestützt werden. Trotzdem beschließt er die Arbeit mit einem auf philosophischen Überlegungen basierenden Argument:

»Wenn wir jene Strahlen, die Objekte beleuchten, Licht nennen, und jene Strahlen, die Körper erwärmen, als strahlende Wärme bezeichnen, dann könnte man fragen, ob sich das Wesen des Lichts von dem strahlender Wärme unterscheidet. Als Antwort darauf schlage ich vor, dass uns die Regeln des Philosophierens nicht gestatten, zwei unterschiedliche Gründe für solche Effekte zuzulassen, die sich mit einem einzigen erklären lassen.«

Ärgerte sich ein berühmter Autor über Konkurrenz durch einen Amateur?

Herschels Reputation als Astronom trug vermutlich dazu bei, dass die meisten Wissenschaftler seine Arbeiten positiv aufnahmen, aber keineswegs alle. Seine dritte Arbeit beginnt mit einer entschieden defensiven Bemerkung; offenbar war er zuvor von jemanden angegriffen worden, den er einen berühmten Autor nennt und der sich an dem Begriff »strahlende Wärme« gestoßen hatte. Bei dem Kritiker könnte es sich um John Leslie gehandelt haben, der als Autorität für das Phänomen Wärme galt und sich über das Eindringen eines



Bei Herschels Experimenten fiel das von einem Prisma erzeugte Farbspektrum auf ein Stück Pappe mit einem Schlitz, der nur Licht einer einzigen Farbe hindurchließ. Ein Thermometer platzierte er im einfallenden Licht, zwei weitere als Kontrollinstrumente im Dunkeln. Durch Vergleich der Messungen fand er die relative Erwärmung gegenüber der Umgebungstemperatur heraus.

Sonne zu uns kommt, sondern durch angenommene Schwingungen eines elastischen Äthers, der überall im Raum verteilt ist. Ich beanspruche lediglich für die Strahlen, die Wärme hervorrufen, dasselbe Privileg, das sie jenen zugestehen, die Objekte beleuchten.»

Die Kritik an seinen Arbeiten blieb nicht ohne Folgen. In der zweiten Hälfte von Herschels dritter und letzter Publikation zu diesem Thema verlagerte sich der Schwerpunkt von der Suche nach Ähnlichkeiten zwischen Licht und strahlender Wärme auf die Suche nach Unterschieden zwischen beiden Phänomenen. In dieser Arbeit zieht er eine Reihe von Vergleichen zwischen Licht und strahlender Wärme. Der erste betrifft die menschliche Sinneswahrnehmung beider Strahlungen. Die nächsten fünf befassen sich mit den um 1800 bekannten Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie: Reflexion, Refraktion, »unterschiedliche Brechbarkeit« (Dispersion), Transmission durch lichtdurchlässige Körper und Streuung an rauen Oberflächen.

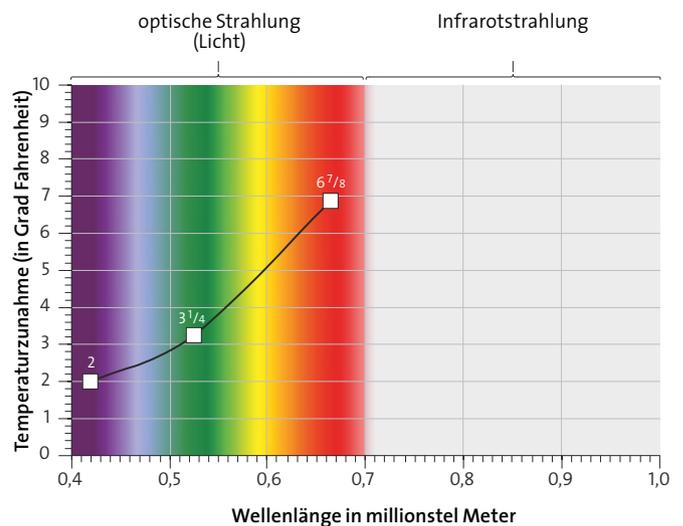
Herschel führte über 200 verschiedene Experimente durch, um die Eigenschaften von Licht und strahlender Wärme miteinander zu vergleichen. Neben Prismen und Quecksilberthermometern kamen Linsen, Spiegel und transparente Materialien in unterschiedlichen Konfigurationen zum Einsatz. Wieder und wieder bestätigte er, dass Licht und strahlende Wärme identische optische Eigenschaften besitzen.

»Amateurs« in sein Fachgebiet wohl ärgerte. In einem Brief, veröffentlicht in »A Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts by William Nicholson«, schrieb Leslie:

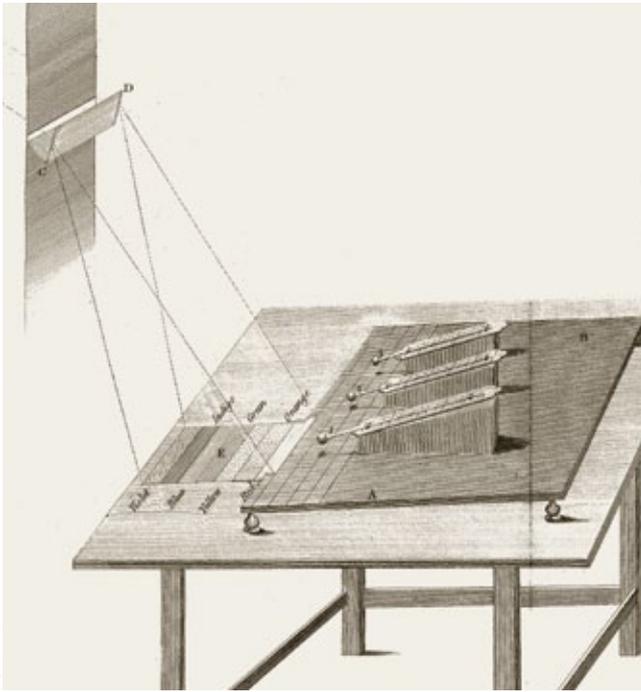
»Es scheint, dass dieser fähige Astronom, als er seine neuen Untersuchungen aufnahm, weder Geräte verwendet hat, die der Feinheit des Untersuchungsgegenstands angemessen sind, noch sich gegen die zahlreichen und verborgenen Fehlerquellen geschützt hat. Ich fühle mich dazu berechtigt, mit größerer Überzeugung zu sprechen, da ich seit Langem meine Forschungen in die gleichen Kanäle ausgerichtet habe ... ich zögere deshalb nicht, zu behaupten, dass Dr. Herschels Hauptaussagen auf trügerischen Beobachtungen beruhen ... und wie auch immer meine Empfindungen bezüglich seiner Schlussfolgerungen sein mögen, unterwerfe ich mit ruhiger Entschlossenheit und unparteilich die angeblichen Tatsachen der Prüfung durch Experimente. Als ein Photometer außerhalb des Spektrums platziert wurde ... war keinerlei Effekt wahrzunehmen.«

Wenn Leslie's differenzielles Thermometer – von ihm als Photometer bezeichnet – tatsächlich keine Erwärmung jenseits des sichtbaren Lichts festgestellt hat, dann hat es sehr schlecht funktioniert. Von der Royal Society durchgeführte, unabhängige Experimente haben das später klar belegt. Um weiterer Kritik zuvorzukommen, sprach Herschel dennoch nicht mehr von »strahlender Wärme«, sondern von »den Strahlen, die Wärme hervorrufen«. Aber bereits mit seiner Verwendung des Strahlenbegriffs stand Herschel im Widerspruch zu konventionellen Überzeugungen über das Licht. Hinsichtlich dieses Punkts versuchte er, seine Kritiker mit einer Herausforderung zum Schweigen zu bringen:

»Ich muss außerdem anmerken, dass meine Verwendung des Begriffs Strahlen weder bedeutet, dass ich der Meinung jener Philosophen widerspreche noch diese unterstütze, die immer noch glauben, dass das Licht nicht als Strahlen von der



Wie Herschel mit seinen Messungen belegte, ist die Fähigkeit des Lichts, Körper zu erwärmen, ungleichmäßig über das Spektrum verteilt. Den größten Wert vermutete er jenseits des roten Streifens auf seinem Messtisch. Das Diagramm zeigt seine originalen Temperaturmesswerte; die Wellenlängen wurden nachträglich ermittelt.



JACK R. WHITE

Im letzten Teil der Arbeit wirft Herschel die Frage auf, ob strahlende Wärme, zumindest wenn sie ausreichend stark ist, einen optischen Sinneseindruck hervorrufen kann. Eine umfassende Antwort würde erklären, warum Licht und Wärme gewöhnlich gemeinsam auftreten, Wärme aber auch ohne Licht registriert werden kann. Mit seinem 18. Experiment belegte der Forscher immerhin zweifelsfrei, dass eine Erhöhung der Intensität infrarote Strahlung nicht sichtbar macht.

Das rasante Tempo seiner späten Experimente führte möglicherweise dazu, dass er Zusammenhänge übersah oder falsch interpretierte – insbesondere, nachdem er begonnen hatte, nach Unterschieden Ausschau zu halten statt nach Ähnlichkeiten. Im Fall von Wärmestrahlung, so zeigte er in einem Versuch, ist die Brennweite einer Sammellinse länger als im Fall von Licht. Doch er bemerkte nicht, dass dieser Unterschied durch denselben Effekt der Dispersion verursacht wird, der auch bei einem Prisma auftritt.

Zu einer ähnlichen Fehlinterpretation kam Herschel bei einer Untersuchung der Streuung. Seine Experimente zeigten – völlig korrekt –, dass Licht stärker gestreut wird als Infrarotstrahlung. Er sah darin jedoch kein Indiz für die Abhängigkeit der Streuung von der Wellenlänge, sondern einen Hinweis darauf, dass Licht und Wärmestrahlung unterschiedlicher Natur sind.

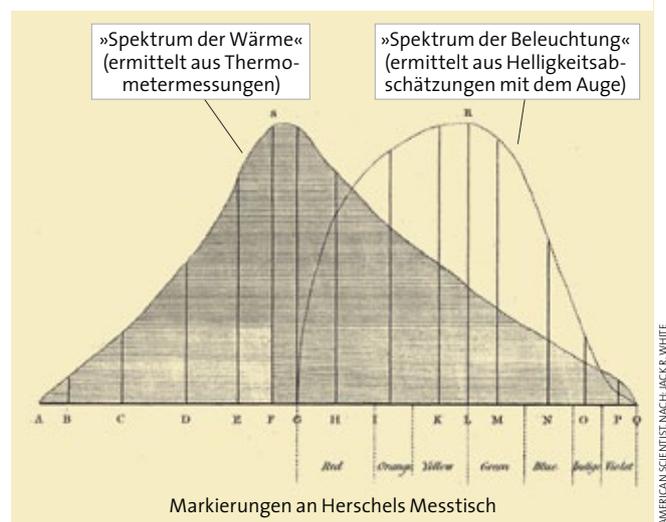
Herschel war nur eingeschränkt in der Lage, seine Entdeckungen auch mathematisch zu beschreiben, denn er hatte die Wissenschaft erst spät für sich entdeckt. Ursprünglich Musiker und Komponist, interessierte er sich erst für Astronomie, als er den Hofastronomen Nevil Maskelyne kennen lernte. Weil ihm die Qualität der zeitgenössischen Fernrohre für die Beobachtung von Sternen und Planeten nicht ausreichte, begann er, selbst Spiegel zu schleifen und Teleskope

Nachdem er sein Experiment abgewandelt hatte, konnte Herschel seine Messungen auch in den unsichtbaren Bereich hinein ausdehnen. Wie er vermutete, steigt das Maß der Erwärmung des Thermometers vom sichtbaren in den unsichtbaren Bereich hinein stetig an und durchläuft schließlich ein Maximum. Um quantitative Ergebnisse zu erzielen, unterteilte der Forscher seinen Messtisch mit parallelen Linien.

zu bauen. Herschels Stärke war deshalb weniger die wissenschaftliche Einsicht in die Ursachen der Phänomene als vielmehr profunde Kenntnis der Optik, kombiniert mit handwerklichem Geschick bei der Herstellung von Instrumenten.

Seine am 6. November 1800 vorgestellte abschließende Arbeit zum Thema Wärmestrahlung enthält das erste Diagramm, das die spektrale Verteilung von sichtbarem Licht und infraroter Strahlung zeigt. Herschel bezeichnete die Kurven als »Spektrum der Beleuchtung« und »Spektrum der Wärme« (von infrarotem Licht sprach man erst ab den 1880er Jahren). Die vertikale Achse repräsentiert die gemessenen Temperaturen und die wahrgenommenen Helligkeiten. Um die Kurven vergleichbar zu machen, wählte er die Maßstäbe so, dass die Maxima beider Kurven die gleiche Höhe besaßen. Da Herschel das Konzept der Wellenlänge noch fehlte, trug er auf der horizontalen Achse die gemessenen Abstände seiner – mit Buchstaben bezeichneten – Messlinien ab. Im Gegensatz zur heute üblichen Konvention steigt dadurch die Wellenlänge im Diagramm von rechts nach links an.

Herschels Kurven sind das Werk von Vorstellungskraft, Erkenntnisfähigkeit und monatelanger mühsamer Arbeit – und völlig irreführend. Vermutlich war es ihre Form, die ihn schlussfolgern ließ, dass Licht und strahlende Wärme eben doch grundlegend verschiedene Phänomene sind:



AMERICAN SCIENTIST, NACH JACK R. WHITE

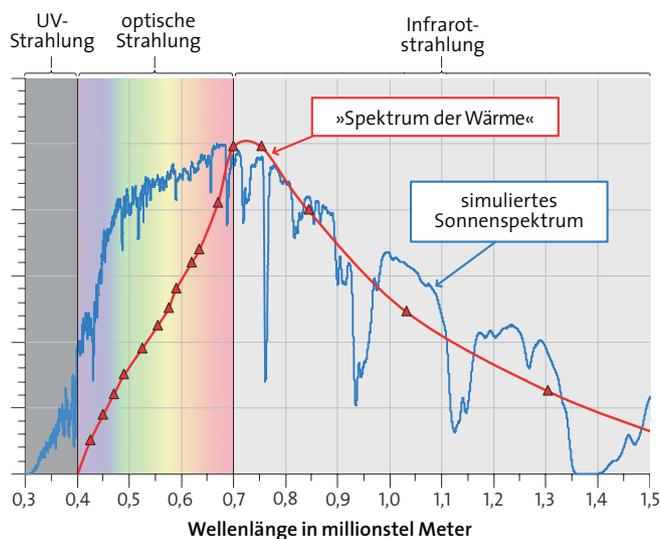
Herschels abschließende Veröffentlichung aus dem Jahr 1800 enthält dieses Diagramm des »Spektrums der Wärme« und des »Spektrums der Beleuchtung«. Die Wellenlänge nimmt darin von rechts nach links zu. Die Maßstäbe wählte der Forscher so, dass die Maxima beider Kurven dieselbe Höhe besaßen.

»Die bloße Inaugenscheinnahme der beiden Kurven ... versetzt uns bereits in die Lage, zu erkennen, wie unterschiedlich das Prisma die Wärme erzeugenden Strahlen und jene, die Beleuchtung hervorrufen, über die Flächen ... unserer beiden Spektren verteilt! Diese Strahlen stimmen weder in ihrer mittleren Brechbarkeit noch in der Lage ihrer Maxima überein. Bei R, wo wir das meiste Licht haben, ist nur wenig Wärme; und bei S, wo wir die meiste Wärme haben, finden wir überhaupt kein Licht!«

Selbst heute ist es schwierig, Herschels Diagramm zu betrachten, ohne den Eindruck zu gewinnen, dass Licht und strahlende Wärme zwei grundverschiedene Arten von Strahlung sind. Die Kurven sind beide akkurat, aber sie zeigen Größen, die nahezu unabhängig voneinander sind und überhaupt nicht zusammen dargestellt werden dürften. Herschels Fehler lag nicht in seinen Daten, sondern in seiner Annahme, dass die beiden Kurven miteinander vergleichbar seien.

Um die Qualität von Herschels Spektren zu beurteilen, benötigen wir den Stand der Sonne am Ort und zur Zeit seiner Messungen. Herschel lebte damals in Slough in der Grafschaft Berkshire im Süden von England. Angaben über Datum und Uhrzeiten der Messungen finden sich in seinen Aufzeichnungen nicht, aber die Spektren stammen vermutlich von seinen ersten Experimenten Ende Februar oder Anfang März 1800. Slough liegt auf einer nördlichen Breite von 51,5 Grad, die Sonne stand demnach mittags in einer Höhe von etwa 61 Grad.

Die Jahreszeit beeinflusst die Lage des Maximums der Bestrahlungsstärke. Im Sommer liegt es näher am Mittelpunkt des sichtbaren Bereichs, im Winter hingegen, wenn der Weg des Sonnenlichts durch die Atmosphäre länger ist, ver-



Herschel maß erstaunlich präzise. Das zeigt der Vergleich zwischen seinem in Wellenlängen umgerechneten »Spektrum der Wärme« und einem simulierten Sonnenspektrum, das mit plausiblen Annahmen über Beobachtungsort, -zeit und das verwendete Prisma erzeugt wurde. Allerdings ist sein Spektrum zu höheren Wellenlängen hin verschoben. Das liegt vor allem an der nichtlinearen Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge, von der Herschel noch nichts wusste.

schiebt die atmosphärische Streuung das Maximum zum Roten hin. Mit Hilfe eines numerischen Modells können wir auf Basis dieser Daten das Spektrum der Sonnenstrahlung berechnen, das auf Herschels Prisma gefallen sein dürfte.

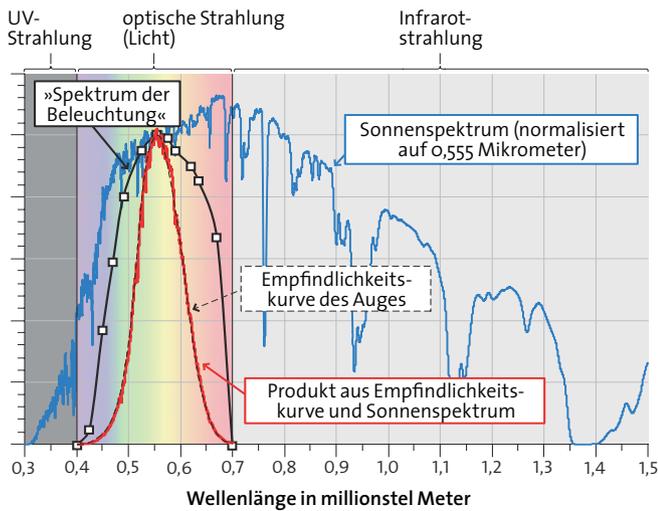
Hier stoßen wir auf die nächste Schwierigkeit: Um Herschels Messlinien in Wellenlängen umzurechnen, müssen wir die Dispersion des Prismas kennen. Herschel zeichnete zwar die Temperaturen äußerst genau auf, notierte aber nicht, welches seiner zahlreichen Prismen aus Kron- und Flintglas er verwendete. Die beste Anpassung an seine Daten lässt sich mit einem 60-Grad-Prisma aus Kronglas erzielen.

Herschel fehlte das Konzept der Wellenlänge

Im Vergleich zu dem so rekonstruierten Sonnenspektrum zeigt Herschels Kurve zum einen eine zu geringe Intensität im sichtbaren Bereich, zum anderen eine auffällige Verschiebung des Strahlungsmaximums aus dem sichtbaren in den infraroten Bereich. Ursache für die Diskrepanz dürfte die Nichtlinearität des Prismas sein, dessen Brechungsindex mit zunehmender Wellenlänge immer langsamer abnimmt. Dadurch fällt allmählich ein immer größerer Wellenlängenbereich auf jeden Zentimeter des Messtisches als bei kürzeren Wellenlängen. Heute können wir diese Nichtlinearität korrigieren. Herschel konnte das nicht, allein schon weil er das Konzept der Wellenlänge nicht kannte. Trotz dieser Widrigkeiten lieferten seine Messungen zwei revolutionäre Ergebnisse: Das von ihm ermittelte »Spektrum der Wärme« bestätigte seine erste Hypothese, nach der die Fähigkeit des Sonnenlichts, Körper zu erwärmen, nicht gleichmäßig über das Spektrum verteilt ist. Seine zweite Hypothese, wonach Licht und strahlende Wärme zwei Facetten ein und desselben Phänomens sind, wird dadurch unterstützt, dass die Kurve vom sichtbaren in den unsichtbaren Bereich hinein stetig verläuft.

Wieso war nun die Darstellung seiner Daten so irreführend? Da Herschel ursprünglich auf der Suche nach einem idealen Sonnenfilter war, der maximale Lichtdurchlässigkeit mit minimaler Hitzeentwicklung kombinierte, lag es für ihn nahe, die Spektren der Beleuchtung und der Wärme im gleichen Diagramm aufzutragen. Aber obwohl seine Messung der Beleuchtung sehr akkurat war, zeigte sie nicht das, was er erwartet hatte. Herschel fehlte die heute selbstverständliche Erkenntnis, dass die Empfindlichkeit jedes Detektors – auch die des menschlichen Auges – nicht über den gesamten Messbereich hinweg konstant ist. Messinstrumente messen nämlich nicht den tatsächlichen Wert einer physikalischen Größe, sondern diesen Wert multipliziert mit ihrer Empfindlichkeit bei diesem Wert. Um vom Messergebnis auf den tatsächlichen Wert zu schließen, muss ein Experimentator daher die so genannte Empfindlichkeitskurve seines Instruments kennen.

Herschel ging dagegen davon aus, dass das von ihm gemessene Beleuchtungsspektrum die tatsächliche spektrale Verteilung des Sonnenlichts repräsentiert. Doch ganz unabhängig vom tatsächlichen Sonnenspektrum müssen Messungen mit bloßem Auge stets den Wert null ergeben, wenn sie außerhalb des Empfindlichkeitsbereichs des menschl-



Das von Herschel gemessene »Spektrum der Beleuchtung« (schwarze, durchgezogene Linie) zeigt keinerlei Ähnlichkeit mit dem Sonnenspektrum (blau) im sichtbaren Bereich. Kein Wunder: Er hatte nicht berücksichtigt, dass die Empfindlichkeit jedes Detektors – auch des menschlichen Auges – vom Messbereich abhängt. Er maß also nicht das Sonnenspektrum selbst, sondern nur das Produkt (rot) aus Sonnenspektrum und Empfindlichkeitskurve des Auges (schwarz gestrichelt). Letztere dominiert dabei so stark, dass dieses Produkt praktisch identisch mit der Empfindlichkeitskurve selbst ist.

chen Auges liegen. Innerhalb des Wahrnehmungsvermögens sind die Messungen dagegen das Produkt des Sonnenspektrums mit der jeweiligen Empfindlichkeit des Auges. Die Grafik oben zeigt, dass ein durch visuelle Beobachtung gemessenes Spektrum im Wesentlichen die Empfindlichkeitskurve des Auges und nicht den spektralen Verlauf des Sonnenlichts zeigt. So erklärt sich auch, dass er bei der Farbe Gelbgrün das Maximum des Spektrums ermittelte – genau dort, bei einer Wellenlänge von 0,555 Mikrometern, befindet sich nämlich das Empfindlichkeitsmaximum des Auges. Mehr noch: Herschel wäre zu exakt demselben Ergebnis gekommen, selbst wenn das Sonnenspektrum im optischen Bereich konstant verlaufen würde. Anders gesagt: Als er aus seiner Kurve den Schluss zog, dass das Licht nicht gleichmäßig über die Farben verteilt ist, traf er zwar eine korrekte Feststellung – aus seinen Daten folgte sie aber nicht.

Das irreführende Aussehen der Kurven und die unterschiedlichen Sinnesempfindungen, die Licht und Wärme auslösen, gewannen bei Herschel schließlich die Oberhand über seine sorgfältig gesammelten Belege. Er kam zu dem Ergebnis, dass die beiden Strahlungen doch verschiedene Phänomene sein müssten. Wieder zog er philosophische Überlegungen heran, diesmal aber, um gegen seine eigenen ursprünglichen Gedanken zu argumentieren:

»Es scheint kein Brauch der Natur zu sein, ein und denselben Mechanismus für zwei unserer Sinne zu nutzen ... Sollten wir dann im Gegensatz dazu behaupten, dass der gleiche Mechanismus der Grund ist für solch unterschiedliche Sinnesindrücke wie die feinfühligste Empfindung des Sehens und die größte aller Affektionen, die den größten Teilen unseres Körpers gemein ist, wenn sie Wärme ausgesetzt sind?«

Ein solches Argument würde heute allerdings niemand mehr gelten lassen, und vermutlich klang es bereits im Jahr 1800 schwach. Doch immerhin diente es dazu, die Suche zu einem Abschluss zu bringen.

Herschel selbst war sicherlich enttäuscht. Aber er hatte mehr erreicht, als ihm oder einem seiner Zeitgenossen bewusst war. Er hatte entdeckt, dass strahlende Wärme die gleichen optischen Eigenschaften besitzt wie Licht. Er hatte seine Hypothese bestätigt, dass das Vermögen von Strahlen, Objekte zu erwärmen, nicht gleichmäßig über das Spektrum verteilt

ist. Und er hatte die erste Messung der spektralen Intensität vom sichtbaren in den unsichtbaren Bereich hinein durchgeführt und dabei festgestellt, dass es sich um eine glatte, stetige Kurve handelt.

Unser heutiges Verständnis der elektromagnetischen Strahlung nahm mit Herschels einfachen Messungen der Temperaturen im Sonnenlicht seinen Anfang, entwickelte sich durch die mathematische Beschreibung des Spektrums durch James Clerk Maxwell im Jahr 1861 weiter und kam 1900 durch Max Plancks Formulierung der Quantentheorie zum Abschluss. Auch wenn es Herschel nicht gelungen war, zu beweisen, dass Licht und strahlende Wärme ein und dasselbe Phänomen sind, lieferten seine Experimente doch starke Indizien und waren ein erster Baustein, auf dem andere Forscher aufbauen konnten. ~

DER AUTOR



Jack R. White arbeitete mehr als vier Jahrzehnte lang auf dem Gebiet der Infrarotradiometrie. Bis zu seiner Pensionierung leitete er eine Arbeitsgruppe für Infrarotmessungen des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums. Jetzt ist er Berater für Datenanalyse in der Infrarotradiometrie.

QUELLEN

- Barr, E. S.:** Historical Survey of the Early Development of the Infrared Spectral Region. In: American Journal of Physics 28, S. 42–54, 1960
- Dreyer, J. L. E. (Hg.):** The Scientific Papers of Sir William Herschel. Royal Astronomical Society, London 1912
- Holden, E. S.:** Sir William Herschel, his Life and Works. W. H. Allen, London 1881
- Lovell, D. J.:** Herschel's Dilemma in the Interpretation of Thermal Radiation. In: Isis 59, S. 46–60, 1968

WEBLINKS

<http://tchester.org/znet/calculations/herschel/index.html>
Caltech-Forscher T. Chester vollzog 1999 Herschels Experimente nach.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168629

Lautlose Explosionen

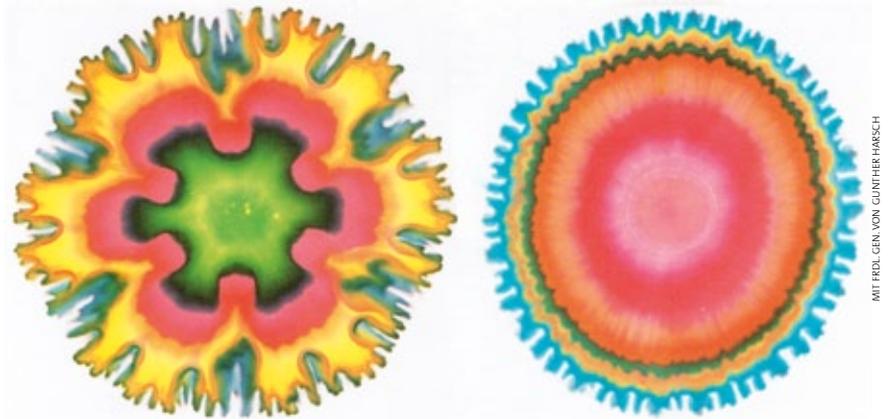
Blieben Sie gelassen, wenn sich Rotwein über das weiße Tischtuch ergießt. Denn dabei können Sie einen komplexen Strukturbildungsprozess studieren.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»**K**ippen Sie als Experiment doch mal ein halbes Glas Wein auf einem frisch gestärkten Tischtuch um. Beobachten Sie völlig absorbiert, wie die Ränder des Flecks ihren Weg nach außen suchen, dabei jede ausgedörrte Baumwollkapillare Fädchen um Fädchen sättigen und dann weiterziehen – eine lautlose, glückliche Explosion ohne bewegliche Teile.«

Der Ausbreitung eines Rotweinflecks schaut nicht jeder so gelassen und interessiert zu wie der Protagonist von Nicholson Bakers Roman »U&I«. Vielmehr dürften sich die meisten von uns aufgeregt der Schadensbegrenzung widmen. Denn wenn Flecken auf saugfähigen Materialien wie Tischtüchern entstehen, breiten sie sich radial nach außen aus. Dabei kann selbst die gleichmäßige Verschmutzung einer größeren Fläche zu ausgeprägten Mustern führen (Foto unten). In den Vertiefungen des von einem kurzen Regenschauer getroffenen Kissens sammelte sich Wasser, drang in das Gewebe ein, löste dort Schmutzpartikel und trieb sie so lange nach außen vor sich her, wie der Nachschub an Wasser reichte.

Nicholson Baker ist allerdings nicht der Erste, der Flecken Positives abzuge-



MIT FOLGEN VON GÜNTHER HARSCH

Mit ein wenig Aufwand lassen sich recht komplexe Rungebilder »zeichnen«. Hier wurden Lebensmittelfarbstoffe auf mit Kupfersulfat imprägniertes Papier geträufelt. Links: Gezielt platzierte Tropfen Speiseöl behinderten stellenweise den kapillaren Fluss. Rechts: Die Farben wurden nacheinander aufgetropft und konnten ungehindert nach außen wandern.

winnen vermag. Schon der Chemiker Friedlieb Ferdinand Runge (1794–1867) schenkte ihnen wissenschaftliche und künstlerische Aufmerksamkeit, zumindest wenn sie auf die beschriebene Weise entstanden. Ihm war die kreative Weise ins Auge gefallen, in der Zufall und Notwendigkeit – Unregelmäßigkeiten im Gewebe einerseits und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lösung andererseits – bei diesem Strukturbildungsvorgang zusammenspielen.

Den von ihm selbst so genannten »Professorenklecksen« ging er aller-

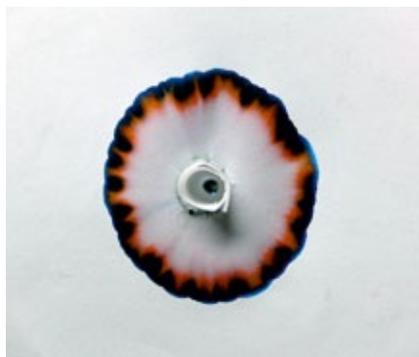
Dieses Sitzkissen ist durch einen Regenguss zwar gleichmäßig nass geworden, dennoch bekam es Flecken. Denn in den Kuhlen sammelte sich Wasser, das Schmutzpartikel mit Hilfe von Kapillarkräften radial nach außen beförderte.

dings nicht auf gestärkten Tischtüchern nach, sondern auf saugfähigem Papier. Er beträufelte es mit farbigen chemischen Lösungen, so dass sich die darin gelösten Stoffe nach allen Seiten ausbreiteten. Weil deren jeweilige chemische Beschaffenheit ihre Wechselwirkung mit Lösungsmittel und Papier und damit ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit beeinflusste, legten sie vom Startpunkt aus pro Zeiteinheit ganz unterschiedliche Entfernungen zurück – so ergaben sich nach Farben getrennte und von Irregularitäten im Papier weiter modifizierte Ringstrukturen.

