

Spektrum

DER WISSENSCHAFT



ARTENBILDUNG
Buntbarsche:
Evolution
im Zeitraffer

APRIL 2014

QUANTENTHEORIE
Ist die Natur
digital oder analog?

KREBSTHERAPIE
Mit Stromstößen
gegen Tumoren

ARCHÄOLOGIE
Die Erfindung
der Landwirtschaft

Das Proton-Paradoxon

Widersprüchliche
Größenmessungen
deuten auf eine
neue Physik



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





Jetzt Idee einreichen
und Energiewendepreis
gewinnen!

www.antworten.sparkasse.de/meine-energiewende



„Meine Energiewende
steckt voller Ideen. Und Ihre?“

Für saubere Energie und mehr
Lebensqualität: Sparkassen fördern
die Energiewende vor Ort.



Ideen bringen die Welt voran: Das gilt besonders für die Energiewende vor Ort. Neben Tatendrang und Erfindergeist braucht es dafür auch finanzielle Mittel. Die Sparkassen unterstützen helle Köpfe mit zahlreichen Projekten rund um Erneuerbare Energien vor Ort – und sind unter Deutschlands Kreditinstituten die Nr. 1 in punkto Energiewendeförderung. **Jetzt informieren und mitdiskutieren:** www.antworten.sparkasse.de/energiewende



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Ein ungeliebtes Fach im Scheinwerferlicht

Wenn wir unsere Leser fragen, welche Themengebiete sie am meisten interessieren, sind die Spitzenreiter fast immer Kosmologie und Hirnforschung. Insgesamt dominieren die Physik und die Biowissenschaften solche Ranglisten stark, was sich auch etwas in unserer Themenzusammenstellung widerspiegelt. Eine ganz zentrale Naturwissenschaft ist hingegen geradezu auf ein Mauerblümchendasein reduziert, obwohl sie jedem in der Schule nahegebracht wird und speziell in Deutschland auf eine reiche historische Tradition zurückblicken kann: die Chemie.

Über die Gründe für diese Nischenexistenz kann man lange spekulieren: Sind es die vielen Formeln, die abschrecken, oder eher ein Mangel an für Laien erfassbaren Durchbrüchen? Beides findet sich auch in manchen physikalischen und biologischen Disziplinen zur Genüge, dennoch erfreuen sich diese eines breiten Interesses. Oder liegt es am Ruf der Chemie als eines der Natur entfremdeten Umweltverschmutzers, der die Tatsache überschattet, dass wir unseren heutigen Lebensstandard zu einem Großteil dieser Wissenschaft zu verdanken haben? Freilich: Auch hier könnte man auf die heftig umstrittenen Bereiche Kernenergie und Gentechnik in den Nachbardisziplinen verweisen, die dennoch der Begeisterung für die Fächer als Ganzes keinen Abbruch tun.

Wie dem auch sei – »Spektrum der Wissenschaft« hat den Anspruch, aus allen wichtigen Fachgebieten zu berichten. Daher versuchen wir, auch der Chemie gebührende Beachtung zu schenken. Bereits im letzten Heft haben wir die faszinierenden Zintl-Anionen vorgestellt. Die vorliegende Ausgabe beleuchtet nun zwei sehr unterschiedliche Facetten der Chemie. Zum Ersten führt der amerikanische Nobelpreisträger Roald Hoffmann ein Gedankenexperiment durch: Was würde geschehen, wenn man eine Suppe aus allen chemischen Elementen kochen würde – welche Verbindungen kämen dabei heraus? Theoretisch wäre ja denkbar, dass hier unzählig viele unterschiedliche und beliebig komplexe Elementkombinationen entstehen, je nachdem welche Atome in welcher Reihenfolge zufällig aufeinanderstoßen. Warum das aber nicht so ist, erfahren Sie ab S. 82.

Der Franzose Gérard Férey befasst sich dagegen mit ganz speziellen Molekülstrukturen: dreidimensionalen kristallinen Gerüsten aus Metallionen und stabförmigen Kohlenstoffverbindungen. In ihren regelmäßig angeordneten Hohlräumen finden andere, kleine Moleküle wie Wasser oder Kohlendioxid Platz. Nicht nur das, bei einigen der neu entwickelten Stoffe können sich die Hohlräume – etwa durch Wasserzugabe – wie auf Knopfdruck bis auf das dreifache Volumen aufblasen, ohne dass dabei nur eine einzige chemische Bindung gelöst oder neu geknüpft wird. Und obendrein ist der Vorgang auch noch reversibel. Damit eröffnen sich für dieses »chemische Soufflee« ungeahnte Anwendungen, etwa das gezielte Transportieren und Freisetzen von Arzneimitteln im Körper (ab S. 88).

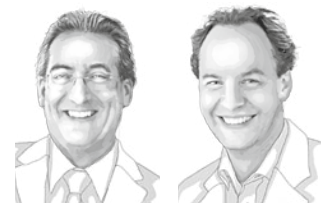
In der Hoffnung, Ihnen mit diesem Heft etwas von der Faszination der aktuellen chemischen Forschung vermitteln zu können, grüßt Sie Ihr

Hartwig Hanser

AUTOREN IN DIESEM HEFT



2 Physiker, 2 Experimente, 2 unvereinbare Ergebnisse: **Randolph Pohl** (links) vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik und **Jan C. Bernauer** vom Massachusetts Institute of Technology haben die Wissenschaft mit ihren Messungen des Protonenradius in Aufregung versetzt (ab S. 48).



»Berufssänger sind Stimm-athleten«, wissen die Freiburger Musikmediziner **Bernhard Richter** (links) und **Matthias Echtenach**. Mit Endoskopen und Tomografen erforschen sie insbesondere die verschiedenen Register der menschlichen Stimme (ab S. 32).



Die Tübinger Umweltarchäologin **Simone Riehl** hält die Erfindung der Pflanzenzüchtung für einen wichtigen Schritt in der menschlichen Evolution (ab S. 64).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Wie Schlangen fliegen • Verjüngungskur fürs Gehirn • Schnelle Leiter aus Graphen • Einen Schritt weiter bei der Kernfusion? • Die ältesten Fußspuren Europas • Unerwartet viele Fische im Meer

11 Bild des Monats

Frosch mit Fangzähnen

12 Forschung aktuell

Die vergessene Dynastie
Archäologen entdeckten das Grab eines bislang unbekanntem Pharaos

Grönlands Eispanzer
Er schmilzt auch von unten, mit Folgen für das Klima und den Meeresspiegel

Verblüffend einfacher Weg zu Stammzellen?

Allein durch Stress sollen sich Körperzellen in embryonale Stammzellen zurückverwandeln lassen

SPRINGER'S EINWÜRFE

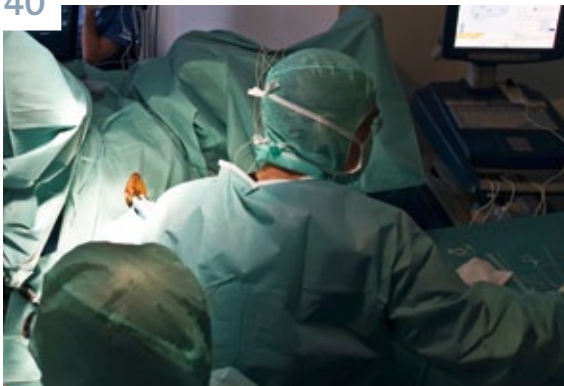
Kommen die Robotermiten?
Emsige Automaten bauen komplexe Strukturen

24



MIT FRDL. GEN. VON ANDREAS KAUTT UND AXEL MEYER

40



MIT FRDL. GEN. DES PROSTATA-CENTER FRANKFURT/OFFENBACH

70



ISTOCKPHOTO / VLADIMIR SAZONOV

BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 24 Evolution im Zeitraffer

Roland Knauer

Buntbarsche bilden in Rekordzeit neue Arten. Manche davon ähneln sich, haben zum Beispiel dicke Lippen.

▶ 32 Leistungssport Gesang

Matthias Echternach und Bernhard Richter

So präzise kontrollieren Berufssängerinnen und -sänger ihre Stimmlippenschwingungen und Resonanzräume.

▶ 40 Mit Stromstößen gegen Krebs

Michael K. Stehling, Enric Günther und Boris Rubinsky

Die »irreversible Elektroporation« zerstört Tumoren, lässt aber extrazelluläre Gewebestrukturen unversehrt.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

▶ 56 Katastrophenabwehr beim Coffee to go

Hans-Joachim Schlichting

Wer gefüllte Pappbecher umherträgt, kann sich noch so viel Mühe geben: Irgendwann schwappt der Kaffee über.

▶ 58 Machen Quanten Sprünge?

David Tong

Im Kleinen scheint sich die Natur sprunghaft zu verhalten. Doch auch hier gelten kontinuierliche Gesetze.

MENSCH & KULTUR

▶ 64 Der lange Weg zur Landwirtschaft

Simone Riehl

Pflanzenzucht als Teil der menschlichen Evolution.

70 Die Milchrevolution

Andrew Curry

Eine Mutation beim Menschen förderte die Milchkultur.



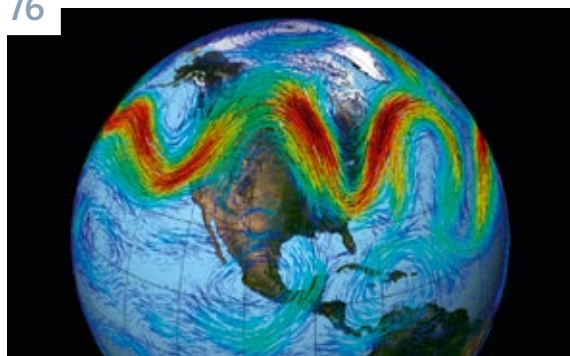
► TITELTHEMA

48 Das Proton-Paradoxon

Jan C. Bernauer und Randolph Pohl

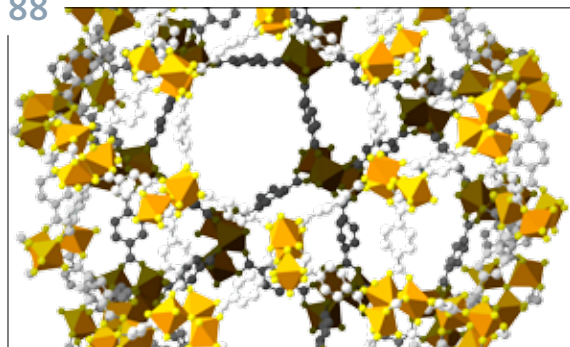
Was tun, wenn nach jahrelangen Messungen zwei deutlich voneinander abweichende Ergebnisse für die Größe des Protons herauskommen? Einige Forscher hoffen, einem völlig neuartigen physikalischen Phänomen auf der Spur zu sein.

76



NASA, GSFC

88



GÉRARD FÉREY / CNRS PHOTOTHÈQUE

ERDE & UMWELT

76 Der Jetstream schlägt Wellen

Daniel Lingenhöhl

Der Höhenwind rund um den Nordpol beult sich zunehmend stärker aus – und verursacht Wetterextreme.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

82 Heute kochen wir Elemente-Suppe!

Roald Hoffmann

Was sind die stabilsten chemischen Verbindungen der Welt?

TECHNIK & COMPUTER

88 Atmende Kristalle

Gérard Férey

Neuartige kristalline Festkörper können bei der Aufnahme von Gasen oder Wasser ihr Volumen vervielfachen.

Nach S. 96 folgt die Sonderpublikation
»Gesundheit stiften«.

97 Rezensionen

Manfred Popp: Deutschlands Energiezukunft • Simon Singh: Homers letzter Satz • Ralf Jauernig, Ulrich Köhler: Der Mars • Sally Ingleton: Die Welt der Meere • Eric Schlosser: Command and Control • Charles C. Mann: Kolumbus' Erbe • Ulrich von Kusserow: Magnetischer Kosmos u. a.

96 Wissenschaft im Rückblick

Von der Kieferprothese zum Elektroauto

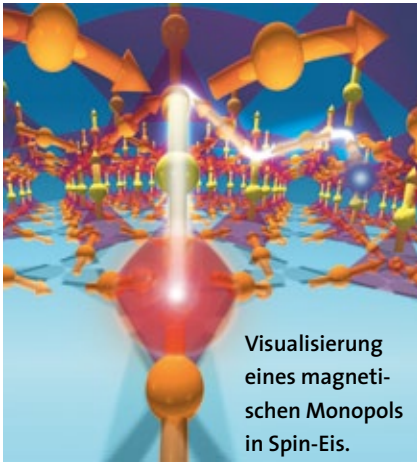
104 Futur III

Dawn Bonanno: Wie Biocola mein Leben rettete

106 Vorschau

Titelmotiv: Tavis Coburn

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



Visualisierung eines magnetischen Monopols in Spin-Eis.

GERHARD DUFF, UCD

Erster Nachweis nicht erwähnt

In Spin-Eis verhalten sich Quasiteilchen wie magnetische Monopole, so die Physiker Hans-Benjamin Braun und Remo Hühli sowie die Materialwissenschaftlerin Laura Heydermann. (»Nordpole ohne Südpole«, Februar 2014, S. 48)

Antonia Rötger, Helmholtz-Zentrum Berlin: Mit großem Interesse habe ich das Februarheft gelesen; insbesondere war ich neugierig, wie »Spektrum« das schwierige Thema der magnetischen Monopole aufgreift. Sie haben dafür

fünf Doppelseiten freigemacht, und die Autoren haben sehr ausführlich die Vorgeschichte und fast alle Wissenschaftler genannt, die jemals an der Suche nach diesen Quasiteilchen beteiligt waren. Allerdings erwähnen sie an keiner Stelle die Forschergruppe, die zuerst magnetische Monopole in einem Dysprosium-Titanat experimentell nachweisen konnte.

Unter der Leitung von Professor Alan Tennant hat das Team diesen Nachweis am Forschungsreaktor BER II des Helmholtz-Zentrums Berlin erbracht und am 3. September 2009 über seine Ergebnisse in »Science« berichtet (www.helmholtz-berlin.de/aktuell/pm/pm-archiv/2009/pm-tennant-morris-monopole_de.html). Alan Tennant ist für diese Entdeckung im Jahr 2012 zusammen mit seinen internationalen Partnern mit dem Preis der Europäischen Physikalischen Gesellschaft ausgezeichnet worden (www.pro-physik.de/details/news/2538891/Europhysics_Prize_2012_fuer_magnetische_Monopole.html).

Ansonsten hat mir das Heft insgesamt sehr gefallen, insbesondere auch der Text von Dieter Hoffmann über Friedrich Houtermans.

Historische Klimadaten

Die Physiker Georg Wergen, Joachim Krug und Stefan Rahmstorf sehen in der Häufung von Extremereignissen einen Zusammenhang mit der globalen Erwärmung. (»Klimarekorde«, Februar 2014, S. 80)

Karl D. May, Gengenbach: Der Artikel präsentiert einige bemerkenswerte Aspekte, gibt aber in zwei Punkten Anlass zu Nachfragen. Anders Celsius (1701–1744), René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683–1757) und Daniel Gabriel Fahrenheit (1686–1736) waren nach heutigem Wissen die ersten Forscher, die sich etwa zu gleicher Zeit mit der objektiven Temperaturmessung beschäftigt haben. Fahrenheit soll 1714 erstmals die Herstellung übereinstimmender Thermometer gelungen sein. Um 1742 präsentierte Celsius seine Temperaturskala. Wie können dann im Bild auf S. 84 Sommertemperaturen ab 1500 berücksichtigt werden? Zumindest bedürfte die Behauptung einer Erläuterung. Im Bild auf S. 83 wird zudem ein sehr kleinteiliges Raster für die Messwerte über den Meeren gewählt, ohne zu erläutern, wie ab 1880 so viele

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

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

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

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahne, Antje Findelee (Bild des Monats);

E-Mail: redaktion@spektrum.com

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistent: Erika Eschwei

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg;

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

Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

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. Reinhard Breuer, Dr. Werner Gans, Dr. Jan Osterkamp, 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 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.

Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF

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

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Nicole Klemmer, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1373

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 35 vom 1.1.2014. 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: © 2014 (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 Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordertes eingesandene Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



Messreihen auf Monatsbasis auf der riesigen Meeresoberfläche ermittelt wurden und mit welcher Genauigkeit.

Bei retrospektiven Betrachtungen des Klimas missachtet man üblicherweise die mangels Messtechnik qualitativen Angaben in vielen Ortschroniken. Für die Stadt Gengenbach nahe Straßburg wird etwa überliefert: 1518: Es herrscht Hungersnot und überall sind schlechte Ernten; 1530: Am Josefstag (19. März) gibt es schon Früchte, die sonst erst im Juni reif sind. Eine zweite Ernte im Herbst ist möglich; 1540: Große Trockenheit und viel Wein. Dieser ist billiger als Wasser. 1570: Nacheinander 12 Fehljahre für die Bauern. 1719: Der Winter ist stürmisch und regnerisch, aber ohne Kälte und Schnee. Unvermittelt wird es Ende Februar hochsommerlich mit solcher Hitze und Trockenheit, dass bis zum Sommer fast kein Regen fällt. Fluss und Brunnen trocknen aus, viel Vieh kommt um, alles reift vorzeitig. Endlich im August stürzt das ersehnte Nass vom Himmel, was eine Weinernte von ungeahntem Ausmaß beschert.

Rekorde dieser Art sind uns heute völlig fremd. Es wäre sicher ein lohnendes Projekt, die historischen Ereignisse in die aktuelle Klimadiskussion etwas differenzierter mit einzubeziehen.

Antwort des Autors Stefan Rahmstorf:

Die Studie der europäischen Sommertemperaturen ab dem Jahr 1500 von Barriopedro et al. (Science, 2011) basiert für die Zeit vor der Existenz von Thermometermessungen auf der Auswertung von Proxydaten durch Luterbacher et al. (Science, 2004). Unter den hier verwendeten Proxydaten sind Klimainformationen aus Baumringen und Eisbohrkernen, aber es wurden auch schriftliche Aufzeichnungen aus früheren Jahrhunderten verwendet, wie Sie sie zitieren. Solche Beschreibungen von klimatisch beeinflussten Ereignissen sind eine wichtige Datenquelle in der Paläoklimaforschung und werden systematisch ausgewertet – zum Beispiel die Termine der Weinlese bis zurück ins Jahr 1354.

Die Abbildung auf S. 83 basiert auf dem globalen Temperaturdatensatz

des Goddard Institute for Space Studies der NASA in New York. Das Verfahren ist beschrieben in Hansen und Lebedeff (Journal of Geophysical Research, 1987). Sie haben Recht, dass gemessene Meerestemperaturen vor der Satellitenära nicht auf einem feinen Gitter verfügbar sind. Die NASA macht sich bei der Erstellung der Karten die Beobachtung zu Nutze, dass Temperaturveränderungen in den Monatsmittelwerten einen räumlichen Korrelationsradius von rund 1200 Kilometern aufweisen, so dass man auch mit der vorhandenen, begrenzten Datendichte nahezu globale Karten erstellen kann. Bewusst haben wir in unserer Grafik die Meeresgebiete abgeblendet, um die Aufmerksamkeit auf die besser mit Daten abgedeckten Landgebiete zu lenken.

Bedürfnis nach Distanz und Unverbindlichkeit

Der französische Soziologe Nicolas Auray untersuchte, wie wir uns in der digitalen Welt verändern. (»Der Mensch im Netz«, Februar 2014, S. 88)

Jörg Bernig, Haukeland (Norwegen):

Der Artikel beleuchtet eine Vielzahl von Auswirkungen oder Erscheinungen der »Internet-Kultur«, was ich sehr anregend fand. Die Auffassung, dass erst durch Facebook & Co bestimmte Verhaltensweisen bei Menschen entstanden sind, teile ich allerdings nicht. Facebook erfüllt meines Erachtens ein Bedürfnis nach Distanz und Unverbindlichkeit bei Menschen, die sich scheuen, Kritik, Verletzungen und Verlusten ausgesetzt zu sein. Die eben aus diesen Gründen keine bedeutungsvollen und verantwortlichen Beziehungen eingehen wollen. Für diesen »Markt« wurde Facebook erfunden. Welche sozialen und zivilisatorischen Faktoren diese Bedürfnisse derart gefördert haben, dem wäre in feldübergreifenden kulturellen Studien nachzugehen.

Analog erfüllen Computerspiele und -simulationen den gleichen Zweck, wo man sich ohne Gefahr und unumkehrbare Konsequenzen in alle erdenklichen Situationen begeben kann. Die

**FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET**



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

eigene Selbstdarstellung – also die Möglichkeit, sich so zu zeigen, wie man sein möchte, nicht, wie man ist –, richtet sich demzufolge nach einem Wunschbild, das geprägt wird von in andere projizierten Erwartungen, sicherlich auch von der Werbung.

Selbst das Phänomen des Multitasking oder eben auch der »Hyperaufmerksamkeit« kann als Ausdruck dieses Bedürfnisses nach Flüchtigkeit gedeutet werden. Die vom Autor festgestellte »angenehme Abwechslung« bei einer Tätigkeit durch zum Beispiel Pop-ups oder E-Mails bestärkt meiner Meinung nach den Eindruck, dass der »Internet-Mensch« sich möglichst keiner Aufgabe oder Beziehung konsequent und unter eventuellem Eingehen eines Risikos hingeben will.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: leserbriefe@spektrum.com
Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

BIOLOGIE

Wie Schlangen fliegen

Schmuckbaumnattern, die in den tropischen Regenwäldern Südasiens leben, bewegen sich häufig im Gleitflug von Baum zu Baum. Ein Team um John Socha von der Virginia Tech (USA) hat nun untersucht, wie den Tieren das gelingt. Die Forscher analysierten dazu die Kräfte, die auf ein umströmtes Modell des Schlangenkörpers wirken.

Wenn Schmuckbaumnattern durch die Luft gleiten (links), nimmt ihr Körper ein dreiecksähnliches Profil an. Dieses haben Forscher nun nachgebildet (rechts).



JAKE SOCHA, VIRGINIA TECH

Wie man schon länger weiß, spreizen Schmuckbaumnattern der Spezies *Chrysopelea paradisi* nach dem Absprung ihre Rippen, so dass ihr Körperquerschnitt ungefähr die Form eines Dreiecks annimmt. Socha und sein Team vermuteten, dass der Schlangenkörper dadurch Tragflächeneigenschaften bekommt.

Um das zu überprüfen, stellten die Forscher ein entsprechend geformtes Modell per 3-D-Druck her. Dieses ließen sie im Strömungskanal von Wasser umfließen und untersuchten die dabei auftretenden Kräfte und Strömungsmuster. Den größten Auf-

trieb erfährt eine fliegende Schlange demnach, wenn sie bei seitlicher Drift ihren Körper in Flugrichtung um einen Winkel von 35 Grad anstellt. Hält sie ihren Körper dagegen waagrecht, wirkt ein Unterdruck auf die Bauchseite, der das Tier nach unten zieht. Vermutlich steuert die Schlange in der Luft, indem sie Teile ihres Körpers gegeneinander verdreht und so lokale Auf- und Abtriebskräfte erzeugt, um beispielsweise Kurven zu fliegen.

Allerdings ist bei echten Schmuckbaumnattern das Verhältnis von Auf- zu Abtrieb besser als beim Modell. Es muss also neben dem veränderten Körperprofil noch weitere Anpassungen geben, die der Schlange den Gleitflug ermöglichen. Offenbar verbessern die Tiere ihre Flugeigenschaften zusätzlich durch aktive Schlangelbewegungen in der Luft.

The Journal of Experimental Biology
217, S. 382–394, 2014

Spektrum DER WISSENSCHAFT **DIE WOCHE**



Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin

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

www.spektrum.de/die-woche

HIRNFORSCHUNG

Verjüngungskur für das Gehirn

Die extrazelluläre Matrix im Gehirn – jene Gewebeanteile, die zwischen den Zellen liegen – wirkt daran mit, Erinnerungen zu fixieren. Zerstört man sie, erlangt das Denkorgan seine jugendliche Plastizität zurück und kann sich strukturell wieder besser an neue Anforderungen anpassen.

Wissenschaftler um Renato Frischknecht vom Leibniz-Institut für Neurobiologie (Magdeburg) trainierten Mongolische Rennmäuse darauf, bei einem bestimmten Ton schnell den Platz zu wechseln, bei einem anderen hingegen an Ort und Stelle zu bleiben. Machten die Tiere dabei einen Fehler, erhielten sie einen Stromschlag. Nach mehreren Tagen verkehrten die Forscher die Assoziation in ihr Gegenteil, die Tiere mussten also umlernen.

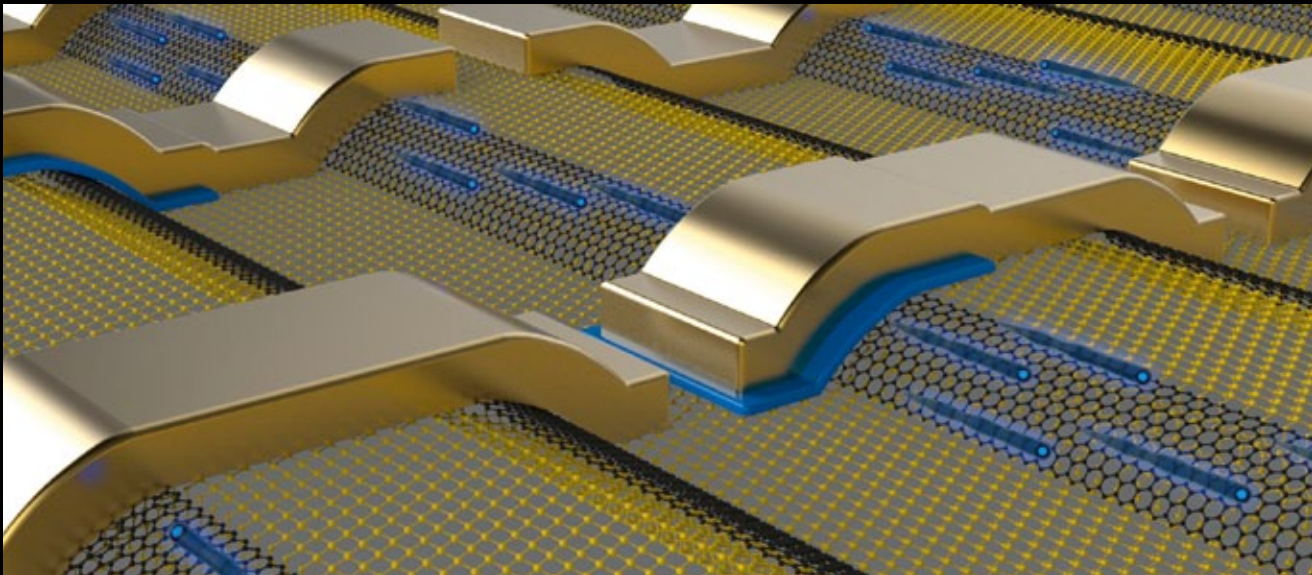
Einige Nager bekamen in eine bestimmte Hirnregion, den fürs Hören

zuständigen auditorischen Kortex, das Enzym Hyaluronidase injiziert, das die extrazelluläre Matrix abbaut. Diese Tiere waren sehr gut darin, den vorher erlernten Zusammenhang durch den neuen zu ersetzen. Die anderen Mäuse hatten mit dem Umlernen erhebliche Schwierigkeiten.

Ergänzende Tests zeigten, dass die Hyaluronidase-Injektion nicht generell Erinnerungen löscht – die Tiere behielten nach der Behandlung erlernte Verhaltensmuster bei, sofern sich ihr Umfeld nicht änderte. Der Abbau der extrazellulären Matrix scheint auch nicht das Lerntempo zu erhöhen. Möglicherweise lassen sich die Erkenntnisse nutzen, um das Gehirn von Schlaganfallpatienten in einen Zustand höherer Plastizität zu versetzen und so die Genesung zu unterstützen.

PNAS 111, S. 2800–2805, 2014

Schnelle Leiter aus Graphen



JOHN HANINSON, GEORGIA TECH

Ein Forscherteam um Walt de Heer vom Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA) hat schmale Streifen aus Graphen erzeugt, die einen extrem geringen elektrischen Widerstand aufweisen. Hierfür ätzen die Wissenschaftler in einen Block aus Siliziumkarbid – einer Silizium-Kohlenstoff-Verbindung – winzige Rillen ein und erhitzen ihn mehrere Minuten lang auf über 1000 Grad Celsius. An den Seitenwänden der Rillen entstanden dabei 40 Nanometer (milliardstel Meter) breite Bänder aus Graphen mit sehr glatten Kanten. Schon zuvor war es möglich gewesen, Graphenstreifen herzustellen – allerdings mit relativ stark ausgefransten Kanten, was die elektrische Leitfähigkeit verschlechterte.

Elektronen (blau) rasen durch schmale Graphenstreifen (schwarz) in den Rillen eines Siliziumkarbidblocks (künstlerische Illustration).

Die von de Heers Team erzeugten Graphenstreifen leiten Elektronen 1000-mal schneller als bisher verfügbare. Diese hervorragenden Transporteigenschaften bleiben bis zu einer Streifenlänge von 16 Mikrometern (millionstel Metern) erhalten. Möglicherweise lassen sich damit neue, widerstandsarme elektronische Bauteile mit sehr hohen Arbeitsgeschwindigkeiten entwickeln.

Nature 506, S. 349–354, 2014

Einen Schritt weiter bei der Kernfusion?

Fusionsforscher von der amerikanischen National Ignition Facility (NIF) melden, sie hätten einen Meilenstein auf dem Weg zum Fusionsreaktor erreicht. Laut Omar Hurricane und seinen Kollegen gelang es, per Kernfusion durch so genannten Trägheitseinschluss mehr Energie bereitzustellen, als zuvor über Laser in den Brennstoff hineingepumpt worden war. Die verwendete Brennstoffhohlkugel aus Deuterium und Tritium nahm insgesamt etwa 10 Kilojoule Energie auf, während die ausgelöste Fusionsreaktion rund 15 Kilojoule freisetzte. Aller-

dings ergibt sich der vermeintliche Nettoenergiegewinn nur, wenn man die noch außerhalb des Brennstoffs anfallenden Verluste durch Energieumwandlung, Absorption und anderes ignoriert. Tatsächlich benötigten die insgesamt 192 Laser für jeden Schuss knapp zwei Megajoule elektrische Energie – mehr als das 100-Fache dessen, was man in diesem bisher erfolgreichsten Versuch durch die Fusionsreaktion zurückbekam.

Das eigentliche Ziel der Experimente lautet, eine Fusionsreaktion auszulösen, die den gesamten Brennstoff

erfasst und ein Vielfaches der investierten Energie freisetzt. Von dieser so genannten Zündung ist das Team noch weit entfernt – obwohl sie schon für 2012 angekündigt war. Dass die Forscher nun das Erreichen einer viel unbedeutenderen Wegmarke als Erfolg vermelden, deutet wohl auf die Schwierigkeiten hin, in denen das Großexperiment steckt. Wegen der hohen Kosten von mehr als fünf Milliarden Dollar stand die weitere Finanzierung des Vorhabens bereits 2012 in Frage.