Diese Vorgänge lassen sich mit einfachen Mitteln nachstellen. Dazu trüpfelt man Wasser auf gewöhnliches Filterpapier und beobachtet, wie sich der entstehende Fleck nach allen Seiten ausbreitet. Die Transportwege sind die länglichen Hohlräume (Kapillaren) zwi-

Betrachte die Flecken an der Wand, die Asche im Ofen, die Wolken oder den Rinnstein. Beim genauen Beobachten wirst du dort Wunderbares entdecken.

Leonardo da Vinci (1452–1519)



schen den Fasern des Papiers. Ein Naturgesetz sorgt dafür, dass das Wasser »von selbst« in die Kapillaren eindringt und im Lauf der Zeit eine wachsende Papierfläche benetzt. Denn bei diesem Vorgang entstehen neue Grenzflächen zwischen Wasser und Kapillarwänden. Sie sind energieärmer als die jeweiligen Grenzflächen mit der Luft, so dass bei ihrer Entstehung Energie an die Umgebung abgegeben werden kann. Genau diese Energieabgabe ist es, welche die Natur gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu maximieren sucht.

»Professorenkleckse« gezielt herstellen

Mit dem jeweiligen Lösungsmittel breiten sich auch die darin gelösten Stoffe aus. Allerdings ist nun ein dritter Reaktionspartner in Form des Papiers im Spiel, und die gelösten Stoffe diffundieren zufallsgesteuert zwischen Papier und Lösungsmittel hin und her. Je nach ihrer Beschaffenheit lagern sie sich dabei vorzugsweise an Ersteres an – was sie abbremst –, oder aber es zieht sie mehr zum Wasser; dann breiten sie sich mit diesem weiter aus.

Wer Professorenkleckse gezielt herstellen will, sollte die unterschiedlichen Anlagerungsprozesse kennen. Bei chemischer Bindung an das Papier muss der gelöste Stoff eine recht hohe Aktivierungsenergie mitbringen. Die Anlagerung erfolgt meist irreversibel, weil sie die Struktur seiner Elektronenhülle verändert. Ist ein Stoff aber nur physikalisch adsorbiert, wechselt er leicht ins Lösungsmittel zurück, um sich später vielleicht erneut zu binden. Denn dann

Ein Blatt Filterpapier (von oben gesehen) sowie ein hindurchgesteckter »Docht« aus demselben Papier, der auf der Unterseite in ein Wasserglas ragt, reichen aus, um das Schwarz eines Filzstiftkreises in Blau, Gelb und zwei Rottöne zu trennen.

ist nur eine schwache, durch Dipolkräfte verursachte so genannte Van-der-Waals-Bindung beteiligt, die sich schnell wieder lösen kann.

Kommt die Ausbreitung mangels Nachschub an Flüssigkeit schließlich zum Erliegen, sind unterschiedliche Stoffe an jeweils anderen Stellen auf der Strecke geblieben; genau dies macht den Reiz des Vorgangs aus. Ästhetisch wirkungsvoll wird das Experiment, wenn man Farbe in die Angelegenheit bringt. Im einfachsten Fall schneidet man in das Filterpapier ein rundes Loch, klemmt einen »Docht« aus aufgerolltem Filterpapier hinein und zeichnet um ihn herum einen Filzstiftkreis (Fotoserie oben). Das Ganze wird so auf ein Glas mit Wasser gelegt, dass der Docht ins Wasser eintaucht und Flüssigkeit nach oben zieht.

Besonders interessante Farbverläufe erhält man mit braunen und schwarzen Farben, da diese aus mehreren anderen gemischt werden. Auf diese Weise können Bilder entstehen, wie sie ähnlich schon Runge gesehen hat. Das Prinzip lässt sich mit vielen Tricks ausbauen, wie das etwa die Chemiker Günther Harsch und Heinz Bussemas getan haben (Fotos links und Quellen).

Aus der anfänglichen ästhetischen Spielerei hat sich längst ein chemisches Analyseverfahren entwickelt. Mit der Papierchromatografie lassen sich selbst sehr kleine Mengen chemisch ähnlicher und schwer trennbarer Farbstoff-

gemische separieren. Die modernen Varianten des Verfahrens wie die Dünnschicht- und die Gaschromatografie sind nicht einmal mehr auf farbige Substanzen oder auf saugfähiges Papier angewiesen, sondern machen die Stoffe etwa mit speziellen Reagenzien oder Spektroskopie sichtbar.

Unerschrockene können natürlich weiterhin auf Wein und Tischtücher zurückgreifen. Sehen sie dann verschwommene Farbfelder, war der Wein wohl in Ordnung; entstehen hingegen eindrucksvolle Muster, wurden ihm künstliche Farbstoffe beigemischt. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Baker, N.: U & I. Wie groß sind die Gedanken? Rowohlt, Reinbek 1998, S. 220
Harsch, G., Bussemas, H. H.: Bilder, die sich selber malen. Aulis, Köln 2003

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1146809



Unser besonderer Tipp:



LCD DELUXE DIGITAL MIKROSKOP Mikroskop mit Digitalkamera und TFT Touchscreen

Vergrößerungsbereich 40x bis 1600x, Einzelbildaufnahme und Filme, universelles Netzteil, 110–240 Volt mit Adaptern für fast alle Länder, 6-Volt-Batterie-pack für mobilen Einsatz (4 AA-Batterien, nicht enthalten), Tragetasche, Gewicht: 1,7 kg, Celestron

Bestell-Nr. 3770 € 299,-

Das Deluxe Digital-Mikroskop ist das weltweit erste digitale LCD-Mikroskop mit 3,5-Zoll-Touchscreen!

Diese Screen ist um 180° drehbar ist – so können Sie die Bilder leicht anderen Zuschauern zeigen. Die eingebaute Digitalkamera ermöglicht Einzelbilder oder kurze Filme, die Sie im internen Speicher oder auf einer optionalen SD-Karte speichern und auf den PC überspielen können.

Weitere Details zum Artikel und umfangreiches Zubehör finden Sie im Internet unter:

www.science-shop.de/mikroskopie



NIGHT VISION LED Rotlicht- Taschenlampe

Hersteller: Celestron

Bestell-Nr. 3689

€ 14,95

Hochwertige Rötlichtleuchte mit zwei stufenlos regelbaren LEDs – das Standardwerkzeug für jeden Hobbyastronomen. Wenn die Augen des Beobachters einmal an die Dunkelheit adaptiert sind, sollte nur noch mit Rotlicht hantiert werden. Dies weitet die dunkel adaptierten Pupillen am wenigsten und reicht aus, um alle wichtigen Arbeiten in der Dunkelheit vorzunehmen. Die Lieferung erfolgt inkl. 9-V Batterie.



ZAHLEN AM LAUFENDEN METER

Albrecht
Beutelspachers
Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x
2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.



ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren des Biskuitporzellans erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!

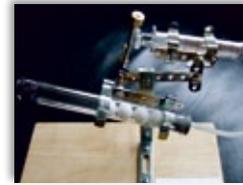


CHARLES DESIGN-NUSSKNACKER Polykarbonat/Aluminium, mit aussergewöhnlicher Mechanik zum Nüsseknacken, schwarz

Design: Ralf Webermann, 62 x 70 mm,
Gewicht: 145 Gramm, Troika

Bestell-Nr. 2842 € 32,90

Lieben Sie Nüsse? Wenn Sie bisher dachten, Nüsse zu knacken wäre eine lästige Angelegenheit, belehrt Sie CHARLES eines besseren. Ein verblüffendes und sauberes Prinzip: Die Nüsse werden mittels Schleuderkraft im Deckel geknackt. Die Nussschalen werden sauber aufgefangen – keine Krümel mehr auf dem Tisch!



STIRLINGMOTOR WIRO 1.0 BAUSATZ Basis-Set

2011, mit ausf. bebildeter Bauanleitung mit Infos zu Historie und Funktion, eduwerk

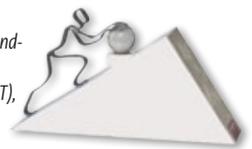
Bestell-Nr. 3272 € 32,90

Ein Motor mit Charakter! Das Modell besticht durch hervorragende Laufeigenschaften schon bei geringer Energiezufuhr. Es kann mit einer Spiritusflamme beheizt werden, aber ebenso mit einem Teelicht oder mit gebündelter Sonnenstrahlung.

Der 'Verdränger'kolben' besteht aus Kugeln, deren Anzahl von 1 bis 7 verändert werden kann. Durch Variationen ergeben sich unterschiedliche Lauf- und Bewegungseigenschaften, die einen Unterhaltungswert haben. Der Bausatz ist auch sehr gut für Schüler ab 12 Jahren geeignet. Aufbauzeit: ca. 60 Min.

LERNEN WIR VON SISYPHOS Sandsteinobjekt

Zinkfigur von Hand gebogen, Sandsteinsockel von Hand gegossen, Größe: 11 x 20 x 3,5 cm (H x B x T), Gewicht: 620 g, invocem



Bestell-Nr. 3662 € 39,90

Aufgaben, die trotz großer Mühen so gut wie nie erledigt werden, nennt man Sisyphosarbeit. Das Objekt ist eine Erinnerung, größere Projekte in abgrenzbaren Schritten zu erledigen und diese Schritte immer wieder abzusichern. Diese Absicherung symbolisiert der in den Sockel eingelassene Keil.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



ASTROSOLAR SONNENFILTER- FOLIE

Für die visuelle
Beobachtung am Fern-
glas, Teleskop oder
an der Kamera

Größe: 20 x 30 cm, Neutrale
Dichte: OD = 5,0, Baader-
Planetarium

Bestell-Nr. 3753

€ 25,-

Durch diese Folie können Sie gefahrlos in die Sonne schauen – auch und gerade mit optischen Instrumenten. Eine ausführliche Anleitung, die Ihnen zeigt, wie Sie sich mit Hilfe dieser Folie einen sicheren Filter basteln können, liegt bei. Diese Folie aus absolut blasen- und schlierenfreien Trägermaterial wird beidseitig mit reflektierenden Schichten bedampft. Dadurch wird erreicht, dass die Folie keine gefährlichen Fehlstellen aufweisen kann und ein kontrastreiches und farbneutrales Sonnenbild geliefert wird.

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet,
Könitz Porzellan



WISSENSBECHER ASTRONOMIE

Bestell-Nr. 3786 € 9,95

WISSENSBECHER BIOLOGIE

Bestell-Nr. 3787 € 9,95

WISSENSBECHER INFORMATIK

Bestell-Nr. 3788 € 9,95

Die Wissensbecher gibt es auch zur Mathematik, Physik und Chemie. Sie finden sie hier:
www.science-shop.de/wissensbecher

Bequem
bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



LEONARDO DA VINCI VITRUV MANN, HOLZBAUSATZ

Einzelteile: 13, L x B x H: 210 x 210 x 290 mm, Maßstab: 1 : 16, Revell

Bestell-Nr. 3433 € 29,95

Für viele war Leonardo der große Humanist der Renaissance. Er versuchte alles über den Menschen nachzuvollziehen – Proportionen, Funktionen und Emotionen. Seine berühmteste Studie hierzu ist der Vitruv-Mann. Er stellt ein echtes Stück Kunstgeschichte dar, das nun erstmals als Holzmodell erhältlich ist.



FLEDERMAUSDETEKTOR ZUM SELBERBAUEN

Inhalt: Buch und alle Bauteile, zusätzlich benötigt werden: LötKolben für den Aufbau, 9-V-Batterie (nicht enthalten), Franzis

Bestell-Nr. 1929 € 29,95

Belauschen Sie die Natur mit moderner Elektronik! Die Platine des Bausatzes ist bereits mit zahlreichen SMD-Bauelementen bestückt. Sie müssen nur noch wenige Teile selbst einlöten und die Platine mit Mikrofon, Lautsprecher und den Einstellreglern verdrahten. Moderne integrierte Schaltungen sorgen für hohe Empfindlichkeit und Lautstärke. Mit dem fertigen Detektor lassen sich die Ultraschall-Rufe von Fledermäusen hörbar machen. So können Sie diese faszinierenden Flugkünstler in der Dunkelheit auch dort aufspüren, wo sie sonst völlig unbemerkt auf der Jagd nach Insekten sind.



PEN ULTIMATE

Bestell-Nr. 1667 € 13,90

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.



DIE KNOTENBOX 50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wertvollen Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.



NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker, Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 € 199,-

Das Night Eye ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. Night Eye ist kompakt und mit einer Hand bedienbar.



POWERLUX – LEUCHTLUPE KALTWEISS

Linsengröße: Ø 58 mm, cera-tec®, Vergrößerung: 28 dpt / 7x

(Doppellinse), punktgenaue Ausleuchtung, Abschaltautomatik nach 30 Min., Lichtfarbe: kaltweiß, ca. 8000 K, Hartschaum-etui. Benötigt werden 3 Mignon Batterien, im Lieferumfang enthalten, made in Germany, Eschenbach

Bestell-Nr. 3476 € 99,-

Die neue Generation der Leuchtlupe – in einer neuen geometrischen Gestaltung. Die einzigartige und vertraute Form der Computermaus hat sich millionenfach bewährt und sorgt für eine entspannte Handhaltung auch bei längerem Gebrauch.

- liegt sehr gut in der Hand
- sehr einfache, intuitive Führung auf dem Lesegut durch kompakte Bauform
- gleichmäßig helle und blendfreie Ausleuchtung durch zwei SMD-LED



DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfcondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50



Carmen Skupin

ABENTEUER ELEKTRONIK

2012, Set aus Bauteilen und Buch, 24 S. m. zahlr. farb. Abb., ab 8 Jahren, Franzis

Bestell-Nr. 3742 € 29,95

Ob drinnen oder draußen, bei Tag oder Nacht, in diesem Set aus Buch und Bauteilen finden Kinder ab 8 Jahren immer das richtige Elektronikabenteuer.

Das Einzigartige an diesem Bastelbuch: alle elektrischen Teile sind bereits enthalten und die restlichen Materialien lassen sich in jedem Haushalt finden. Carmen Skupin will mit diesem Experimentierbuch Mädchen und Jungen für Elektronik begeistern.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Thomas Riegler

DAS GROSSE RETRO-RADIO-BAUBUCH

2012, 32seitiges Buch und alle Bauteile für ein Mittelwellenradio im Retro-Stil, ohne Löten, Franzis

Bestell-Nr. 3757 € 29,95

Das dekorative Retro-Gehäuse lässt Ihr fertiges Radio fast wie ein original Grundgerät Modell 2012 aussehen. Zusätzlich brauchen Sie nur noch eine 1,5-V-Batterie Typ AA (nicht enthalten), und schon kann es losgehen! Und im Begleitbuch: Alles, was zum Bau Ihres Radios und zum Verständnis seiner Technik notwendig ist, auf 30 Seiten mit großen, farbigen Abbildungen und Grafiken.



Ulrich E. Stempel

LERNPAKET STROM MIT WINDENERGIE Grundlagen der Windenergie mit 20 Experimenten

2011, 21 Bauteile u. Buch,

im Paket enthalten: Motor, Windflügel, Messinstrument, Steckplatine, Elkos, LEDs und viele weitere Spezialbauteile, Franzis

Bestell-Nr. 3256 früher € 49,95, jetzt nur € 29,95

Dieses Lernpaket vermittelt die Grundlagen zum Thema Windenergie und führt Sie mit spannenden Experimenten zu vielen interessanten und praktischen Einsatzmöglichkeiten. Die Versuche bauen aufeinander auf, so dass Sie mit geringem Zeitaufwand zum Ziel kommen. Zusätzlich zu den theoretischen Grundlagen können Sie selbst Versuche aufbauen und damit die technischen Vorgänge rund um die Windenergie praktisch nachvollziehen – und das alles ohne Löten.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Bequem bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Die erstaunliche Wiederkehr der Traditionellen Chinesischen Medizin

Im Grunde wollten die chinesischen Machthaber ihre eigene Medizin zu Gunsten einer modernen Heilkunst loswerden. Doch dann verschaffte ausgerechnet der Westen der TCM eine unverhoffte Renaissance.

Von Paul U. Unschuld

W er einmal versucht, mit Google das Alter der so genannten Traditionellen Chinesischen Medizin zu bestimmen, wird auf höchst widersprüchliche Angaben stoßen. Da ist etwa von »jahrtausendealter Heilkunde« die Rede, an anderer Stelle von »drei-«, »vier-«, ja selbst »sechstausend Jahre alter Medizin«. Der Legendenbildung wurde hier offenbar Tür und Tor geöffnet.

Tatsächlich gibt es für einen Historiker keine großen Unklarheiten über die Ursprünge der Chinesischen Medizin, denn er kann sich auf archäologische Funde in zahlreichen Gräbern aus dem 2. Jahrhundert v. Chr. berufen. Demnach wurde in China seit prähistorischen Zeiten eine Heilkunde überliefert, die bereits damals, wie die in den Gräbern entdeckten Schriften belegen, einen höchst eindrucksvollen Entwicklungsstand erreicht hatte. Mehrere hundert Substanzen pflanzlicher, tierischer und mineralischer Herkunft, aber

auch künstlich hergestellte Dinge – zum Beispiel Wagenschmiere oder Strohmatte – dienten der Behandlung einer großen Bandbreite von Krankheiten und Verletzungen.

Aufbereitet wurden sie mittels einer komplizierten pharmazeutischen Technologie sowie auf verschiedene Arten verabreicht, etwa als Pillen, Waschlotionen oder so genannte Aufkochungen. Ein einigermaßen kohärenter theoretischer Hintergrund für diese Therapien lässt sich nicht erkennen. Von magischen Bezügen und Bemühungen, Dämonen aus dem Körper zu vertreiben, ist in den Schriften zwar reichlich die Rede, doch lassen sie sich mit den ausgefeilten pharmazeutischen Verarbeitungen der Natursubstanzen nicht in Verbindung bringen.

Ab dem 2. Jahrhundert v. Chr. entstand dann eine ganz neue Form der Heilkunst, die wir heute als Medizin im engeren Sinn bezeichnen. Eine Gruppe von Intellektuellen formte seinerzeit die Vorstellung, der Mensch solle sein Schicksal in die eigenen Hände nehmen. Diese Zeitgenossen postulierten, dass für Qualität und Länge des menschlichen Lebens Naturgesetzmäßigkeiten verantwortlich seien, nicht aber Dämonen oder Ahnen, wie es die seinerzeit herrschende Weltanschauung einer extremen existenziellen Fremdbestimmung behauptete.

Die damaligen Anfänge der chinesischen Naturwissenschaften schwankten zwischen zwei Polen. Einmal einer Methodik, wie sie sich auch schon zwei, drei Jahrhunderte zuvor im östlichen Mittelmeerraum entwickelt hatte: nämlich das Wesen der Dinge über eine Analyse ihrer kleinsten Bausteine zu ergründen. Andererseits verfolgten sie den in China letztlich erfolgreicherem Ansatz, es über das Verhältnis aller Dinge untereinander zu erkennen.

Bis zum Einbruch westlicher Wissenschaft und Technologie im 19. und frühen 20. Jahrhundert ging China zwei Jahrtausende lang diesen zweiten Weg. An Stelle der analytischen Naturwissenschaft, wie sie sich in Europa durchsetzte, wurde das Werden, Sein und Vergehen aller Phänomene mit einer ebenfalls rein säkularen, aber »relationistischen« Naturge-

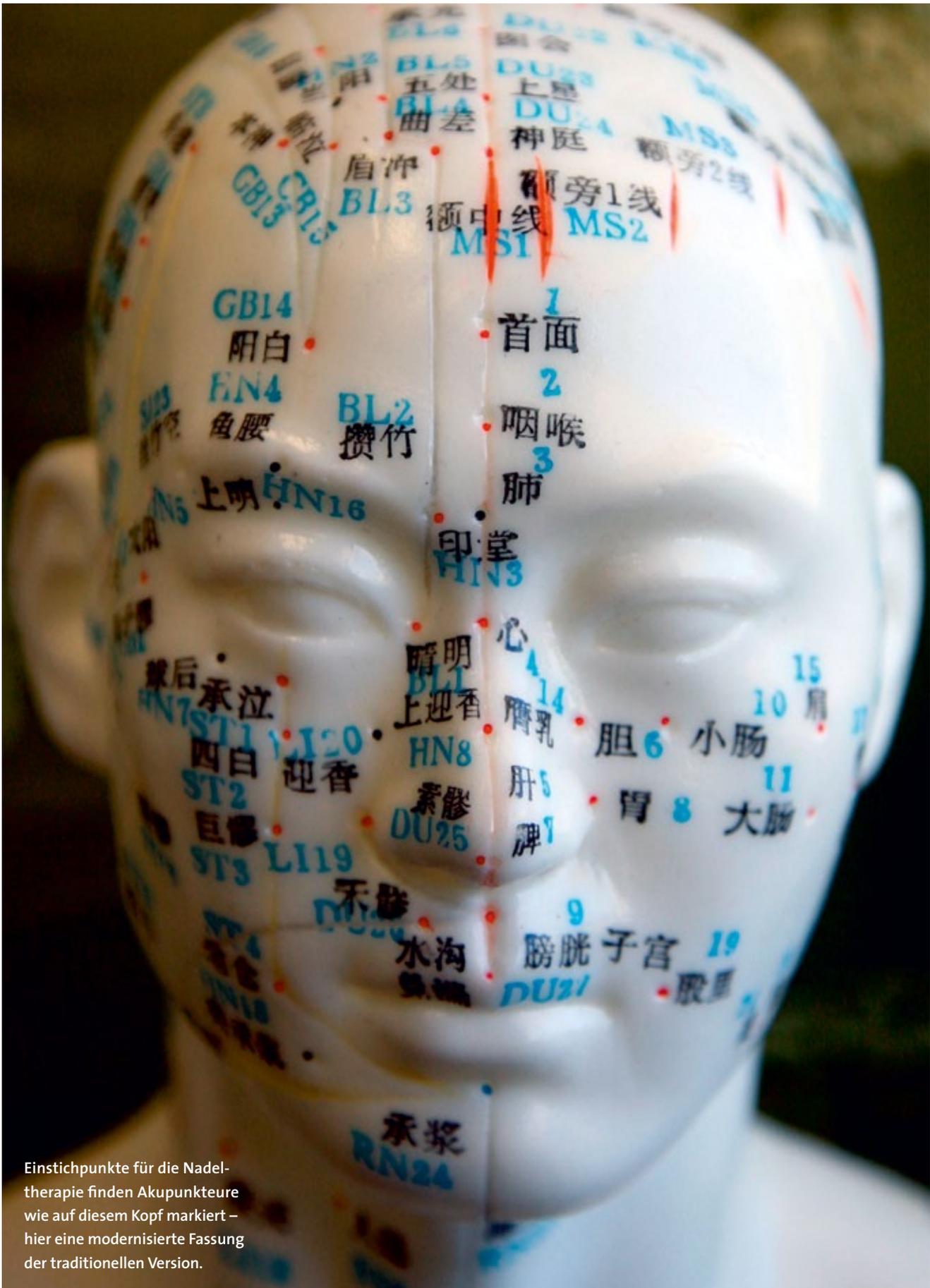
AUF EINEN BLICK

ZWISCHEN TRADITION UND MODERNE

1 Die historische **Chinesische Medizin** wird von der Politik im eigenen Land als unwissenschaftlich und fortschrittsfeindlich angesehen, ja als Gefahr für die Modernisierung Chinas. Seit Gründung der Volksrepublik im Jahr 1949 unterstützt die Regierung Bemühungen, sinnvolle und nützliche Elemente zu identifizieren und in die moderne, auf biologische Naturwissenschaften gegründete Medizin zu integrieren.

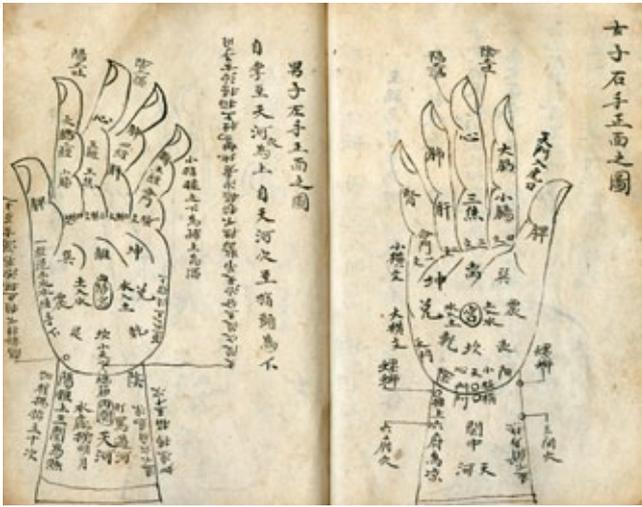
2 Mit der Öffnung Chinas in den 1970er und 1980er Jahren erfuhr die **TCM** jedoch im Westen eine unerwartete Popularität, die allerdings anfangs auf **mangelnder Sachkenntnis** beruhte.

3 Behörden, Geschäftsleute und akademische Einrichtungen in China reagierten auf das Interesse im Westen. Die Regierung verbreitet seitdem ihre Deutung der TCM als zukünftigen **Teil der Schulmedizin**. Chinesische Firmen exportieren mit wachsendem Erfolg Arzneipflanzen. Universitäten und private Initiativen bieten westlichen Ärzten, Heilpraktikern und Laien teure Einführungen in die TCM an.



DREAMSTIME / JENNIFER WALZ

Einstichpunkte für die Nadeltherapie finden Akupunkteure wie auf diesem Kopf markiert – hier eine modernisierte Fassung der traditionellen Version.



Die diagnostische Aussagekraft der Hände von Männern (links) und Frauen (rechts) beschreibt hier ein Arzt der Chinesischen Medizin in einer Notiz. Die Quelle stammt vom Anfang des 20. Jahrhunderts.

setzlichkeit erklärt. Sie bedeutet, dass alle greifbaren und erdenklichen Dinge in Gruppen eingeteilt werden, deren Einzelteile von derselben Art sind. Alle gleichartigen Einzelteile verhalten sich somit vergleichbar. Die einzelnen Gruppen – zwei, vier, sechs oder auch zwölf in der Yin-Yang-Lehre; fünf in der Fünf-Phasen-Lehre – verhalten sich zueinander nach ganz bestimmten Gesetzmäßigkeiten.

Ab dem 2. Jahrhundert v. Chr. wendeten die chinesischen Gelehrten diese Art der Weltsicht auch auf die Deutung von Krank- und Gesundsein an. Dabei mussten sie – eine Parallele zu Europa – stets und bis in die jüngste Gegenwart mit einer anderen Weltanschauung konkurrieren, die der Vorstellung einer existenziellen Selbstbestimmung widersprach: Wenn die Naturwissenschaftler ihre Maxime als »Mein Schicksal liegt in meinen Händen, nicht im Himmel« formulierten, dann antworteten ihre Gegenspieler mit dem Slogan »Die Planungen des Menschen sind nichts gegen die Planungen des Himmels«.

Das Bild der Gesellschaft prägten einerseits Konfuzianer und Legisten, also solche, die gesellschaftliche Harmonie durch Forderungen nach der Einhaltung einer ausgefeilten Morallehre und klarer Gesetzesvorgaben zu erreichen suchten; andererseits die Daoisten, die solche kulturellen Zwänge ablehnten und, zumindest in den Anfangsjahren, der Meinung waren, das einfache Leben in und mit der Natur sei das friedlichste. Die neue Medizin Chinas stand dem Konfuzianismus und Legismus näher als dem Daoismus. Sie lehrte, der Mensch müsse seinen Gefühlen Grenzen setzen und sein Leben in Einklang mit den Naturgesetzen führen, um mit Gesundheit belohnt zu werden.

Die Daoisten hielten mit der Ansicht dagegen, dass Krankheit etwas völlig Natürliches sei und man noch so viele Gesetze befolgen und dennoch erkranken könne. Die Law-and-

Order-Medizin der Konfuzianer und Legisten konzentrierte sich auf die Lebensführung, um Gesundheit zu bewahren, und führte die Akupunktur ein, um leichte Befindlichkeitsstörungen zu beheben. Vielfach war die Nadelbehandlung nichts anderes als ein Aderlass, der mit dem Blut gefährliche Pathogene entfernen sollte.

Die daoistische Heilkunde hingegen erweiterte kontinuierlich ihre Kenntnis der Substanzen, welche die Natur zur Therapie von Erkrankungen zur Verfügung stellt. Unzählige Rezepturen wurden im Volk mündlich und in der gedruckten Literatur überliefert, um allen möglichen Leiden wirksam zu begegnen. Während die Akupunktur im Gesamtspektrum der therapeutischen Verfahren stets von bestenfalls zweitrangiger Bedeutung blieb und lediglich im Jahr 1601 ein einziges großes Sammelwerk hervorbrachte, lieferte die chinesische Arzneikunde den eigentlichen Rückhalt für diese Therapien.

Viele Arzneibücher der Zeit zeigen, wie sich die Kenntnisse laufend erweiterten; schließlich, im 16. Jahrhundert, enthielten sie bis zu 2000 Beschreibungen einzelner Substanzen. Sie wurden ergänzt durch Rezeptsammlungen mit bis zu 60000 Vorschriften. Diese Handbücher waren nur die sichtbarsten Leuchttürme einer von Jahrhundert zu Jahrhundert heterogeneren heilkundlichen Landschaft. Ab dem 14. Jahrhundert schien sie – wie auch die europäische Medizin – die Orientierung zu verlieren und splitterte in divergierende Einzelmeinungen und Modeströmungen auf. Bereits 1754 verkündete der Arzt und Autor Xu Dachun (1693–1771), ein Zeitgenosse des italienischen Pathologen Giovanni Battista Morgagni (1682–1771), dass die Akupunktur eine verlorene Tradition sei. Auch die Herrscher stimmten ihm bei: 1822 verkündete die Regierung, die Nadeltherapie werde nicht mehr kompetent angewendet und sei daher zu meiden.

Der Generalsekretär und die Unwissenheit der Ärzte

Im Jahr 1915 verfasste Chen Duxiu einen »Appell an die Jugend« seines Landes. Darin beschuldigte der spätere Mitbegründer und erste Generalsekretär der Kommunistischen Partei Chinas nicht zuletzt die Ärzte der Chinesischen Medizin der beklagenswertesten Unwissenheit – ein Akt der Verzweiflung. Seit 70 Jahren hatten die westlichen Mächte England, Frankreich, USA, Russland, Deutschland, Spanien, Portugal, Holland und zum Schluss auch noch das kleine Inselreich Japan dem Land China eine Demütigung nach der anderen zugefügt und seine territoriale wie auch politische Integrität immer weiter eingeschränkt.

Chinas Reformen und Revolutionäre sahen nur einen Ausweg. China müsse, wie Japan bereits erfolgreich demonstriert hatte, die westlichen Wissenschaften und Technologien sowie deren kulturelle Grundlagen studieren und übernehmen. Erst dann könne es wieder als »Reich der Mitte« erstarren und unabhängig agieren.

Chen Duxiu und seine Mitstreiter fanden starke Worte, um die eigenen Traditionen mitverantwortlich für den Nie-

dergang Chinas zu machen. Damit stand die Chinesische Medizin in ihrem Heimatland im Mittelpunkt ätzender Kritik. Anstatt die Leiden der Menschen zu heilen, sei die traditionelle Heilkunde Chinas selbst ein Teil der Krankheit, hieß es. Um diese zu überwinden, davon waren zu Beginn des 20. Jahrhunderts nahezu alle Reformer gleich welchen politischen Lagers überzeugt, müsse auch die Chinesische Medizin so schnell wie möglich von der Bildfläche verschwinden.

Die Schriftsteller Lu Xun (1881–1936), Ba Jin (1904–2005) und andere prangerten die aus ihrer Sicht hohlen Diagnosen und katastrophalen Therapien der traditionellen Ärzte in ihren Novellen an, wobei sie offenbar auch eigene Erfahrungen verarbeiteten. Der Autor des ersten Slapstickfilms Chinas »Die Liebe eines Obsthändlers« (1922) musste nicht lange

suchen, um einen Berufsstand zu finden, den er in Übereinstimmung mit seinem Publikum der Lächerlichkeit preisgeben konnte – die traditionellen Ärzte.

Ein Versuch seitens der Politik, ein entsprechendes Verbot durchzusetzen, lief Ende der 1920er Jahre jedoch ins Leere. Nach der Gründung der Volksrepublik China im Jahr 1949 sah auch Mao Tse-tung keine Möglichkeit, dem Treiben der von der Politik ungeliebten, aber im Volk nach wie vor verwurzelten traditionellen Ärzte ein schnelles Ende zu setzen. Man müsse die Tradition, so der »Große Vorsitzende«, künftig als eine »Schatztruhe« ansehen, deren Schätze es allerdings erst einmal zu identifizieren gelte. Die offizielle chinesische Politik richtet sich nach dieser Maxime zwar bis in die Gegenwart – aber die Realitäten entwickelten sich ganz



Lei Gong, legendärer Ahnherr der pharmazeutischen Technologie der Chinesischen Medizin, wacht über die Aufbereitung diverser Natursubstanzen. Die Darstellung stammt aus einem chinesischen Manuskript des 16. Jahrhunderts.

anders als geplant. Von Beginn der 1950er bis zur Mitte der 1960er Jahre tagte eine Kommission, um aus dem heterogenen Erbe der traditionellen chinesischen Heilkunde brauchbare »Schätze« zu heben.

Welche Anteile waren es wert, in einem modernen sozialistischen Staat bewahrt zu werden, der moderner Wissenschaft und Logik verpflichtet war? Die Mitglieder der Kommission waren in der Mehrzahl Ärzte der westlichen Medizin. Ihr Weltbild schlug sich in den Empfehlungen nieder, die schließlich zu der Konstruktion einer »Traditionellen Chinesischen Medizin (TCM)« führte – einem ideologisch motivierten Kunstprodukt mit Versatzstücken der Geschichte.

Die Behörden versprachen sich davon, den Wirrwarr religiöser und weltlicher Konzepte sowie therapeutischer Praktiken abzulösen. Ihre tragfähigen Elemente sollten auf Resten traditioneller Konzepte allmählich in ein Erklärungsmodell moderner, sprich westlicher Medizin übergehen. Der Besuch des US-Präsidenten Richard Nixon in China im Jahr 1972 und die folgende Öffnung Chinas unter der Ägide Deng Xiaopings machten die Lage jedoch komplizierter, als es die politischen Strategen erwartet hatten.

Im Westen setzten die Berichte über durchaus vorhandene, geradezu mysteriöse Heilerfolge der Akupunktur einen wahren Strom interessierter Ärzte, Heilpraktiker, Laien und Politiker nach China in Gang. Sogar die CIA zog Erkundigungen ein über den militärischen Nutzen der angeblich so wirksamen Akupunktur-Anästhesie. Noch heute finanziert das US-Militär großzügig Akupunkturstudien. Nun steht allerdings weniger die bestenfalls marginale analgetische Wirkung der Nadelbehandlung im Operationssaal im Blick, sondern mehr ihr Nutzen zur Behandlung von posttraumatischen Stresserkrankungen bei Soldaten mit Kampfverletzungen.

Bald erschienen in den USA und Europa Bücher über die alternative Heilkunde aus dem Fernen Osten. Sie wurden zu Bestsellern. Für viele Leser stellte diese Lehre das lange ersehnte Gegenprogramm zu der auf Chemie und Technologie gegründeten Medizin des Westens dar.

Dummerweise wurden die frühen Erfolgsbücher von Autoren verfasst, die weder über ausreichende chinesische

Sprachkenntnisse verfügten noch sich in chinesischer Medizingeschichte auskannten. Auch hatten diese »Experten« gar keine Möglichkeit, längere Zeit die tatsächliche klinische Praxis in China zu verfolgen. So glaubten sie stattdessen einfach, TCM sei das getreue Abbild einer mehrtausendjährigen Tradition. Sie projizierten alle ihre Erwartungen an eine ganzheitliche, natürliche, sanfte Heilkunde in den dürftigen Rahmen, den ihnen die kurzen Begegnungen mit chinesischen Informanten boten.

Trostsuche in fernöstlichen Weisheiten

Mit zahllosen Vorträgen vermittelten diese Autoren in den 1970er und frühen 1980er Jahren einem staunenden Publikum in den USA und in Europa ihr TCM-Konstrukt. Man kann sich nur wundern, wie sich Menschen einer aufgeklärten Gesellschaft hier verhielten. Menschen, die in Schule und Universität mit Naturwissenschaft und Logik konfrontiert waren, bestaunten nun primitivste Grafiken über die Fünf-Wandlungsphasen- oder die Yin-Yang-Lehre und akzeptieren diese als Ausdruck fernöstlicher althergebrachter Weisheiten.

Liest man heute diese Schriften über »Chinesische Medizin«, dann wird klar, dass hier offenbar eine Sehnsucht bedient wurde. Es war die Zeit des Club of Rome, mit dem Abklingen des Kalten Kriegs und der Furcht vor einer atomaren Auseinandersetzung. Es war auch die Zeit, in der im Westen neue existenzielle Ängste die Menschen ergriffen: Ölembargo, Energiewende, Umweltzerstörung, Artensterben, Klimawandel, Auflösung zwischenmenschlicher Beziehungsformen – all das war neu und verunsicherte die Menschen.

Es war eine Furcht, die auch gesellschaftlichen Wandel in Gang setzte, neue politische Parteien auf den Plan rief und, wie so oft in der Geschichte der Medizin, auch den Umgang mit dem eigenen Körper veränderte. Dabei kam es gar nicht so sehr darauf an, was TCM oder Chinesische Medizin wirklich darstellten. Je ungenauer die historische Kenntnis, desto leichter fiel die Projektion eigener Heilserwartungen auf das weiße Papier. Hinweise auf historische Fakten aus der chinesischen Medizingeschichte konterten viele Protagonisten der TCM- und Akupunktur-Bewegung mit aggressiver Polemik – und einer Abschottung vor den Tatsachen.

Die Chance, sich seriös und nüchtern mit der Geschichte auseinanderzusetzen und die sinnvollen Ideen und Praktiken mit den nützlichen Anteilen westlicher Medizin zu verbinden, ist all denen zuwider, die die TCM als Ausdruck einer Weltanschauung verstehen, die es scharf abzugrenzen gilt von der Biomedizin. Und genau hier kommt wieder die Politik Chinas ins Spiel, die dabei an zwei Fronten aktiv ist: zu Hause und im westlichen Ausland.

Zunächst hatten sich chinesische Politiker nur gewundert, dass »der Westen« ausgerechnet an etwas Interesse hatte, das man selbst so schnell wie möglich loswerden wollte. Dann aber entdeckten sie darin ein Exportpotenzial für chinesische pharmazeutische Produkte. Die TCM-Universitäten erhielten die Möglichkeit, mit einfachsten Lehrkursen von vertrauens-





PAUL U. UNSCHULD

Angestellte einer Apotheke in Peking wiegen die Bestandteile einer traditionellen Rezeptur aus.

seligen Westlern unfassbar viel Geld einzunehmen. Und schließlich erkannten die Verantwortlichen in China auch die Gefahr, die von der westlichen Begeisterung für die TCM als Alternative zu der Schulmedizin drohte.

Chinas Furcht vor Rückkehr der chinesischen Medizin

Vor 100 Jahren war China noch Spielball der westlichen imperialen Mächte. Das asiatische Land wurde selbst vom kleinen Japan gedemütigt, weil es noch immer und zu lange in Yin-Yang- oder Fünf-Wandlungsphasen-Theorien schwelgte. Damit kann man kein Handy zum Klingeln, keine Lampe zum Leuchten und schon gar keine Rakete zum Abheben bringen, darüber waren sich alle Politiker in China einig.

Die sensiblen und durchaus intelligenten jungen Leute im Westen, die sich von den Naturwissenschaften abwenden und chinesischen Traditionen folgen, werden kein Einstein sein und auch kein Steve Jobs oder Bill Gates. Für den wissenschaftlichen und technologischen Fortschritt sind sie schlicht belanglos. Doch ist es für die örtlichen Behörden ein bedrohliches Szenario, wenn auch in ihrem Land immer mehr Stimmen laut werden, die eine Rückkehr zu den alten Konzepten fordern. Nicht überraschend sehen sie darin im Wettkampf der Zivilisationen den Grundstein für eine erneute Schwächung Chinas.

Da mag es verwundern, dass es weiterhin Kampagnen von chinesischer Seite gibt, die der TCM in Europa einen noch größeren Stellenwert erkämpfen wollen. Solche Aktivitäten sind aus einem rein kommerziellen Interesse verständlich. China möchte die Beschränkungen abbauen, die dem vermehrten Export seiner TCM-Fertigarzneien nach Europa im Weg stehen. Aber in zweiter Linie sind sie ein Bemühen, die moderne chinesische Deutung auch im Westen durchzusetzen. Demnach sei die TCM nun ein Bestandteil der modernen Medizin, begründet in den biologischen Wissenschaften und mit einer rein molekularbiologischen Legitimation versehen. Nur auf diese Weise, so vermuten die Behörden, lässt sich vermeiden, dass der Funke der TCM als Alternative zu

moderner Wissenschaft vom Westen auf China überspringt und dort einen Flächenbrand auslöst.

Die Beijing Declaration on TCM aus dem Jahr 2007 und jüngst die Bologna-Erklärung von 2012 sind genau diesem Ziel verpflichtet. Auf den ersten Blick mag es absurd sein, wenn die chinesische Seite betont, dass chinesische Medizin so eng mit chinesischer Kultur verknüpft sei, dass sie nur in China und von Chinesen erlernt werden könne – dann könnte man dasselbe ja auch für die aus europäischer Kultur entstandene westliche Medizin behaupten. Hinter dieser Forderung steht freilich nichts als die Befürchtung, die Kontrolle über die zukünftige Entwicklung zu verlieren.

Der Westen reagiert auf die TCM bislang sehr unterschiedlich. Diejenigen Gruppierungen, die sich auf die chinesische Heilkunde als Alternative zu der ungeliebten westlichen Medizin konzentrieren, stehen denjenigen gegenüber, die versuchen, die »Realität« der Wirkungen von Akupunktur und Arzneidrogen aus China zu erforschen.

Die vielen Defizite der so genannten Schulmedizin und die unbestreitbaren Therapieerfolge der alternativen oder komplementären Therapien sind nur ein Teil der Ursachen dafür, dass sich die TCM ebenso wie Ayurveda und andere Heilkunden aus fremden, zumeist östlichen Kulturen (aber auch aus der Geschichte Europas) so hartnäckig behaupten können.

Die Auseinandersetzung um Sinn oder Unsinn von TCM und Akupunktur ist kulturell und sozialpsychologisch vielschichtig. Sie berührt nicht nur rein fachliche, sondern auch weltanschauliche, politische und kommerzielle Aspekte des Gesundheitswesens und wird somit noch auf geraume Zeit einer rein nüchternen Betrachtung entzogen bleiben. ~

DER AUTOR



Paul Ulrich Unschuld ist Direktor des Horst-Görtz-Stiftungsinstituts für Theorie, Geschichte und Ethik Chinesischer Lebenswissenschaften der Charité-Universitätsmedizin in Berlin. Er studierte Pharmazie, promovierte in Sinologie und war lange Direktor des Instituts für Geschichte der Medizin der Ludwig-Maximilians-Universität München. Unschuld ist Autor

zahlreicher Bücher zur Geschichte der Traditionellen Chinesischen Medizin.

QUELLEN

Unschuld, P.U.: Was ist Medizin? Westliche und östliche Wege der Heilkunst. C.H.Beck, München, 2. Auflage 2012

Unschuld, P.U.: Chinesische Medizin. C.H.Beck, München 2003; eine völlige Neubearbeitung unter dem Titel »Traditionelle Chinesische Medizin« erscheint in diesem Frühjahr.

Unschuld, P.U.: Ware Gesundheit. Das Ende der klassischen Medizin. C.H.Beck, München, 2. Auflage 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182494

In vielen Schritten zur Schrift

Welche der Kulturen Altamerikas als erste Zeichen nutzte, um Botschaften in Stein zu fixieren, darüber lässt sich nur spekulieren. Auch dass nur die Maya die Entwicklung bis zu einem komplexen Schriftsystem konsequent verfolgten, bleibt ein Rätsel.

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Wenn sich die Gelegenheit bietet, Monte Albán zu besuchen, eine beeindruckende Ruinenstätte im heutigen mexikanischen Bundesstaat Oaxaca, der sollte auf die Inschriften mancher Steinstelen achten: Einige davon entstanden wohl ab dem 4. Jahrhundert v. Chr. und gehören zu den ältesten Amerikas (eine genauere Datierung ist derzeit nicht möglich). Zum Beispiel finden sich Zeichen, die in Säulen – fachsprachlich Kolumnen genannt – übereinanderstehen (siehe Bild S. 65). Manche sind aus Köpfen von Menschen und Tieren zusammengesetzt, andere bestehen aus Händen, wieder andere wirken abstrakt. Zweifellos diente dieses grafische System dazu, eine Botschaft zu übermitteln – es war also der Definition nach eine Schrift. Doch welchen Inhalt die Nachrichten hatten und welche Sprache die Schreiber verwendeten, darüber rätseln Forscher noch.

Andere Inschriften in Monte Albán machen es ein wenig leichter: Einzelne Zeichen oder eine kleine Gruppe davon, die bei der Darstellung eines Menschen stehen, bezeichnen vermutlich dessen Namen. Immer wieder treten zwischen diesen Symbolen waagrechte Balken und darüber bis zu vier Scheiben auf, zweifellos Zeichen für Zahlen, wie sie auch in vielen späteren präkolumbischen Kulturen Mittelamerikas über Jahrhunderte hinweg bis zu den Maya in Gebrauch waren. Mit Scheiben schrieb man die Ziffern Eins bis Vier, Balken standen für eine Fünf und konnten ebenfalls mehrfach

gesetzt werden. Bei den fraglichen Inschriften fanden sich keine Zahlenwerte größer als 19. Wieder zeigt ein Vergleich mit späteren Kulturen, dass diese Kolumnen wohl kalendari-sche Angaben enthielten – anders als in unserem Dezimal-system diente dort häufig die Zahl 20 als Basis.

Heutzutage sind uns Schreiben und Lesen so vertraut, dass wir es bei komplexen Gesellschaften als selbstverständlich voraussetzen. Das gut organisierte Reich der Inka im Gebiet der mittleren Anden ist vermutlich ein Gegenbeispiel – bis heute ist es fraglich, ob die als Quipu bezeichneten Knotenschnüre nicht nur Zahlen, sondern auch Textinfor-mationen trugen. Auch in Teotihuacan im heutigen Mexiko entwickelte man keine Schrift. Zwar findet man in dieser einst größten Stadt des vorspanischen Amerika vereinzelt Zeichen auf Wandgemälden, doch Forscher interpretieren sie inzwischen nicht mehr als Schriftelemente, sondern als Symbole, die im Kontext von Opferhandlungen Nahrungs-mittel repräsentierten. Schriftsysteme, die in der Lage sind, nichtnumerische Inhalte annähernd wörtlich wiederzu-geben, haben sich auf der Welt tatsächlich nur in wenigen Regionen entwickelt. Neben dem Nahen Osten, China und vielleicht dem Indus-tal geschah dies in Mittelamerika. Teoti-huacan bildete dort eine Ausnahme; den Grund dafür ken-nen wir nicht.

Nach gegenwärtiger Kenntnis kam die Schriftlichkeit irgendwo im heutigen Mexiko auf, in einem weiten Gebiet zwischen Pazifik und Atlantik. Das spricht für einen regen Austausch zwischen den verschiedenen mesoamerikani-schen Kulturen (als Mesoamerika bezeichnen Altamerikanis-ten die präkolumbische Siedlungslandschaft Mittelame-rikas, die heute von Mexiko bis Costa Rica reicht). In vielen Zentren kamen dieselben Zahlzeichen auf, die Form der Schriftsymbole ähnelte sich, und als Kartuschen bezeichnete Umrahmungen mit abgerundeten Ecken, die es schon in Monte Albán gab, fassten Gruppen von Schriftzeichen zu-sammen – über Jahrhunderte hinweg.

Beeindruckende Textfunde stammen von der Kultur der Epi-Olmeken, die auf jene der Olmeken folgte und über de-ren Verbreitungsraum hinausreichte. Die »Stele C« von Tres Zapotes trägt ein Datum in der so genannten Langen Zähl-

AUF EINEN BLICK

IN STEIN GEHAUEN

1 Spätestens ab dem 4. Jahrhundert v. Chr. ersannen die Kulturen Mittelamerikas Vorläufer der **Hieroglyphenschrift**. Aus dieser Zeit stammen auch die ersten Datumsangaben.

2 Inschriften dieser Zeit zeigen bereits **typische Merkmale mesoamerikanischer Schrift**, beispielsweise die Verwendung von Scheiben und Balken für Zahlen.

3 Ab dem 1. Jahrhundert n. Chr. nutzten viele Kulturen **Bilder in Kombination mit Schriftzeichen** zur Vermittlung komplexer Inhalte. Aber nur die Maya vermochten längere Texte zu schreiben.

Macht wollte legitimiert sein! Und so ließen Herrscher ihre Taten in Text und Bild in Stelen schlagen. Auf diesem Monument demonstrierte Maya-König Yaxun B'alam IV. (709–768 n. Chr.) Stärke: Er trug den Ornat seines Vaters und triumphierte über einen gefangenen und nackten Gegner. Mit derartigen Darstellungen unterstrich der Herrscher der Stadt Yaxchilan seinen Anspruch auf den Thron. Denn als Sohn der Zweitfrau seines Erzeugers stand seine Legitimation stets auf der Kippe.



AKG IMAGES / WERNER FORMAN

lung (siehe Kasten S. 66), das nach Ansicht von Experten dem 3. September 32 v. Chr. entspricht. Leider ist der zugehörige Text derart erodiert, dass sich heute nicht mehr sagen lässt, aus welchem Anlass der Stein aufgestellt worden ist.

Besser erhalten ist die »Stele 1« aus dem nahe gelegenen La Mojarra, die 143 oder 156 n. Chr. entstand (siehe linkes Bild S. 67). Ihre 535 Symbole entstammen wohl einem bereits gut entwickelten Schriftsystem aus Wort- und Silbenzeichen (erstere stehen für ganze Worte der gesprochenen Sprache, die zweiten für einzelne Silben). Einer Übersetzung der Linguisten John Justeson und Terrence Kaufman zufolge, derzeit an der University at Albany beziehungsweise University of Pittsburgh, rühmt der Text die Taten eines längst vergessenen Herrschers. Dabei stützen sich die beiden Forscher auf die Annahme, dass die Glorifizierung von Regenten bei der La-Mojarra-Kultur ein ebenso wichtiges Thema war wie bei späteren. Allerdings ließ sich bei Schriftzeichen eines anderen Monuments mit derselben Methode kein sinnvoller Text gewinnen. Unter anderem deshalb ist die von den Forschern zu Grunde gelegte hypothetische Sprache und damit ihre Übersetzung sehr umstritten.

»Offenbar ersannen Menschen in verschiedenen Zentren Mesoamerikas etwa zur gleichen Zeit erste Formen von Schrift«

Der »Steinblock von Cascajal« (siehe rechtes Bild S. 67) gilt manchen Inschriftenexperten als eine weitere, unabhängige Frühform mesoamerikanischer Schrift. Das Besondere daran: Die insgesamt 62 Zeichen sind dort in Zeilen angeordnet, wenn auch manche davon unterbrochen sind. Leider ist der Block nicht zuverlässig zu datieren. Zudem haben die Schriftzeichen darauf wenig Ähnlichkeit mit anderen bislang bekannten Zeichen. Manche Forscher spekulieren daher, dass es sich um eine regionale Form gehandelt habe, die niemals weiterentwickelt wurde und deshalb ein isoliertes Phänomen blieb. Andere bezweifeln schlichtweg die Echtheit der Inschrift.

Noch ist die Forschung im Fluss. Es scheint aber, als seien die Schrift von Monte Albán und die weiterer präklassischer Zentren aus einer anderen, den Altamerikanisten noch unbekanntem Schrift hervorgegangen. Dafür spricht der gemeinsame Kalender, der auf Grund seines Entwicklungsgrads erheblich älter sein dürfte als die Prototypen mesoamerikanischer Schriftlichkeit.

Das olmekische Kulturgebiet war aber nicht der einzige Nährboden für das Aufkommen von Schrift. Vor zehn Jahren

Als Mesoamerika umschreiben Altamerikanisten das von Kulturen wie den Olmeken oder Maya besiedelte präkolumbische Mittelamerika.



Die bislang ältesten Schriftzeichen Mesoamerikas kamen in Monte Albán ans Licht. Die Anordnung übereinander macht deutlich, dass sie tatsächlich eine Botschaft übermittelten (oberes Foto). Einige Jahrhunderte später hingegen pflegte die Nachfolgekultur diese Regel nicht mehr, sondern kombinierte die Zeichen frei mit bildlichen Darstellungen (unteres Foto).

wurde in der archäologischen Stätte San Bartolo in Guatemala ein Steinblock mit zehn Zeichen einer frühen Form der Maya-Schrift gefunden, der nach seiner Lage in einem Gebäude und durch Radiokohlenstoffdatierung einiger in derselben Schicht ausgegrabener Objekte dem 3. Jahrhundert v. Chr. zugeordnet wurde. Dass diese Schriftzeichen anscheinend in Gestalt und Anordnung einer Konvention folgten sowie abstrahiert auftraten, legt noch frühere Entwicklungsstufen nahe. Experten wie der Bonner Altamerikanist Hanns Prem vermuten ihre Wurzeln im 5. Jahrhundert v. Chr. Offenbar ersannen Menschen verschiedener Zentren im Süden von Mexiko, in Guatemala und darüber hinaus sowie bei den Maya etwa zur gleichen Zeit erste Formen von Schrift.

Ankunft der Zapoteken

Doch dieser Trend endete bald wieder. Im 1. Jahrhundert n. Chr. spaltete sich die Schriftentwicklung in verschiedene Linien auf. In Oaxaca, dem Kerngebiet der olmekischen Kultur, nutzten die Menschen keine in Kartuschen und Kolumnen angeordneten Zeichen mehr, sondern ordneten diese gemeinsam mit Darstellungen handelnder Figuren auf den Steinflächen ihrer Monumente frei an. Bis heute wissen wir nicht, in welcher Abfolge sie zu lesen sind (siehe Bild rechts unten). Nur vereinzelt finden sich noch längere Reihen von Zeichen, aber diese besitzen wenig Ähnlichkeit mit denen der vorangegangenen Epoche. Grund für die Abkehr von einem nach unseren Maßstäben Erfolg versprechenden Prinzip war vermutlich das Auftreten der Zapoteken. Während Forscher von Olmeken und Epi-Olmeken nur Kulturmerkmale kennen, also etwa vergleichbare Architektur oder Keramikstile, gelten die Zapoteken als erste identifizierbare Ethnie Mittelamerikas. Sie übernahmen insbesondere in Monte Albán das Zepter; die Blütezeit ihrer Kultur dauerte von etwa 300 bis 900 n. Chr.

Für einen zweiten und überaus rätselhaften Entwicklungsstrang steht eine am Ende des 1. Jahrtausends n. Chr. im heutigen mexikanischen Bundesstaat Morelos entstandene Inschrift. Xochicalco heißt die weitläufige, auf einem Hügel errichtete Stätte, die einst bis zu 20 000 Einwohner zählte. Mit ihren Zeremonialbauten, Wohngebäuden der Oberschicht, Plätzen und den terrassierten Hängen bildete sie das Zentrum einer eigenständigen Kultur. Ein einzigartiges Relief am Tempel der Gefiederten Schlange (siehe Bild S. 68) macht offenkundig, dass eine komplexe Aussage mit den in Xochicalco vorhandenen Mitteln nicht als Text allein ausgedrückt werden konnte: Aus einem Datumszeichen – erkennbar an der gebräuchlichen Schreibweise mit Scheiben und



BILDFOTOS MIT FRIHL. GEN. VON HANNS. I. PREM

Kalender für Alltag und Ewigkeit

Mit einer skurrilen Mischung aus esoterischen Pilgerfahrten, religiösen Zeremonien und ausgelassenen Weltuntergangspartys begrüßten Tausende den Sonnenaufgang des 21.12. 2012 n. Chr. Auch wer sich noch nie mit dieser Kultur beschäftigt hatte, wusste inzwischen, dass die Maya Zeit als zyklisches Geschehen angesehen hatten. Und dass katastrophale Ereignisse stets das Ende eines Zyklus und den Beginn des nächsten markierten.

Tatsächlich spielten Kalender bei vielen Kulturen Mesoamerikas eine große Rolle, um günstige oder ungünstige Tage zu bestimmen. Für den Alltag war dabei ein Zyklus von 260 Tagen ausreichend, im Aztekischen hieß er »tonalpohualli«, bei den Maya »tzolk'in«. Er wurde in 13 Subzyklen à 20 Tage unterteilt, wobei jeder Wochentag ein eigenes Symbol hatte. Ein Datum in diesem Kalender bestand daher aus einem Tageszeichen und einer Zahl zwischen 1 und 13. Die einzelnen Tage wurden als gut, schlecht oder neutral angesehen und entsprechend auch zur Wahrsagerei genutzt. Insbesondere bestimmte der jeweilige Geburtstag angeblich das Schicksal der Menschen.

Wie bei vielen Kulturen der Menschheitsgeschichte gab es in Mesoamerika auch einen am Sonnenlauf orientierten 365-Tage-Zyklus, im Aztekischen »xiuhuitl«, bei den Maya »ha'ab« genannt. Weil der aber einige Stunden länger dauert, stimmen solche Kalender nie exakt mit dem Sonnenjahr überein. Der Zyklus wurde in 18 Subzyklen zu 20 Tagen eingeteilt (siehe Tabelle), in Maya »winal« beziehungsweise »k'in« genannt. Hinzu kam ein Abschnitt von fünf als unglücklich geltenden Tagen.

Beide Systeme überlagerten sich zu einem größeren Zyklus von 52 Jahren, von den Azteken »xiuhmolpilli« genannt. Zunächst liefen die Subzyklen parallel, gerieten durch die fünf zusätzlichen Tage des »ha'ab« dann aber aus dem Takt. Nun entsprachen dessen Tageszeichen nicht mehr denen im »tzolk'in«. Dieser kombinierte Kalender ergab jetzt andere Konstellationen von Tageszeichen und Subzyklenziffern. Im folgenden Jahr veränderten sie sich erneut. Dadurch erlaubte es der »xiuhmolpilli«-Kalender, einzelne Jahre voneinander zu unterscheiden.

Die Olmeken oder ihre unmittelbaren Nachfolger erfanden als vermutlich weltweit Erste ein Stellenwertsystem mit einer



AKIMAGES / BILDARCHIV STEFFENS

Die »Stele C« aus der Ruinenstätte Tres Zapotes trägt die älteste bekannte Datumsangabe in der »Langen Zählung«. Sie entspricht dem 3. September 32 v. Chr. Das Foto zeigt das untere Bruchstück der Inschrift.

Stelle	Maya-Name / ältere Bezeichnung in der Forschung		Tage	Jahre
1	k'in / kin		Tag	1
2	winal / uinal	20 Tage	20	
3	ha'ab / tun	18 winal	360	1
4	winik ha'ab / katun	20 ha'ab	7 200	19,71
5	pik ha'ab / baktun	400 ha'ab	144 000	394,26

Um die Zeit zu fassen und Ereignisse datieren zu können, entwickelten die Völker Mittelamerikas ein Kalendersystem aus verschiedenen langen Zyklen.

Null (das uns heute geläufige Zahlensystem beruht auf einer Entwicklung in Indien um etwa 300 v. Chr.). In der Forschung hat sich dafür der Name »Lange Zählung« eingebürgert, denn diese Zeitrechnung auf Basis des Sonnenjahrs »ha'ab« reicht weiter. Ab einem mythischen Anfangsdatum, das im gregorianischen Kalender dem 11. August 3114 v. Chr. entspricht, wurde die Zeit nicht nur mit einer Kombination aus »k'in«, »winal« und »ha'ab« angegeben, sondern man zählte die Jahre selbst mit einem Stellenwertsystem auf der Basis 20. Die kleinste Periode hieß »winik ha'ab«, zu Deutsch »20 Jahre«, die nächstgrößere mit 20 mal 20 Jahren nannte man »pik ha'ab« (»ein Bündel Jahre«). Für historische Daten benötigte man nur diese beiden. Bei der Verlängerung der Ahnenreihe eines Herrschers in die mythische Vergangenheit oder der Vorhersage seiner Jahrestage kamen aber Zyklen vor, die Millionen und Milliarden Jahre zählen konnten. Tage, Monate und Jahre wurden meist hintereinandergeschrieben, ähnlich der Art und Weise, wie wir heutzutage Daten schreiben. Damit war jeder Zeitpunkt genau anzugeben.

Die immens großen Zahlenwerte, die immer wieder in kalendarischen Angaben vorkommen, zeigen, dass die Maya ihr System als unbegrenzt und endlos verstanden und schon deshalb die Erwartung eines Weltendes am 21.12. 2012 unsinnig war – das Datum zeigte lediglich das Ende von »pik ha'ab 12« an.

Die Maya entwickelten noch andere Zyklen, insbesondere für astronomische Beobachtungen. Wo wir den Zweck kennen, nötigt er Respekt ab. Ausgehend von der Langen Zählung haben sie beispielsweise die Mondphasen auf den Tag genau berechnet und in ihren Inschriften vermerkt. Diese auf unseren Trabanten bezogenen Perioden wurden auch zur Vorhersage von Mond- und Sonnenfinsternissen herangezogen, die für die Bevölkerung erschreckend waren. Die scheinbar drohende Gefahr im Voraus zu wissen, brachte Priestern und Herrschern daher enormes Prestige. Außer dem Lauf des Mondes verfolgte man auch den der Venus. Die Völker Mesoamerikas wussten, dass fünf Venusjahre fast genauso lange dauerten wie acht Erdjahre, nämlich 2920 Tage. Erst ein präziser Kalender und besonders die Lange Zählung ermöglichten die Aufzeichnung astronomischer Beobachtungen über einen so großen Zeitraum hinweg.