Nature 506, S. 343–349, 2014

ARCHÄOLOGIE

Die ältesten Fußspuren Europas

FOTO: MARTIN BATES, AUS ASHTON, N. ET AL.: HOMOININ FOOTPRINTS FROM EARLY PLEISTOCENE DEPOSITS AT HAPPIBURGH, UK. IN: PLOS ONE 9, E88329, 2014, FIG. 4B



In Happisburgh, einem Küstenort im englischen Norfolk, sind Archäologen auf die bislang ältesten menschlichen Fußspuren außerhalb Afrikas gestoßen. Bis zu fünf Individuen könnten es gewesen sein, die ihre Abdrücke im Schlamm der damaligen Themsemündung hinterließen. Diese Entdeckung machten die Forscher um Nick Ashton vom British Museum (London) bereits im Mai vergangenen Jahres, stellten sie aber erst jetzt der Öffentlichkeit vor.

Die rund 50 Abdrücke waren laut Schichtfolgendatierung etwa 780 000 Jahre alt und stammten somit aus einer Zeit, als frühe Menschen erstmals bis nach Nordeuropa vordrangen. Bei diesen Pionieren dürfte es sich um archaische Menschen mit sehr robustem Körperbau gehandelt haben,

Vor einem Jahr traten diese uralten Fußspuren in England zu Tage. Der Kameradeckel dient als Größenvergleich.

schreiben die Forscher. Fossile Überreste dieser Wesen wurden in Großbritannien bislang noch nicht entdeckt, allerdings gibt es zeitlich passende Funde aus dem nordspanischen Gebirgszug Sierra de Atapuerca. Dort werden sie als *Homo antecessor* bezeichnet – eine Frühmenschenform, die sich über Jahrhunderttausende hinweg vermutlich zum Neandertaler entwickelte.

Offenbar war die Gruppe, die am Flussufer vielleicht nach Essbarem suchte, bunt gemischt: Sowohl Individuen mit einer Körperhöhe von über 1,70 Meter – vermutlich erwachsene Männer – waren darunter als auch Kinder von weniger als einem Meter Größe. Zu diesem Schluss kamen die Wissenschaftler, als sie die dreidimensionale Form der Abdrücke analysierten.

Die Spuren hatten unter Sand verborgen gelegen, der im vergangenen Jahr von Sturmfluten abgeschwemmt wurde. Zufällig war das Forscherteam gerade in der Nähe und wurde so auf die Abdrücke aufmerksam. Andernfalls wären sie wohl unentdeckt geblieben, denn an der ungeschützten Oberfläche überdauerten sie keine zwei Wochen: Die Flut hat das Material inzwischen abgetragen und die Spuren für immer verwischt.

PLoS One 9, e88329, 2014

ÖKOLOGIE

Das Meer wimmelt von Fischen

Es gibt viel mehr Fische in den Ozeanen als bislang angenommen – zumindest in Wassertiefen zwischen 200 und 1000 Metern. In dieser mesopelagischen Zone, in der nur noch Dämmerlicht herrscht, beträgt die Gesamtmasse der Fische demnach bis zu zehn Milliarden Tonnen – zehnmal so viel wie zuvor vermutet. Das schreiben Meeresbiologen um Xabier Irigoien von der King Abdullah University of Science and Technology (Saudi-Arabien).

Ein Fisch aus dem Mesopelagial, der Dämmerlichtzone der Ozeane.

Neuen Untersuchungen zufolge gibt es weit mehr solcher Tiere als vermutet.

Bisherige Abschätzungen beruhten auf Fangzahlen von Fischtrawlern: Schiffen, die in diesen Tiefen ihre Netze ausbringen. Seit Kurzem weiß man aber, dass die Fische die Netze erkennen und davor fliehen. Irigoien und seine Kollegen nutzten daher akustische Messverfahren. Auf einer Schiffsexpedition durch den Atlan-

JOHN COSTA, CHIC



tischen, den Pazifischen und den Indischen Ozean ermittelten sie stichprobenartig die Größe und Dichte der Fischschwärme durch Rückstreuung von Ultraschallwellen.

Sollte sich bestätigen, dass in der Dämmerlichtzone tatsächlich so viel mehr Fische leben, erwachsen daraus weit reichende Konsequenzen für das Verständnis ökologischer Zusammenhänge. Die Meerestiere in diesen Tiefen verfrachten sowohl Nährstoffe als auch Kohlendioxid zwischen Wasseroberfläche und Tiefsee hin und her. Ihr Beitrag zu entsprechenden Transportvorgängen müsste dann neu bewertet werden.

Nature Communications 5, 3271, 2014



FROSCH MIT FANGZÄHNEN

Eine neue Froschfamilie verblüfft durch ihr untypisches Gebiss: Neben zwei kräftigen Fangzähnen im Unterkiefer besitzen die Tiere auch im Oberkiefer noch eine ganze Reihe spitzer, nach hinten gebogener Zähne, wie die computertomografische Aufnahme zeigt. Die Vertreter der von Michael Barej und Mark-Oliver Rödel vom Museum für Naturkunde in Berlin und seinen Kollegen als Odontobatrachidae beschriebenen Familie leben in westafrikanischen Regenwäldern an schnell fließenden Flüssen und Wasserfällen. Sie sind nicht näher mit ähnlichen Stromschnellenbewohnern in Zentral- und Ostafrika verwandt, sondern spalteten sich bereits in der Kreidezeit als eigene Entwicklungslinie ab.

Frontiers in Zoology 11, 8, 2014



CT-AUFNAHME OBEN: KRISTIN MAHLOW; FOTO UNTEN: MICHAEL BAREJ; BEIDE: MUSEUM FÜR NATURKUNDE, LEIBNIZ-INSTITUT FÜR EVOLUTIONS- UND BIODIVERSITÄTSFORSCHUNG, BERLIN

ÄGYPTOLOGIE

Die vergessene Dynastie

Bei Ausgrabungen im oberägyptischen Abydos gelang Archäologen, was längst nicht mehr für möglich gehalten wurde: Sie entdeckten das Grab eines bislang unbekanntes Pharaos. Offenbar gab es dort zwischen etwa 1650 und 1600 v. Chr. ein kleines Königreich, das nach seinem Untergang in Vergessenheit geriet.

VON LUISE LOGES



JOSEF WEGNER, PENN. MUSEUM

Das Team um Josef Wegner von der University of Pennsylvania in Philadelphia gräbt seit 1994 in dem Gebiet um den so genannten Anubis-Hügel in Abydos, einem im alten Ägypten bedeutenden Kultort gut 160 Kilometer nördlich von Luxor.

Im vergangenen Sommer stießen die Forscher dort in einem Grab auf einen ungewöhnlich großen Sarkophag aus rotem Quarzit. Seinen Inschriften zufolge gehörte er einem Pharaos Sobekhotep (vermutlich Sobekhotep I., um 1780 v. Chr.). Das Überraschende daran: Dessen Grab kannten die Archäologen schon, es liegt aber an einer anderen Stelle in Abydos. Der tonnenschwere Steinsarkophag war also in der Antike daraus entfernt und wieder verwendet worden. Allerdings lieferte das Grab des Diebes keinen Hinweis darauf, wer sich darin hatte bestatten lassen.

Neugierig geworden widmeten sich die Forscher nun der näheren Umgebung und öffneten im vergangenen Januar eine weitere Grabstätte. Sie bestand aus einer Hauptkammer mit weiß verputzten Kalksteinwänden (siehe Bild rechts) und vier Vorkammern – für Angehörige der Oberschicht eine

Im vergangenen Sommer stießen Forscher der University of Pennsylvania in der Nekropole von Abydos auf Hinweise, die sie zu einem bislang unbekanntes Pharaonengrab führten (im Bild: Öffnung der Grabkammer). Die Überraschung: Der dort bestattete König taucht in der schriftlichen Überlieferung nicht auf.

bescheidene Anlage. Immerhin: Gut erhaltene Farben, religiöse Darstellungen und Motive aus dem Königs kult zierten die Wände. In der Hauptkammer waren die vier ägyptischen Schutzgöttinnen Isis, Nephtys, Nut und Selket abgebildet, die den Verstorbenen in allen vier Himmelsrichtungen gegen Unheil abschirmen sollten.

Zudem kam ein Kanopenschrein zum Vorschein, eine Holzkiste, in der man die vor der Mumifizierung entnommenen Organe deponiert hatte. Auch dieser war der Beschriftung zufolge ursprünglich für einen Sobekhotep angefertigt worden.

Der Verwesung preisgegeben

Wer immer sich erdreistet hatte, ihn für seine eigene Beisetzung zu beanspruchen, war selbst das Opfer von Plünderern geworden: Von seiner Mumie blieb nur das Skelett, denn kaum beigelegt, war der Tote wieder ausgewickelt worden – vermutlich trug er wertvolle

Amulette, die ihn im Jenseits schützen sollten. Der Verwesung preisgegeben zerfiel der Körper bis auf die Knochen.

Eine erste anthropologische Untersuchung der Überreste ergab, dass der Verstorbene ein etwa 1,75 Meter großer Mann mittleren Alters gewesen war. Die wirkliche Überraschung boten aber gut lesbare Hieroglyphen an den Wänden. So genannte Kartuschen (siehe Bild S. 14), also von einem ovalen Rahmen eingefasste Namen, verrieten den Thron- und den Eigennamen des Grabbesitzers: »König von Ober- und Unterägypten, Useribre« und »Sohn des Re, Senebkay«. Die Schreibweise, die Verwendung der beiden traditionellen Titel sowie die behauptete göttliche Abstammung weisen den Verstorbenen als Pharao aus!

Ist dies das Grab eines Pharaos einer bislang unbekanntenen Dynastie? Der Blick in die Hauptkammer zeigt eine eher bescheidene Anlage. Gemalte Schutzgöttinnen bewachten einst den Kanopenschrein, der die inneren Organe des Toten enthielt.

Das Grab des neuen Königs datieren Grabungsleiter Wegner und sein Mitarbeiter Kevin Cahail von der University of Pennsylvania ungefähr auf das Jahr 1650 v. Chr., das in die Zweite Zwischenzeit Ägyptens fällt. Mehrere politische Fraktionen konkurrierten damals um die Vorherrschaft.

Die in Memphis ansässige ehemalige Zentralmacht hatte seit Beginn des 18. Jahrhunderts v. Chr. zunehmend an Einfluss verloren. Könige, die sich von der memphitischen Dynastie losgelöst hatten und an dieser vorbei diplomatische Beziehungen mit der Kerma-Kultur in Nubien führten, residierten inzwischen im Zentraldelta.

In der Mitte des 17. Jahrhunderts besiegten die Hyksos, Einwanderer aus Vorderasien, beide Königshäuser und



herrschten von ihrer Hauptstadt Avaris aus über Unterägypten.

In Oberägypten übernahm bald darauf eine einheimische Dynastie mit Residenz in Theben die Macht. Nach etwa einem Jahrhundert der Konflikte gewannen sie endgültig die Oberhand und begründeten das Neue Reich. Doch offenbar war das nicht die ganze Ge-

schichte, denn das neu entdeckte Königsgrab in Abydos kann keiner dieser Fraktionen zugerechnet werden.

Machtvakuum in Oberägypten

Dessen Entdeckung bestätigt eine These, die der dänische Ägyptologe Kim Ryholt 1997, nach einer bereits 1988 veröffentlichten Idee seines deutschen Kol-

legen Detlef Franke, bekannt gemacht hatte: Das Machtvakuum, das durch den Fall der memphitischen Dynastie in Oberägypten entstanden war, habe für kurze Zeit das Aufkommen eines unabhängigen Kleinkönigreichs in der Gegend um Abydos zugelassen. Denn zur Konfrontation der Hyksos mit Theben kam es den Inschriften der beiden Dynastien zufolge erst 20 Jahre nach der Eroberung von Memphis, was Ryholt als Hinweis auf einen Pufferstaat deutete, der die beiden Territorien voneinander trennte.

Er stützte seine Annahme zum einen auf drei Stelen, die alle in Abydos und der näheren Umgebung gefunden wurden. Sie sind die einzigen schriftlichen Zeugnisse dreier Pharaonen, die sonst nichts hinterlassen hatten. Eine plausible Erklärung dafür wäre, dass ihre Regierungszeit zu kurz war. Zum anderen bezog sich der Forscher auf den Turiner Königspapyrus. Dieser Text aus der Zeit Ramses' II. (1279–1213 v. Chr.) ist eine der wichtigsten Quellen für die politische Geschichte Altägyptens. Alle damals bekannten Herrscher sind darin aufgeführt.

Nach einer Gruppe thebanischer Könige aus der Zweiten Zwischenzeit nennt die Liste mehrere Pharaonen mit sehr kurzen Regierungszeiten, deren Namen jedoch auf Grund des schlechten Zustands des Papyrus kaum oder gar nicht zu entziffern sind. Dazu gehören zwei aufeinanderfolgende Regenten mit dem jeweils nur teilweise erhaltenen Thronnamen »User...re«. Wegner und sein Team glauben nun, dass Senebkay einer von ihnen gewesen sein könnte.

Auf dem fraglichen Areal in Abydos entdeckten sie Hinweise auf etwa 16 weitere unerforschte Gräber. Ob dort auch die übrigen Könige einer Abydos-Dynastie bestattet wurden, sollen die kommenden Kampagnen zeigen. Wegner ist aber guter Dinge, dass in den nächsten Jahren ein Teil der ägyptischen Geschichte neu geschrieben werden muss.



JENNIFER WEGNER, PENN MUSEUM

Für Ägyptologen deutlich lesbar und doch rätselhaft: Dem im Rahmen stehenden Eigennamen des Grabbesitzers Senebkay geht der Pharaontitel »Sohn des Sonnengottes Re« voraus (dargestellt durch die Gans-Hieroglyphe mit Sonnenscheibe).

Die Ägyptologin **Luise Loges** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Tübingen.

Verblüffend einfacher Weg zu Stammzellen?

Es wäre ein Durchbruch in der Medizin mit weit reichenden Konsequenzen: Körperzellen ausgewachsener Säugetiere sollen sich allein durch belastende Reize in embryonale Stammzellen zurückverwandeln lassen. Allerdings mehren sich Zweifel an der Erfolgsmeldung.

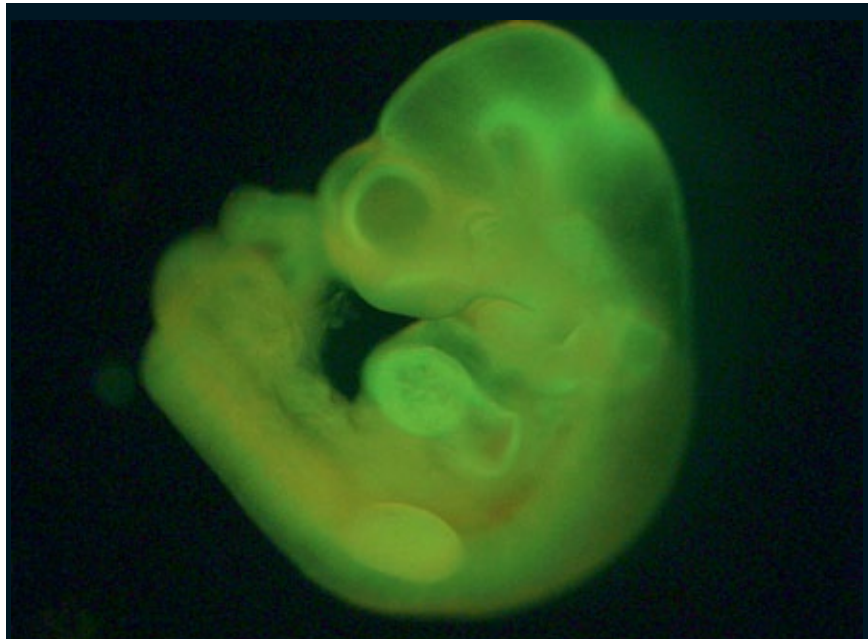
VON HELEN THOMSON

Etwa Stress genügte offenbar für die Verjüngung: Ausgereifte, spezialisierte Zellen erlangten die Fähigkeit, wieder jede Art von Gewebetyp hervorzubringen, wenn sie nur kurz widrigen Bedingungen ausgesetzt wurden. Dieses überraschende Ergebnis einer japanisch-amerikanischen Forschungsgruppe verspricht nicht weniger als eine Revolution in der Stammzellmedizin.

Ende Januar erschien die Veröffentlichung über das neue Verfahren in der Fachzeitschrift »Nature« (Bd. 505, S. 641–647, und S. 676–680). Noch fehlen viele Details, und inzwischen gibt es auch skeptische Stimmen (siehe Kasten S. 18). Doch falls sich die Ergebnisse bestätigen, würden sie einen Durchbruch mit enormen Auswirkungen auf die Fortpflanzungsmedizin, die Krebsforschung und die Behandlung erkrankter Organe bedeuten. Auch das Klonen von Menschen wäre wieder ein Stück näher gerückt. »Schon aus einem Tropfen Blut könnte sich auf ganz einfache Weise ein genetisch absolut identischer Zwilling erschaffen lassen«, meint Charles Vacanti von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts), der an der Arbeit beteiligt war.

In der ersten Zeit nach der Befruchtung sind die wenigen Zellen, aus denen der werdende Embryo besteht, noch pluripotent, können sich also zu fast jedem Typ von Körpergewebe entwickeln. Solche embryonalen Stammzellen eignen sich daher prinzipiell dazu, Ersatz für geschädigte oder erkrankte Organe zu liefern. Aber weil bei ihrer Gewinnung ein Embryo zerstört wird, werfen sie heikle ethische Fragen auf.

Im Jahr 2006 fanden Shinya Yamanaka von der Universität Kioto (Japan) und seine Kollegen einen eleganten Ausweg aus diesem moralischen Dilem-



HARUKO OBOKATA, RIKEN CENTRE FOR DEVELOPMENTAL BIOLOGY

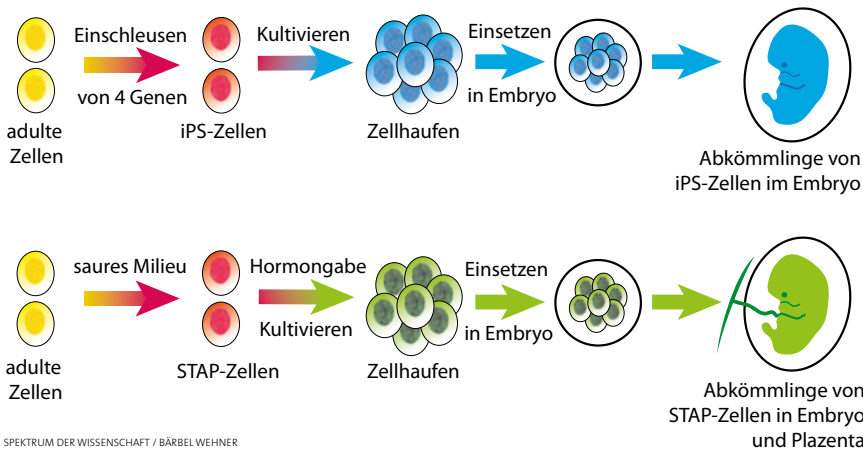
Die durch Stress erzeugten Stammzellen trugen ein Fluoreszenzgen als Erkennungsmerkmal. Nach ihrer Injektion in einen nur wenige Tage alten Mäusembryo leuchtete später der gesamte Fetus grün – ein Beweis dafür, dass die Zellen pluripotent waren, sich also zu jeder Art von Gewebe entwickeln konnten.

ma. Durch Übertragung von vier Genen, die normalerweise in pluripotenten Zellen aktiv sind, konnten sie Körperzellen erwachsener Menschen zu so genannten iPS-Zellen umprogrammieren. Für diese bahnbrechende Leistung erhielten sie 2012 den Medizin-Nobelpreis. Allerdings sind die so erzeugten induzierten pluripotenten Stammzellen nicht unproblematisch, weil man nicht weiß, ob die eingeführten Gene womöglich später Krebs verursachen.

Das neue Verfahren, das Vacanti gemeinsam mit Haruko Obokata am Riken-Zentrum für Entwicklungsbiologie in Kobe (Japan) und weiteren Kollegen entdeckt hat, lässt die DNA dagegen völlig unangetastet. Auf die Idee dazu kamen die Forscher durch ein Phänomen

aus der Botanik, wo ein starker Umweltreiz manchmal gewöhnliche Zellen in unreife Vorläufer zurückverwandelt, aus denen neue Pflanzen hervorgehen können. Zum Beispiel geschieht das bei Karotten, wenn man ein bestimmtes Hormon zugibt. Auch bei Reptilien und Vögeln ist Ähnliches bekannt.

Um zu prüfen, ob das Phänomen vielleicht bei Säugetieren ebenfalls auftritt, stifteten Obokata und Mitarbeiter Mäuse per Genmanipulation mit einem Fluoreszenzmarker aus, der in Gegenwart des nur in pluripotenten Stammzellen vorkommenden Proteins Oct-4 grün aufleuchtet. Aus der Milz von eine Woche alten Tieren entnahm das Team dann Blutproben und setzte daraus isolierte Lymphozyten, eine Sor-



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / BÄRBEI WEHNER

Die durch Säurebehandlung von Körperzellen gebildeten Stammzellen sind nach Zugabe bestimmter Wachstumsfaktoren sogar totipotent: Im Unterschied zu schon länger bekannten induzierten pluripotenten Stammzellen (iPS) bilden solche STAP-Zellen nach Implantation in wenige Tage alte Mäuseembryonen auch Plazentagewebe.

te weißer Blutzellen, vorübergehend belastenden physikalischen oder chemischen Reizen aus. Dazu gehörte beispielsweise das halbstündige Bad in einer schwach sauren Lösung mit einem pH-Wert von 5,7. Anschließend übertrugen die Forscher die Zellen auf ein Kulturmedium, wo ideale Wachstumsbedingungen herrschten.

Anfangs geschah nicht viel. Einige Zellen starben ab, und die anderen sahen unverändert wie Lymphozyten aus. Doch schon am zweiten Tag begannen die ersten grün zu leuchten, was hieß, dass sie Oct-4 produzierten. Nach einer Woche zeigten zwei Drittel der überlebenden Zellen dieses und weitere Merkmale von Pluripotenz, wie sie großenteils auch bei embryonalen Stammzellen zu beobachten sind. iPS-Zellen erreichen dieses Stadium dagegen erst nach bis zu vier Wochen.

Die Forscher bezeichnen das von ihnen entdeckte Phänomen als »stimulus-triggered acquisition of pluripotency« (reizgetriggertes Erwerb von Pluripotenz). Zum Nachweis, dass ihre STAP-Zellen tatsächlich pluripotent waren, injizierten sie diese in fünf bis sechs Tage alte Mäuseembryonen, die sich im so genannten Blastozystenstadium befanden. Die daraus herangewachsenen Tiere enthielten in jedem Gewebetyp Zellen mit dem grünen Fluoreszenzmarker (Bild S. 15). Selbst in ihrem Nach-

wuchs tauchten noch Abkömmlinge der STAP-Zellen auf. Diese hatten sich demnach teilweise zu Keimzellen entwickelt, die der Fortpflanzung dienen.

In einem zweiten Test injizierte das Team STAP-Zellen in erwachsene Mäuse, um zu sehen, ob sie dort ein Teratom bildeten – einen Keimzelltumor, der ein weiteres Merkmal von Pluripotenz darstellt. Auch das war der Fall.

Schließlich prüften die Forscher, ob sich andere Körperzellen gleichfalls auf so einfache Art in pluripotente Zellen zurückverwandeln lassen. Dazu badeten sie Gewebeproben, die sie aus dem Gehirn, der Haut, den Muskeln, Fettgewebe, Knochen, der Lunge und der Leber von einwöchigen Mäusen gewonnen hatten, in Säure. Trotz unterschiedlicher Ausbeute, war das Ergebnis überall gleich. Unveröffentlichten Versuchen zufolge scheint das Verfahren laut Vacanti auch bei viel älteren Tieren zu funktionieren, einschließlich erwachsener Primaten. Doch seien die Experimente noch nicht abgeschlossen.

Genereller Reparaturmechanismus?

Bisher ist unklar, wie die Rückverwandlung genau abläuft. Denkbar wäre, dass ein fundamentaler Reparaturmechanismus dahintersteckt. Wenn man Zellen an den Rand des Absterbens bringt, schalten sie bestimmte Gene an oder ab, meint Vacanti. Dies könnte sich auf

zentrale genetische Steuerungsprogramme auswirken, so dass alle Gene wieder aktivierbar werden. Das gelte vermutlich für sämtliche Zelltypen im Körper, erklärt Vacanti. »Nach einer Verletzung oder Verbrennung verwandeln sich ausgereifte Zellen in der Nachbarschaft zurück zu Stammzellen.« Angeregt durch bestimmte Umweltsignale beginnen diese sich dann zu teilen, wandern in das beschädigte Gewebe ein, bilden dort passende neue Zellen und reparieren so den Schaden.

Zunächst können sich isolierte STAP-Zellen allerdings nicht vermehren. Erst die Zugabe von Wachstumsfaktoren verändert sie so, dass sie sich zu teilen vermögen. Solche STAP-Stammzellen, wie die Forscher sie nennen, können sich nicht nur in einen werdenden Embryo integrieren, sondern auch in den umgebenden Trophoblasten, aus dem die Plazenta entsteht (Bild oben). »Die Zellen sind also nicht nur pluripotent wie embryonale Stammzellen, sondern sogar totipotent«, erläutert José Silva von der University of Cambridge (England). Demnach wären sie noch flexibler und vielseitiger einsetzbar. Totipotenz zeigen sonst nur Zellen, die höchstens ein paar Teilungszyklen nach der Befruchtung hinter sich haben. »Es handelt sich quasi um Vorläufer embryonaler Stammzellen«, so Silva.

Das hat weit reichende Konsequenzen. »Wenn diese Zellen wirklich totipotent sind und sich auch beim Menschen gewinnen lassen«, spekuliert Robert Lanza von der Firma Advanced Cell Technology in Marlborough (Massachusetts), »kann man sie in die Gebärmutter einsetzen – mit der Aussicht, dass sie zu einem menschlichen Wesen heranwachsen. Das führt schnurstracks auf ganz heikles Terrain.«

Und es liegt womöglich näher als gedacht. Laut eigener Aussage hat Vacanti einen Mitarbeiter gebeten, der Sache im Tierversuch nachzugehen. Dieser ließ daraufhin STAP-Zellen, die aus Lymphozyten einer Maus gewonnen waren, zu einem kugelförmigen Haufen heranwachsen und implantierte diesen in den Uterus eines Weibchens. Dort sei er, so Vacanti, zu einem Fetus herange-

>300000

CUTTING EDGE

NATURE
NATURE BIOTECHNOLOGY
NATURE CELL BIOLOGY
NATURE CHEMISTRY
NATURE CLIMATE CHANGE
NATURE COMMUNICATIONS
NATURE GENETICS
NATURE IMMUNOLOGY
NATURE MATERIALS
NATURE MEDICINE
NATURE METHODS
NATURE NANOTECHNOLOGY
NATURE NEUROSCIENCE
NATURE PHOTONICS
NATURE PHYSICS
NATURE STRUCTURAL AND MOLECULAR BIOLOGY
BIOLOGICAL CHEMICAL EARTH MEDICAL PHYSICAL

Download the *Nature Journals* app for iPad, iPhone and iPod touch and gain access to over 30 cutting-edge Nature-branded titles. Subscribe to any journal in the app for just \$35.99*, or access all open access articles and news content for free. Tap in and discover more.

nature.com/appforall



*Apple exchange rates apply. Full access is also available through an existing personal or mobile subscription. Limited time offer available on all journals except *Scientific Reports*. iPad, iPhone and iPod touch are trademarks of Apple Inc.



Zweifel an Stammzellen aus Säurebad

VON DAVID CYRANOSKI

Die beiden Ende Januar publizierten Berichte in »Nature«, wonach sich adulte Zellen von Mäusen mit bloßen Stressreizen – etwa durch Zugabe von Säure oder Druck auf die Zellmembranen – in den Zustand befruchteter Eizellen zurückversetzen lassen, erregten von Anfang nicht nur Staunen, sondern auch Skepsis in der Fachwelt. Im Lauf des Februar ist die Schar der Zweifler deutlich gewachsen. PubPeer und andere Blogs wiesen auf problematische Einzelheiten nicht nur in den beiden Studien, sondern auch in einer Veröffentlichung der Erstautorin Haruko Obokata vom Riken-Zentrum in Kobe aus dem Jahr 2011 hin. Darin war das Potenzial von adulten Stammzellen in ausdifferenziertem Gewebe behandelt worden. Eine Grafik, so die Vorwürfe, enthalte dort Balken, um die Konzentration eines bestimmten Stammzellmarkers anzuzeigen; dieselben Balken seien aber anscheinend gespiegelt auch in einer zweiten Abbildung eingesetzt worden, wo sie das Vorhandensein eines anderen Stammzellmarkers dokumentieren sollen. Ein weiterer Bereich der gleichen Grafik repräsentiere offenbar in noch einer Abbildung einen dritten Marker. Überdies enthalte das Paper eine weitere mutmaßliche Dopplung.

Der verantwortliche Autor dieser Studie – Charles Vacanti, Anästhesist an der Harvard Medical School in Boston – beteuert, er habe erst jetzt von dem »Durcheinander bei einzelnen Grafiken« gehört und das Journal bereits wegen einer Korrektur kontaktiert. »Jedenfalls sieht das nach einem unabsichtlichen Fehler aus, der nichts an der Datenlage ändert – oder etwa den Schlussfolgerungen oder anderen Aussagen des Papers«, betont Vacanti.

Auch die Auffälligkeiten in den zwei aktuellen Veröffentlichungen betreffen Grafiken. In dem einen Paper scheint in der ersten Abbildung bei dem Elektrophorese-Blot, der die Ergebnisse der Genomanalyse zeigt, ein Abschnitt nachträglich eingefügt worden sein. Im anderen ähneln sich die Fotos zweier Plazentas verdächtig, obwohl sie aus unterschiedlichen Experimenten stammen sollen.

Teruhiko Wakayama von der Universität Yamanashi (Japan), Koautor beider Publikationen, hat den größten Teil der Plazentaufnahmen erstellt, aber noch während der Vorbereitung des Manuskripts Riken verlassen. Seiner Meinung nach könnte es sich schlicht um eine Verwechslung handeln. Er erinnert sich, mehr als 100 Bilder an Obokata geschickt zu haben. Vielleicht seien dadurch zufällig zwei ausgewählt worden, welche dieselbe Plazenta zeigen. Er bemühe sich, das zu klären.

Grund für die Skepsis sind zudem Schwierigkeiten, die neuen Resultate nachzuvollziehen: Keinem einzigen von zehn renommierten Stammzellforschern, die auf eine Anfrage von »Nature« reagierten, ist dies bisher gelungen. In dem Blog des Stammzellforschers Paul S. Knoepfler von der University of California in Davis (www.ipsccell.com/stap-new-data) berichten Wissenschaftler über insgesamt ebenfalls zehn fehlgeschlagene Versuche. Allerdings hat keiner von ihnen mit der Stammzelllinie aus Obokatas Labor arbeiten können.

Einige Forscher sehen deshalb derzeit noch kein echtes Problem. Qi Zhou vom Zoologie-Institut der chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking meint etwa, dass es knifflig sei, die richtigen Bedingungen für den Versuch hinzubekommen. So haben die meisten seiner Mäusezellen die Säurebehandlung nicht überstanden. Die Erfahrung lehre jedoch, dass es extrem schwierig sein könne, Experimente einer fremden Arbeitsgruppe, die geübt darin sei, im eigenen Labor nachzuvollziehen. »Allein auf Grund meiner fehlgeschlagenen Versuche, die Ergebnisse zu replizieren, möchte ich daher kein Urteil über die Arbeit fällen.«

Jacob Hanna, Stammzellbiologe am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel) findet: »Wir sollten uns alle davor hüten, über neue Befunde vorschnell den Stab zu brechen.« Dennoch sei er »extrem beunruhigt und skeptisch«. Er werde aber kein endgültiges Verdikt aussprechen, bevor er die Sache nicht noch mindestens zwei Monate lang probiert habe.