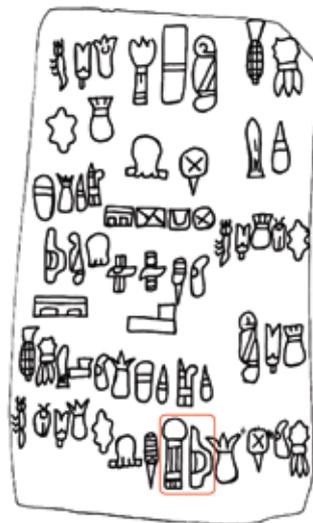


MIT FRIEDRICH VON GEORGE E. STUART



MAJUNUS / PUBLIC DOMAIN

Mit 535 senkrecht angeordneten Zeichen demonstriert die »Stele 1« von La Mojarra (links; Umzeichnung und Detailfoto), dass dort im 2. Jahrhundert n. Chr. ein weit entwickeltes Schriftsystem existierte. Es kannte Symbole für ganze Begriffe, aber bereits auch Silbenzeichen. Die in der Umzeichnung erkennbare Person war



MICHAEL LEVERSON / CC-BY 3.0. NÄCHST-ÄLTESTE SCHRIFT IM NEUEN WELT. IN: SCIENCE 313, S. 160-164, 2006, FIG. 4



MIT FRIEDRICH VON GEORGE E. STUART

wohl ein Herrscher. Ob jedoch auch der »Steinblock von Cascajal« (rechts) eine weitere frühe Form von Schrift belegt, ist umstritten. Zeichen wie die umrahmte Darstellung einer Fackel sind zwar schon von den Olmeken bekannt, nicht aber in dieser abstrakten Form. Einige Forscher halten die Inschrift für eine Fälschung.

Balken – und dem Zeichen »Haus« (der Name eines Tages in der 20-tägigen Reihe des Kalenders, siehe Kasten links) greift eine Hand heraus, die an einem Seil zieht, an dem wieder ein Datumszeichen sowie das naturalistische Abbild eines Affen befestigt sind. Die Datumsangaben unterscheiden sich hinsichtlich der Gestaltung der Kartuschen und im Typus der Zahlenschreibung: Die eine hat vier Scheiben und einen Balken, steht also für die Ziffer Neun, die andere hat elf kleine einzelne Scheiben. Offenbar wurden hier zwei Schreibsysteme gleichzeitig verwendet. Vielleicht verweist das Zeichen am Seil auf eine Tradition, aus der sich dann die Schrift der spätesten mesoamerikanischen Kulturen entwickelt hat, der Mixteken und der Azteken sowie ihrer Nachbarn im Raum um das heutige Mexiko-Stadt.

»Die Azteken nutzten Wort- und Silbenzeichen, jedoch nur für die Namen von Orten und Personen sowie für Warenkategorien«

Die mixtekischen Bilderhandschriften, von denen sich ungefähr ein halbes Dutzend erhalten hat, waren Faltbücher aus Leder mit einer fein geglätteten, weißen Kalkoberfläche. Darauf wurden im Zickzack Szenenabfolgen gemalt, die historische Ereignisse, aber auch Rituale und Mythen zum Thema hatten (siehe Bild S. 69). Kalenderangaben in Form eines »tonalpohualli« (siehe Kasten links) legten den Zeitpunkt des jeweiligen Geschehens fest. Es gab zwar Schriftzeichen im engeren Sinn, sie dienten aber nur als »Name« für Personen und Orte. Die dazugehörigen Geschichten vermittelten allein die szenischen Darstellungen. Diese waren aber mitunter derart abstrahiert und metaphorisch, dass sie dem Leser wohl nur Anhaltspunkte lieferten, um die Mythen abzurufen, die er schon kannte.

Auch von den Azteken, den mächtigen Herren des mexikanischen Hochlands vom 14. bis zum frühen 16. Jahrhundert, sind solche Bilderhandschriften (fachsprachlich: Kodizes) überliefert. Allerdings wurden alle noch erhaltenen Exemplare erst nach der spanischen Eroberung anhand älterer Vorlagen erstellt – die »heidnischen« Originale waren dem religiösen Eifer der Missionare zum Opfer gefallen. Bis der mexikanische Archäologe Joaquin Galarza in den 1960er Jahren erkannte, dass die Kodizes Schriftzeugnisse sind, galten sie als schön anzusehende Bildersammlungen. Heutzutage ist klar, dass die überlieferten Bücher zumeist Kalender enthielten und insbesondere der Wahrsagerei dienten.

Ein Beispiel aztekischer Inschriften liefert der große Opferstein, der im Großen Tempel ihrer Metropole Tenochtitlán aufgestellt war und heute nach dem Azteken-Herrscher Tizoc benannt ist. Auf dessen Außenrand sind 15 sehr ähnliche Szenen eingemeißelt. Sie zeigen jeweils einen aztekischen Krieger, der einen Gefangenen am Schopf hält; ein Ortszeichen identifiziert dessen Zugehörigkeit zu einer eroberten Stadt. Der Krieger trägt die Tracht des Gottes Tezcatlipoca, was ihn mit diesem assoziiert. In einem Fall verrät eine Glyphe den Namen des Siegers: Tizoc.

Insgesamt zeigen die Funde, dass die Azteken zwar immer wieder Zahlen und Kalenderzeichen schrieben, Schriftzeichen jedoch nur für die Namen von Orten und Personen – zumeist Angehörige der Elite – sowie für Warenkategorien verwendeten. Dabei mischten sie Wort- und Silbenzeichen,

wobei Letztere entweder Endungen für Ortsnamen ausdrückten oder die korrekte Lesung der Wortzeichen durch Verdopplung des Anfangs sichern sollten. Beispielsweise diente das Zeichen für Zahn – in der Sprache der Azteken »tlantli« – auch zur Schreibung der Endung »-tlan«, einer geografischen Bezeichnung; das Zeichen »atl« (deutsch: Wasser) präziserte den Anlaut von »a'colli« (Schulter). Zur Darstellung von Inhalten wie Geschichten und Ritualen dienten wieder Abbildungen.

Eine Ausnahme könnten Schriftzeichen aus der mit der aztekischen Hauptstadt Tenochtitlán konkurrierenden Stadt Tetzcoco (heute: Texcoco) sein. Dort wurden Wort- zu Silbenzeichen weiterentwickelt, die dann in einer festen Abfolge standen. Allerdings zweifeln manche Altamerikanisten daran, dass diese Entwicklung in der Zeit vor der spanischen Eroberung stattfand. Auch sie hatte zwar Potenzial, brachte aber immer noch keine längeren Texte hervor.

Als einzige Kultur Mesoamerikas vollzogen die Maya diesen letzten Entwicklungsschritt. Die Ursprünge ihrer Schrift

Ein Relief vom Tempel der Gefiederten Schlange in Xochicalco zeigt Ungewöhnliches: Einige Zahl- und Tageszeichen gehören zu verschiedenen Schriftsystemen (eckiger beziehungsweise abgerundeter Rahmen). Hinzu kommt die an einem Seil ziehende Hand, deren Bedeutung noch unklar ist.

lassen sich bis in das 3. Jahrhundert v. Chr. zurückverfolgen, dann verlieren sich die Spuren. Ob sie also im Maya-Kernland, dem Tiefland der Halbinsel Yukatan (siehe Karte S. 64), entstand oder aber von den Schriften der olmekischen Nachfolgekulturen inspiriert wurde, diskutieren Forscher kontrovers. Ab dem 3. Jahrhundert standen die Mittel zur Verfügung, um umfangreiche Texte zu verfassen. Als die große Zeit der Maya im 10. Jahrhundert zu Ende ging, verschwanden sie nicht von der Erde, und auch nach der spanischen Eroberung im 16. Jahrhundert konnten manche Maya noch in ihrer Schrift schreiben. Insbesondere der Versuch des spanischen Bischofs Diego de Landa (1524–1579), gemeinsam mit einem Maya-Adligen die Buchstaben des lateinischen Alphabets mit den Glyphen der Maya auszudrücken, diente als Ausgangspunkt für die Entzifferung.

Kalter Krieg und Kodizes

Bereits 1952 erkannte der russische Archäologe Juri Knorosow: Es handelte sich nicht um eine Bilderschrift, wie es die Lehrmeinung war. Doch der Kalte Krieg verhinderte bis in die 1980er Jahre, dass seine These im Westen ernst genommen wurde. Nach heutigem Wissen kombinierten die Maya Silben- mit Wortzeichen. Es war für die Entzifferung sehr hilfreich, dass dasselbe Wort oft durch Kombination von beiden ausgedrückt wurde, andererseits Wortzeichen immer wieder in Illustrationen auftraten und dort aus dem Kontext zu ver-





Der »Codex Mexicanus Vindobonensis« ist eine mixtekische Bilderhandschrift aus dem 14. Jahrhundert. Im Unterschied zu erhaltenen aztekischen Kodizes stammt sie also aus präkolumbischer Zeit. Die heute zum Bestand der österreichischen Nationalbibliothek gehörende Handschrift enthält zahlreiche Verweise auf mythische Anfänge. Einige Zeichen finden sich in vielen mesoamerikanischen Schriftsystemen, beispielsweise das liegende Doppel-T, das wohl ein Ballspielfeld symbolisierte.

stehen sind. Von Vorteil ist zudem, dass die in den Inschriften verwendete yukatekische Sprache und die im Raum des heutigen Chiapas verbreitete Sprache Ch'ol noch heute von Maya-Indianern genutzt wird. Daher wissen Forscher: Dieses Schriftsystem vermochte sogar Feinheiten der Sprache widerzuspiegeln, seien es die Längen der Vokale, seien es Eigenheiten von Dialekten.

Ihr Beschriftungsmaterial wählten die Maya nach dem Subjekt aus: Auch für die Nachwelt gedachte Informationen über die Mächtigen der jeweiligen Städte, ihre Allianzen und Heiratsverbindungen, Kämpfe und Opferhandlungen meißelten sie in Stein. Das Gleiche gilt für Jahrestage etwa einer Thronbesteigung. Diese wurden zur Wahrsagerei weit in die Zukunft hinein berechnet, wie umgekehrt Stammbäume der Regenten bis weit in eine mythische Vergangenheit zurück verlängert wurden.

Gemalte Texte auf Keramiken wie Gefäßen und Schalen mit kursiv gesetzten Schriftzeichen gaben Weiheformeln wieder, die kostbare Trinkgefäße zu sakralen Objekten umwidmeten. Sie enthalten Angaben zu Besitzer und Zweckbestimmung, häufig auch die Namen der ausführenden Künstler, was diese aus der Anonymität heraushob. Dieselbe kursive Schreibweise findet sich auch in Kodizes aus Feigenbast mit kalendarischen Tabellen und Wahrsagerei.

Insgesamt überstand ein derart umfangreiches Textkonvolut der präkolumbischen Maya die Jahrhunderte, dass es heutzutage möglich ist, Archäologie und Schriftquellenstu-

dium intensiv im Verein zu nutzen. Keine andere Kultur Altamerikas und ihre Entwicklung kennen wir inzwischen so gut. Und doch sind noch mehr als Detailfragen zu klären, etwa auch: Warum endete die Blütezeit der Maya? Dies ist keineswegs von rein akademischem Interesse. Vieles deutet darauf hin, dass Klimaveränderungen und dadurch ausgelöste lang anhaltende Dürren zum Untergang dieser Hochkultur beigetragen haben. Die archäologischen Befunde sind allerdings keineswegs eindeutig: Während die etablierten Zentren im Tiefland Yukatans untergingen, blühten andere Städte auf. Es scheint mehr zu brauchen als Dürren, um komplexe, seit Jahrhunderten entwickelte Gesellschaften zur Aufgabe zu zwingen. Liegen die Lösungen des Rätsels vielleicht noch in den Texten der Maya verborgen? ~

DER AUTOR



Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Der Artikel entstand mit Material des Bonner Ethnologen und Altamerikanisten Hanns Prem.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182495

STOCHASTISCHE PROZESSE

Liebe zwischen Rittern und Bauern

Wie kann man Punkten, die zufällig auf der Ebene verstreut sind, Teilflächen dieser Ebene zuweisen?
Mit einem Algorithmus zur Ehebahnung!

VON CHRISTOPH PÖPPE

Friedlich ruht die Käsescheibe auf dem Tisch. Da bricht das Unheil über sie herein, in Gestalt einer Wolke von Schimmelsporen, die sich alle zufällig verteilt auf der Oberfläche niederlassen und alsbald Kolonien gründen. Kreisförmig um jeden Landeplatz breitet sich ein Schimmelfleck aus, und unweigerlich stoßen irgendwann zwei dieser wachsenden Kreise zusammen.

In diesem Augenblick wird offenbar, dass es sich nicht um echte Schimmelpilze handelt, sondern um eigens zum Zweck der Darstellung ausgedachte. Die Abkömmlinge zweier verschiedener Sporen können sich nämlich nicht ausstehen und gehen sich nach Möglichkeit aus dem Weg. Also wächst jede Kolonie nur dort weiter, wo noch keine andere ist. Im Endeffekt teilen die Nachkommen der ursprünglich eingefallenen Sporen die ganze Fläche unter sich auf. Jeder Punkt des Käses gerät unter die Herrschaft derjenigen Spore, die ihm am nächsten liegt, denn diese hat ihn zuerst erreicht. Das Reich jeder Schimmelspore ist eine so genannte Voronoi-Zelle; seine Grenzen bestehen aus Stücken der Mittelsenkrechten zwischen der Spore und ihren nächsten Nachbarn.

Man kennt diese Figuren aus einem völlig schimmelfreien Kontext. Um die Struktur eines Kristalls zu verstehen, arbeitet man mit der Voronoi-Zelle eines Atoms; das ist die Menge aller Punkte, die ihm näher liegen als jedem anderen, die es also mit einer gewissen Berechtigung seine Privatsphäre nennen darf (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 36).

Unterstellen wir nun, abermals entgegen der biologischen Realität, dass

die mikroskopischen Pilze »genügsam« sind. Sowie ein Schimmelreich eine gewisse Fläche bedeckt, hört es auf zu wachsen. Was geschieht dann?

Solange die Sporen dünn gesät sind, ist die Situation einigermaßen übersichtlich. In den meisten Fällen wächst ein Reich ungehindert durch missgünstige Nachbarn, bis es »saturiert« ist, das heißt seine Wunschfläche erreicht hat. Die ist dann kreisförmig. Nur wenn zufällig zwei Sporen dicht aneinander geraten, etabliert sich zwischen ihnen eine geradlinige Grenze; die »Außengrenzen« sind wieder Kreisbögen, diesmal mit etwas größerem Radius. So ähnlich geht es auch bei drei oder mehr dicht benachbarten Sporen zu; und ein mehr oder weniger großer Teil des Käses bleibt unbehelligt.

Das ist der »unterkritische« Fall. Was geschieht im »überkritischen« Fall, wenn die Gesamtfläche des Käses nicht ausreicht, um die Gier aller Beteiligten zu befriedigen? Die zuerst beschriebene Situation entspricht unendlich großer Verfressenheit. Bei endlicher, aber immer noch großer Gier bilden sich ebenfalls Voronoi-Zellen.

Reiche mit Exklaven

Mit geringer werdenden Ansprüchen – oder größerer Käsefläche, was auf das selbe hinausläuft – entspannt sich die Situation etwas. Nicht dass auch nur ein Stückchen Käse frei bliebe; aber es kann vorkommen, dass ein Reich komplett von anderen Reichen umzingelt ist und trotzdem noch Ausdehnungsmöglichkeiten vorfindet. Jenseits eines fremden Reichs ist vielleicht noch ein Stück Käse frei, auf das der unmittelbare Anrainer keinen Appetit mehr hat.

So entstehen Reiche, die aus mehreren unzusammenhängenden Stücken bestehen.

Am kompliziertesten – und interessantesten – ist der kritische Fall: Die vorhandene Fläche reicht gerade aus, um alle satt zu machen. Niemand bleibt hungrig, kein Stückchen Fläche bleibt frei, und die Reiche nehmen bizarre Formen an (Bild rechts). Der kritische Fall ist wie in der statistischen Physik, wo er zum Beispiel dem Übergang vom festen zum flüssigen Zustand entspricht, ein einziger Punkt auf der »Gierskala«, in dem die Verhältnisse völlig anders sind als in den beiderseits – beliebig dicht – benachbarten Punkten. Daher genießen kritische Punkte das besondere Interesse der Mathematiker ebenso wie der Anwender.

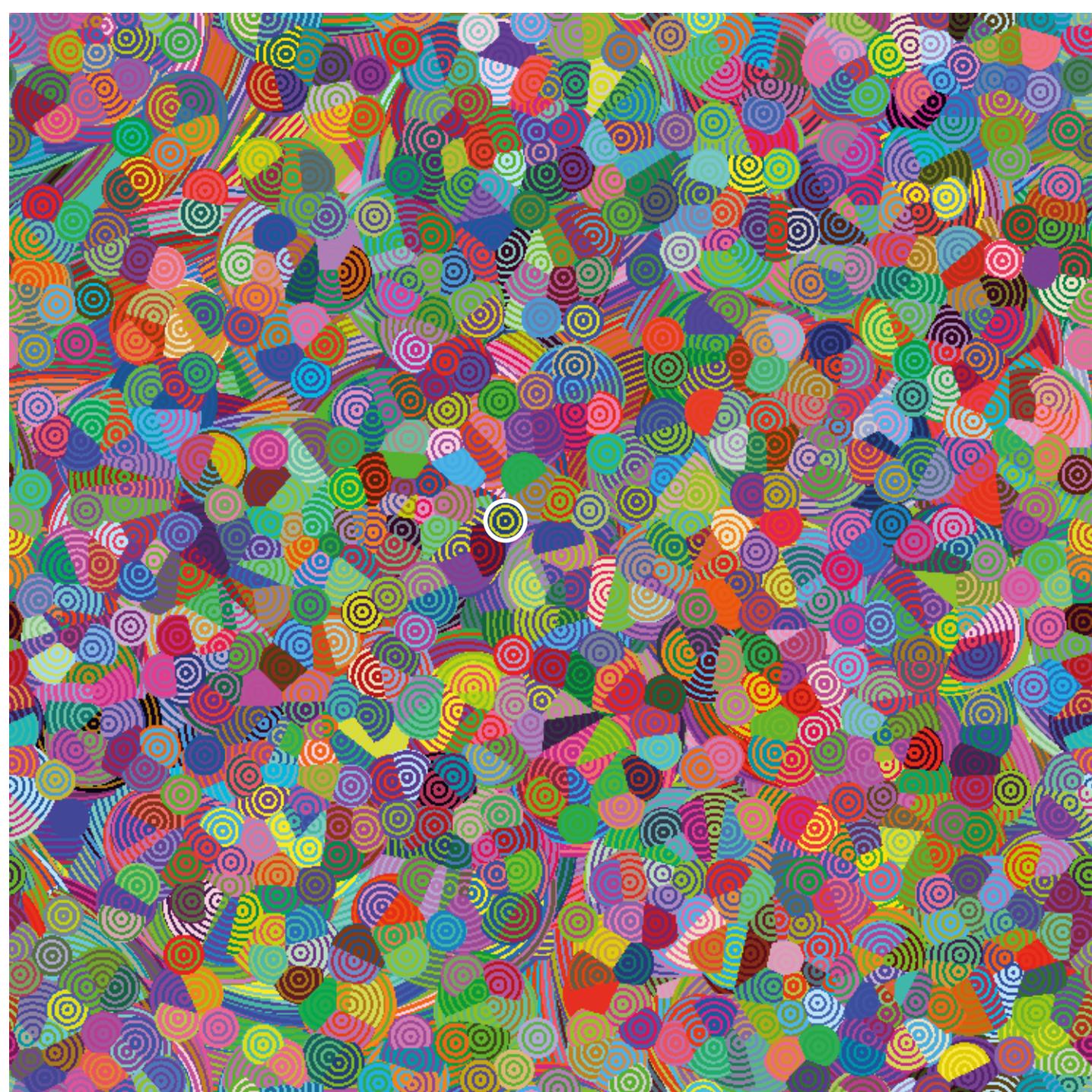
Auf die Fläche dieses Quadrats wurden 1000 Punkte zufällig verstreut. Jeder von ihnen legte sich dann möglichst in seiner nächsten Umgebung, aber in Konkurrenz mit den anderen ein »Reich« mit der Fläche von einem Tausendstel der Gesamtfläche zu (der »kritische Fall«). Jedes Reich ist durch konzentrische Ringe um seinen Ausgangspunkt abwechselnd in zwei Farben eingefärbt. Manche Reiche sind ungehindert gewachsen und daher exakt kreisförmig (Beispiel durch weißen Ring gekennzeichnet), andere liegen zum Teil fern dem Ursprungspunkt oder sogar durch fremde Reiche von ihm getrennt. Damit die Ränder des Quadrats sich nicht störend auswirken, wurden gewissermaßen der rechte Rand mit dem linken und der untere mit dem oberen verklebt. Topologisch gesehen ist das Quadrat also ein Torus.

Wie kann man Näheres über die Verteilung im kritischen Fall herausfinden? Welche Formen können die Reiche annehmen? Werden sie beliebig lang, dünn und vielteilig? Für dieses mathematische Problem erweist sich das Modell mit den Schimmelpilzen als weniger geeignet. Ersetzen wir die Mikroorganismen in Gedanken durch Raubritter. Sie werden über fruchtbarem, von Bauern beackertem Land abgeworfen, und zwar

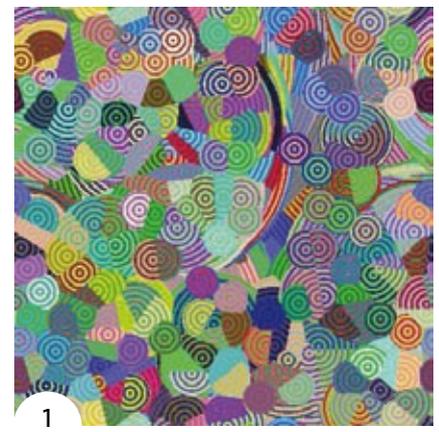
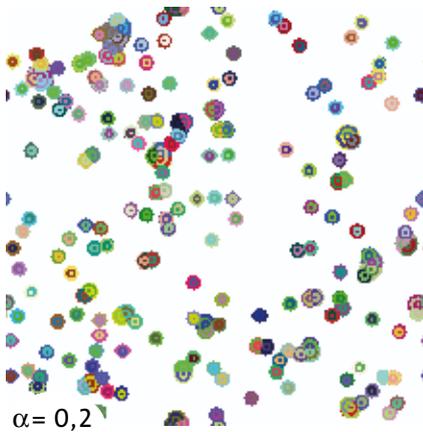
ebenso zufällig wie zuvor die Sporen über dem Käse. Zu jedem Ritter gehört eine gewisse, für alle gleiche Anzahl an Knappen; die Schwärme nun von ihrem jeweiligen Abwurfplatz (der »Ritterburg«) nach allen Seiten aus und machen sich alle Bauern untertan, die sie antreffen. Es sind allerdings einigermaßen friedliche Ritter: Sie hören mit Erobern auf, sowie sie genug Bauern unter ihrer Fuchtel haben, um in Saus und

Braus leben zu können, sowie also ihr »Appetit« befriedigt ist; sie kämpfen nicht gegeneinander, sondern respektieren das Recht des ersten Eroberers, und ein Ritter gewährt jedem anderen, der noch nicht genug hat, das Durchzugsrecht durch sein Gebiet.

Es sieht so aus, als müsste nach diesem Verfahren eine eindeutig bestimmte Aufteilung zu Stande kommen. Aber wenn man nicht über echte



ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: ALEXANDER E. HOIKOV



So teilen 100 zufällig über das Quadrat gestreute Schimmelsporen die (wieder zum Torus zusammengeklebte) Quadratfläche unter sich auf, je nachdem, wie groß ihr Appetit α ist. Der Parameter α variiert hier von 0,2 bis unendlich (Zahl jeweils links unten); der kritische Fall ist $\alpha=1$. Bei unendlichem Appetit entstehen Voronoi-Zellen.

Ritter und Bauern, sondern über deren Idealisierung nachdenkt, kommen die Tücken des Unendlichen ins Spiel. In jedem der unendlich vielen Punkte der Ebene sitzt ein Bauer, und unendlich viele Ritter sind über die unendliche Ebene verstreut.

Dass die Bauern, die genau auf der Mittelsenkrechten zwischen zwei Burgen sitzen, nicht wissen, zu welcher sie gehören sollen, ist noch zu verschmerzen. In diesem Bereich der Mathematik begnügt man sich mit Aussagen, die »fast überall« gelten, das heißt überall bis auf eine Menge der Fläche null – was auf die »Grenzbauern« zutrifft.

Es genügt auch, eine Aussage für »fast alle« Anfangsverteilungen zu treffen. Man könnte die Ritter, statt sie zufällig über das Land zu streuen, nach einem so exotischen Muster platzieren, dass bei der allgemeinen raffgierigen Landnahme die seltsamsten Verteilungen herauskommen. Aber auch das interessiert nicht, weil eine exotische Anfangsverteilung zwar möglich ist, aber unter einem echten Zufallsprozess so gut wie nie (»mit Wahrscheinlichkeit null«, sagt der Statistiker) vorkommt.

Aber selbst wenn man diese Spezialitäten beiseitelässt, sind die Mathematiker mit dem Modell der raffgierigen Landnahme nicht glücklich, weil es sich einer korrekten Formalisierung widersetzt oder man diese Möglichkeit zu

mindest nicht ausschließen kann. Stattdessen arbeiten sie mit einem handlicheren Kriterium namens »Stabilität«.

Ein Ritter wünscht sich nicht nur, dass sein Reich die seinem Appetit angemessene Größe hat, sondern auch, dass es möglichst nahe bei der Burg gelegen ist. Schließlich legt er Wert darauf, dass das Schlachtvieh, das er als Tribut von den Bauern fordert, noch hinreichend frisch und rechtzeitig für das Gelage auf der Burg eintrifft. Der Idealzustand ist für ihn ein kreisförmiges Reich der richtigen Größe. Eine Landaufteilung heißt stabil, wenn es keine zwei Ritter gibt, die durch einen Gebietstausch untereinander ihre Reiche arrondieren, das heißt die Durchschnittsentfernung aller Reichspunkte von ihrer Burg vermindern können.

Höfliche Eroberung

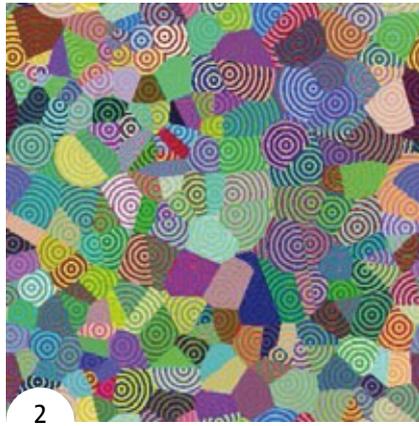
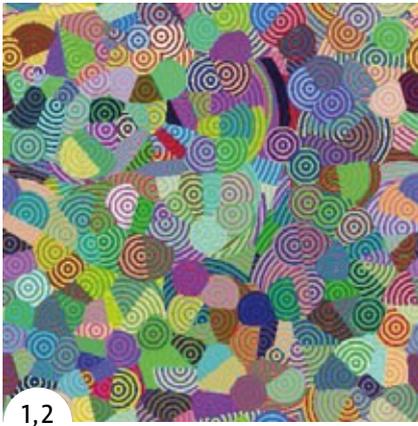
Die raffgierige Landnahme erzeugt im Allgemeinen eine stabile Verteilung. Aber beweisen kann man das erst, indem man sie durch ein wesentlich zivilisierteres Verfahren – mit demselben Ergebnis – ersetzt. Christopher Hoffman von der University of Washington in Seattle, Alexander E. Holroyd von der University of British Columbia in Vancouver und Yuval Peres von der University of California haben auf ein solches Verfahren zurückgegriffen, das nachweislich zu stabilen Beziehungen führt:

die Eheanbahnung nach dem Algorithmus von Gale und Shapley.

Erinnern wir uns (SdW 12/2012, S. 82): In einer Gruppe von gleich vielen Damen und Herren fragt zuerst jeder Herr die Dame, die ihm die liebste ist, ob sie seine Frau werden möchte. Die sagt vorläufig Ja, schickt aber jeden Bewerber weg, sowie einer aufkreuzt, der ihr besser gefällt. Alle abgewiesenen Herren fragen die jeweils Zweitliebste, und so weiter. Nach endlich vielen Runden kommt eine stabile Paarung zu Stande. Stabil heißt, dass es keine zwei Leute – Mann und Frau – gibt, die sich verbessern könnten, indem beide aus ihrer jeweiligen Beziehung ausbrechen und sich zusammentun.

Wenn die Rollen von Damen und Herren vertauscht werden, kommt im Allgemeinen eine andere, ebenfalls stabile Paarung heraus. Sie ist »damenoptimal« in dem Sinn, dass jede Frauen – nach ihrer Präferenzliste – besten Mann bekommt, den sie unter den gegebenen Umständen kriegen konnte.

Was die Damen und Herren zu nicht immer glücklichen, aber immerhin stabilen Paaren zusammenführt, funktioniert überraschenderweise auch für Bauern und Ritter. Dass ein Ritter zu unendlich vielen (punktförmigen) Bauern eine Beziehung eingeht, stört überhaupt nicht. Man muss sich halt auf die absonderliche Vorstellung einlassen, Feudalherren und Untertanen könnten einander in inniger Liebe verbunden sein. Und zwar begehrt ein Ritter einen Bauern umso mehr, je näher dieser bei seiner Burg wohnt (umso frischer bleibt das Tributschwein). Umgekehrt gelüstet



es einen Bauern im Zweifelsfall nach dem Ritter, dessen Burg ihm näher liegt.

Das ritteroptimale Verfahren verläuft dann folgendermaßen. Jeder Ritter fragt zunächst jeden Bauern im Umkreis mit dem Radius r : »Willst du mein Untertan werden?« Dabei ist r der Radius des Kreises, dessen Fläche den Appetit des Ritters befriedigt. (Alle Ritter haben den gleichen Appetit.) Wenn alle gefragten Bauern mit »Ja« antworten würden, wäre dieser Ritter glücklich und das Verfahren für ihn beendet. Ein Bauer sagt aber nie »Ja«, sondern allenfalls »Vielleicht«. Wenn ein weiterer Ritter ihn fragt, sagt er zu demjenigen »Nein«, dessen Burg weiter weg liegt; und dieses Nein ist unwiderruflich.

Ein Ritter, der sich eine solche Ablehnung eingefangen hat, dehnt daraufhin seinen Suchradius aus, und zwar so weit, dass die Fläche des nunmehr vergrößerten Kreises minus der Fläche, auf der die ihn ablehnenden Bauern sitzen, seinem Appetit entspricht. Wieder bekommt er vorläufige Zusagen und neue Ablehnungen, auch von solchen Bauern, die er schon für die seinen hielt; denn auch die anderen Ritter strecken ihre Fühler weiter aus als zuvor und machen ihm dadurch Bauern abspenstig.

Das geht eine theoretisch unbegrenzte Zahl von Verfahrensschritten so weiter. Der ursprüngliche Heiratsalgorithmus endet spätestens dann, wenn jeder Herr jede Dame gefragt hat; aber dieses Argument nutzt nichts bei unendlich vielen Beteiligten. Man kann jedoch zeigen, dass irgendwann die Ritter, die jetzt noch Fragen stellen, zu weit entfernt sind, um noch eine Chance zu

haben. Man weiß also, dass nach einer gewissen Anzahl von Schritten die Verteilung der Ländereien sich nicht mehr verändert, nicht aber, nach wie vielen Schritten dies der Fall sein wird.

Das bauernoptimale Verfahren geht ganz analog. Jeder Bauer fragt den ihm nächstgelegenen Ritter: »Darf ich dein Untertan sein?« Der Ritter zieht einen Kreis um seine Burg, der gerade so groß ist, dass alle Bauern, die sich ihm angeeignet haben und innerhalb des Kreises liegen, zusammen seinen Appetit befriedigen. Die weiter draußen liegenden schickt er weg – unwiderruflich.

Die abgewiesenen Bauern fragen den jeweils zweitnächsten Ritter. Wenn der feststellt, dass sie innerhalb seines bisherigen Kreises liegen, kann er diesen Kreis verkleinern und damit weitere Bauern aus seiner Herrschaft entlassen. Wieder kommt irgendwann – man weiß aber nicht wann – der Zeitpunkt, an dem kein Bauer mehr von irgendeinem Ritter eine neue Zusage erhält.

Während beim Heiratsalgorithmus die herrenoptimale und die damenoptimale Lösung des Problems sehr verschieden sein können, führen das ritteroptimale und das bauernoptimale Verfahren stets zu derselben, eindeutig bestimmten Landverteilung. Wie das?

Beim ursprünglichen Algorithmus von Gale und Shapley ist das Zusammenfallen von herren- und damenoptimaler Lösung ein exotischer Ausnahmefall: Dann und nur dann, wenn stets die Dame, die Herr X am liebsten hätte, auch Herrn X an die erste Stelle ihrer Präferenzliste gesetzt hat, finden im ersten Verfahrensschritt alle Paare

zusammen und sind glücklich. Aber dieser romantische Fall liegt bei Rittern und Bauern ja gerade vor: Jeder Ritter begehrt den Bauern am meisten, der ihm am nächsten ist, und umgekehrt.

Die Idee ist einfach. Viel schwieriger ist es, sich zu vergewissern, dass bei einer Anfangsverteilung von Rittern, über die man nur statistische Aussagen hat, keine unangenehmen Überraschungen auftreten. Hoffman, Holroyd und Peres brauchen für ihre Darstellung volle 33 Seiten – und bieten dann doch noch verblüffende Resultate. So können sie beweisen, dass im kritischen Fall nicht nur die Landschaft einem bunten Flickenteppich gleicht; die Reichen sind auch sehr weit ausgedehnt. Der Erwartungswert der Entfernung zwischen einem beliebigen Punkt eines Reichs und seiner Burg ist – unendlich! ~

DER AUTOR



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

QUELLE

Hoffman, C. et al.: A Stable Marriage of Poisson and Lebesgue. In: The Annals of Probability 34, S. 1241–1272, 2006. Online unter <http://arxiv.org/abs/math/0505668>

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182496

Bücher und mehr



NEU Lawrence M. Krauss

EIN UNIVERSUM AUS NICHTS

... und warum da trotzdem etwas ist

2013, 256 S. mit 40 Abb., geb., Knaus

Bestell-Nr. 3804

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Die Frage nach der Entstehung unseres Universums ist eine der bemerkenswertesten Erkundungsreisen, die die Menschheit je unternommen hat. Einstein und Hubble, Relativitätstheorie, Inflation und Quantenmechanik – kein Forscher und Bereich der Kosmologie, über den Lawrence Krauss nicht verständlich und vor allem spannend zu erzählen weiß. Dabei fragt er immer auch nach den Quellen unseres Wissens: Wie hat sich unsere Vorstellung vom Ursprung aller Dinge entwickelt? Weshalb wissen wir, was wir heute wissen? Und warum können wir davon ausgehen, dass das auch stimmt?



NEU Salomon Kroonenberg

WARUM DIE HÖLLE NACH SCHWEFEL STINKT

Eine geologische Höhlenfahrt

2013, 272 S., 107 farb. Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 3806

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Faszinierende Einblicke in die Unterwelt – ein unterhaltsames und schön illustriertes Buch! Wäre die Erde durchsichtig, würden die Menschen den ganzen Tag flach auf dem Bauch liegen, um in die Tiefe zu schauen – so schön sind die Vorgänge unter unseren Füßen. Salomon Kroonenberg betreibt Feldforschung unter der Erde, mit jedem Kapitel steigt er tiefer hinab, wobei er sich an Dantes Höllenkreisen orientiert. Entstanden ist eine unterhaltsame Geologie der Unterwelt – gewürzt mit Kroonenbergs persönlichen Erlebnissen und einem kräftigen Schuss Mythologie.



NEU Georg Schwedt

EXPERIMENTE RUND UM DIE KUNSTSTOFFE DES ALLTAGS

2013, 180 S., kart, Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3805

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Wie kann man das Material eines Joghurtbechers von dem eines Zahnputzbechers unterscheiden? Was kann man mit dem Superabsorber einer Babywindel so alles Sinnvolles anstellen? Nach der Lektüre dieses Buches wissen Sie mehr! Und den Spaß beim lehrreichen Experimentieren gibt es kostenlos dazu! Ein neues und in seiner Thematik einzigartiges Experimente-Buch für Lehrer und Schüler der Mittel- und Oberstufe, Dozenten, Studenten und überhaupt für Alle an Chemie Interessierte.



Peter M. Higgins

DAS KLEINE BUCH DER ZAHLEN

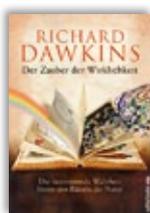
Vom Abzählen bis zur Kryptographie

2012, VIII, 354 S. m. 35 Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3748

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Peter Higgins verarbeitet Jahrhunderte des Fortschritts zu einer erbaulichen Erzählung, die das Geheimnisvolle der Zahlen hervorhebt und erklärt, wie die verschiedenen Arten von Zahlen aufgetaucht sind und weshalb sie nützlich sind. Das Buch enthält viele historische Anmerkungen und interessante Beispiele, und es behandelt einfache Zahlenrätsel und Zaubertricks ebenso wie Verbindungen zu Problemen des Alltags.



Richard Dawkins

DER ZAUBER DER WIRKLICHKEIT

Die faszinierende Wahrheit hinter den Rätseln der Natur

2012, 270 S. m. zahlr. Abb., geb., Ullstein

Bestell-Nr. 3752

€ 26,99 (D), € 27,80 (A)

Seit jeher hat die Menschheit versucht, sich die rätselhafte Natur durch Mythen begreiflich zu machen. Auf den Herbst folgt der Winter, weil Hades, Persephone in sein Reich entführt hat und die blühende Natur mit ihr; in Wirklichkeit gibt es unterschiedliche Jahreszeiten, weil die Erdachse geneigt ist. Und die Welt entstand auch nicht, weil der indische Gott Vishnu seinem Diener Brahma ihre Erschaffung auftrag, sondern durch den Urknall. So wunderbar die Mythen sind, weitaus spannender ist die wissenschaftliche Betrachtung. Genau das tut Dawkins, indem er die Wahrheit hinter den Rätseln erklärt. Ein faszinierendes, üppig illustriertes Buch, das den Zauber der Wirklichkeit feiert.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



W. Engländer, H.-H. Bergmann

DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD

220 Vögel, Filme und Stimmen

2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box, INFO- Progr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

Bestell-Nr. 1859

€ 49,99 (D), € 49,99 (A)

220 Vogelarten mit ihren Rufen und Gesängen erfreuen uns durch wunderschöne Bilder in Filmen. Ein Sprecher erklärt jede Darstellung, das Begleitbuch informiert noch ausführlicher.



Joachim Wambsganß

UNIVERSUM FÜR ALLE

70 spannende Fragen und kurzweilige Antworten

2012, 439 S. m. zahlr. Farbbabb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3646

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Heidelberger Astronomen erklären Ihnen hier die Rätsel des Universums. Die Artikel basieren auf der Vortragsreihe *Uni(versum) für alle!* – Halbe Heidelberger Sternstunden: Von April bis Juli 2011 gab es jeden Tag eine »Astronomische Mittagspause« in der Heidelberger Peterskirche mit einem 15-minütigen Kurzvortrag. In diesem Buch sind alle 70 Vorträge zu allen erdenklichen Themen der Astronomie für Sie zusammengestellt.

Alle Vorträge wurden gefilmt und stehen auf YouTube zur Verfügung. Mit dem jeweiligen QR-Code werden Sie zum passenden Video geleitet oder Sie gehen direkt zum YouTube-Kanal von *Spektrum der Wissenschaft*:

www.spektrum.de/universumfueralle

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Bestellen +49 6221 9126-841
Sie direkt: info@science-shop.de



Udo Gansloßer, Kate Kitchenham

FORSCHUNG TRIFFT HUND

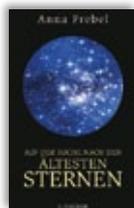
Neue Erkenntnisse zu Sozialverhalten, geistigen Leistungen und Ökologie

2012, 240 S. m. 250 Farbbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3751

€ 29,99 (D), € 30,90 (A)

Immer mehr Forschungsprojekte in Europa und den USA befassen sich mit dem Haushund, seiner Entwicklung, seinem Verhalten, seiner Intelligenz und seinen Emotionen. Dr. Udo Gansloßer und Kate Kitchenham berichten über die Forscher und ihre Arbeit, fassen die interessantesten Ergebnisse zusammen und geben damit Hundehaltern Anleitung für ein besseres Verständnis ihres Vierbeiners.



Anna Frebel

AUF DER SUCHE NACH DEN ÄLTESTEN STERNEN

2012, 352 S., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3684

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Mit Mitte zwanzig entdeckte Anna Frebel während ihrer Promotion den ältesten bis dahin bekannten Stern. Seitdem ist sie als »stellare Archäologin« den metallarmen Sternen auf der Spur. Diese ältesten bekannten Objekte überhaupt geben über die ersten Sterne im Universum und die Entstehung der chemischen Elemente Auskunft – dadurch werden sie ein Schlüssel zum Verständnis des gesamten Universums. In ihrem Buch gibt Anna Frebel Einblicke in diesen Aspekt der Astronomie und berichtet anschaulich von ihrer konkreten Arbeit mit den Teleskopen in fernen Gegenden der Welt. Ein faszinierender Blick in die Tiefe des Alls und ein lebensnaher Bericht darüber, wie Naturwissenschaft heute betrieben wird.

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7523-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



**STEPHEN HAWKINGS
GROSSER ENTWURF**
Eine neue Erklärung
des Universums

2012, Laufzeit: circa 135 Minuten,
Polyband

Bestell-Nr. 3761 € 17,99

In dieser Dokumentation blickt der populäre Astrophysiker über den Tellerrand der Wissenschaft hinaus und geht bedeutenden philosophischen Fragen auf den Grund: Beruht unsere Existenz auf einer höheren Macht? Was ist der Sinn des Lebens? Wie lauten die kosmischen Gesetze? Spektakuläre 3-D-Computeranimationen und faszinierende Bilder machen die Reise zu den größten Rätseln des Weltalls perfekt. Technische Angaben: Sprachen: Deutsch und Englisch; Untertitel: keine; Ton: Dolby Digital 5.1; Bild: 16:9 (1,78:1); Medium: DVD 9; Region: 2 PAL; FSK-Freigabe: INFO-Programm.



Josef Gaßner, Harald Lesch

**URKNALL, WELTALL UND
DAS LEBEN**
Vom Nichts bis heute Morgen

2012, 352 S. m. 123 Abb., geb.,
Komplett Media

Bestell-Nr. 3766

€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Den Urknall, das Weltall und das Leben verstehen? Vielleicht ist das zu hoch gegriffen – aber eines können Harald Lesch und Josef M. Gaßner versprechen: Sie erklären die Geheimnisse des Kosmos so verständlich wie nur möglich. Die beiden Gelehrten plaudern miteinander über Fragen wie: Woher wissen wir das alles? Wie konnte Alles aus dem Nichts entstehen? Was war vor dem Urknall? Warum gibt es Sterne und Galaxien? Wie ist das Leben entstanden? Was sind Neutrinos, Higgs und LHC? Gibt es Leben auf fernen Planeten? Wo ist die Grenze der wissenschaftlichen Erkenntnis? Ist noch Platz für Gott in unserem Weltbild?

Lieferbar auch als Hörbuch unter: www.science-shop.de/artikel/1167971 – oder rufen Sie uns einfach an!



Thomas Eversberg

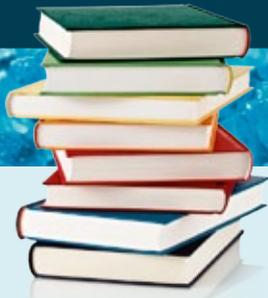
HOLLYWOOD IM WELTALL
Waren wir wirklich
auf dem Mond?

2012, 174 S. 40 Farbabb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3647

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Der Astrophysiker Thomas Eversberg setzt sich mit den bekanntesten Verschwörungstheorien der Mondlandungsleugner auseinander und analysiert diese in farbigen Detailaufnahmen und mit vielen vom Buch aus abrufbaren Filmsequenzen. Dabei geht er sowohl auf die ältesten gut bekannten, aber auch die aktuellsten Zweifel an der Mondlandung ein und bietet seinen Lesern so einen spannenden Krimi aus Physik, Politik und Geschichte. Thomas Eversberg arbeitet im Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und weiß daher, wovon er schreibt.



Eiskalte Angebote



Manfred Reitz

DAS LEBEN AUF DER BURG
Alltag, Fehden und Turniere

2004, 208 S. m. 60 meist farb.
zeitgenöss. Abb., geb., Thorbecke

Bestell-Nr. 3790

früher € 24,90, jetzt nur
€ 9,95 (D), € 10,30 (A)

Manfred Reitz lässt die mittelalterliche Geschichte am Beispiel der Burg lebendig werden: Dabei verfolgt er das Leben der Menschen durch Jahreszeiten und Tagesablauf und berücksichtigt Freizeit und Mode ebenso wie Landwirtschaft und Krieg. Dieses Buch macht junge und alte Leser zu kundigen Burgenbesucher, die die Spuren der Vergangenheit mit neuen Augen entschlüsseln.



Jürgen Händler

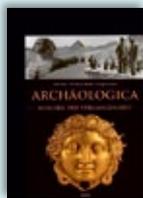
**BETRIEBSWIRTSCHAFTS-
LEHRE FÜR INGENIEURE**
Lehr- und Praxisbuch

4., aktualisierte Auflage 2010, 620 S.,
kart., Carl Hanser

Bestell-Nr. 3780

früher € 34,90, jetzt nur € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Dieses Grundlagenwerk bietet einen Überblick über das Gesamtspektrum der Betriebswirtschaftslehre in kurz gefasster Form mit vielfältigen Schnittstellen zum Ingenieurwesen. Es wendet sich vorrangig an Studierende von Bachelor- und Masterstudiengängen der Ingenieur- und Wirtschaftsingenieurwissenschaften an Fachhochschulen, Universitäten und Berufsakademien, für die die »Betriebswirtschaft« eher Neben- als Hauptfach ist. Aber auch für im Beruf stehende Praktiker ist das Buch ein willkommenes Nachschlagewerk.



Mark Rose, Eti Bonn-Müller,
Giorgio Ferrero

ARCHÄOLOGICA
Wunder der Vergangenheit

2010, 288 S. m. zahlr. meist farb.
Fotos, geb., Weltbild, Lizenz White Star

Bestell-Nr. 3782

früher € 38,-, jetzt nur € 14,99 (D), € 15,40 (A)

Dieser großformatige Band, der eine Vielzahl zeitgenössischer Fotos von den Grabungsstätten und den dort gemachten Funden enthält, schildert die Ereignisse rund um die wichtigsten archäologischen Entdeckungen aller Zeiten, von den Wüsten Ägyptens und den Wäldern Mittelamerikas bis hin zu den antiken Städten im Mittelmeerraum und den Palästen des Mittleren Ostens.



**KOMPAKTLEXIKON
DER BIOLOGIE,
3 BÄNDE**

Unveränd. Nachdr. d. Ausg. v.
2001/02, 495 S., 528 S., 501 S.,
m. zahlr. Abb., Softcover,
Spektrum Akademischer Verlag

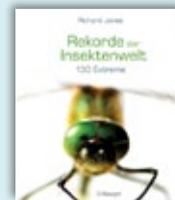
Bestell-Nr. 1615

frühere Ausg. € 99,-,

jetzt nur € 59,85 (D), € 61,80 (A)

Das Kompaktlexikon der Biologie vermittelt in rund 15.000 Stichwörtern in drei Bänden einen umfassenden Überblick über das Spektrum der modernen Biologie. Es gibt grundlegende und aktuelle Informationen zu den klassischen Disziplinen der Wissenschaft, so zur Systematik der verschiedenen Organismengruppen, ihren Bauplänen und ihrer Lebensweise, wie auch zu brandaktuellen Entwicklungen, z. B. aus den Bereichen Bio- und Gentechnologie.

**Rekorde der Natur – zwei große Bände
jetzt zum Sonderpreis:**



Richard Jones

**REKORDE
DER INSEKTENWELT**
130 Extreme

2010, 287 S. m. 134 Farbfotos, geb.,
Haupt

Bestell-Nr. 3784 früher

€ 39,90, jetzt nur € 19,90 (D), € 20,50 (A)

130 Rekordhalter der Insektenwelt werden mit Bild und Text vorgestellt und lassen uns über ihre Vielfalt, Einzigartigkeit und Außergewöhnlichkeit staunen.



Dominic Couzens

**REKORDE
DER VOGELWELT**
130 Extreme

2010, 288 S. m. 134 Farbfotos, geb.,
Haupt

Bestell-Nr. 3785 früher

€ 39,90, jetzt nur € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Einige Rekordhalter der Vogelwelt sind den meisten Menschen bekannt – wie z. B. der größte Vogel, der Strauß. Die Vogelwelt hat jedoch weitere spektakuläre Leistungen vorzuweisen, die faszinieren!

**Weitere Schnäppchen finden Sie unter:
www.science-shop.de/eiskalt**

Bequem
bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

1: GETTY IMAGES / AP / JAMIE REINA; 2: 3-7: GETTY IMAGES / AP / DANIEL MIHAILESCU; 4: AP PHOTO / PABLO MARTINEZ MONSIVIS; 5: GETTY IMAGES / AP / CESAR MANSO; 6: REUTERS / DADO RUVIC; 8: AP PHOTO / KICHIRO SATO



WENN DER FROST REGIERT

- Palma de Mallorca, Spanien, 4. Februar 2012: Unerwarteter Schneesturm auf der Mittelmeerinsel.
- / 3. Cărligu Mic, Rumänien, 11. Februar 2012:
Etwa 35 000 Menschen in der Region sind von der Lebensmittel- und Wasserversorgung abgeschnitten. 16 Menschen sterben.
- Washington D. C., 10. Februar 2012: Wegen des »Snowmageddon«-Unwetters kommt die Arbeit der Regierungsbehörden fast eine Woche zum Erliegen.
- Burgos, Spanien, 5. Februar 2012: Autos schleichen auf schneebedeckten Straßen entlang.
- Ostbosnien und Herzegowina, 6. Februar 2012: Ein entlegenes Dorf ist durch den Schnee vollkommen von der Außenwelt abgeschnitten.
- Konstanza, Rumänien, 1. Februar 2012: Die Temperaturen fallen auf minus 34 Grad Celsius.
- Chicago, USA, 2. Februar 2012: Hunderte Autofahrer sitzen bis zu zwölf Stunden auf einer Schnellstraße fest.



KLIMAFORSCHUNG

Die Rückkehr der harten Winter

In den letzten Jahren gab es in Europa und den USA ungewöhnlich strenge Kältephasen. Die Ursache dafür: Das arktische Meereis taut im Zuge des Klimawandels auf immer größeren Flächen ab.

Von Charles H. Greene

Der Winter 2012/2013 verlief bis zum Redaktionsschluss wechselhaft. Einem frühen Einbruch mit Frost und Schnee folgte ein längerer milder Abschnitt, bis Mitte Januar die Temperaturen erneut fielen und Deutschland unter einer Schneedecke verschwand. Der Frost hielt bis Ende Januar an. Damit könnte sich auch in diesem Winter die Folge strenger Kälteperioden fortsetzen, die Nordamerika und Europa seit 2009 erleben.

Die Ostküste der USA sowie West- und Nordeuropa wurden in den vergangenen Jahren von außerordentlich kalten Schneestürmen heimgesucht. Zu ihnen gehörte das so genannte »Snowmageddon«-Unwetter (eine Wortschöpfung aus »snow« für Schnee und »Armageddon«), das im Februar 2010 in Nordamerika wütete, dabei auch Washington D. C. unter Schneemassen begrub und die Handlungsfähigkeit der US-Regierung fast eine Woche lang erheblich einschränkte. Im Oktober 2010 sagte das National Climatic Data Center (NCDC) der USA voraus, dass der kommende Winter im Osten der Vereinigten Staaten relativ mild verlaufen würde, da ein La-Niña-Ereignis die Winterstrenge dämpfen würde. Doch trotz des Einflusses von La Niña kam es in New York City und Philadelphia im Januar 2011 zu sehr niedrigen Temperaturen und Rekordschneefällen.

Der Winter 2011/2012 hielt noch weitere Überraschungen bereit. Während die östlichen USA einen der mildesten Winter ihrer Geschichte erlebten, war es in anderen Teilen Nordamerikas und Europas außergewöhnlich kalt. In Alaska lag die Durchschnittstemperatur im Januar zehn Grad Celsius unter dem langfristigen Monatsmittel. Ein Sturm begrub Städte im Südosten Alaskas bis zu zwei Meter hoch unter Schnee. Über Mittel- und Osteuropa brach in der zweiten Januarhälfte eisiges Wetter herein, mit Temperaturen um minus 30 Grad Celsius. Mancherorts reichten die Schneeverwehungen bis zu den Dächern. Als sich die klirrende Kälte Mitte Februar verzog, waren ihr mehr als 600 Menschen zum Opfer gefallen.



3



6



8

Wie sind diese Wetterereignisse zu erklären, wo doch das Jahrzehnt zwischen 2002 und 2012 das wärmste in den 160 Jahren seit Beginn weltweiter Temperaturlaufzeichnungen war? Wissenschaftler scheinen die Antwort an einem unerwarteten Ort gefunden zu haben: im Nordpolarmeer, wo die sommerliche Ausdehnung des Meereises über die Jahre immer stärker zurückgegangen ist.

Seit meiner ersten Reise ins Nordpolargebiet im April 1989 hat sich die Arktis enorm verändert. Besonders deutlich fällt der Rückgang des Meereises in der warmen Jahreszeit auf. Jeden Sommer taut die arktische Meereisfläche teilweise ab und schrumpft, bis sie im September ihr Jahresminimum erreicht. In den Wintern friert das Nordpolarmeer fast vollständig wieder zu. Es ist dann sowohl von dickem mehrjährigem Eis bedeckt, das sich mit der Zeit angesammelt hat, als auch von dünnem einjährigem Eis, das jene Wasserflächen überzieht, die im Sommer zuvor offen lagen.

Anfang 1989, als der Winter zu Ende ging, bedeckte das arktische Meereis gut 14 Millionen Quadratkilometer. Etwa die Hälfte davon, also rund sieben Millionen Quadratkilometer, entfiel auf dickes mehrjähriges Eis, das etliche Sommer überdauert hatte. Heute stellt sich die Situation völlig anders dar. Obwohl das Meereis Anfang 2012 eine fast genauso große Fläche überzog wie zu Beginn des Jahres 1989, waren im September 2012 davon nur noch knapp 3,5 Millionen Quadratkilometer übrig – halb so viel wie in den 1980ern. Das entspricht einem sommerlichen Rekordtief.

Über die Jahre hinweg ist die arktische Meereisfläche im Sommer immer stärker geschrumpft, doch war das kein allmählicher Prozess, sondern eher ein sprunghafter. 1979 begann man, ihre Ausdehnung mit Satelliten zu messen. Bis zum Jahr 2000 entwickelten sich die sommerlichen Eisverluste nicht besonders auffällig. Zwischen 2000 und 2006 beschleunigte sich der Rückgang zwar, doch erst 2007 wurde er plötzlich so gravierend, dass eine breitere Öffentlichkeit davon Notiz nahm. Innerhalb jenes Jahres schrumpfte die sommerliche Meereisdecke um zusätzliche 26 Prozent, verglichen mit dem Jahr zuvor – von etwa 5,8 Millionen Quadratkilometern im September 2006 auf etwa 4,3 Millionen im September 2007. Dieser beispiellose Schwund veranlasste die Wissenschaftler zu neuen Vorhersagen darüber, wann das Nordpolar-



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Klima« finden Sie unter
www.spektrum.de/klima

meer zum ersten Mal eisfrei sein würde. Basierend auf den Daten, die vor 2007 gesammelt wurden, hatte der Weltklimarat (IPCC) diesen Zeitpunkt einst für das Ende des 21. Jahrhunderts prognostiziert. Doch auf der Grundlage der neuen Daten seit 2007 kommen die meisten Studien nun zu dem Ergebnis, dass es schon zwischen 2020 und 2040 so weit sein könnte.

Rasante Erwärmung am Nordpol

Der Meereisschwund ist deshalb so ausgeprägt, weil der Klimawandel sich besonders stark auf die Arktis auswirkt. In den vergangenen 50 Jahren sind die Durchschnittstemperaturen dort doppelt so schnell gestiegen wie im Rest der Welt. Diese rasche Erwärmung hat das Wettergeschehen in der Nordpolarregion verändert und riesige Permafrostgebiete auftauen lassen. Die Folge davon sind drastisch veränderte Lebensräume für die regionale Tierwelt, was das langfristige Überleben vieler Arten gefährdet. Auch die Inuit, Yupik und Aleuten, seit Langem für ihre Anpassungen an Kälte und Eis bekannt, müssen ihren Lebensstil deutlich ändern und sehen ihr kulturelles Erbe zunehmend bedroht. Menschen, die außerhalb der Polarregionen leben, fühlen sich von diesen Vorgängen meist nur wenig betroffen. In Wahrheit wirkt sich jedoch das Klima der Arktis spürbar auf das Wettergeschehen in den mittleren Breiten aus. Vermutlich hat es auch zu den strengen Wintern in Europa und Nordamerika beigetragen, die in den zurückliegenden Jahren zu verzeichnen waren.

Schon in den 1960er Jahren gab es eine Reihe von ungewöhnlich harten Wintern. Ich kann mich noch gut daran erinnern, wie ich in meinem damaligen Wohnort nahe Washington D. C. gemeinsam mit Freunden durch den Schnee zur Schule stapfte. Nach heutigem Stand der Forschung gingen diese Kälteperioden auf zwei natürliche Phänomene zurück: die Arktische Oszillation und die Nordatlantische Oszillation (siehe Kasten auf S. 80). Es handelt sich um Klimaschwankungen, die durch Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und dem Ozean entstehen und sich am auffälligsten in der Winterzeit bemerkbar machen.

Die Arktische Oszillation betrifft den Luftdruckgegensatz zwischen arktischen und mittleren Breiten. Dieser wird durch eine Kennzahl charakterisiert, einen so genannten Index, der sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Wenn der Index positiv ist, besteht ein ausgeprägtes Druckgefälle zwischen den mittleren Breiten und der Arktis, was den so genannten Polarwirbel verstärkt – eine beständige Strömung in der höheren Atmosphäre, die in West-Ost-Richtung rund um die Arktis weht. Ein kräftiger Polarwirbel

AUF EINEN BLICK

DAS GROSSE SCHMELZEN IM NORDEN

1 Die globale Erwärmung hat den **sommerlichen Meereis-schwund in der Arktis** verstärkt. Infolgedessen verändern sich Klimabedingungen, die das Winterwetter in Europa und den USA beeinflussen.

2 Polare Luftmassen können häufiger in mittlere Breiten eindringen. Dadurch kommen **strenge Wintereinbrüche** vermehrt vor – etwa vor zwei Jahren in den östlichen USA und Nordeuropa sowie vergangenes Jahr in Ost- und Südosteuropa.

3 Auch künftig dürfte es in Nordamerika und Europa zu **ungewöhnlich harten Kältephasen** kommen.



hält die arktischen Luftmassen weit gehend jenseits des nördlichen Polarkreises gefangen.

Ist der Index hingegen negativ, liegt nur ein geringes Druckgefälle zwischen Süden und Norden vor, was den Polarwirbel schwächt. Die kalte Polarluft kann dann nach Süden in die mittleren Breiten vorstoßen, wo sie für frostige Wetterlagen und verstärkten Schneefall sorgt. Besonders betroffen sind davon meist die Ostküste der USA sowie Nordeuropa.

Als Nordatlantische Oszillation wiederum bezeichnet man Schwankungen im Luftdruckverhältnis zwischen dem Norden und dem Süden des Nordatlantiks, genauer: zwischen Islandtief und Azorenhoch. Auch dieses Verhältnis wird durch einen Index charakterisiert, der positiv oder negativ sein kann. Bei einem positiven Index sind sowohl das Azorenhoch als auch das Islandtief stark ausgeprägt. Es herrschen dann große Druckunterschiede zwischen subtropischen und subpolaren Gebieten vor, was die Westwinde verstärkt, die ganzjährig in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel wehen. Die Druckdifferenzen lenken auch den Strahlstrom – eine schnelle, hohe Luftströmung rund um den Globus – von der Ostküste der USA aus nach Nordosten in Richtung Nordeuropa. Winterstürme, die den Nordatlantik überqueren, folgen diesem Weg und bringen feuchteres und milderes Wetter nach Nordeuropa.

Ganz andere Verhältnisse herrschen, wenn der für die Nordatlantische Oszillation maßgebliche Index negativ ist. Dann bestehen nur geringe Druckunterschiede zwischen subtropischen und subpolaren Gebieten, was die Westwinddrift schwächt. Der Strahlstrom schwenkt nun, sobald er Nordamerika verlässt, stärker nach Norden und erreicht Grönland, bevor er wieder in Richtung Europa abbiegt. Die Winterstürme folgen ihm jetzt nicht, sondern ziehen quer über den Nordatlantik direkt auf Südeuropa und die Mittelmeergebiete zu, wo sie für feuchteres und milderes Wetter sorgen. Nordeuropa hingegen bleibt kalt und trocken.

Klimaforscher sind sich uneins darüber, ob die Nordatlantische und die Arktische Oszillation als zwei verschiedene Phänomene betrachtet werden sollten. Manche meinen, die erste sei lediglich eine Manifestation der zweiten im Nordatlantik. Andere sind überzeugt davon, die Dynamik der beiden sei verschieden genug, um sie getrennt zu behandeln. Denn obwohl beide Oszillationen stark miteinander korre-

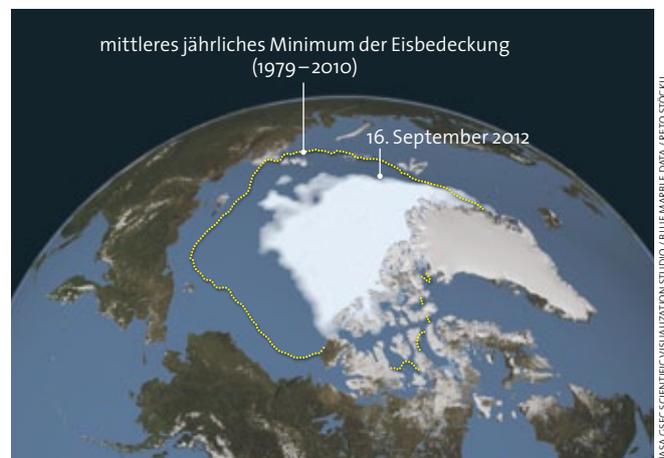
Infolge des Klimawandels schrumpft die sommerliche Meereisfläche in der Arktis immer stärker. Am 16.9.2012 wurden 3,44 Millionen Quadratkilometer gemessen – so wenig wie noch nie.

liert sind, weicht ihr Verhalten mitunter voneinander ab – so wie im vergangenen Winter.

Der menschengemachte Ausstoß von Treibhausgasen verändert das Erdklima, und diese Veränderungen überlagern die natürlichen Klimaschwankungen. Es ist schwer zu ermitteln, wie groß dieser Effekt genau ist. Jüngere Forschungen deuten aber darauf hin, dass die globale Erwärmung und der Meereisschwund in der Arktis bereits heute unsere Winter beeinflussen, indem sie den normalen Rhythmus der Arktischen und der Nordatlantischen Oszillation stören.