Womöglich ist das Prozedere nur besonders kompliziert und fehleranfällig. Selbst Wakayama hatte anfangs Probleme mit der Reproduktion der Ergebnisse. Er und ein Mitarbeiter waren aber noch vor der Veröffentlichung erfolgreich, nachdem Obokata sie persönlich eingewiesen hatte. Seit seinem Wechsel an die Universität Yamanashi ist es ihm dagegen wieder nicht mehr gelungen. »Auf den ersten Blick sieht das ganz leicht aus – einfach Säure zugeben –, aber das ist es eben nicht«, so der Forscher.

Für Wakayama ist die erfolgreiche Replikation durch ihn selbst ausreichend Grund für die Überzeugung, dass die Methode funktioniert. Außerdem handle es sich bei den von Obokata produzierten Zellen um die einzigen, die – abgesehen von frisch befruchteten Eizellen – Plazentagewebe bilden können. Das schließe aus, dass anders erzeugte Stammzellen untergeschoben wurden.

Viele Forscher haben bei einem oder mehreren der Autoren weitere Einzelheiten über das experimentelle Vorgehen angefragt, jedoch keine Antwort erhalten. Hongkui Deng, Stammzellbiologe der Peking-Universität, erfuhr stattdessen, dass »die Autoren planen, in Kürze ein detaillierteres Methodenprotokoll zu publizieren«. Vacanti lässt mitteilen, er hätte nichts dagegen, die Experimente zu wiederholen, und ergänzt, er werde Obokata bitten, das genaue Versuchsprotokoll beizusteuern, damit »jede Abweichung vermieden wird, die Anlass zu Verwirrung geben könnte«. Obokata selbst hat sich gegenüber »Nature« bislang nicht geäußert.

Das Riken-Institut will wegen der behaupteten Unregelmäßigkeiten in den beiden Nature-Veröffentlichungen Nachforschungen anstellen. Auch »Nature« hat nach Aussage eines Sprechers eine Untersuchung des Falls eingeleitet.

David Cyranoski ist »Nature«-Korrespondent.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 10.1038/nature.2014.14738, 17. Februar 2014

wachsen, der allerdings aus unbekannt-Gründen irgendwann aufhörte, sich weiterzuentwickeln.

Wenn der Versuch geklappt hätte, wäre der erste perfekte Säugetierklon der Welt entstanden. Bisher wurde immer der Kern der Ausgangszelle auf eine entkernte Eizelle übertragen. Dadurch steuert diese jedoch ihre mitochondrielle DNA, die sich außerhalb des Zellkerns befindet, zu dem entstehenden Tier bei. »Klone wie Dolly sind deshalb gar keine 100-prozentigen Kopien«, erklärt Vacanti. »Bei unserem Verfahren brauchen wir dagegen keine Eizelle, und folglich gibt es auch keine zusätzliche externe mitochondrielle DNA.«

Ersatzgewebe für Organe

Obokata betont aber, es gehe dem Team nicht darum, Klone zu produzieren. Vielmehr wolle man herausfinden, wie es gelingt, mit STAP-Zellen nach Wunsch jede Art von Gewebe zu erzeugen. »Wir bringen die Zellen in unterschiedliche

Milieus und prüfen, wozu sie sich entwickeln«, sagt Vacanti. »Wir wollen ihre Differenzierung in einzelne Gewebetypen ganz genau steuern können.«

Nach vorläufigen Befunden scheint die Aufgabe gar nicht so schwer zu sein, weil sich die STAP-Zellen offenbar an das umgebende Gewebe anpassen. »Wie es aussieht, brauchen wir eine STAP-Zelle nur in einen Muskel zu bringen und sie entwickelt sich zur Muskelzelle«, berichtet Vacanti.

Das Ziel besteht deshalb auch nicht darin, komplette Organe zu züchten und sie dann einzusetzen. Vielmehr möchte man das erkrankte Gewebe mit gesunden Zellen beimpfen. Bei vielen Organen wie Leber oder Niere genügt rund ein Fünftel der normalen Zellmasse zum Überleben. Warum sich also die Mühe machen, ein komplexes Organ wie die Leber vollständig nachzubauen, wenn das wiederholte Einspritzen von gesunden Zellen auch hilft? So ließe sich die Funktion allmählich verbes-

sern, bis das Organ seine Aufgabe wieder zufrieden stellend erfüllt.

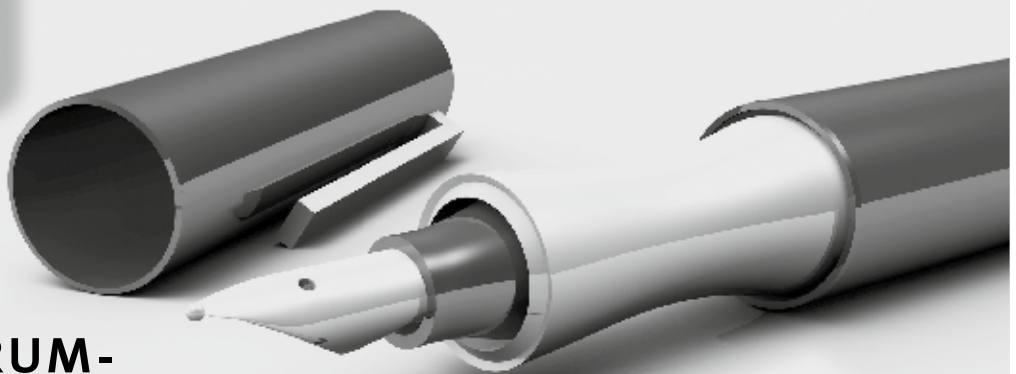
Dabei ist keinerlei Abstoßungsreaktion zu befürchten; denn die Reparaturzellen stammen ja vom Kranken selbst. »Weil das Verfahren so unglaublich einfach ist«, meint denn auch Chris Mason, Fortpflanzungsmediziner am University College London, »ließen sich mit minimalem Aufwand und zu geringen Kosten personalisierte Stammzelllinien erstellen. Und das ginge viel schneller als mit iPS-Zellen.« Ähnlich positiv äußert sich Lanza, warnt aber zugleich: »Das Missbrauchsrisiko ist viel größer. Es wird interessant sein, zu sehen, wohin das Ganze führt. Aber wenn das Verfahren beim Menschen funktionieren sollte, würde es völlig neue Perspektiven eröffnen.«

Helen Thomson ist Redakteurin bei der Zeitschrift »New Scientist«.

© New Scientist

www.newscientist.com

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG



DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT

Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg

Abonnenten unserer Magazine erhalten einen Rabatt auf die Teilnahmegebühr!

Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen.



GLAZIOLOGIE

Grönlands Eispanzer schmilzt auch von unten ab

In Zentralgrönland entdeckten Forscher Regionen, wo die kontinentale Kruste ungewöhnlich dünn und der Wärmefluss aus dem Erdmantel entsprechend hoch ist. Dort schmilzt der Eispanzer an der Unterseite – ein Effekt, den Klimaforscher bislang kaum berücksichtigt haben.

VON RÜDIGER SCHACHT

Jeder kennt sie: die Bilder des ewigen Eises, das den antarktischen Kontinent und auch Grönland, die größte Insel der Welt, bedeckt. Doch wie lange wird es die mächtigen Eiskappen noch geben? Dass ihre Stabilität von der globalen Erwärmung bedroht wird, ist längst gesichert, denn die Wechselwirkung zwischen der Oberfläche der Eiskörper und der Atmosphäre wurde vielfach untersucht. Trotzdem sind wichtige Fragen unbeantwortet geblieben. Gerade die Bewegungen des Körpers und seiner einzelnen Teile sowie das Abschmelzen

von Eis innerhalb und unterhalb der Kappen verstehen die Forscher bislang noch nicht besonders gut.

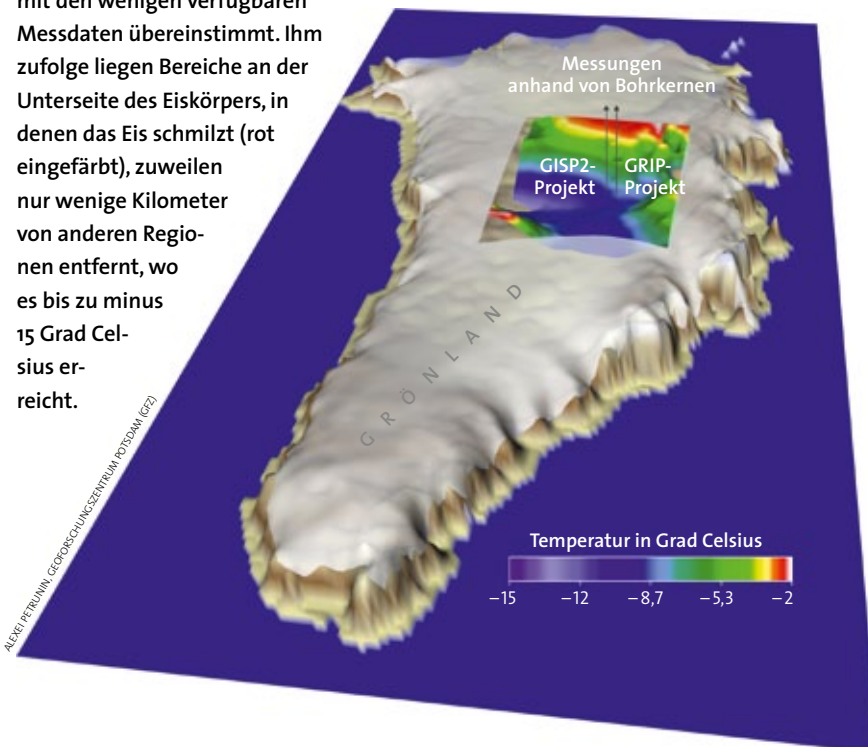
Der Massenverlust der Eisschilde lässt sich durch gravimetrische Messungen mit Satelliten wie GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) untersuchen, einem deutsch-amerikanischen Projekt unter Beteiligung des Geoforschungszentrums Potsdam (GFZ). Aus Veränderungen des Schwerfelds der Erde leiten die Wissenschaftler ab, dass der Antarktis und Grönland zusammen genommen derzeit rund 300

Milliarden Tonnen Eis pro Jahr verloren gehen. Tiefbohrungen, die Auskunft über die innere Struktur der Eispanzer und seine Interaktionen mit dem Untergrund geben können, gibt es indessen nur wenige.

Nun aber gelang es Wissenschaftlern des GFZ, mit vergleichsweise hoher Detailgenauigkeit die Wärmeflüsse an der Basis der Eiskörper zu modellieren. Die Studie zeigt, dass sie stark von Prozessen beeinflusst werden, deren Ursprung weit unterhalb des auf der Lithosphärenplatte aufliegenden Eispanzers liegt. Infolge der ungewöhnlich dünnen Lithosphäre (lithos: griechisch für Stein) unterhalb von Zentralgrönland dringt aus dem Erdmantel nämlich offenbar mehr Wärme als gedacht nach oben und lässt in einigen Regionen die Basis des mächtigen Grönländischen Eisschildes auftauen (*Nature Geoscience* 6, S. 746–750, 2013).

Wie viel Wärme durch die irdische Lithosphäre fließt, also durch diejenige Schicht, welche die Erdkruste sowie die äußeren Bereiche des Mantels umfasst, hängt von den jeweiligen geologischen Umständen ab. In vulkanisch aktiven Regionen wie etwa Island und oberhalb dünner Lithosphärenbereiche im Umfeld tektonischer Grabenbrüche – wie dem Ostafrikanischen Grabensystem und dem Rheintalgraben – erreicht der Wärmefluss höhere Werte, während er in tektonisch und magmatisch ruhigen Bereichen klein ist. Auch die so genannten Kratone – Stücke kontinentaler Kruste, die bereits in der Frühzeit der Erde entstanden und in der Regel über eine bis zu

Weil die Lithosphäre unter Zentralgrönland so dünn ist, dringt mehr Wärme als gedacht aus dem Erdmantel in die Basis des Eispanzers. Dies belegt ein neues Modell, das gut mit den wenigen verfügbaren Messdaten übereinstimmt. Ihm zufolge liegen Bereiche an der Unterseite des Eiskörpers, in denen das Eis schmilzt (rot eingefärbt), zuweilen nur wenige Kilometer von anderen Regionen entfernt, wo es bis zu minus 15 Grad Celsius erreicht.





ISTOCKPHOTO / DAN BACH-KREISTENSEN

200 Kilometer mächtige Lithosphäre verfügen – gelten eher als kalt. Zu ihnen zählen aber auch große Bereiche des grönländischen Untergrunds, so dass die Ergebnisse der Potsdamer umso mehr verwundern.

Zur Messung von Wärmefläßen senkt man üblicherweise Temperatursensoren in Bohrlöcher ab. Liegt die Lithosphäre unterhalb einer Eiskappe, sind Bohrungen allerdings aufwändig und teuer. Die Potsdamer suchten darum einen anderen Weg. Aufbauend auf indirekten geophysikalischen Messungen entwickelten sie ein Modell für die Wärmeflüsse und koppelten es mit bereits existierenden Modellierungen der Eiskörper, in welche Temperaturmessungen, das Fließverhalten großer Eisströme und Daten von Bohrkernen des Greenland Icecore Project (GRIP) eingegangen waren.

Aus seismischen Daten ermittelten die Forscher zunächst, dass die Lithosphäre unter Zentralgrönland nur 70 bis 80 Kilometer dick sein kann, während andere Kratone bis zu viermal mächtiger sind. Der Grund dafür liegt 50 bis 70 Millionen Jahre zurück: Damals bewegte sich die Landmasse über einen Bereich des Erdmantels, in dem nach oben fließendes warmes Mantel-

Vor allem der Einfluss von Sonne und Atmosphäre bringt Gletscher zum Schmelzen. Im permanent vergletscherten Zentralgrönland spielt aber auch der Wärmefluss von unten eine Rolle, zumal er angesichts der dünnen Lithosphäre dort ungewöhnlich hoch ist.

material die Lithosphäre von unten her ausdünnte.

Bei ihren Analysen der Satellitendaten nutzten die Forscher darüber hinaus den Effekt, dass magnetische Minerale beim Überschreiten der so genannten Curie-Temperatur ihre Magnetisierung verlieren; in Felsgestein ist dies bei durchschnittlich etwa 580 Grad Celsius der Fall. Ihre Messungen zeigten, dass solch hohe Temperaturen auch noch in geringeren Tiefen herrschen. Durch die dünne Lithosphärenschicht fließt also offenbar viel Wärme nach oben.

Der Wärmefluss von unten bringt den Eiskörper in Bewegung

Normalerweise fällt diese zwar kaum ins Gewicht: »Veränderungen des Wärmeflusses in der Lithosphäre sind für das Geschehen auf der Erdoberfläche in der Regel vernachlässigbar, denn Sonne und Atmosphäre haben viel stärkeren Einfluss«, sagt die GFZ-Geophysikerin Irina Rogozhina. Permanent vergletscherte Regionen bilden aber eine Aus-

nahme: Wo Sonne und Luft nicht hingelangen, spielt der lithosphärische Wärmefluss eine wichtige Rolle für die Temperaturverteilung und die Bewegungen im Eiskörper. Unterstützt vom Druck der auflastenden Eismasse lässt er auch dessen Basis anschmelzen, wodurch sich Eisströme schneller bewegen.

Mit Magnetometerdaten konnten die GFZ-Geophysiker zudem die Temperatur der so genannten Mohorovičić-Diskontinuität, kurz Moho, abschätzen. In der untersuchten Region liegt diese Grenzfläche zwischen Erdkruste und darunter liegendem Erdmantel in der nicht ungewöhnlichen Tiefe von 40 Kilometer, fällt aber mit Temperaturen von bis zu 850 Grad Celsius ungewöhnlich heiß aus. Zum Vergleich: Unter ozeanischer Kruste liegt die Moho typischerweise rund 10 Kilometer tief und erreicht 300 Grad Celsius; unter den Alpen sind es in rund 70 Kilometer Tiefe 600 Grad.

Mit ihrer Arbeit haben die Forscher begonnen, einen Schwachpunkt bishe-

Kommen die Robotermiten?

Beschränkte Automaten bauen komplexe Strukturen.

Die Dinosaurier waren mit ihren gewaltigen Körpern, aber kaum Hirn zwar teils Furcht erregende Raubtiere, aber gewiss dümmer als wir. Folglich setzen wir hohe Intelligenz in der Regel mit einem großen Gehirn gleich. Darum werden uns weit überlegene Außerirdische in der klassischen Sciencefiction gern als schwächere Wesen mit riesigen Köpfen vorgestellt. Und der superintelligente Computer HAL 9000 aus Stanley Kubricks Film »2001: Odyssee im Weltraum« füllt eine große Raumschiffabteilung mit seinen elektronischen Schaltkreisen und Speichermedien.

Das Gegenmodell zum zentralisierten Superhirn bietet die verteilte Intelligenz des Insektenstaats, den Ameisenforscher wie Bert Hölldobler und Edward O. Wilson als »Superorganismus« charakterisieren. Da entsteht aus dem Zusammenwirken vieler kleiner Akteure, denen jeweils nur ein eng begrenztes Repertoire an vorprogrammierten Reaktionen zur Verfügung steht – übrigens nicht unähnlich den Nervenzellen des Gehirns –, ein komplexes Verhalten, das den Horizont jedes Einzelinsekts bei Weitem übersteigt.

Zum Beispiel errichten tausende winzige Termiten meterhohe klimatisierte Gebäude, ohne dass irgendwo so etwas wie ein Architekt zu erkennen wäre. Seine Rolle übernimmt die Selektionskraft der Evolution, die demjenigen Termitenvolk, das durch eine Laune der Natur auf wohllicheres Bauen programmiert ist, einen Überlebensvorteil gewährt. Bei solchen im Kollektiv schlauen Insekten ist nun ein Team von Ingenieuren in die Lehre gegangen, um einer Schar von relativ simplen Automaten das Errichten komplexer Bauwerke beizubringen (*Science* 343, S. 754–758, 2014).

Justin Werfel und seine Kollegen von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) stellten sich die Aufgabe, eine vorgegebene Struktur – etwa eine Pyramide, eine burgartige Einfriedung oder einen quadratischen Turm – in Verhaltensregeln für einfache Roboterwägelchen zu übersetzen, die einzelne Ziegel aufnehmen und scheinbar zufällig wieder so absetzen, dass daraus allmählich das gewünschte Gebäude entsteht. Die künstlichen Termiten orientieren sich wie ihre natürlichen Vorbilder nur an der unmittelbaren Umgebung, und dennoch geht aus ihrer Tätigkeit das von den Programmierern beabsichtigte große Ganze hervor.

Worfels Roboter-Insekten arbeiten allerdings noch extrem langsam, und jede halbe Stunde müssen ihre Batterien aufgeladen werden. Zudem vermögen die kleinen Baumeister nur recht einfache Strukturen zu errichten. Bei komplizierten Objekten geraten sie rasch in ausweglose Situationen: Sie bleiben in geschlossenen Kreisläufen stecken oder geraten in eine Sackgasse, aus der sie nicht mehr herauskommen.

Dennoch könnten die künstlichen Termiten den Weg zur vollautomatischen Produktion x-beliebiger Objekte bahnen. Noch sind 3-D-Drucker diesbezüglich der letzte Schrei; sie bauen den vorprogrammierten Gegenstand Schicht für Schicht auf – etwa aus einer an der Luft erstarrenden Flüssigkeit. Doch diese Substanz, ein spezieller Kunststoff, schränkt ihren Anwendungsbereich enorm ein. Viel reizvoller finde ich da die Vorstellung, wie Scharen flinker Roboter aus beliebigem Material kleine Elemente zusammenfügen, die am Ende wie die Pixel eines Bilds das fertig konstruierte Objekt ergeben. Vielleicht kommt die Massenproduktion der Robotermiten sogar eines Tages so billig, dass diese nicht mehr mühsam umherfahren müssen, um Ziegel abzuladen und neue zu holen, sondern selbst als Bausteine dienen. Durch Selbstorganisation würden sich die wimmelnden Automaten dann von allein zum gewünschten Bauwerk zusammensetzen – ganz so, wie das etwa auch die Zellen eines Embryos tun, wenn sie ein Organ bilden.



Michael Springer

riger Untersuchungen auszuräumen: »Modellrechnungen zur Dynamik des grönländischen Eispanzers vernachlässigen meist den Effekt der Lithosphäre«, sagt Rogozhina. Dank der GFZ-Studie ist dieser nun vergleichsweise genau bekannt. Während er in anderen kratonischen Gebieten durchschnittlich 37 bis 50 Milliwatt pro Quadratmeter beträgt, liegt der Wert hier bei 60 bis 70 Milliwatt pro Quadratmeter. Allein die Anomalie der Lithosphäre hat am Wärmefluss in die Basis des Eiskörpers einen Anteil von 15 bis 30 Milliwatt pro Quadratmeter. Wärmeflüsse, die sich aus der Entstehungsgeschichte des Grönländischen Eisschildes über geologische Zeiträume hinweg erklären lassen, konnten die Forscher ebenfalls quantifizieren; auch sie belaufen sich einige zehn Milliwatt pro Quadratmeter.

Verhindern, dass die Daten schmelzen

Während bisherige Modelle oft stark von den verfügbaren Messwerten abweichen, stimmt die von den Potsdamern modellierte Verteilung geothermaler Wärmeflüsse gut mit Daten der Projekte GRIP und GISP2 (Greenland Ice Sheet Project 2), mit Radar-»Durchleuchtungen« des Eises sowie mit Beobachtungen fließender Eisströme überein. Auch die Detailgenauigkeit des Modells ist hoch: Nur wenige Kilometer neben Eis mit Basaltemperaturen von rund minus 15 Grad Celsius befinden sich demnach Bereiche des zentralen Grönländischen Eisschildes, an denen sich bei Temperaturen von mehr als etwa minus 2,4 Grad Celsius Schmelzwasser bildet.

Die GFZ-Forscher schlagen darum vor, dass man ihre Ergebnisse zur Planung neuer Tiefbohrkampagnen verwendet. Die Auswahl geeigneter Orte ist bislang nämlich die Achillesferse solcher Vorhaben: Beim North Greenland Ice Core Project (NGRIP) beispielsweise erwies sich der untere Teil des Eiskerns unerwartet als geschmolzen, womit ein wichtiger Teil der erhofften Klimadaten verloren war.

Rüdiger Schacht ist promovierter Meeresgeologe und Wissenschaftsjournalist in Lüneburg.

DIGITAL AM
SONNTAG
—
MONTAG
AM KIOSK

POLITIK

Auf den Punkt statt drumherum.



Erfahren Sie, was wirklich wichtig ist. FOCUS analysiert politische Entwicklungen und Entscheidungen und setzt sie in Bezug zum aktuellen Geschehen. Klar. Verständlich. Präzise. Damit Sie jede Woche die Hintergründe kennen, um mitreden zu können.

Jetzt per QR-Code zum digitalen Angebot von FOCUS.

Erleben Sie das FOCUS Magazin multimedial mit Augmented Reality.

Das Entscheidende im

FOCUS

Evolution im Zeitraffer

Bei manchen Buntbarschen entstehen in Rekordgeschwindigkeit neue Arten. Forscher untersuchen die Bedingungen dafür – und die beteiligten genetischen Mechanismen.

Von Roland Knauer

Die beiden Zitronenbuntbarsche finden offensichtlich Gefallen aneinander. Nichts Ungewöhnliches, sollte man meinen, dass sich ein Männchen und ein Weibchen derselben Art füreinander interessieren. Außerdem sind die in Mittelamerika verbreiteten und bei Aquarianern beliebten Zitronenbuntbarsche für ihren Hang zum Familienleben bekannt: Bei ihnen kümmert sich ein Paar gemeinsam um seine Brut. Auch diese beiden im Xiloá-Kratersee Nicaraguas, Vertreter der Art *Amphilophus xiloensis*, haben schon Nachwuchs, den sie nun sorgsam hüten (siehe Bild rechts).

Doch eigentlich geben sich Zitronenbuntbarsche bei der Wahl eines Partners heikel – und zwar was dessen Färbung betrifft. Ihre verschiedenen Spezies werden heute in den so genannten *Amphilophus-citrinellus*-Artenkomplex gestellt. Bei vielen davon tragen die meisten der Artgenossen dunkle Streifen und Flecken auf einem helleren Grund: Sie wirken eher unscheinbar grau-schwarz. Bei einer Reihe dieser Arten verliert allerdings etwa jedes 20. Tier in später Jugend seine schwarzen Pigmente und bekommt dann ein gelbliches bis rötlich goldenes Kleid. Und gemäß dem Motto »Gleich und

Gleich gesellt sich gern« gründen dann fast nur Fische von ähnlichem Äußeren eine Familie. Die beiden Buntbarsche im Xiloá-Kratersee bilden da eine Ausnahme.

Der Evolutionsbiologe Axel Meyer von der Universität Konstanz beobachtete diese Vorliebe schon als Doktorand an der University of California in Berkeley bei den Fischen in ihrer Heimat. Seitdem lässt ihn der Gedanke nicht mehr los, dass hier vielleicht gerade eine neue Spezies entsteht, bei der alle Erwachsenen goldgelb aussehen werden. Wenn diese These zutrifft – wovon Meyer überzeugt ist –, würden die Forscher hier sozusagen der Evolution direkt, »live«, bei der Artbildung zusehen. Es ist offensichtlich, dass bei diesem Artenkomplex zwei Kräfte eine Rolle spielen: die »natürliche« und die »sexuelle« Selektion. Bei einigen der Arten unterscheiden sich die Fische nicht in der Färbung – alle Tiere bleiben gestreift –, jedoch in den Körperproportionen und Zähnen. An solchen Unterschieden kann die natürliche Auslese angreifen. Treten jedoch zwei Farbmorphen auf, zusammen mit selektiver Partnerwahl, wirkt sexuelle Auslese.

Die Idee, dass in den Kraterseen Nicaraguas gerade neue Arten entstehen, ist nicht völlig überraschend. Schließlich haben die Buntbarsche – Cichliden – in lateinamerikanischen und afrikanischen Seen in den letzten Jahrtausenden und sogar Jahrhunderten häufig neue Lebensräume erobert und dabei eine große Anzahl neuer Spezies hervorgebracht. Diese Fische können sich in Körperbau und Verhalten sehr schnell an neue Umweltbedingungen anpassen. So zeigte Meyers Team, dass in Nicaragua zumindest in zwei kleinen, 2000 Jahre alten Kraterseen Arten leben, die nur jeweils in einem See vorkommen. Auch von Afrika ist bekannt, ebenfalls von Studien aus Meyers Labor, dass Buntbarsche extrem schnell neue Arten bilden können – wobei sich die Evolution in den verschiedenen Seen Ostafrikas in auffälliger Weise wiederholt (siehe dazu auch SdW 6/1999, S. 36).

Buntbarsche sind ein evolutionäres Erfolgsmodell. Unter allen Wirbeltieren stellen sie mit rund 3000 Spezies die vielleicht größte zoologische Familie dar. Gut die Hälfte der

AUF EINEN BLICK

DER ARTBILDUNG ZUSEHEN

- 1 Neue **Evolutionslinien** und **Arten** entstehen auf verschiedene Weise: oft nach **geografischer Trennung von Populationen**, aber auch davon unabhängig durch neue **Anpassungen**.
- 2 Bei vielen **Buntbarschen** – Cichliden – erfolgt die Evolution neuer Arten in rasantem Tempo. Auch heutzutage scheint ihre Artenzahl beständig zu wachsen.
- 3 Diese Buntbarsche benötigen für den Artenzuwachs mitunter nicht einmal geografische Barrieren. Vielmehr reagieren sie teils stark und sehr flexibel auf **Umweltgegebenheiten**. Oder es entwickeln sich am selben Ort **Verhaltensunterschiede** zwischen einzelnen Gruppen, die dann Veränderungen im Körperbau nach sich ziehen.

Wirbeltierarten sind Fische, und von denen gehören allein etwa acht Prozent zu den Cichliden. Alle Säugetiere zusammen bringen es dagegen auf nicht einmal 6000 Spezies. Als deren artenreichste Familie gelten mit rund 750 Arten die Muriden, die »Langschwanzmäuse« der Alten Welt, zu denen etwa Hausmaus oder Wanderratte zählen.

Für Evolutionsstudien sind Buntbarsche auch wegen ihrer schnellen Generationenfolge recht gut geeignet. Viele von ihnen können sich schon im Alter von wenigen Monaten fortpflanzen. Zitronenbuntbarsche etwa bringen mindestens jedes Jahr eine neue Generation hervor. Deshalb lieferte das Vierteljahrhundert Buntbarschforschung, auf das Meyer zurückblicken kann, ihm tiefe Einblicke in aktuelle Evolutionsprozesse.

Zu den spannendsten – und lange strittigen – Fragen rund um die Entstehung von Arten gehört das alte Rätsel, unter

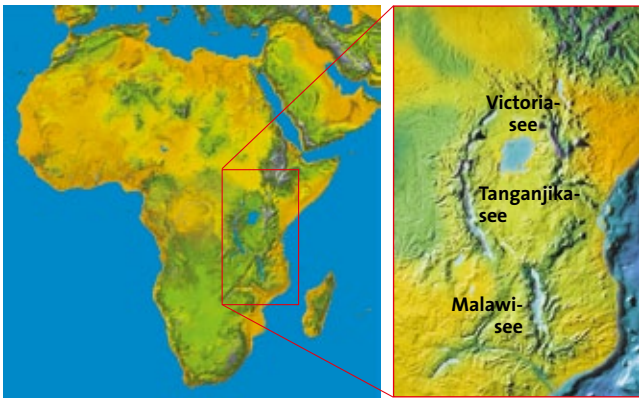
welchen geografischen Bedingungen sich neue Spezies überhaupt bilden. In vielen Fällen geschah das offensichtlich dann, wenn Populationen räumlich voneinander isoliert wurden und so keine Gene mehr ausgetauscht werden konnten. Nach neueren Erkenntnissen, gerade auch von den Buntbarschen der Kraterseen Nicaraguas, ist eine geografische Trennung dafür aber keineswegs immer notwendig.

Seit einigen Jahrzehnten betrachten Biologen den Victoriasee in Ostafrika als einen besonders aufschlussreichen Ort, um Gesetzmäßigkeiten bei der Auffächerung und Neubildung von Arten zu untersuchen (siehe Karte S. 26). Mit 68800 Quadratkilometern – etwa die Fläche Bayerns – ist dies der zweitgrößte Süßwassersee der Erde (nach dem Oberen See in Nordamerika). Allerdings ist der Victoriasee nicht sehr tief. Im Durchschnitt beträgt die Wassertiefe heute etwa 40, maximal gerade einmal 84 Meter.

MIT FRDL. GEN. VON AD KONINGS, WWW.CICHLIDPRESS.COM



Dieses Foto zeigt ein Paar von Zitronenbuntbarschen der Art *Amphilophus xiloensis* im Xiloá-Kratersee in Nicaragua. Normalerweise verpaaren sich diese Fische nur mit gleich gefärbten Artgenossen. Doch hier haben ein dunkel gestreiftes Männchen und ein goldfarbenedes Weibchen zusammengefunden und hüten ihre Brut nun gemeinsam.