Während meiner Kindheit in den 1960er Jahren befanden sich beide Oszillationen vorwiegend in der negativen Phase, was an der Ostküste der USA und in Nordeuropa zu schneereichen und kalten Wintern führte. Es gibt keinen Grund zu der Annahme, die strengen Winter jenes Jahrzehnts seien auf irgendetwas anderes zurückzuführen gewesen als auf diese beiden natürlichen Klimaphänomene. In den 1970er und 1990er Jahren hingegen war der Index der Nordatlantischen Oszillation überwiegend positiv. Daraus resultierte eine Serie von milden Wintern, die viele Wissenschaftler in den steigenden Treibhausgaskonzentrationen begründet sahen. Der Weltklimarat prognostizierte, dass sich die Erwärmung mit dem zunehmenden Gehalt von Treibhausgasen in der Atmosphäre fortsetzen würde. Doch in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre endete die Dominanz positiver Phasen der Arktischen und der Nordatlantischen Oszillation.

Zwar setzte sich die Serie milder Winter damals nicht fort, das heißt aber nicht, dass der einst postulierte Zusammenhang zwischen Treibhausgasen und Erderwärmung falsch ist. Der beschleunigte Klimawandel in der Arktis, den wir heute beobachten, war in den 1990er Jahren noch nicht absehbar. Einige Experten sprechen davon, dass die Gebiete rund um den Nordpol in eine »Arktische Wärmeperiode« eingetreten seien. Sie beziehen sich dabei auf das rasche Abschmelzen des arktischen Meereises, des grönländischen Eisschildes und der kontinentalen Gletscher sowie auf das Auftauen der Permafrostböden. Von zentraler Bedeutung für diese Veränderungen ist die so genannte Albedo-Rückkopplung: Wenn die Eisdecke abschmilzt und dunklere Land- oder Meeresoberflächen freigeht, reflektiert das Gebiet weniger Sonnenstrahlung.



Besonders große Sorgen bereitet den Wissenschaftlern die Albedo-Rückkopplung im Nordpolarmeer. Durch den Verlust an sommerlichem Meereis trifft das Sonnenlicht dort auf immer größere offene Wasserflächen. Das Oberflächenwasser absorbiert mehr Strahlung als Eis und erwärmt sich entsprechend stärker. Daraus resultieren zwei wichtige Effekte. Erstens: Ein Teil der zusätzlichen Wärme lässt in den Sommermonaten noch mehr Eis abtauen. Zweitens: Die verbleibende zusätzliche Wärme gibt der Ozean im Herbst allmählich an die Atmosphäre ab. Dadurch steigen Luftdruck und Luftfeuchtigkeit in der Arktis, und die Temperaturunterschiede zwischen arktischen und mittleren Breiten gehen zurück.

Diese Rückkopplungseffekte führen dazu, dass es im Winter verstärkt zu negativen Phasen der Arktischen und der Nordatlantischen Oszillation kommt. Infolgedessen werden der Polarwirbel und der Strahlstrom geschwächt. Ein schwächerer Polarwirbel kann die polaren Luftmassen mit ihrem erhöhten Feuchtigkeitsgehalt weniger effektiv daran hindern, in mittlere Breiten abzufließen und dort für Kälteeinbrüche und Schneefall zu sorgen. Ein geschwächter Strahlstrom wiederum folgt oft einem sinusförmigen Pfad mit großräumigen Auslenkungen, die auf der Stelle stehen bleiben und dadurch manche Regionen in eine Art Kältefalle einschließen.

Gemeinsam bewirken diese beiden Phänomene eine Häufung schwerer Wintereinbrüche in Nordamerika und Europa.

Allerdings können auch noch andere Faktoren ins Spiel kommen. El Niño, ein ungewöhnliches Strömungsmuster im äquatorialen Pazifik, kann das Winterwetter in den USA stark beeinflussen. Im östlichen Teil der Vereinigten Staaten verlagert sich der Strahlstrom während einer El-Niño-Phase in Richtung Süden, was vielerorts kältere, strengere Winter zur Folge hat. Während eines La-Niña-Ereignisses hingegen – einem Klimaphänomen, das meist nach El Niño auftritt und gewissermaßen sein Gegenteil darstellt – wandert der Strahlstrom nach Norden und bringt denselben Regionen wärmere und mildere Winter.

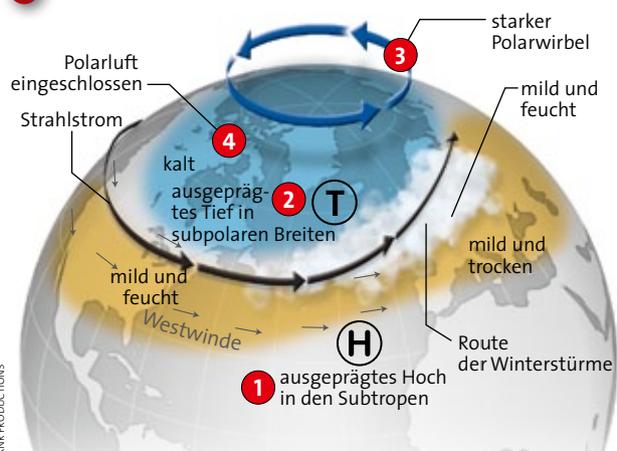
Treten negative Phasen der Arktischen und der Nordatlantischen Oszillation gemeinsam mit El Niño auf, so erhöht dies die Wahrscheinlichkeit kalter, strenger Winter an der US-Ostküste stark. Zu einer solchen Konstellation kam es im Winter 2009/2010. Fallen sie hingegen mit La Niña zusammen, dann kompensieren sie deren Folgen. Genau das geschah 2010/2011, als die niedrigen Temperaturen und Rekordschneefälle in New York City und Philadelphia die Wetterexperten überraschten, die auf Grund von La Niña einen milden Winter erwartet hatten.

Klima und Wetter

Zwei natürliche Klimaphänomene, die Arktische Oszillation und die Nordatlantische Oszillation, können das Winterwetter in den USA und Europa stark beeinflussen. Beide weisen positive und negative Phasen auf, und zwar meist synchron. Großflächige Verluste an sommerlichem Meereis in der Arktis haben das Klima so verändert, dass es nun vermehrt zu negativen Phasen kommt, was wiederum zu strengeren Wintern auf der Nordhalbkugel führt.

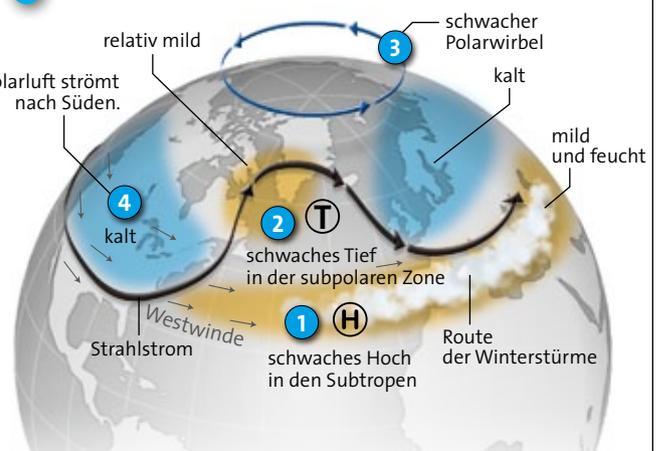
Positive Phasen der Arktischen und der Nordatlantischen Oszillation sind durch ein ausgeprägtes Hochdruckgebiet (H) in den Subtropen (1) und ein starkes Tiefdruckgebiet (T) in den subpolaren Breiten (2) gekennzeichnet. Unter diesen Bedingungen entsteht ein starker Polarwirbel (3), der die kalte Luft im Norden einsperrt (4). Warme Luft aus südlichen Breiten kann nun weit nach Norden vordringen. Der Strahlstrom und die Winterstürme folgen einem nordöstlichen Kurs über den Atlantik und bringen warme, feuchte Luft nach Nordeuropa.

- + **ARKTISCHE OZILLATION**
- + **NORDATLANTISCHE OZILLATION**



Negative Phasen der Arktischen und der Nordatlantischen Oszillation zeichnen sich durch geringe Druckunterschiede zwischen den Subtropen (1) und subpolaren Breiten (2) aus. Auch der Polarwirbel (3) bildet sich nur schwach aus, was es der kalten arktischen Luft erlaubt, weit nach Süden zu strömen (4). Unter diesen Bedingungen ähnelt der Strahlstrom einer Sinuskurve. Er taucht südwärts in den Ostteil der USA ein, erreicht seinen nördlichsten Punkt nahe Grönland und biegt dann wieder nach Süden ab. Die Winterstürme ziehen nun eher in östlicher Richtung über den Atlantik und bringen warme, feuchte Luft nach Südeuropa.

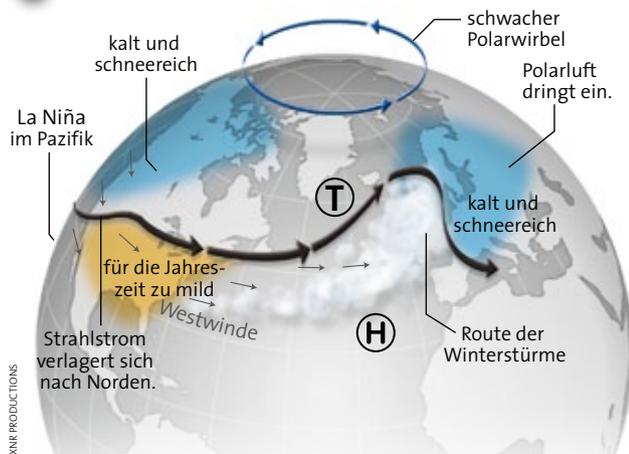
- **ARKTISCHE OZILLATION**
- **NORDATLANTISCHE OZILLATION**



Der Winter 2011/2012 – ein Kuriosum

– ARKTISCHE OZILLATION

+ NORDATLANTISCHE OZILLATION



Ungewöhnliche atmosphärische Bedingungen führten Anfang 2012 zu einem sonderbaren Nebeneinander von extremer Kälte und milden Temperaturen in den USA. Gewöhnlich verlaufen die Arktische und die Nordatlantische Oszillation synchron. Auch in diesem Winter waren beide zunächst positiv. Doch Mitte Januar wechselte die Arktische Oszillation in eine negative Phase, in der sie bis Anfang Februar blieb, während die Nordatlantische Oszillation in der positiven Phase verharrte. Dies ermöglichte den polaren Luftmassen, nach Mittel- und Osteuropa vorzudringen und dort für sehr kaltes und schneereiches Wetter zu sorgen. Die Kombination mit einem La-Niña-Ereignis im Pazifik führte auch in Alaska zu starker Kälte und Schnee. Zugleich lenkte La Niña den Strahlstrom über dem Norden der USA so um, dass milde Luft aus dem Golf von Mexiko in den östlichen Teil der Vereinigten Staaten vordrang und dort für ungewöhnlich warmes Wetter sorgte.

Obwohl die Veränderungen in der Arktis es wahrscheinlicher gemacht haben, dass wir künftig mehr strenge Wintererbrüche erleben, können wir nie sicher sein, was in einem bestimmten Jahr genau passieren wird. Der Winter 2011/2012 ist ein gutes Beispiel dafür. Für den Osten der USA war relativ mildes Wetter vorhergesagt, da sich im Pazifik ein La-Niña-Ereignis abzeichnete und sowohl Arktische als auch Nordatlantische Oszillation zunächst in einer positiven Phase waren. Von Mitte Januar bis Anfang Februar wechselte die Arktische Oszillation jedoch in eine negative Phase, während der Index der Nordatlantischen Oszillation positiv blieb. Alaska sowie Teile Mittel- und Osteuropas wurden von extremer Kälte und heftigen Schneestürmen erfasst, im Osten der USA hingegen blieb das Wetter für die Jahreszeit ungewöhnlich mild. La Niña hatte den Strahlstrom über Nordamerika viel weiter nach Norden gelenkt als in der Wintermitte bei negativem Index der Arktischen Oszillation üblich. So konnte warme Luft aus dem Golf von Mexiko in den Osten der Vereinigten Staaten strömen und dieser Region den viertwärmsten Winter seit Beginn der Aufzeichnungen beschern. Die Verlagerung des Strahlstroms brachte auch dem Nordatlantik und Westeuropa vergleichsweise mildes Wetter.

Anfang März entwickelte sich im Ostpazifik ein starkes und beständiges Hochdrucksystem, das die ungewöhnlichen Wetterbedingungen weiter verschärfte. Das Ergebnis waren Wärmerekorde im gesamten Mittelwesten und Osten der USA. Zugleich erlebten andere Teile der Nordhalbkugel einen ungewohnt strengen Winter sowie überraschend niedrige Temperaturen bei Frühlingsbeginn. Nach einem Bericht des National Climatic Data Center war die weltweite Durchschnittstemperatur im März 2012 die niedrigste seit 1999.

Die im Herbst 2012 vorliegenden Informationen sprachen dafür, dass es auch 2012/2013 in Nordamerika und Europa zu strengen Wintereinbrüchen kommen würde. Der Rekordver-

lust an arktischem Meereis im vergangenen Sommer machte das Einströmen kalter polarer Luftmassen in die mittleren Breiten wahrscheinlich; zudem zeichnete sich ein El-Niño-Ereignis ab. Dieses ist nun allerdings doch nicht eingetreten, und die Meteorologen mussten ihre Vorhersagen revidieren. Das zeigt, wie schwierig eine zuverlässige Langfristprognose immer noch ist – und dass das Wetter weiterhin für Überraschungen sorgen wird. ~

DER AUTOR



Charles H. Greene arbeitet als Professor für Geo- und Atmosphärenwissenschaften an der Cornell University in New York (USA). Zudem ist er dort Direktor des Programms »Ozeanressourcen und Ökosystemen« sowie Mitglied am David-R.-Atkinson-Zentrum für eine nachhaltige Zukunft. Er koordiniert die Ausbildungspläne der Universität im Bereich nachhaltige Geo-, Energie- und Umweltsysteme.

QUELLEN

- Francis, J. A., Vavrus, S. J.:** Evidence Linking Arctic Amplification to Extreme Weather in Mid-Latitude. In: *Geophysical Research Letters* 39, L06801, 2012
- Greene, C. H., Monger, B. C.:** An Arctic Wild Card in the Weather. In: *Oceanography* 25, S. 7–9, 2012
- Overland, J. E. et al.:** The Recent Arctic Warm Period. In: *Tellus* 60, S. 589–597, 2008

WEBLINKS

<http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a003900/a003991>
Animierte Karten, die den Rückgang der sommerlichen Meereisfläche in der Arktis zeigen

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182033

Elektronik aus Kohlenstoff

Forscher suchen nach neuen Möglichkeiten, schnellere Transistoren für Mikrochips herzustellen. Große Hoffnungen setzen sie auf den Wunderstoff Graphen. Doch einen Wermutstropfen gibt es bereits: Für Computer scheint er wenig zu taugen.

Von Keith A. Jenkins

Für ihre »bahnbrechenden Experimente mit dem zweidimensionalen Stoff Graphen« erhielten Andre Geim und Konstantin Novoselov 2010 den Physik-Nobelpreis (Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 16). Die Wissenschaftler von der University of Manchester hatten sechs Jahre davor diese Form des Kohlenstoffs entdeckt und damit auf der ganzen Welt eine Welle theoretischer und experimenteller Untersuchungen ausgelöst. Denn Graphen besitzt äußerst bemerkenswerte und einzigartige physikalische Eigenschaften.

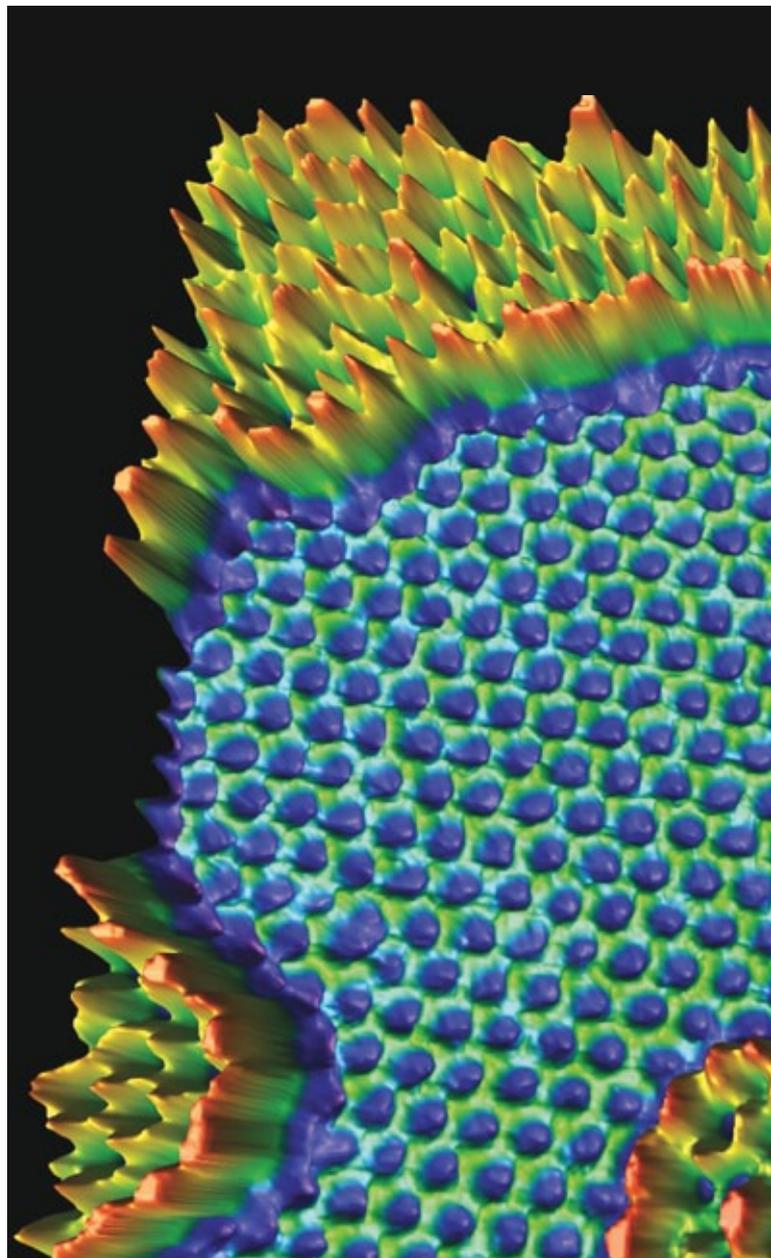
Es handelt sich um eine zweidimensionale Modifikation des Kohlenstoffs, eine Schicht aus Atomen, die in einem hexagonalen Honigwabemuster angeordnet sind. In der Natur findet man dergleichen übereinandergestapelt im weit verbreiteten Material Graphit. Jede Schicht darin ist an die angrenzenden durch Van-der-Waals-Kräfte gebunden. Weil diese viel schwächer sind als chemische Bindungen, eignet sich Graphit als Gleitmittel.

Graphen ist biegsam und trotzdem zehnmal stärker als andere Werkstoffe gleicher Dicke. Es absorbiert Licht über einen weiten Frequenzbereich – und ist dennoch transparent, da der zweidimensionale Kristall insgesamt nur 2,3 Prozent des einfallenden Lichts schlucken kann. Die Substanz verhält sich zwar chemisch relativ träge, lässt sich aber durch eine

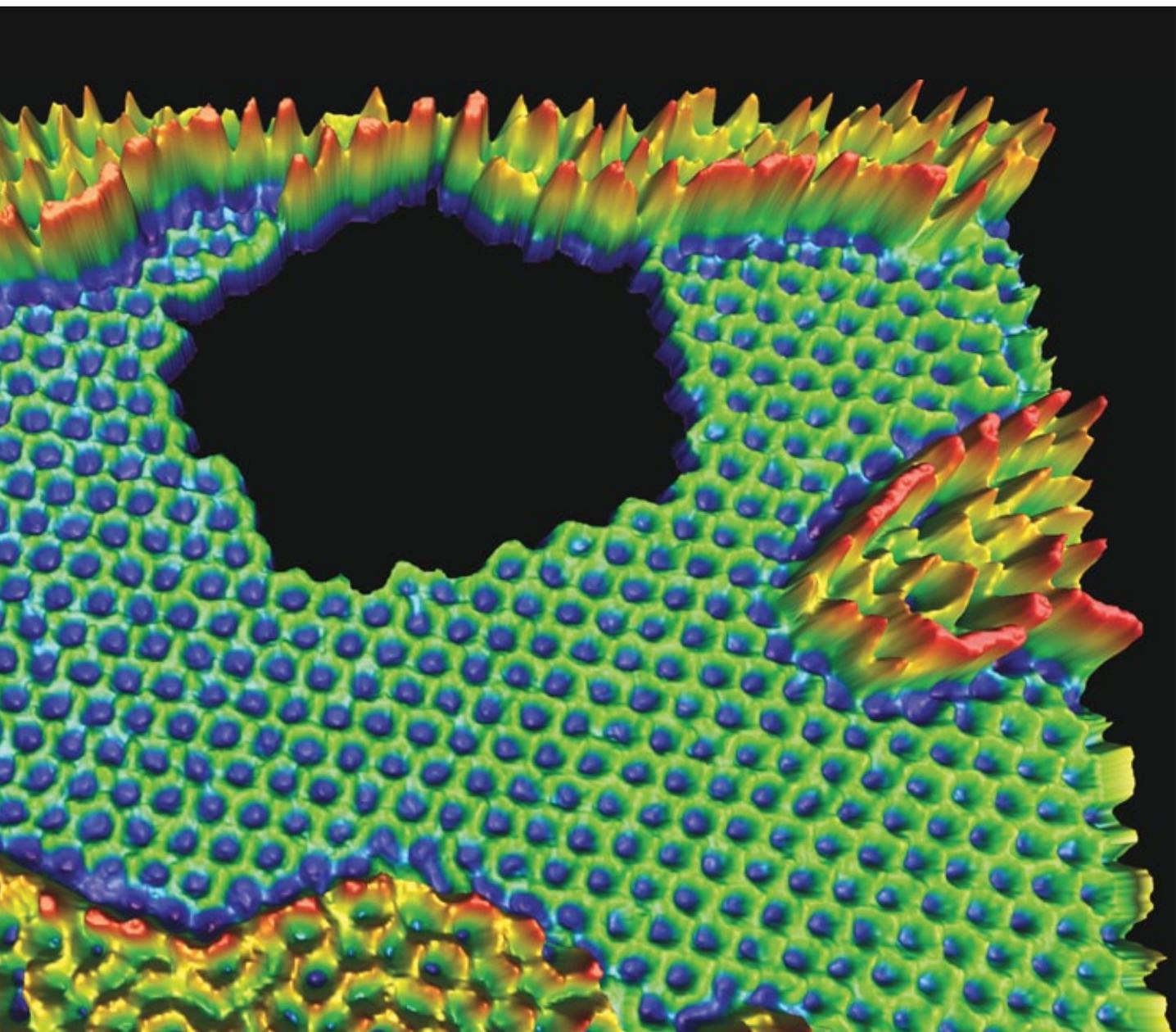
AUF EINEN BLICK

DER BEINAHE-HALBLEITER

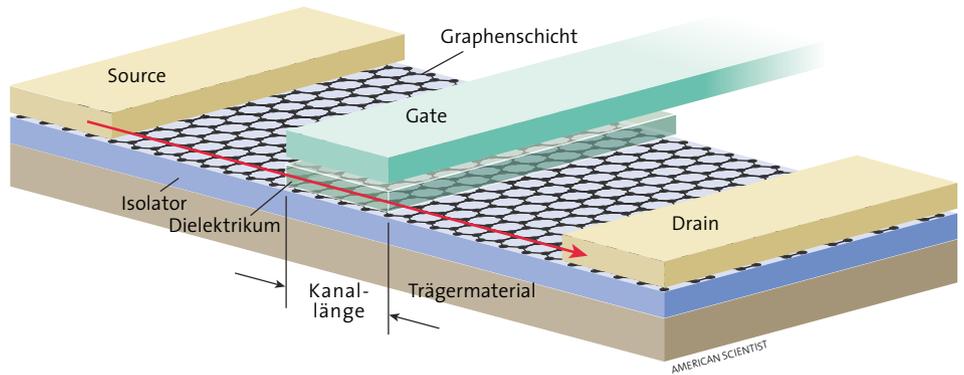
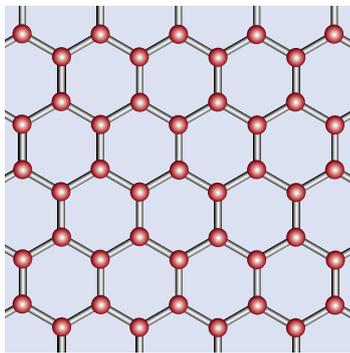
- 1 Weil sich Elektronen in dem **Kohlenstoffkristall Graphen** viel schneller bewegen als in dem **Halbleiter Silizium**, hoffen Forscher damit leistungsfähigere Transistoren zu entwickeln.
- 2 Allerdings weist Graphen keine durchgehende Lücke zwischen dem **Energieband** der gebundenen und dem der freien Ladungsträger auf, wie es bei einem Halbleiter der Fall ist.
- 3 Ein Graphentransistor kann Strom daher nicht vollständig abschalten. Somit eignet er sich nicht für Computerchips, wohl aber für die **analoge Kommunikationstechnik**.



Wie ein Muster aus Honigwaben erscheint Graphen in der Aufnahme, die mit einem speziellen Elektronenmikroskop gemacht wurde. Diese kristalline Form des Kohlenstoffs ist biegsam, belastbar – und zweidimensional, das heißt nur eine Atomlage dick. Sie könnte Silizium oder andere konventionelle Halbleiter in elektronischen Schaltungen ersetzen oder doch zumindest ergänzen, denn Graphen leitet Strom wesentlich schneller. Das hier abgebildete Plättchen zeigt aber auch den noch beträchtlichen Entwicklungsbedarf auf: Zum einen gibt es eine große Lücke im Kristallgitter, zum anderen liegen Fremdstoffe an den Rändern.



AG FOCUS / SPL / LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY



Eine Graphenschicht (links, Schema) aus einer einzigen Lage von Kohlenstoffatomen wurde in einen Feldeffekttransistor (FET) eingebaut (rechts). Wenn am Gate-Anschluss die richtige Spannung anliegt, bildet sich ein Stromkanal zwischen Source und Drain (roter Pfeil). Seine Länge beeinflusst die Geschwindigkeit des Transistors stark.

Vorbehandlung in einen Detektor verwandeln, der bereits sehr geringe Konzentrationen von Chemikalien nachweist. Überdies besitzt Graphen eine hohe Elektronenbeweglichkeit: Elektrische Ladungen fließen theoretisch 100-mal schneller hindurch, als es bei konventionellen Halbleitern wie Silizium der Fall ist.

Testsieger in Sachen Elektronenbeweglichkeit

Insbesondere die letzte Eigenschaft lieferte den Anlass für Visionen einer neuen Elektronik, die noch schnellere Computer und höhere Datenraten ermöglichen sollte. Bisher gelangen solche Verbesserungen durch Verkleinern der wichtigsten Bauelemente moderner Schaltkreise: der Transistoren. Normalerweise bestehen diese aus Halbleitern wie Silizium, die unter bestimmten Bedingungen Strom leiten, unter anderen als Isolator wirken. Dieses Verhalten beruht auf den Energiebändern, zu denen sich die Energieniveaus der Elektronen im Kristallgitter der Halbleiteratome überlagern. Anders als bei Metallen gibt es keinen permanenten Pool freier Ladungsträger, doch es bedarf auch keines großen Aufwands, gebundene Elektronen in das so genannte Leitungsband zu heben. Diese »Bandlücke« lässt sich zudem durch »Dotieren« steuern: Der Einbau von Fremdatomen in das Gitter sorgt dafür, dass manche Elektronen ungebunden und daher frei beweglich sind. An anderen Plätzen fehlen sie hingegen, weshalb dort die positive Ladung des Atomkerns hindurchscheint. Diese »Löcher« sind ebenfalls mobil und transportieren die positive Ladung durch den Festkörper. Halbleiter, bei denen negativ geladene Elektronen fließen, nennt man n-dotiert, solche, bei denen positiv geladene Löcher strömen, heißen p-dotiert.

In modernen Computern kommen meist Feldeffekttransistoren (FET) zum Einsatz. Der Aufbau eines FETs folgt einem einfachen Muster: Eine Gate-Elektrode (nach englisch: gate für »Gatter«) sitzt in der Mitte des Bauelements, durch eine dünne Isolatorschicht von dem darunterliegenden

Halbleiter getrennt (siehe Grafik oben). Den kontaktieren zwei Elektroden – Source (auf Deutsch: Quelle) und Drain (auf Deutsch: Senke) genannt – und schicken Elektronen oder Löcher durch einen die beiden verbindenden Stromkanal. Dieser lässt sich mittels einer Spannung am Gate steuern. In einem n-dotierten FET zum Beispiel bildet eine positive Spannung an der Gate-Elektrode eine Schicht aus Elektronen in der Kanalregion aus, so dass Strom fließen kann.

Um einen FET schneller zu machen, wird der Abstand zwischen Source und Drain – also die Kanallänge – verkürzt; die Signale reisen dann schneller zwischen den beiden Anschlüssen. Obendrein lassen sich so mehr Transistoren auf eine bestimmte Fläche packen. Der IBM-Forscher Robert Dennard taufte dieses Vorgehen in den 1970er Jahren Skalieren (englisch: scaling).

Inzwischen wird es allerdings immer schwieriger, die Größe konventioneller Siliziumtransistoren weiterzuschrumpfen. Ein neues Paradigma scheint notwendig: Statt die Signalggeschwindigkeit durch Skalieren zu erhöhen, setzen manche Forscher auf Materialien, die elektrische Signale schneller leiten. Deshalb ist die hohe Elektronenbeweglichkeit von Graphen so interessant.

Verglichen mit anderen Halbleitermaterialien schneidet Silizium hier eher schlecht ab. Dennoch ist es weit verbreitet, weil es beispielsweise mechanisch belastbar ist und sich daraus relativ einfach hochreine Kristalle herstellen lassen. Hingegen eignen sich Galliumarsenid (GaAs) und Indiumphosphid (InP) trotz ihrer höheren Elektronenbeweglichkeit nur für bestimmte Anwendungen wie drahtlose Hochfrequenztransmitter und -empfänger in Handys oder für Spezialelektronik in militärischen Kommunikationseinrichtungen. In derartigen Anwendungen könnten auch Transistoren aus Graphen bald eine Rolle spielen, deren Elektronenbeweglichkeit noch größer ist.

Ziel unserer Forschungsgruppe bei IBM ist daher, daraus Transistoren und Schaltkreise zu bauen sowie eine für die Serienproduktion taugliche Herstellungs- und Verarbeitungs-

technologie zu entwickeln. Das Verfahren, mit dem Geim und Novoselov Graphen gewannen, taugt dafür nicht: Sie pressten ein Klebeband auf Graphit, zogen es ab und drückten es dann mehrfach auf einen Träger, bis auch Graphenplättchen übrig blieben. Schließlich hatten sie genug davon für ihre Experimente. Vermutlich stieg das Interesse an diesem Material auch deshalb so stark, weil man es in geringen Mengen leicht bekommen kann.

Doch die so gewonnenen Plättchen sind winzig: nur einige zehn Mikrometer groß. Moderne Schaltkreise werden aber aus dünnen, scheibenförmigen Einkristallen (Wafern) mit einem Durchmesser von 20 oder 30 Zentimetern gefertigt, auf denen durch diverse Bearbeitungsschritte oft hunderte identische Schaltkreise entstehen. Es gilt deshalb, den nur 300 Pikometer (10^{-12} Meter) hohen Graphenkristall über viele Zentimeter Länge und Breite zu fertigen.