KARTEN: NASA, IRI; ANIMAN: BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT; MICH; AXEL MEYER; RECHTS: MIT FRED. GEN. VON AD. KONINGS, WWW.CICHLIDPRESS.COM

In den großen Seen Ostafrikas leben viele hundert Buntbarscharten. Die meisten sind Maulbrüter, und die Weibchen übernehmen die Brutpflege: rechts ein Weibchen der Art *Nimbochromis livingstonii* im Malawisee.

Klimaänderungen in früheren Zeiten hatten deswegen für seine Bewohner manchmal dramatische Folgen. Kaltzeiten auf der Erde bedeuten weniger Feuchtigkeit in der Luft und dadurch weniger Niederschlag. Diese Phasen bekam auch der Victoriasee zu spüren. Insgesamt dreimal scheint er in geologisch jüngerer Vergangenheit praktisch trockengefallen zu sein, und zurück blieben wohl nur Schlammflächen und höchstens ein paar wesentlich kleinere Seen, deren hohen Salzgehalt Süßwasserfische nicht aushielten. Das letzte Mal dürfte sich solch eine Katastrophe vor rund 17300 Jahren ereignet haben.

Geschwindigkeitsrekorde

Erst vor 14700 Jahren füllte sich der Victoriasee langsam wieder. Die Vorfahren seiner heute rund 500 Buntbarscharten dürften sich demnach frühestens damals dort neu angesiedelt haben. Anscheinend schafften das überhaupt nur ein oder zwei Arten. Denn wie Meyer und seine Kollegen schon in den 1990er Jahren mit Erbgutanalysen nachwiesen, stammen alle heutigen Cichliden des Sees offenbar von derselben Linie aus jener Zeit ab. Grob gerechnet wäre seitdem durchschnittlich etwa alle 30 Jahre eine neue Art hinzugekommen. »Das ist Evolution im Zeitraffer«, kommentiert Axel Meyer.

Eine so rasante Artentstehung scheint allerdings selbst bei Cichliden etwas Besonderes darzustellen, denn generell gilt sie für die Buntbarsche der großen ostafrikanischen Seen nicht. Beispielsweise scheinen sich die Fische im Tanganjikasee deutlich mehr Zeit zu nehmen. Dieser bis zu 1470 Meter tiefe See ist bereits zehn Millionen Jahre alt und wohl kaum jemals trockengefallen. Trotz seines hohen Alters leben in ihm »nur« 250 Cichlidenarten, halb so viele wie im sehr viel jüngeren Victoriasee. Man sollte meinen, dass ein 673 Kilometer langes und bis zu 72 Kilometer breites Gewässer reichlich Platz und diverse Habitate für verschiedenste Arten bereithalten würde.

Wieder anders, ebenfalls verblüffend, stellt sich der Malawisee dar. Mit rund 570 Kilometer Länge, 75 Kilometer Breite und bis zu 706 Meter Tiefe steht er zwischen dem Vik-

toria- und dem Tanganjikasee, ebenso mit seinem Alter von unter vier Millionen Jahren. Dabei beherbergt er deutlich mehr Cichlidenpezies als der Victoriasee – nach derzeitigen Schätzungen zwischen 800 und 1000.

Die Geschichte der Besiedlung dieser drei riesigen Seen durch Buntbarsche konnten Meyer und seine Mitarbeiter molekulargenetisch zurückverfolgen. Denn das Alter einer Linie spiegelt sich darin, wie viele Mutationen sich im Erbgut angehäuft haben. Tatsächlich findet sich für den Tanganjikasee, passend zu seinem Alter, unter seinen Buntbarscharten die größte genetische Variation und für den Victoriasee die deutlich geringste. Entsprechend weit liegt die Besiedlung des Tanganjikasees nachweislich zurück. Die Erbgutvergleiche lassen zudem erkennen, dass seine Cichliden von Flussbuntbarschen aus dem Kongobecken in Westafrika abstammen, wo die ältesten Buntbarsche des afrikanischen Kontinents leben. Vom Tanganjikasee aus gelangten Buntbarsche über temporäre Flussverbindungen in den Malawisee, später erreichten sie auf ähnliche Weise auch den Victoriasee.

Wie sich die unterschiedlichen Artenzahlen in diesen Seen erklären, weiß man noch nicht. Eine Idee ist, dass die Anzahl der Spezies nach einer expansiven Phase nachträglich wieder zurückgeht, etwa auf Grund von ökologischer Konkurrenz, während nun die morphologischen Unterschiede größer werden. Die Cichliden des Tanganjikasees lassen sich wesentlich leichter voneinander unterscheiden als die Arten im Victoria- oder die im Malawisee.

Die zahlreichen Cichlidenarten in den afrikanischen Seen erklären Biologen unter anderem damit, dass diese Fische besondere anatomische Voraussetzungen etwa für die Kieferbildung und Bezahnung mitbrachten. Damit konnten sie sich leichter auf neue, spezialisierte Lebensweisen umstellen als Angehörige anderer Fischfamilien. Es ist auffällig, dass nur die Buntbarsche dermaßen viele Arten hervorgebracht haben, obwohl in diesen Seen auch andere Fische leben. Zugleich bietet die dortige Vielfalt an Lebensräumen ihnen offenbar gute Voraussetzungen für ein Aufspalten in neue Arten. In den Seen gibt es wesentlich mehr Cichlidenpezies

als in den Flüssen. Felsige und sandige Bereiche, steile und ebene Abschnitte, tiefe und flache Zonen, Felsküsten und Ufer mit Stränden wechseln einander vielfältig ab. Oft wirkt der eigene Lebensraum für die Bewohner wie eine Insel, die sie nicht verlassen. Ein völlig anders gestaltetes angrenzendes Habitat kann dann eine Verbreitungsbarriere darstellen. Dadurch entstanden lokal immer wieder neue und andere Arten mit speziellen Lebensgewohnheiten. Außerdem aber bildeten sich in einander ähnlichen, jedoch räumlich getrennten Habitaten erstaunlich oft Fische mit gleichen Anpassungen heraus – auch das für die Forscher ein aufschlussreiches Phänomen.

Die erste Buntbarschart, die im Victoriasee nach dem letzten Austrocknen auftauchte, gehörte zu den Haplochrominen, einer besonders erfolgreichen Linie von Cichliden, zu der auch fast alle Arten des Malawisees zählen. Allein von ihnen gibt es über 1800 Arten. Sie alle sind »Maulbrüter«. Und zwar hüten bei ihnen die Mütter die Brut. Ein Weibchen legt seine noch unbefruchteten Eier im Territorium eines balzenden Männchens – nur um sie gleich darauf ins Maul zu nehmen, somit in sichere Obhut. Der Revierinhaber aber präsentiert jetzt unverzüglich seine verlockende Afterflosse, auf der kleine, runde, schwarz umrandete orange Flecken prangen. Diese leuchtenden »Eiflecken« entstehen testosterongesteuert durch Ausschalten bestimmter Pigmentgene, wie Meyer und sein früherer Mitarbeiter Walter Salzburger, der heute an der Universität Basel forscht, herausfanden. Optisch ähneln sie verblüffend den wirklichen Eiern, und das Weibchen scheint sie tatsächlich dafür zu halten, denn es schnappt danach, als wollte es schnell die »vergessenen« Eier aufsaugen, und stößt dabei gegen die Eiattrappen. In diesem Moment gibt das Männchen Samen ab, den das Weibchen aufsaugt. So

werden die Eier im Maul der Mutter befruchtet und können sich dort relativ geschützt entwickeln, denn unter den Buntbarschen gibt es auch spezielle Eierdiebe.

Die Mundhöhle der Mutter ist noch für die Jungfische in einem Gewässer voller Fressfeinde ein ziemlich sicherer Ort. Nach dem Schlüpfen dürfen sie zwar schon bald ins Wasser hinaus – aber immer, wenn die Mutter eine Gefahr spürt, beordert sie ihren Nachwuchs mit einer bestimmten Körperbewegung wieder ins Maul zurück. Es gibt allerdings auch Kinderfresserbuntbarsche, so genannte pädophage Arten, die es auf diesen nahrhaften Mundinhalt abgesehen haben. Manche saugen am Maul des Mutterfisches und versuchen so, Eier oder Jungfische herauszuholen. Andere rammen den Kopf der Mutter von unten, quasi um sie zu zwingen, ihre Brut auszuspuken.

Vorteile eine schiefen Mauls

In den afrikanischen Seen gibt es noch weitere verblüffende Ernährungsweisen. Manche Buntbarsche »grasen« zum Beispiel Schuppen ab: Sie nähern sich dem Opfer möglichst unbemerkt von hinten an, um dann von dessen Flanke rasch einige Schuppen abzuraspeln. In allen drei genannten Seen gibt es hierauf spezialisierte Arten – allein im Tanganjikasee sechs. Der Clou dabei: Einige dieser Fische haben einen leicht schiefen Kopf, denn mit einem etwas seitlich stehenden Maul lassen sich Schuppen leichter und rascher klauen. Bei etwa der Hälfte der Artgenossen ist der Mund etwas nach rechts verschoben, bei der anderen Hälfte nach links. Die gleiche Verteilung könnte eine Anpassung sein, die verhindert, dass angegriffene Fische auf eine Seite besonders Acht geben. Da die Schuppenfresserarten der verschiedenen Seen nicht auseinander hervorgegangen sein können, muss diese spezialisierte Lebensweise mehrmals unabhängig entstanden sein. Solche Schuppddiebe wirken jedoch im Vergleich zu einem Cichliden des Malawisees noch recht harmlos: Er lebt unter anderem davon, anderen Fischen die Augen auszupicken.

In den ostafrikanischen Seen untersuchen Biologen, wie sich die Buntbarsche das große Angebot an Lebensräumen durch vielfältige Anpassungen zu Nutze gemacht haben und sich an vielen Stellen sogar das gleiche Habitat ökologisch mit mehreren Spezies teilen. Da gibt es etwa Spezialisten für Sand- und andere für Felsküsten. Manche Arten bevorzugen tiefe Zonen, andere flaches Wasser. In den felsigen Bereichen weiden bestimmte Buntbarsche Algen ab, andere klaben mit langen Zähnen Insektenlarven aus Spalten. Ein Felsenriff kommt für seine Bewohner oft einer Insel gleich, weil eine breite Sandfläche es vom nächsten Riff trennt. Beim Versuch, diese Strecke zu überqueren, würden ans Leben im Riff angepasste Buntbarsche leicht Opfer von Raubfischen. Daher verlassen solche Spezialisten ihr Gebiet normalerweise nicht. Weil somit jede »Insel« ihre eigene – lokale – Evolution erlaubt, konnten in diesen Seen die riesigen Artenzahlen aufkommen. Im Vergleich hiermit bringen es die Fische der Süßgewässer und Meere Europas nur auf insgesamt etwas über 200 Spezies.



MIT FROL GEN VON HENRIK KUSCHE

Der Evolutionsforscher Axel Meyer inspiziert Buntbarsche, die er gerade im Tanganjikasee gefangen hat.



In Nicaragua haben sich in einer Reihe von Vulkankratern Seen gebildet; nur einige sind in der Karte aufgeführt. Darin entwickelten sich isolierte Fischpopulationen. Besonders die Buntbarsche – die erst durch Wirbelstürme dorthin gelangten – bieten Evolutionsforschern Einblicke in Prozesse der Artbildung.

Biologen bezeichnen es als »allopatrische Artbildung«, wenn sich Populationen derselben Spezies in voneinander getrennten Gebieten eigenständig weiterentwickeln und schließlich genetisch nicht mehr zusammenpassen. In Ostafrika betrifft dies nicht nur ähnliche Lebensräume im selben See, sondern natürlich genauso die verschiedenen Seen. Zwischen ihnen liegen weite Distanzen, und es dürfte höchst selten vorkommen, dass Fische von einem in einen anderen gelangen. So entstanden im Malawi- und im Victoriasee jeweils eigene Kinderfresser oder Schuppendiebe. Aber auch für die Kraterseen Nicaraguas, also auf einer viel kleineren geografischen Dimension, zeigte Meyer, dass in den einzelnen Seen ähnliche Arten unabhängig voneinander entstanden. Sein Team sucht nun nach der genetischen Basis solcher »parallelen« Evolution. Es möchte herausfinden, ob ähnliche Anpassungen auf den gleichen Mutationen beruhen oder auf verschiedenen genetischen Mechanismen.

Schwerer als eine allopatrische Artbildung lässt sich erklären, weshalb zum Beispiel im selben Felsenriff, also ohne eine räumliche Trennung, unterschiedlich spezialisierte Arten nebeneinander entstehen konnten, die sehr nah miteinander verwandt sind. Wieso und auf welche Weise entwickeln sich neue Linien ohne äußeren Zwang? Diesen Vorgang bezeichnen die Forscher als »sympatrische Artbildung«. Studien dazu sind in den riesigen afrikanischen Seen sehr aufwändig, und die Ergebnisse werden bei dort rund 1800 Buntbarscharten bald unübersichtlich. Ohnehin bevorzugen Naturwissenschaftler leichter überschaubare Systeme, um grundlegende Mechanismen und Einflussfaktoren aufzudecken.

Hier kommen die Kraterseen in Mittelamerika den Wünschen der Evolutionsforscher entgegen. Sie stellen sozusagen ein natürliches Experiment dar: Von einer Ausgangspopulation wurden sie mehrfach und unabhängig besiedelt, aber mit ähnlichen evolutionären Ergebnissen. Meyer selbst hat dort schon seit Mitte der 1980er Jahre Studien durchgeführt. Die Kraterseen Nicaraguas liegen in einer Reihe erlo-

schener oder ruhender Vulkane (siehe Karte oben). Weil sie nicht durch Wasserwege verbunden sind, konnten Fische sie nicht von allein erreichen. Dennoch leben darin Cichliden. Wie gelangten sie dorthin? Und wann?

Eine der seltenen Gelegenheiten für solch eine Besiedlung bieten gewaltige tropische Wirbelstürme, die mit großen Wassermengen manchmal Fische mit in die Luft reißen. Im indischen Bundesstaat Kerala etwa fielen 2006 bei so einem Wetterereignis tatsächlich Fische vom Himmel. Nicaragua wird häufig von schweren Hurrikanen heimgesucht, und es kommt vor, dass ein Wirbelsturm aus dem Managua- oder dem Nicaraguasee Fische in die Luft saugt. Auch in diesen beiden 1000 und über 8000 Quadratkilometer großen Seen leben Buntbarsche. Im Lauf der Jahrtausende scheinen Wirbelstürme tatsächlich hin und wieder Cichliden und andere Fische in die nahe gelegenen Kraterseen verfrachtet zu haben. Genetische Untersuchungen der Konstanzer Forscher lassen vermuten, dass alle Fische eines Kratersees jeweils etwa zur selben Zeit dorthin gelangten.

Als weitere Transporteure von Buntbarschen kommen große Fische fressende Vögel wie Pelikane, Reiher oder Seeadler in Betracht. Denn mitunter lassen diese ihr Opfer wieder fallen oder spucken es fast unversehrt wieder aus. Für eine bleibende Besiedlung müsste der Zufall allerdings

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



Unser Online-Dossier zum Thema »Evolution« finden Sie unter



www.spektrum.de/thema/evolution/903365

Männchen und Weibchen derselben Buntbarschart in denselben Kratersee befördert haben. Weil die verschiedenen Gelegenheiten sicherlich sehr selten eintraten, wundert es nicht, dass die nah verwandten Buntbarsche eines Kratersees praktisch immer von einer einzigen Ursprungsart aus einem der beiden großen Seen abstammen, wie Meyer und seine Mitarbeiter genetisch nachwiesen.