Die Herstellung: Vom Klebefilm zur Gasphasenabscheidung

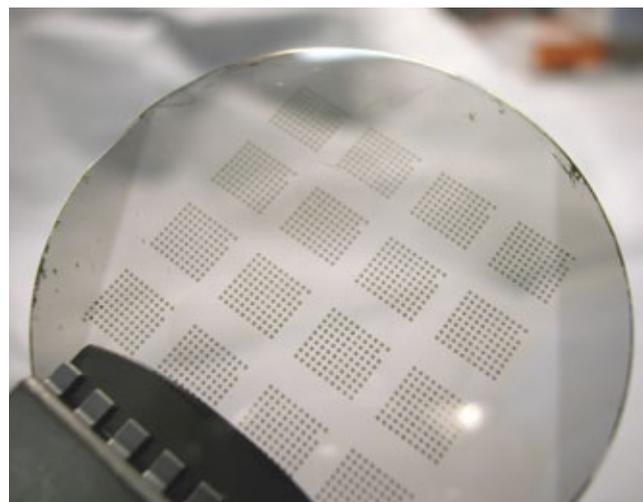
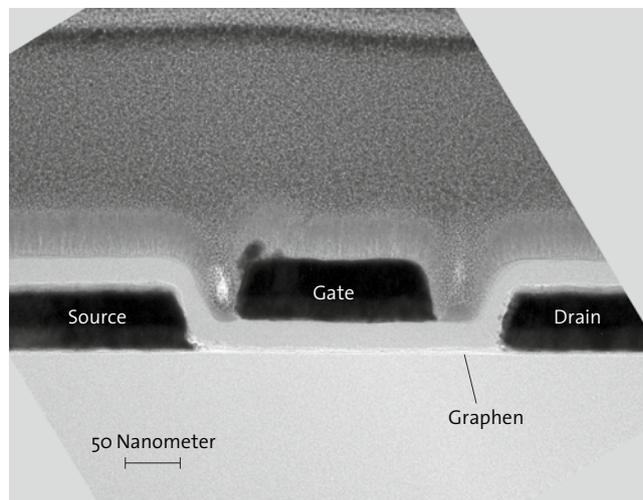
Eine viel versprechende Herstellungsmethode erzeugt Graphen aus Siliziumkarbid (SiC). Bei Temperaturen höher als 1000 Grad Celsius brechen dessen Bindungen auf, und das Silizium verdampft. Leitet man kohlenstoffhaltige Gase über die Oberfläche, lagern sich zusätzliche Atome an die verbliebenen an, und es entsteht das gewünschte hexagonale Gitter. Diese epitaktische Methode – Epitaxie bezeichnet das Aufwachsen von Strukturen auf einem Kristallträger – wird seit einigen Jahren verwendet, um 50 Millimeter große Scheiben herzustellen, deren Trägerstruktur vollständig von einer Graphenschicht bedeckt wird. Solche Wafer können dann mit vielen Fertigungstechniken der konventionellen Chipherstellung zu Bauelementen und Schaltkreisen verarbeitet werden. In naher Zukunft sollen Wafer mit 100 Millimeter Durchmesser auf den Markt kommen, was diese Methode noch attraktiver macht. Doch es gibt einen Wermutstropfen: Die so gewonnene Graphenschicht ist an das Grundmaterial gebunden, und das bremst die Elektronen aus. Tatsächlich bildet sich sogar zunächst eine Übergangsschicht, in der es gar kein Elektronengas gibt, das für die Leitung zur Verfügung stünde.

Eine weitere Methode, Graphen in Wafergröße zu produzieren, ist die chemische Gasphasenabscheidung (englisch: chemical vapour deposition, CVD), bei der sich ein Gas an einer Substratoberfläche zersetzt und sich eines der Reaktionsprodukte als Festkörperfilm darauf abscheidet. So konnte mit einem kohlenstoffhaltigen Gas wie Ethen (C_2H_4) auf einer Kupferschicht, die als Katalysator wirkt, bereits hochwertiges Graphen hergestellt werden. Weil Kupfer Strom leitet, ist diese Kombination jedoch nutzlos. Man muss das Graphen daher noch auf ein isolierendes Substrat übertragen. Dazu wird es zuerst mit einem Polymer beschichtet; dann wird das Kupfer weggeätzt und die Graphen-Polymer-Schicht auf einen Trägerwafer übertragen; schließlich entfernt man mit Chemikalien wie Azeton das Polymer wieder. Mit dieser Technik lassen sich Durchmesser von 200 und 300 Millimetern errei-

chen. Zudem ist es inzwischen möglich, das Graphen auf vorgefertigte Schaltkreise aufzubringen und so hybride Bauelemente zu produzieren. Auch diese Methode hat ihre Schattenseiten: Die Elektronen büßen hier noch mehr Beweglichkeit ein, sei es weil Polymerreste zurückbleiben, sei es durch Störungen der Kristallstruktur. Bilden sich etwa Grenzflächen zwischen Bereichen unterschiedlicher Orientierung, können die Elektronen sie nicht ohne Weiteres überwinden.

Darüber hinaus gibt es andere Verfahren wie das Abtragen von Graphen von einem Graphitkristall mit speziellen Lösungsmitteln sowie den Versuch, es aus Vorprodukten zu synthetisieren (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2012, S. 82). Sie alle haben Vor- und Nachteile – das Rennen ist offen.

Ein Graphentransistor ähnelt durchaus einem konventionellen Feldeffekttransistor und hat genau wie dieser eine durch einen Isolator abgetrennte Gate-Elektrode, um den



Fünf Zentimeter misst dieser Siliziumkarbidwafer im Durchmesser (unteres Bild). Er trägt eine Schicht aus Graphen. Darauf wurde ein Raster aus den im Ausschnitt oben gezeigten Transistoren (elektronenmikroskopische Aufnahme) hergestellt. Da Graphen und das Trägermaterial selbst durchsichtig sind, zeichnen sich nur die metallischen Kontakte ab.

BEIDE FOTOS: KEITH A. JENKINS

Fluss von Elektronen oder Löchern zu steuern. Doch anders als etwa bei Silizium oder Siliziumkarbid ist die Energielücke zwischen dem Leitungsband (in dem sich Elektronen frei bewegen können) und dem Valenzband (wo Elektronen fest an ihre Atome gebunden sind) nicht durchgängig, sondern es gibt sozusagen Berührungspunkte. Deshalb lässt sich der Stromfluss im Graphentransistor niemals vollständig abschalten, sondern nur die Zahl der Ladungsträger verringern. In einem Silizium-FET ist der Reststrom im ausgeschalteten Zustand um den Faktor 10^4 bis 10^5 kleiner als der Durchlassstrom, doch beim Graphentransistor gilt schon der Faktor zehn als hoch.

Außerdem wächst der Widerstand bei Siliziumbauelementen bereits, wenn nur ein Teil des Kanals geschlossen ist. Dieses »Abschnürung« genannte Phänomen sorgt für einen

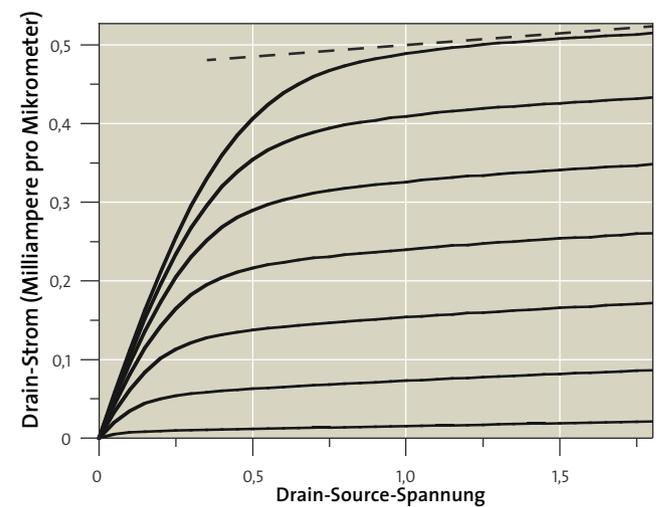
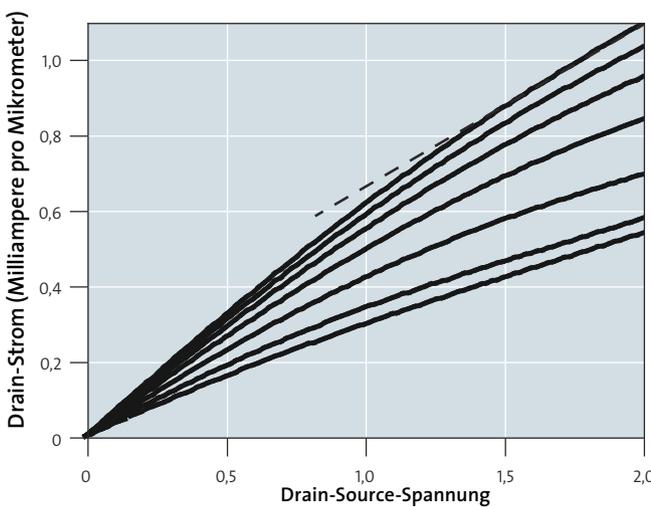
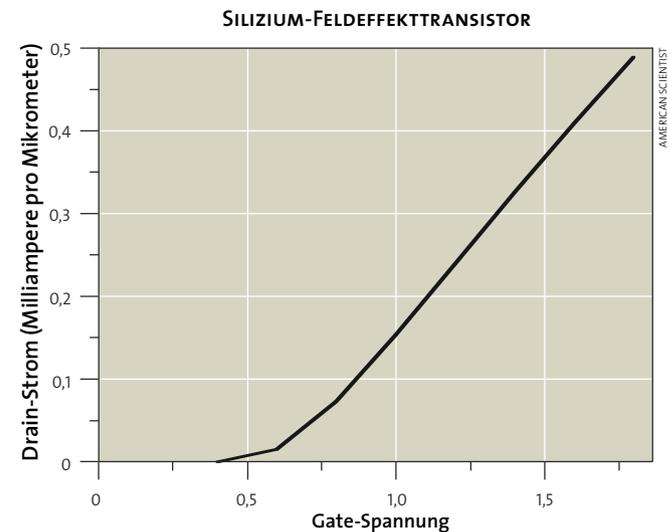
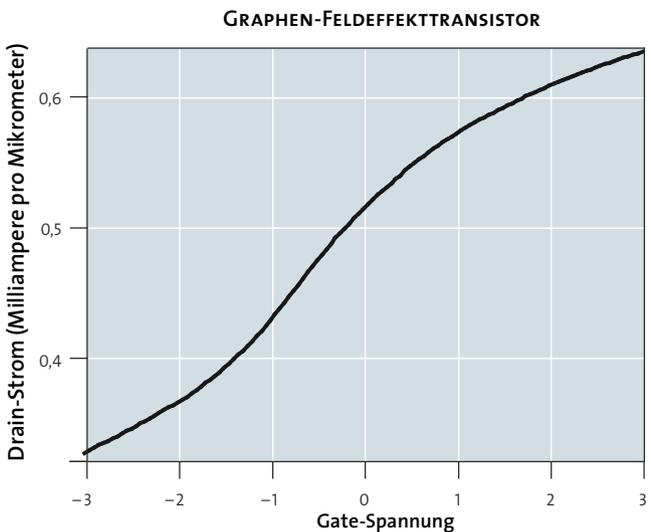
hohen Ausgangswiderstand und damit für eine gute Leistungsverstärkung. Doch weil es im Graphen keine durchgängige Bandlücke gibt, kennt es auch keine Abschnürung.

Keine Option für Computer?

Da FETs aus Silizium vollständig abgeschaltet werden können, sind sie für digitale Schaltkreise ideal, bei denen nur zwei Zustände erlaubt sind: ein oder aus, das heißt, Strom fließt oder fließt nicht. In der herkömmlichen Technik mit Millionen von Transistoren sind diese die meiste Zeit überstromlos. Wäre dem nicht so, würden Schaltkreise ungeheure Mengen an elektrischer Energie verbrauchen und sich viel zu stark erhitzen.

Einige Kollegen suchen deshalb nach Wegen, Graphen eine Bandlücke aufzuzwingen oder diese durch neue Transis-

Bei Gleichstrom verhält sich ein Graphen-Feldeffekttransistor deutlich anders als einer aus Silizium. Die so genannte Übertragungskennlinie (obere Reihe) setzt den Strom, der an dem als Drain bezeichneten Anschluss entnommen wird, zur Steuerspannung am Gate in Beziehung. Hingegen macht die Ausgangskennlinie (untere Reihe) das Verhältnis von Drain-Strom zu der zwischen Drain und Source anliegenden Spannung sichtbar. Jede Kurve in der unteren Grafik entspricht einer anderen Gate-Spannung. Die Kurven haben eine umso größere Steigung (gestrichelte Linien), je kleiner der Ausgangswiderstand ist.



torkonzepte überflüssig zu machen (siehe den Kasten rechts). Diese Entwicklungen stehen aber noch am Anfang. Andere Forscher konzentrieren sich auf analoge Hochfrequenzschaltkreise, weil Transistoren hier nur die Amplitude von Signalen modulieren, statt sie an- und auszuschalten.

Doch nicht nur die fehlende Energielücke, sondern auch die Möglichkeiten des Chipaufbaus bereiten Kopfzerbrechen. Denn bei einem zweidimensionalen Material können Ströme nur auf der Oberfläche fließen, und jeder Kontakt stört, weil die fremden Atome Ladungsträger streuen. Während die Elektronenbeweglichkeit in reinem Graphen zehnmal so hoch ist wie in Silizium, erreichen FETs aus dem Material nur etwa das Doppelte. Verbesserungen erhoffen sich Forscher weltweit durch den Einsatz anderer Materialien und anderer Transistorarchitekturen.

Denn die räumliche Struktur eines klassischen FETs ist bei Verwendung von Graphen problematisch, da es zwei Bereiche mit hohem elektrischem Widerstand gibt. Auf Grund der chemischen und quantenmechanischen Eigenschaften des Graphens betrifft das zum einen die Metallkontakte an Source und Drain. Im Augenblick wissen wir noch nicht, ob sich dafür überhaupt eine technische Lösung finden lässt. Kritisch sind zum anderen die Bereiche zwischen dem Graphen am Gate und dem an Source und Drain. Abhilfe könnte ein Gate schaffen, das den Bereich zwischen den beiden Elektroden vollständig ausfüllt; entsprechende Fertigungsverfahren sind auf dem Weg.

Vergleich der Kennlinien

Um Transistoren miteinander zu vergleichen, betrachten Entwickler beispielsweise deren Übertragungskennlinie. Darin tragen sie den Strom, der das Element durch die Drain-Elektrode verlässt, gegen die Spannung am Gate auf. Die Steigung dieser Kennlinie nennt man Transkonduktanz: Je größer sie ist, desto stärker reagiert ein Bauteil auf Änderungen der Steuerspannung. Ein zweiter Kennwert ist der Ausgangswiderstand, den man aus der Steigung der so genannten Ausgangskennlinie bestimmt. Die setzt Strom und Spannung an der Drain-Elektrode in Beziehung. Transkonduktanz und Ausgangswiderstand müssen im Allgemeinen bekannt sein, um einen analogen Schaltkreis so zu entwerfen, dass er ein Signal nicht verzerrt.

Eine weitere Kennlinie, Frequenzgang genannt, zeigt, wie sich die Verstärkung mit der Frequenz des Signals ändert. Bei der so genannten Grenzfrequenz verstärkt der Transistor gar nicht mehr, das Verhältnis von Eingangssignal und Ausgangssignal ist eins. Aus dieser »cutoff frequency« lässt sich abschätzen, wie schnell ein Signal vom Gate zur Drain gelangt. Denn ab dieser Grenze kommt der Transistor – vereinfacht gesagt – aus dem Takt und kann nicht mehr korrekt arbeiten, weil die Ladungsträger zu lange unterwegs sind.

Schon unsere ersten Graphentransistoren bestätigten, dass die Verwendung dieses eigentümlichen Halbleiters an solchen grundsätzlichen Verhaltensweisen nichts ändert. Dabei konnten wir zeigen, dass die kritische Frequenz pro-

Graphenelektronik made in Germany

Am Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik in Frankfurt an der Oder entwickelt ein Forscherteam unter Leitung von Wolfgang Mehr einen völlig neuartigen Graphentransistor, bei dem der Strom nicht in der Ebene des Graphens, sondern senkrecht dazu fließt. Die inzwischen patentierte Konstruktion ähnelt einer Vakuumröhre: Das Graphen dient als ultimativ dünnes (eine Atomlage) und auf Grund seiner extrem hohen Leitfähigkeit extrem schnell schaltbares Steuergitter, das den Elektronenfluss zwischen einer Kathode und einer Anode regelt. Das Vakuum wird dabei durch nanometerdünne Schichten aus dem Isolator Siliziumdioxid ersetzt. Die Elektronenemission erfolgt durch einen Tunnelprozess, der mit der Graphenschicht gesteuert wird. Experimente bestätigten, dass ein solcher Aufbau sowohl das Problem der fehlenden Bandlücke als auch das der mangelnden Abschirmung bei Graphen löst.

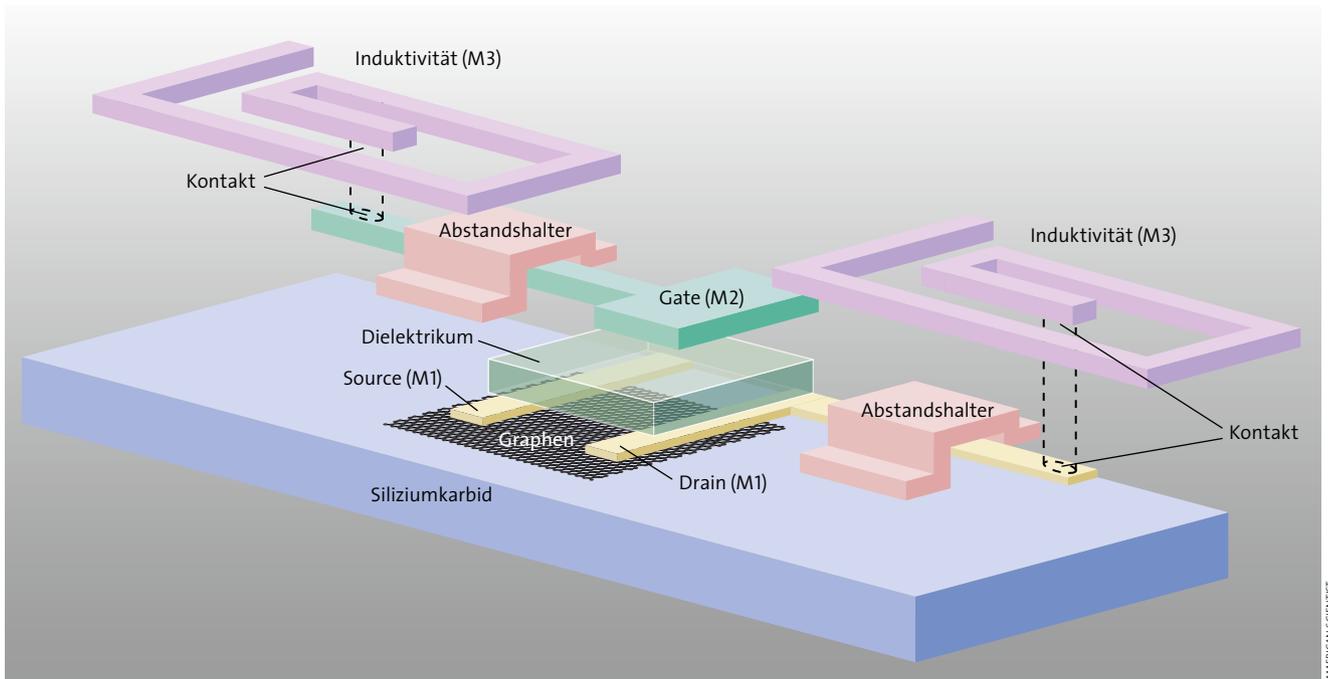
kdl

portional zur Transkonduktanz ist und dass sie höher wird, wenn man die Kanallänge verkleinert. Innerhalb weniger Jahre konnten wir die kritische Frequenz von einigen auf über 300 Gigahertz bringen – fast so gut wie bei konventionellen Hochleistungschips. Verglichen mit Silizium-FETs haben Graphen-FETs bei gleicher Gate-Länge sogar immer eine höhere kritische Frequenz.

Während wir noch daran arbeiten, die Transistoren zu perfektionieren, entwickeln wir bereits Konzepte für ihre Integration in Schaltkreise. Wie es die übliche industrielle Praxis ist, sollen möglichst viele Chips gleichzeitig entstehen. Die gängigen Verfahren auf einen Wafer zu übertragen, der mit Graphen beschichtet ist, erweist sich aber als schwierig. Zuerst einmal haftet der Stoff nur sehr schwach an Metallen und Oxiden, wie sie in integrierten Schaltkreisen verwendet werden. Weil die Graphenschicht außerdem nur eine Atomlage dick ist, können die gebräuchlichen Ätztechniken sie leicht beschädigen. Dazu kommt beispielsweise, dass die in unseren Experimenten eingesetzten Substratmaterialien und Isolatoren nicht alle für die Waferserienproduktion taugen.

Graphen für die Kommunikationstechnik

Nach fast einem Jahr Arbeit gelang es uns, einen ersten integrierten Schaltkreis auf einem Siliziumkarbidwafer zu fertigen. Wir benötigen dazu mehr als 60 Verarbeitungsschritte, das ist fünf- bis zehnmal so viel wie zur Fertigung nicht-integrierter Graphentransistoren. Das Ergebnis war ein Frequenzmischer (siehe Bild S. 88), weniger als ein Quadratmillimeter groß. Er besitzt einen FET und diverse Verbindungen, Isolatoren und Spulen als induktive Bauelemente.



AMERICAN SCIENTIST

Frequenzmischer sind Kernkomponenten in der Kommunikationstechnik. Sie werden als integrierte Schaltkreise in vielen Schritten auf einem Wafer gefertigt. Das Team des Autors entwarf ein solches Bauelement, das kaum einen Quadratmillimeter groß ist und einen Graphen-Feldeffekttransistor verwendet. In mehr als 60 Verarbeitungsschritten wurden alle Komponenten auf einem Siliziumkarbid-wafer realisiert.

Frequenzmischer sind ein Kernelement der drahtlosen Kommunikationstechnik. Man benötigt sie, um das Nutzsignal von der Trägerwelle zu trennen. In der Praxis ist Ersteres die Differenz aus der Träger- und einer Modulationsfrequenz. In unseren Experimenten verwendeten wir typische Werte: 3,8 Gigahertz für die Trägerwelle, 4 Gigahertz für die Modulation. Das informationstragende Nutzsignal hatte demnach 200 Megahertz. Unser Graphenmischer weist zwar einen ziemlich hohen Signalverlust auf, doch die Experimente zeigen bereits, was wir dagegen tun können. Sehr erfreulich war, dass er fast unverändert in einem Temperaturbereich zwischen 4,2 und 400 Kelvin arbeitet. Die meisten konventionellen Halbleiterschaltkreise für Radiofrequenzen brauchen zusätzliche Regelkreise, wenn sie in einem weiten Temperaturbereich funktionieren sollen.

Eine viel versprechende Idee ist auch, analoge Graphenschaltkreise auf digitalen Halbleiterschaltkreisen aufzubringen, um die besten Eigenschaften beider Welten zu kombinieren. Erstere dienen der Signalübertragung und -verstärkung, die zweiten ihrer Verarbeitung. Das beflügelt erst recht die Träume der Entwickler, insbesondere in der Kommunikationstechnik: Mit dem fast durchsichtigen Material könnte quasi unsichtbare Elektronik für Fenster und Brillen entstehen; und seine Biegsamkeit prädestiniert es für Chips, die in Kleidung eingenäht werden; die extreme Temperaturstabilität macht es höchst geeignet für den Einsatz im Weltraum sowie für die Erforschung des Erdinneren. ~

DER AUTOR



Der promovierte Physiker **Keith A. Jenkins** erforscht am IBM Thomas J. Watson Research Center in Yorktown Heights (US-Bundesstaat New York) den Einsatz von Graphen für Hochfrequenzschaltkreise.

QUELLEN

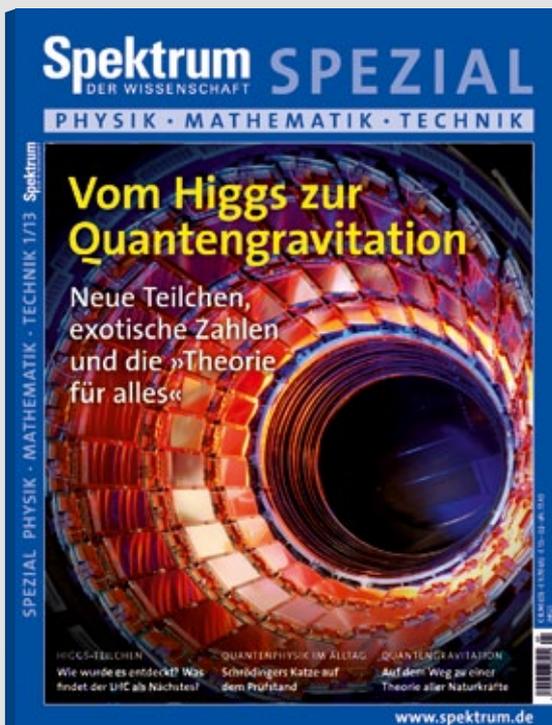
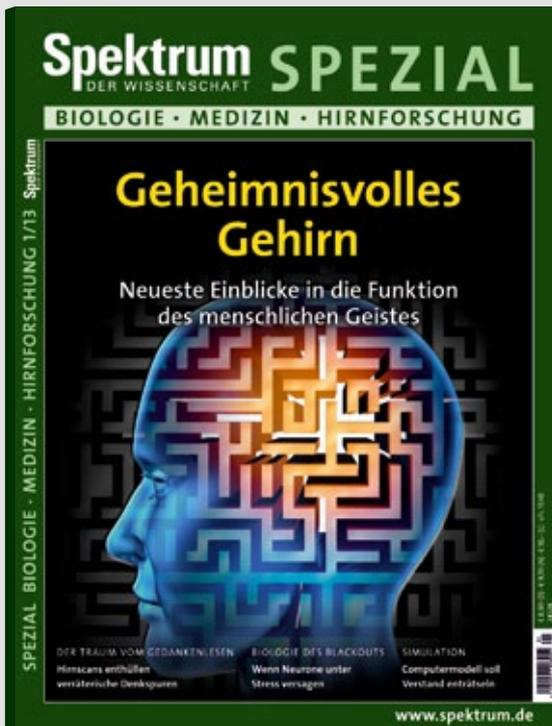
- Avouris, P. et al.:** Carbon-Based Electronics. In: Nature Nanotechnology 2, S. 605–615, 2007
- Geim, A. K., Novoselov, K. S.:** The Rise of Graphene. In: Nature Materials 6, S. 183–191, 2007
- Han, S.-J. et al.:** High-Frequency Graphene Voltage Amplifier. In: Nano Letters 11, S. 3690–3693, 2011
- Lin, Y.-M. et al.:** Wafer-Scale Graphene Integrated Circuit. In: Science 332, S. 1294–1297, 2011
- Wang, H. et al.:** Graphene Frequency Multipliers. In: IEEE Electron Device Letters 30, S. 547–549, 2009
- Wu, Y. et al.:** High-Frequency, Scaled Graphene Transistors on Diamond-Like Carbon. In: Nature 472, S. 74–78, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen zu Graphen und seinen möglichen Anwendungen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1182498

© American Scientist

DAS GANZE SPEKTRUM:
UNSERE SPEZIALREIHEN



JETZT IM
ABO
BESTELLEN
 UND 15%
 SPAREN

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

www.spektrum.de/spezialabo



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



Cornelius Weiss

Risse in der Zeit

Ein Leben zwischen Ost und West

Rowohlt, Reinbek 2012. 368 S., € 19,95

ZEITGESCHICHTE

Vom sowjetischen Lager bis in den sächsischen Landtag

Der heute 79-jährige Chemiker erzählt mit der Geschichte seiner Familie zugleich die eines ganzen Volkes.

Cornelius Weiss, geboren 1933 in Berlin, hat ein überaus ereignisreiches Leben hinter sich. In der Öffentlichkeit bekannt wurde er als Rektor der Universität Leipzig von 1991 bis 1997. Aber die interessanteren Teile seiner Autobiografie beziehen sich auf die Zeit davor.

In Biesdorf, einer beschaulichen Arbeitersiedlung am Stadtrand Berlins, erlebt Cornelius Weiss eine glückliche Kindheit. Der Älteste von drei Geschwistern genießt eine strenge religiöse und musische Erziehung. Obwohl sein Vater neben seiner Stelle als Wissenschaftler am Physikalisch-Techni-

schen Reichsinstitut noch zwei weitere Lehrtätigkeiten ausübt, um die fünfköpfige Familie zu ernähren und das Haus abzubezahlen, beschreibt Weiss diese Lebensphase als die »wahrscheinlich einzig glückliche Zeit« seiner Eltern. Den Freundeskreis eint die Liebe zur Musik ebenso wie die Abneigung gegen den Nationalsozialismus; der Knabe macht seine ersten wissenschaftlichen Gehversuche, indem er Pflanzen fürs Herbarium in den literarischen Klassikern der Eltern presst und trocknet. Die werden davon zwar feucht und wellig, aber es gibt keinen Ärger –

»so oft schauten sie halt auch nicht in ihre Klassiker«.

Bereits in den Monaten vor Kriegsbeginn spürt der damals Sechsjährige die Unruhe und Beklommenheit der Eltern, sieht, wie sie Vorräte anlegen, und nimmt in der Schule an Luftschutzübungen teil. Noch heute, so schreibt er, jagen ihm Sirenen – egal ob real oder im Fernsehen – einen kalten Schauer über den Rücken und erinnern ihn an die nächtlichen Luftangriffe in seiner Kindheit.

Weiss schildert seine Eindrücke vom Krieg auf erschütternd ehrliche Weise: wie er mit den Nachbarskindern nach der Schule im Bombenkrater spielt und Granatsplitter sammelt und sich bei dem zerstörten Haus auf dem Schulweg fragt, wo die Bewohner jetzt leben, weil er nicht begreift, dass sie bei dem Angriff umgekommen sind. Seine kindliche Faszination für Uniformen verschweigt er ebenso wenig wie seinen Ärger darüber, dass seine Mutter ihm die Kleidung der Hitlerjugend verweigert und ihn – zum Gespött der anderen – im selbst genähten Aufzug zum Eröffnungssappell schickt.

Die Nachkriegszeit ist für den jungen Weiss hauptsächlich durch Hunger geprägt. Erschreckend und unfassbar, was die Menschen damals essen, um nicht zu verhungern. So erinnert sich Weiss daran, dass die Kinder der Nachbarn einmal mit Spiritus und Zucker bestrichene Brote aufgetischt bekamen – und zumindest an diesem Abend sicherlich gut eingeschlafen sind. Oder wie die Mutter versucht, aus Kartoffel-

Cornelius Weiss als Neunjähriger (rechts im linken Bild) mit seinen Eltern und den Geschwistern Clemens und Bettina sowie als Rektor der Universität Leipzig zusammen mit dem damaligen Ministerpräsidenten Kurt Biedenkopf (Weiss: links im Bild).



schalen, Kaffeeersatz, Mohn und Wasser ein Knäckebrot herzustellen.

In dieser Zeit bekommt der Vater von der Sowjetunion das Angebot, zwei Jahre dort zu arbeiten. Da die zuständigen Stellen dem Angebot durch eine dreiwöchige Festungshaft bei bestem Essen Nachdruck verleihen, stimmt der Vater, nach langen Diskussionen mit seiner Frau, schließlich zu. Doch die Familie wird nicht wie vereinbart nach Moskau gebracht, sondern in ein kleines Dorf namens Obninskoje. Dort muss der Vater als »rüstungsrelevanter Forscher« zehn Jahre lang in einer abgelegenen Einrichtung arbeiten.

Trotz eingeschränkter Bewegungsfreiheit, ständiger Überwachung und Zensur der Briefe in die Heimat hat Weiss hauptsächlich positive Erinnerungen an die Zeit im sowjetischen Lager. Den Jugendlichen fehlt es an nichts. Sie fühlten sich wohl wie Kaninchen im Käfig, die das Leben in freier Wildbahn nicht kennen. Den Erwachsenen dagegen hilft ihr Zusammenhalt gegen die Verzweiflung. Sie organisieren Sportveranstaltungen, Musik- und Spieleabende oder Theaterstücke. Laut Weiss kann man die damals selbst gebauten Sportplätze noch heute bei Google Maps erkennen.

Die Zeit des Chemiestudiums in Minsk erlebt Weiss in relativer Freiheit, obwohl er keinen Pass, sondern nur ein »Visum zum Wohnen« bekommt. Seine Familie wird indessen in »Quarantäne« ans Schwarze Meer umgesiedelt, eine Vorsichtsmaßnahme der Regierung, damit nicht zu viel aktuelles Forschungswissen ins Ausland gelangt.

1955 kehrt die Familie schließlich zurück nach Deutschland und zieht nach Leipzig, wo Cornelius Weiss sein Chemiestudium beendet. Nach Abschluss der Promotion 1964 wird er zunächst Dozent, später Professor und 1991 schließlich Rektor der Universität Leipzig. Amüsant beschreibt er, wie der Amtsantritt einem Sprung ins kalte Wasser gleicht. Aber er hat ein fähiges Team um sich, das ihm die universitären Strukturen und Abläufe nahebringt und seine chaotische Arbeitsweise in geordnete Bahnen lenkt.

Im Vergleich zu den ersten Kapiteln lässt dieser Teil des Buchs stark nach. Interessante Einblicke und Hintergründe zu den Umbrüchen in der DDR lassen den Leser zwar darüber hinwegsehen, dass Weiss stellenweise einen leicht arroganten Ton anschlägt. So zum Beispiel, als er seine Rede vor der Wahl zum Direktor beschreibt, bei der das Publikum »fast atemlos« zuhört und seine Worte mit Zwischenapplaus honoriert.

Nach seiner Emeritierung 1999 beginnt Weiss eine späte politische Karriere als SPD-Abgeordneter im sächsischen Landtag. Ab hier wird das Buch immer langweiliger zu lesen. Während Weiss sich mehrfach wiederholt und über seine ehemaligen Kollegen im politischen Betrieb lästert, geht dem Leser

der rote Faden verloren. Schade, denn bis auf diese letzten Seiten bietet das Buch wirklich ein großes Lesevergnügen: zeitgeschichtliche Informationen aus erster Hand und faszinierende Hintergründe zur Nachkriegszeit aus einer ungewöhnlichen Perspektive, erzählt in amüsanten, packenden und ernsten Episoden.

Dieses Buch ist keine Autobiografie von Cornelius Weiss, sondern vielmehr die Biografie der Familie Weiss aus Sicht des ältesten Sohns. Hätte Weiss das bis zum Ende durchgezogen, wäre das Buch noch gelungener. Trotzdem: definitiv lesenswert!

Janina Fischer

Die Autorin ist promovierte Chemikerin und arbeitet in Iserlohn.



Mara Hvistendahl

Das Verschwinden der Frauen

Selektive Geburtenkontrolle und die Folgen

Aus dem Englischen von Kurt Neff.

dtv, München 2013. 424 S., € 24,90

SOZIOLOGIE

Massenhafte Abtreibung von Mädchen

Eine unheilvolle Mischung aus traditionellen Vorstellungen und moderner Technik führt in zahlreichen Gesellschaften zu einem eklatanten Frauenmangel – mit dramatischen Folgen.

Ein junger indischer Medizinstudent tritt Anfang der 1970er Jahre den praktischen Teil seines Studiums an – und das Erste, was ihm an der Tür des Kreißsaals begegnet, ist eine Katze, die mit einem blutbeschmierten menschlichen Fetus im Maul hinausläuft und im Begriff ist, ihn aufzufressen. Auf die vorsichtige Frage nach dem Warum erhält der Jungmediziner die Antwort – kühl und in sachlichem Ton: »Weil es ein Mädchen war.«

Das ist die einzige wirklich blutrünstige Geschichte in diesem Buch. Im Übrigen bemüht sich die amerikanische Wissenschaftsjournalistin Mara Hvistendahl nach Kräften, das ohnehin heftig umstrittene Thema Abtreibung nicht noch zusätzlich emotional aufzuladen. Gleichwohl hat sie uns eine erschütternde Nachricht mitzuteilen: Allein in Asien fehlen 160 Millionen Frauen und Mädchen. Sie sind nie geboren worden, sondern wurden abge-



Arnold Retzer

Miese Stimmung. Eine Streitschrift gegen positives Denken

S. Fischer, Frankfurt am Main 2012. 336 S., € 19,99

Es geht uns materiell und gesundheitlich so gut wie nie zuvor; aber zugleich haben Depressionen, Angstzustände und das Burnout-Syndrom in den letzten 20 Jahren in erschreckendem Maß zugenommen. Der Heidelberger Psychiater Arnold Retzer findet die Ursache dafür im Diktat des »positiven Denkens«. Einflussreiche Gurus reden uns ein, wir müssten uns nur den richtigen Optimismus zulegen, dann würden wir die Probleme des Lebens, von der eigenen Willensschwäche bis zum Krebs, ohne Weiteres bewältigen. Wenn das nicht gelinge, liege das an der mangelhaften Grundeinstellung unseres Gehirns, und dem sei durch Coaching und geeignete Chemikalien (»Hirndoping«) abzuhelfen. Dieser Unfug wird zweifellos vertreten, aber Retzers These, der Mensch werde depressiv, weil er dem Unfug folgend an der Realität scheitere, ist nicht wesentlich besser. Allenfalls kann man dem Text die Binsenweisheit »Selbsttäuschung ist immer schlecht« entnehmen. CHRISTOPH PÖPPE



Florian Freistetter

Der Komet im Cocktailglas. Wie Astronomie unseren Alltag bestimmt

Hanser, München 2013. 224 S., € 16,90

Das Universum ist dunkel und alles, was darin passiert, weit weg. Das kann man so sehen, muss es aber nicht. Schließlich weht uns der Wind nur deshalb um die Nase, weil die Sonne eines Tages genau so entstand, wie sie entstand. Und Gold in der Erdkruste finden wir nur deshalb in größeren Mengen, weil einst ein Protoplanet mit der frühen Erde kollidierte. Der Urknall? Wenn Sie noch eine Antenne auf dem Dach haben, sehen Sie seine Spuren auf Ihrem Fernsehapparat. Florian Freistetter ist ein promovierter Astronom, der als Wissenschaftsblogger bekannt wurde und unlängst in »2012 Keine Panik« auch die grassierenden Weltuntergangstheorien wissenschaftlich sezierete. Nun hat er aus einem wohl nicht für jedermann offensichtlichen Grundgedanken – dass nämlich das Universum nicht nur »da draußen« ist, sondern sich auch direkt vor unserer Nase befindet – ein schönes kleines Buch für Laien gemacht, denen er mit viel Geduld die Welt erklärt. THILO KÖRKELE



Sylvain Delouvé

Warum verhalten wir uns manchmal merkwürdig und unlogisch?

Aus dem Französischen von Jutta Bretthauer. Springer Spektrum, Heidelberg 2013. 201 S., € 14,95

Dieses kleine Buch sollte sich jeder zu Gemüte führen. Sylvain Delouvé, Sozialpsychologe an der Universität Rennes 2, behandelt in leichtem Stil klassische und weniger bekannte Experimente über die Abgründe menschlichen Verhaltens. Menschen unter Gruppenzwang urteilen oft falsch. In Ausnahmesituationen verhalten sie sich erschreckend unsozial: Im Ferienlager feinden sich Gruppen an, niemand aus einer großen Masse steht einem Unfallopfer bei, eine künstliche Gefängnissituation artet zu Aggressionsausbrüchen aus, in Labortests folgt der »Lehrer« brav der Anweisung, den »Schüler« unmäßig hart zu strafen. Delouvé führt solches Verhalten auch auf mächtige, eigentlich nützliche soziale Mechanismen zurück: etwa Drang nach Konformität oder vorlogisches »natürliches« Denken. Die begleitenden Karikaturen sind ganz nett, aber ein wenig eintönig. ADELHEID STAHNKE



Emily Wallington (Drehbuch), Rob Bruyns et al. (Kamera)

Die Erdmännchen Gang. Wilde Abenteuer in der Kalahari-Wüste

Freigegeben ohne Altersbeschränkung. Sunfilm Entertainment, München 2013.

93 Minuten, DVD € 12,90, Blu-ray € 14,90, Blu-ray 3-D € 19,90

Ein Kamerateam filmt eine Tierfamilie über längere Zeit und macht daraus eine spannende Geschichte: Dieses Rezept wurde bei »Im Reich der Raubkatzen« mit großem Erfolg angewandt (SdW 5/2012, S. 100). Diesmal sind die Helden nicht majestätische Löwen, sondern putzige Erdmännchen – mit ihrer menschenähnlichen Körperhaltung und ihrem wuseligen Verhalten klassische Sympathieträger im Zoo. Kameras auf Augenhöhe sorgen für lebendige und lustige Bilder, der Kommentator erzählt allerlei Wissenswertes. Beziehungskisten innerhalb der Familie, Aggressionen zwischen verschiedenen Horden und gefräßige Feinde sorgen für reichlich Action. Ein handwerklich gut gemachter, unterhaltender Film – aber die Klasse der Löwengeschichte erreicht er bei Weitem nicht. ELKE REINECKE

trieben, nachdem mittels Ultraschalluntersuchung ihr Geschlecht bestimmt worden war.

Gemessen an der Gesamtbevölkerung Asiens sind selbst 160 Millionen nur vier Prozent; da aber die selektive Abtreibung weiblicher Föten erst seit knapp 40 Jahren betrieben wird, ist der Effekt in der entsprechenden Altersgruppe dramatisch. In manchen chinesischen Provinzen kommen unter den bis zu Dreijährigen auf 100 Mädchen bis zu 176 Jungen. Mittlerweile erreichen Millionen von Männern das heiratsfähige Alter, finden aber keine Frau – nicht weil gegen sie persönlich etwas einzuwenden wäre, sondern einfach weil nicht genug Frauen da sind.

Das trifft die jungen Männer Indiens und Chinas noch wesentlich härter als ihre westlichen Altersgenossen, weil sie das Singledasein keine gesellschaftlich akzeptierte Option ist. Ein Mann ist erst ein richtiger Mann, wenn er eine Familie hat – und vor allem einen Sohn.

Das allein erklärt jedoch noch nicht, warum die selektive Geburtenkontrolle so grassiert. Der demografische Übergang kommt hinzu: Im Rahmen der wirtschaftlichen Entwicklung folgt einer sinkenden Sterberate eine fallende Geburtenzahl, so wie die westlichen Länder es vor reichlich 100 Jahren erlebten. Allerdings findet in den aufstrebenden Volkswirtschaften Asiens dieser Übergang wesentlich rascher und dramatischer statt. Die Familien wollen nicht mehr einfach so lange Kinder in die Welt setzen, bis wenigstens ein Sohn darunter ist. In China ist es ihnen seit 1979 sogar verboten, mehr als ein Kind zur Welt zu bringen.

Bei uns gilt die Fixierung auf einen männlichen Stammhalter als antiquiert und längst überwunden. Aber es sind keineswegs die rückständigen Teile der asiatischen Gesellschaften, welche die selektive Geburtenkontrolle am intensivsten betreiben, sondern im Gegenteil die modernen städtischen

Eliten: dieselben Schichten, die auch beim demografischen Übergang selbst vorangehen. Zu allem Überfluss findet sich neuerdings ein Überschuss an männlichen Neugeborenen – über das natürliche Verhältnis von 105 Jungen zu 100 Mädchen hinaus – nicht nur in Fernost, sondern auch in manchen Staaten Osteuropas sowie in Albanien.

In Hvistendahls betont sachlicher Darstellung ist auch für die romantischen Gefühle, die man mit Eheschließung und Familiengründung zu verbinden pflegt, wenig Platz. Vielmehr beschreibt sie ausführlich, dass der Frauenmangel, wie jede Knappheit im Wirtschaftsleben, Kompensationsmaßnahmen auslöst. Ein Wirtschaftswissenschaftler würde als Erstes erwarten, dass das knappe Gut im Preis steigt; aber das findet bemerkenswerterweise nicht statt. Allem Anschein nach nehmen die Männer die Tatsache, dass sie für ihre Frau kaum Ersatz finden würden, nicht zum Anlass, sie pfleglicher

AKTUELLES AUS DEM LESERSHOP



Sammelkassette

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



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); Lieferung: Ende Februar 2013. ISBN 978-3-943702-22-4

www.spektrum.de/lesershop



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

zu behandeln. Allerdings kaufen zum Beispiel reiche taiwanesischen Männer armen vietnamesischen Familien Frauen ab, was zwar manchen Dörfern eine wirtschaftliche Blüte bringt, aber letztlich nur das Problem des Frauenmangels von Reich nach Arm verlagert. In der Not teilen sich gelegentlich auch zwei Brüder eine Frau, für die dann sogar höhere Preise gezahlt werden.

Aus der Sicht der Spieltheorie handelt es sich um einen klassischen Fall der »tragedy of the commons« (»Tragik der Allmende«): Jeder will das Gemeingut für sich nutzen, aber niemand zu seiner Erhaltung beitragen, mit dem Effekt, dass das Gemeingut zu jedermanns Nachteil alsbald erschöpft ist. Diese Interpretation von Frauen als Gemeingut ist zwar überaus chauvinistisch, lehrt uns aber, dass die Kräfte des Marktes aus dem Dilemma nicht herausführen werden.

Bei aller sorgfältig gewährten emotionalen Distanz lässt die Autorin keinen Zweifel daran, dass die selektive Geburtenkontrolle den Gesellschaften, in denen sie praktiziert wird, schweren Schaden zufügt. Einem wesentlichen Teil der männlichen Bevölkerung wird ein erfülltes Leben versagt bleiben, und die gewaltsamen bis kriminellen Versuche, diesem Schicksal zu entgehen, vermehren insgesamt nur das Leid.

Während Hvistendahl das Problem in klaren Worten beschreibt, tut sie sich mit der Frage nach dessen Ursache wesentlich schwerer. Ist es die jahrtausendealte und tief verwurzelte Überzeugung von der Minderwertigkeit der Frau? Oder die wesentlich jüngere Tatsache, dass Abtreibung als legitimes Mittel der Familienplanung gilt und ohne große Kosten und Risiken verfügbar ist? Oder die Allgegenwart preisgünstiger, mobiler Ultraschallgeräte, die eine Geschlechtsbestimmung ungeachtet staatlicher Verbote ermögli-

chen? Ursache 1 wird von der Autorin nicht ernsthaft angefochten – vielleicht aus Respekt vor jahrtausendealten kulturellen Traditionen im Allgemeinen. Oder sie hält diese Einstellung für unwandelbar – wenig plausibel angesichts des geradezu dramatischen kulturellen Wandels, den diese Gesellschaften durchmachen. Ursachen 2 und 3 dagegen, ohne die Ursache 1 ihre katastrophalen Wirkungen kaum entfaltet hätte, sind zweifellos Importe aus den westlichen Industrienationen.

Hvistendahl beschreibt ausführlich, wie in den 1960er Jahren Heerscharen vor allem amerikanischer Berater die indische Regierung dazu drängten, dem Wachstum ihrer Bevölkerung durch massenhafte Abtreibungen Einhalt zu gebieten, da alle anderen Mittel der Geburtenkontrolle nicht hinreichend wirksam oder praktikabel erschienen. Und die Regierung gab diesem Drängen nach, auch weil finanzieller Druck von Seiten der Berater ihrer Überzeugung aufhalf. Allerdings fördert auch die chinesische Regierung, einer Abhängigkeit von westlichem Einfluss gänzlich unverdächtig, seit reichlich 30 Jahren die Abtreibung zum Eindämmen des Bevölkerungswachstums und nimmt damit de facto das Verschwinden der Mädchen in Kauf.

Während Hvistendahl kein Problem damit hat, den Kulturimperialismus ihrer Landsleute zu geißeln, ist ihre Position im Übrigen durchaus zwiespältig – ein getreues Bild der Tatsache, dass die Auseinandersetzung in den USA quer zu den etablierten Frontlinien verläuft. Die Autorin lokalisiert Paul Ehrlich, den Autor des einflussreichen Bestsellers »Die Bevölkerungsbombe«, und vor allem seine zahlreichen Leser bei den Rassisten, die nicht in erster Linie zu viele Menschen auf der Erde fürchten, sondern zu viele gelbe und schwarze Menschen. Das sind nun ausgerechnet die Konservativen, für die Abtreibung des Teufels ist. Wenn diese ihr Ziel propagieren, dürfen sie also nicht so laut über das Mittel reden.

Die Liberalen auf der anderen Seite wollen auf das Mittel nichts kommen lassen; auch Hvistendahl besteht auf

dem mühsam erkämpften Recht der Frau, über ihren eigenen Körper zu verfügen. Da ist es für die Argumentation nicht hilfreich, dass die massenhafte Anwendung dieses Mittels so katastrophale Folgen hat. Also meiden beide Seiten das Thema, mit dem Effekt, dass das Verschwinden der Frauen längst nicht die öffentliche Aufmerksamkeit erhält, die es verdient hätte.

Neuerdings können Paare in den USA durch Spermiselektion und ähnliche Techniken das Geschlecht ihres Nachwuchses frei von jeder Abtreibungsproblematik wählen – und siehe da, 80 Prozent von ihnen entscheiden sich für ein Mädchen. Wehe, wenn das Kind dann den Traum seiner Eltern vom Prinzesschen mit Haarspangen und rosa Kleidchen nicht erfüllt.

Der Blick auf dieses Luxusproblem hilft der Autorin schließlich, ihre eigene ideologische Position zu klären: »Eine Frau sollte das Recht haben, eine Schwangerschaft zu beenden, aber sie sollte nicht das Recht haben, der in der Schwangerschaft verkörperten Person eine Form nach ihrer Laune zu geben.« Nun ja. Was die Elternpaare Indiens und Chinas zum selektiven Schwangerschaftsabbruch veranlasst, ist kaum als »Laune« zu charakterisieren.

In Zeiträumen von einigen Jahrzehnten lernen auch traditionsbewusste Gesellschaften aus ihren Fehlern. So ist neuerdings in Südkorea das Geschlechtsverhältnis bei den Geburten auf den Normalwert zurückgekehrt, allerdings auf kläglich niedrigem Niveau; und die Regierung sieht sich veranlasst, in großen Kampagnen für das Gebären von Kindern und insbesondere Töchtern zu werben. Da die asiatischen Gesellschaften den demografischen Übergang viel schneller vollziehen als die europäischen, droht ihnen bereits jetzt und in viel stärkerem Ausmaß das Problem der Überalterung.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Die unausgewogene Geschlechterverteilung unter seinen Kindern – eine Tochter, vier Söhne – ist ohne jede Selektion zu Stande gekommen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869



Julia Fischer
Affengesellschaft
Suhrkamp, Berlin 2012. 281 S., € 26,95

PRIMATENFORSCHUNG

Dem Denken auf der Spur

Von unseren Verwandten können wir einiges über uns selbst erfahren.

In diesem Buch geht es um das Verhalten von Primaten in ihrem sozialen Leben – darum, wie sie sich miteinander arrangieren und kommunizieren, und allgemeiner, wie sie Umweltsituationen deuten und ihnen begegnen. Im Mittelpunkt der Schilderung stehen die Tiere, an denen die Göttinger Primatologin Julia Fischer selbst geforscht hat: Berberaffen, Bärenpaviane und Guineapaviane. Daneben kommen viele andere Arten zur Sprache, bis hin zu Menschenaffen und gelegentlich zum Menschen.

Julia Fischer versucht einen Spagat zwischen Erlebnisbericht und Lehrbuch. So erzählt sie einerseits viel von eigenen und fremden Forschungen an frei lebenden Affen in Afrika, in mehreren großen Affenkolonien in Europa und Amerika, die unter Halbfreilandbedingungen leben, und nicht zuletzt von zahlreichen Experimenten mit Tieren in Gefangenschaft. Andererseits gibt sie tiefe Einblicke in die Kognitionsforschung und deren Geschichte sowie in Studien und Theorien zur Evolution von Kommunikation und Sprache. In der breiten Darstellung finden auch aufschlussreiche Arbeiten mit Nichtprimaten Platz.

Die Darstellung springt häufig zwischen Theorie und Erlebnisbericht hin und her. Das macht auch die abstrakteren Abschnitte lebendig, fordert aber – über die große Stofffülle hinaus – dem Leser einiges ab. Gerade wegen dieser engen Verzahnung ist es nicht immer

einfach, Tatsachen von Interpretationen zu unterscheiden; da helfen auch die vielen Anmerkungen der Autorin nur bedingt, was besonders in dem Abschnitt über Sozialsysteme von Primaten auffällt.

Flüssig, oft spannend, manchmal auch amüsant lesen sich die Schilderungen über die Mühsal, mit wild lebenden Affen gezielte Tests durchzuführen. Da schleppen die Forscher Lautsprecher oder Raubtierattrappen an, und ihre Versuchsobjekte haben schlicht Wichtigeres im Sinn, als sich dafür gerade jetzt zu interessieren. Oder sie erschrecken heftig vor einem Versuchsaufbau und sind nicht mehr zum Mitmachen zu bewegen.

Einen Kontrast zu diesen lebendigen Geschichten bilden viele längere Passagen insbesondere im Mittelteil des Buchs, die akribisch eine Vielzahl sowohl historischer als auch neuerer Intelligenzstudien aufzählen. Hier muss der Leser Geduld aufbringen und gut aufpassen, um sich die Einzelheiten zu merken und um die Argumentationsstränge zu verfolgen.

Viele werden sich besonders für die an mehreren Stellen eingestreuten Vergleiche mit dem Menschen interessieren. Ausführlich erörtert Fischer einzelne Sprachtheorien, schildert die diversen Versuche, Affen zur sprachlichen Kommunikation zu bringen, führt auch jüngere Ergebnisse über ein »Sprachen« an – und kommt wie die meisten ihrer Kollegen zu dem Schluss, dass die



Verschiedene Gesichtsausdrücke bei Berberaffen: oben Drohen, unten unterwürfiges Grinsen.

Sprachevolution vorerst ein Rätsel bleibt.

Vergleichende Beobachtungen zu kognitiven Leistungen anderer Art mögen auf den ersten Blick unspektakulärer erscheinen, sind aber nicht weniger frappant. So hatten Forscher eine Kiste konstruiert, die auf Knopfdruck Laute von Artgenossen der Versuchstiere von sich geben sollte – und mussten sie unverrichteter Dinge wieder mitnehmen. Den Pavianen war das Ding unheimlich. Dafür durfte nun ein menschliches Kleinkind damit spielen: Begeistert und unermüdlich betätigte es die Knöpfe für die Stimmen seiner Eltern und Geschwister.

Mit diesem anspruchsvollen Buch ist Julia Fischer ein erschöpfender Überblick über den Stand der Primatenverhaltensforschung gelungen. Nehmen Sie sich Zeit, denken Sie mit und lassen Sie sich durch die vielen Sprünge zwischen den Erzählebenen nicht irritieren.

Adelheid Stahnke

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

DAMIT AUS NEUGIER WISSEN WIRD!

In Kooperation mit  IPN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

NEO

Nr. 4

Das Wissenschaftsmagazin für junge Leserinnen und Leser

Der menschliche Körper

Spektrum NEO

6,50 € (D/A) · 6,90 € (U) · 9,90 sfr.
Nr. 4/2013 · 81935

04
4 152283 006503

mit lustigem Poster!

Dr. Eckart von Hirschhausen erklärt: Warum Lachen gesund ist

AUAAA!!!

Alarm auf der Nervenbahn: So entstehen Schmerzen

Wieso altern wir? NEO-Reporter suchen nach Antworten



JETZT IM
ABO
BESTELLEN

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert. Jetzt abonnieren und sparen: 4 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

1913

Vorsicht Kino!

»Der schnelle Bildwechsel in Verbindung mit dem Flimmern der Bilder strengen bei längerem Verweilen im Lichtbildtheater Augen und Nerven so sehr an, daß bei häufigerem Besuch dieser Veranstaltungen sicher Schädigungen eintreten. Es interessierte mich nun die Frage, wie lange kann ein normaler Mensch derartigen Vorführungen beiwohnen?

Ich wählte aus: einen Durchschnittsmenschen robuster Konstitution, einen geistig tätigen Akademiker, beide mit gesunden Augen, alsdann einen nervösen Künstler mit einer Schwäche

der Augennerven. Wir wohnen nun gemeinsam einer Kinodauervorstellung bei. Am frühesten versagte erstaunlicherweise der kerngesunde Mensch. Nach kaum mehr als 5 Stunden zeigte sich hochgradige Ermattung, eine Schwere der Lider. Der Akademiker hielt etwas über 5½ Stunden stand. Der nervöse Künstler, der schon vor Ablauf von 2½ Stunden Augentränen, nach 3 Stunden Kopfweh bekam, hielt 5⁵⁰/₆₀ Stunden aus. Noch lange nach dem Niederlegen war ihm zumute, als hebe und senke sich die Bettstatt mit ihm.

Die hohe Schädlichkeit für Augen und Nerven dürfte damit erwiesen sein und man sollte jeder Einschränkung des Kinogewerbes aus gesundheitlichen Gründen zujubeln.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 13, S. 255, 1913

Der erste Engländer?

»Eine der interessantesten paläontologischen Entdeckungen der letzten Zeit ist der dem englischen Forscher Dawson geglückte Fund eines fossilen Menschenschädels im ehemaligen Kiesbett eines Flusses in Piltown Common (Sussex, England). Ohne Zweifel war er weit höher entwickelt als die Neanderthalrasse mit ihrer viel weiter vorspringenden Stirnbildung... Wenigstens neigt der mit Dawson arbeitende Forscher Smith Woodward zu der Ansicht, daß der Neanderthaler die degenerierte Nachkommenschaft einer ganz primitiven Menschenrasse darstelle, während der moderne Europäer direkt von jener Rasse abstamme, von deren Bestehen uns der Sussex-Schädel den ersten Beweis liefert.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 11, S. 222, 1913



Falscher Vorfahr:
der Sussex-Mensch

(30 Jahre später bewies der Geoarchäologe Kenneth Oakley vom British Museum of Natural History, dass der Sussex-beziehungsweise Piltown-Mensch eine Fälschung war. Hintergründe und Urheber des Betrugs sind bis heute allerdings ungeklärt.)

Erosion im Weinberg

»In den stark geneigten Weinberglagen zwischen Nackenheim und Nierstein am Rhein werden alljährlich im Frühjahr wertvolle Bodenschichten abgetragen. Die Erosion ist in diesem Gebiet nicht nur eine Folge von Starkregen. Vielmehr ist an Hand des schichtweisen Sedimentaufbaues der Bodenaufschüttungen zu beweisen, daß auch Landregen von geringer Intensität, aber langer Dauer den Boden abtragen. Der Boden ist ja im Frühjahr mit Wasser gesättigt, so daß Niederschläge in Rinnsalen abfließen und dabei vor allem die feinen Ton- und Humusteilchen abspülen.« Umschau 6, S. 179, 1963

Kraftwerk auf dem Mond

»Die so häufig gestellte Frage, welche praktische Bedeutung es haben würde, wenn es Menschen gelänge, auf dem Mond zu landen, hat eine neue Antwort erhalten. Nikolai N. Semjonoff, Nobelpreisträger für Chemie im Jahre 1956, ist der Ansicht, dass der Mond, auf den die Sonnenstrahlung ungeschwächt einfällt, ideale Möglichkeiten bietet, um diese Strahlung in elektrische Energie zu verwandeln, z. B. mit Hilfe

Kreisel im All

»Nun berichtet auch General Electric über ihre Beteiligung an dem Projekt Apollo. Neben der Lieferung eines Teiles der Startkontrolle hat General Electric ein »Metall-Flüssigkeits-Kreisel-Gerät« entwickelt. Da Raumfahrzeuge außerhalb der Lufthülle nicht mehr aerodynamisch gesteuert werden können, kommt diesem Gerät beson-

dere Bedeutung zu. Die von ihm ausgehenden Steuerimpulse werden auf die Steuerdüsen automatisch übertragen. Der Kreisel wird von einer elektromagnetischen Pumpe angetrieben, die Kreiselwirkung von rotierendem Quecksilber erzeugt.« Elektronik 3, S. 63, 1963

sogenannter Sonnenbatterien, die auch vielen Erdsatelliten Elektrizität liefern. Um wirklich grosse Strommengen zu erzeugen, braucht man sehr viel Raum, aber daran herrscht auf dem Mond kein Mangel. Aber wie kommt die Elektrizität zur Erde? Professor Semjonoff rechnet damit, dass in den letzten Jahren entwickelte Elektronengeräte, MASER und LASER, dazu imstande sein werden.« Neuheiten und Erfindungen 327, S. 32–33, 1963

1963

NEUE SERIE:

Die größten Rätsel der Astronomie

Teil 1: Der heiße Kosmos

Das Universum ist kein ruhiger Ort. Vielmehr toben Stürme, explodieren Sterne, rasen Teilchen und Strahlen mit sonst unerreichten Energien durchs All. Den Ursachen versuchen Forscher mit riesigen Teleskopen auf die Spur zu kommen – auf der Erde und im Weltall.

Mit dieser Ausgabe beginnt »Spektrum der Wissenschaft« eine neue sechsteilige Serie. Darin berichten Astrophysiker über wegweisende Erkenntnisse zu den zentralen Rätseln des Kosmos.

NASA/ESA, STSCI



JEAN-COTTES

Höhlenmalerei als Kino

Löwenrudel beim Angriff, Huftierherden auf der Flucht: Frühe Künstler versuchten, die Tiere in Bewegung darzustellen. In flackerndem Licht scheinen sie tatsächlich zu rennen.



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Fast wie ein Teil des Körpers

Gezüchtete Neurone sollen helfen, Arm- und Beinprothesen direkt mit dem Nervensystem zu verbinden. Dies würde es Schwerverletzten nicht nur erlauben, künstliche Gliedmaßen zu steuern, sondern auch, diese bis zu einem gewissen Grad zu spüren.

Drohende Sintfluten

Gewaltige Wasserdampfströme in hohen Luftschichten haben in der Vergangenheit wiederholt zu verheerenden Regenfällen geführt, die katastrophale Überschwemmungen verursachten. Der Klimawandel verstärkt solche »atmosphärischen Flüsse« und erhöht damit die Überflutungsgefahr.

Was die winzigsten Insektenhirne leisten

Kleinste Würmer, Spinnen oder Insekten erwiesen sich auch mit Miniaturgehirnen als konkurrenzfähig. Diese Beobachtung wirft manche Ansichten über die Evolution immer leistungsfähigerer Nervensysteme über den Haufen.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

ALLES ÜBER IHRE GRAUEN ZELLEN. 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

Deutschlands erstes digitales, wöchentliches Wissenschaftsmagazin



Jetzt jeden Donnerstag

- mit mehr als 40 Seiten Hintergründen, News, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar



Infos und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum.de/testwoche