Neue Chancen in vulkanischen Seen

Früher hielten Biologen und Aquarianer manche Cichliden in den Seen Nicaraguas für eine einzige Art – die durch eine Vielzahl von Erscheinungsformen auffiel. Die einzelnen Formen sahen sie als Varianten des Zitronenbuntbarsches an. Inzwischen stellte sich aber heraus, dass es sich genau genommen um eine so genannte adaptive Radiation nah miteinander verwandter Arten von Zitronenbuntbarschen handelt. In der englischen Fachliteratur heißen diese Fische Midas-Cichliden – nach dem sagenhaften phrygischen König, der alles, was er berührte, in Gold verwandelte.

Die Neuankömmlinge in einem Vulkansee suchten ihre Nahrung vermutlich noch zwischen den Steinen und dem Geröll am Grund. Denn so machen es die Buntbarsche in den großen und alten Ursprungsseen, dem Nicaragua- und dem Managuasee. Diese sind einige hunderttausend Jahre alt, ihr Wasser ist trüb, und die dortigen Cichliden besitzen eine an diesen Lebensraum angepasste eher kompakte Körperform mit hohem Rücken, was in der stark strukturierten Umwelt wendigeres Schwimmen erlaubt. Anders als in diesen großen Seen ist das Wasser in den viel jüngeren Kraterseen normalerweise glasklar.

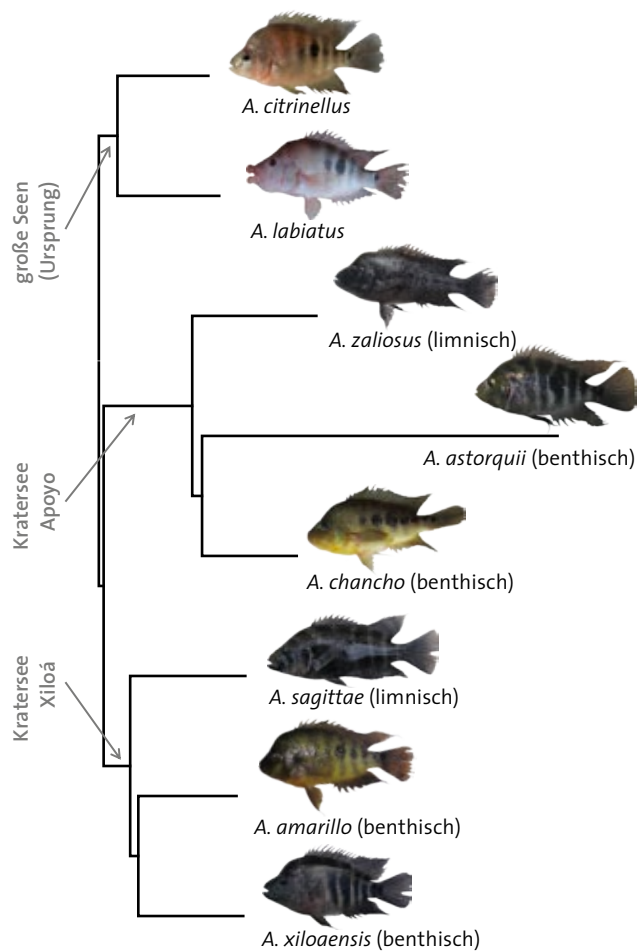
Man kann sich für die Seen in Vulkanen nun folgende Szenerie vorstellen: Wahrscheinlich wagten sich bald einige der neu angekommenen, noch leicht gedrungenen Buntbarsche ins freie Wasser hinaus und begannen da zu jagen. Für pfeilschnelles Schwimmen ist allerdings ein schlanker Körper günstiger. Dort behaupteten sich also solche Fische besser, die etwas stromlinienförmiger gebaut waren. Die »Freischwimmer« begegneten ihren Paarungspartnern wohl eher im offenen Wasser, und wahrscheinlich waren beide bereits etwas schlanker gebaut als Artgenossen, die lieber zwischen den Steinen blieben und ihrerseits gedrungene Partner schätzten. Die Nachkommen der schlankeren Fische erbten die elegantere Körperform, und über Generationen entstand neben der alten Spezies am Seerand eine neue Buntbarschart schneller Jäger im offenen Wasser.

In diesem Beispiel sorgte also nicht eine unüberwindliche physische Grenze für die getrennte Entwicklung. Vielmehr lösten offensichtlich eine im Ursprungssee nicht vorhandene, unbesetzte ökologische Nische das veränderte Verhalten der Fische und die körperlichen Anpassungen das Entstehen einer neuen Art aus: Beide Gruppen kamen nach einiger Zeit einfach nicht mehr miteinander in Berührung, und ihr Erbgut entwickelte sich auseinander.

Axel Meyer und seine Kollegen wiesen eine solche sympatrische Artbildung bei mehreren Buntbarscharten der Kra-

terseen molekularbiologisch nach: Dort bestehen tatsächlich die unsichtbaren Grenzen, an denen sich das Erbgut verschiedener Gruppen auseinanderentwickelt. Solche Barrieren beruhen somit auf dem Verhalten und den Lebensweisen der jeweiligen Gruppen, die sich schließlich zu getrennten Arten entwickeln.

Unter anderem ermittelten die Forscher für Cichliden aus dem Nicaragua- und dem Managuasee sowie aus den beiden Kraterseen Apoyo und Xiloá jeweils die »genetischen Fingerabdrücke«. Darin sehen sie dann zwischen den einzelnen Populationen und Fischformen winzige Abweichungen im Erbmaterial. Die ermittelten Veränderungen zeichnen die Geschichte der Buntbarsche beider Kraterseen nach: Die heute dort schwimmenden *Amphilophus*-Arten stammen jeweils von Grundfischen aus einem der großen Seen ab, gelangten aber unabhängig voneinander und zu verschiedenen Zeiten in den neuen Lebensraum. Die anschließende Evolution verlief nach diesen Analysen in beiden Kraterseen



In Seen Nicaraguas entstanden aus gedrungenen Grundfischen (benthisch) mehrmals ähnliche Buntbarscharten: schlanke Fische des freien Wassers (limnisch) sowie Arten mit vorgestülpten dicken Lippen. Die Darstellung zeigt einen von den Konstanzer Forschern ermittelten genetischen Stammbaum zu mehreren *Amphilophus*-Arten aus zwei Kraterseen und den großen, alten Seen ihrer ursprünglichen Herkunft.

MIT FREDL GEN VON ANDREAS KAUTT UND AXEL MEYER

verblüffend ähnlich, obwohl zwischen ihnen kein genetischer Austausch stattfand. Zuerst entstanden neben der ursprünglichen, am Grund lebenden, kompakten Art jeweils die schlanken Jäger des offenen Wassers. Später spalteten sich in beiden Seen auch die Grundfische selbst nochmals in zwei unterschiedliche Spezies, die zwischen den Steinen andere ökologische Nischen nutzen. Sie knacken Schneckengehäuse mit verschieden stabilen Zähnen.

Das Erbgut der *Amphilophus*-Arten im Xiloásee ist deutlich weniger differenziert als im Apoyosee. Der Befund passt zum Alter der beiden Kraterseen. Während der Xiloásee vor höchstens 6100 Jahren entstand, könnte der Apoyosee an die 22000 Jahre alt sein, wie Steffen Kutterolf vom Geomar Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel und seine Kollegen ermittelten. Entsprechend länger konnten sich dort in den einzelnen Fischlinien Mutationen anhäufen. Im Apoyosee entstanden denn auch mittlerweile sechs Buntbarscharten der Gattung *Amphilophus*, im Xiloásee dagegen in der kürzeren Zeit immerhin vier.

Neue Arten bilden sich bei diesen Cichliden mitunter sogar noch wesentlich schneller. Auch im Apoyequekrater entstand ein See – der nach geologischen Analysen allenfalls seit 2000 Jahren existiert. Dieser Vulkan war aber vor etwa 120 bis 180 Jahren erneut aktiv. »Damals muss alles eventuell vorhandene Leben im See gekocht haben«, deutet Meyer die Befunde seiner Kollegen von der Geologie.

Zusammen mit anderen Forschern hat er deswegen auch diesen See aufgesucht, der nur nach einem langen, anstrengenden Abstieg erreichbar ist. Sie wollten wissen, ob heute überhaupt wieder Fische darin leben. Und tatsächlich fanden sie Buntbarsche, und zwar wieder eine Art aus der Verwandtschaft der Zitronenbuntbarsche. Vor allem aber treten sie in zwei verschiedenen Formen auf. Einige haben dicke, wulstige Lippen, während andere eher schmallippig sind. Der Hintergrund: In den Felsspalten der steilen Kraterseewände verstecken sich gern Krabben. Dort kommen die normalen, schmallippigen Buntbarsche mit ihren eher breiten Köpfen kaum hinein. In höchstens 100 Generationen muss sich in diesem Kratersee also eine Form mit dicken Lippen und lang ge-

strecktem Kopf entwickelt haben, die sich von dem Getier in den engen Spalten ernähren kann.

Auch in anderen Kraterseen Nicaraguas haben sich Cichliden aus dem Verwandtschaftskreis der Zitronenbuntbarsche an diese Weise des Fressens angepasst – und offenbar entwickelten sie ihre dicken Lippen jeweils unabhängig voneinander. Selbst im Nicaragua- und im Managuasee lebt eine dicklippige Art. Da diese Evolution im Apoyequesee unglaublich schnell verlaufen sein muss, suchten die Forscher nach den Genen, welche die Veränderung der Lippen steuern.

Sie holten dazu dick- und schmallippige Fische aus den beiden alten, großen Seen, aus dem sehr jungen Apoyequesee und aus einem weiteren Kratersee namens Masaya, dessen Alter Steffen Kutterolf auf unter 6000 Jahre bestimmte. Tereza Manousaki, Doktorandin an der Universität Konstanz, und ihre Kollegen maßen bei den Tieren unter anderem die Rückenhöhe, den Ansatz der Schwanzflosse und die Form der Kiefer. Aus den Lippenzellen isolierten sie dann die so genannten mRNAs der dort aktiven Proteine – also die Genabschriften, die als Vorlage für Proteine dienen. Ein Vergleich der RNA-Sequenzen zeigte: Bei den dicklippigen Fischen aller vier Seen waren stets die gleichen sechs Gene weniger aktiv als bei ihren schmallippigen Verwandten.

Ein »Angelina-Jolie-Projekt«

Die Funktionen von fünf jener Gene sind bereits von anderen Wirbeltieren bekannt. Zwei von ihnen sind für Wachstum und Regeneration von Nervenzellen wichtig. Diese Gene könnten das Wachsen der Nerven für Geschmacksknospen hemmen, mit denen die Fische ihre Beute aufspüren. Sind die Gene weniger aktiv, dürften diese Nervenzellen also besser wachsen. Zwei der anderen Gene sind beteiligt, wenn Muskeln und Knorpel entstehen. Das fünfte Gen spielt für die Immunabwehr von Erregern eine Rolle. Ob die sechs Gene wirklich an der Evolution dicker Lippen beteiligt sind, könnten Eingriffe ins Genom erweisen. Man müsste diese Erbanlagen beispielsweise in Eiern von Fischen mit schmalen Lippen ausschalten oder ihre Aktivität bremsen. Würden dann anstatt schmallippiger Buntbarsche dicklippige schlüpfen, wäre ein Zusammenhang erwiesen. Transgene Midas-Buntbarsche zu erzeugen, gelang gerade dem Konstanzer Mitarbeiter Claudius Kratochwil. Zudem vergleichen Gonzalo Machado-Schiaffino und Lukas Baumgarten von Meyers Arbeitsgruppe die Genome von dick- und dünnlippigen Buntbarschen aus Nicaragua und Afrika, um zu sehen, ob für die unterschiedliche Lippenbildung die gleichen Gene verantwortlich sind. Sie nennen es das »Angelina-Jolie-Projekt«.

Beobachten die Forscher Paarungen der in Nicaragua untersuchten Zitronenbuntbarsche, sehen sie fast nie »Mischehen« zwischen verschieden gefärbten Artgenossen. Sowohl in den Kraterseen wie auch in Aquarien paaren sich normalerweise schwarz-weiße nur mit ebenso gemusterten dunklen Fischen, während goldgelbe Buntbarsche ähnlich wie sie selbst gefärbte helle Partner bevorzugen. Entstehen hier aus einer gerade zwei neue Arten? Frederico Henning von Mey-





MIT FREILEGEN VON AXEL MEYER

Zu Nicaraguas eindrucksvollen Kraterseen zählt auch der See Asososca León.

ers Gruppe glaubt einen Genabschnitt gefunden zu haben, der sowohl für die Farbunterschiede als auch für die Paarungsentscheidung verantwortlich ist.

Diesmal stießen die Forscher gleich auf 46 Gene, die bei den goldfarbenen Exemplaren anders aktiv sind als bei den dunkel gestreiften. Wie man es erwarten konnte, spielen einige dieser Erbinformationen eine Rolle in den Pigmentzellen der Haut. Sie sind bei den hellen Fischen viel weniger aktiv. Andere Gene sind Forschern bereits im Zusammenhang mit Hautkrankheiten bei Menschen aufgefallen. Sie sind für Entzündungsprozesse wichtig. Eine von den abweichenden Erbeigenschaften sticht aber bei den gelben Fischen besonders heraus: Dieses Gen ist sowohl mit ihrer Farbe als auch mit ihrem Sexualverhalten verknüpft.

Wie groß die Chancen sind, dass bald eine eigene goldfarbige Art entsteht – oder sogar mehrere –, lässt sich schwer abschätzen. Die hell leuchtenden Fische können sich vor Fressfeinden nicht so gut verbergen und werden deswegen leicht Opfer von Vögeln und größeren Raubfischen, jedenfalls solange sie jung sind – so dachten die Forscher zumindest. Experimente mit verschiedenen gefärbten Wachsmodellen in den Kraterseen ergaben allerdings, dass Vögel die dunklen Attrappen häufiger fingen. Hingegen attackierten Fische fressende Fische, auch Cichliden, die gelben Modelle umso öfter, je trüber das Wasser war. Trotzdem überleben in den verschiedenen Seen Nicaraguas stets genügend von den hellen Buntbarschen und pflanzen sich fort. Es besteht also Hoffnung auf eine goldene Zukunft. ☞

DER AUTOR



Roland Knauer ist freier Wissenschaftsautor und Fotograf. Er hat Chemie studiert und in Molekularbiologie promoviert.

QUELLEN

- Henning, F. et al.:** Transcriptomics of Morphological Color Change in Polychromatic Midas Cichlids. In: *BMC Genomics* 14, S. 171–183, 2013
- Kautt, A. F. et al.:** Genomic Signatures of Divergent Selection and Speciation Patterns in a »Natural Experiment«, the Young Parallel Radiations of Nicaraguan Crater Lake Cichlid Fishes. In: *Molecular Ecology* 21, S. 4770–4786, 2012
- Manousaki, T. et al.:** Parsing Parallel Evolution: Ecological Divergence and Differential Gene Expression in the Adaptive Radiations of Thick-Lipped Midas Cichlid Fishes from Nicaragua. In: *Molecular Ecology* 22, S. 650–669, 2013

LITERATURTIPP

Evolution. Wie sie die Geschichte des Lebens geformt hat. Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2014. Darin insbesondere: Marty, C.: *Missverständnisse à la Darwin*, S. 6–13
Beiträge über neue Evolutionsstudien und aktuelle theoretische Ansätze

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1224867

Leistungssport Gesang

Die Anforderungen an professionelle Sängerinnen und Sänger sind enorm. Wie diese hohe Töne ausdrucksvoll und technisch sauber singen und dabei ein Orchester scheinbar mühelos übertönen, interessiert auch Wissenschaftler.

Von Matthias Echternach und Bernhard Richter

Konzentriert nimmt der Athlet Maß, geht in Gedanken den Bewegungsablauf durch – dann sorgt eine Kaskade von Steuerimpulsen dafür, dass jede einzelne Muskelfaser zur rechten Zeit kontrahiert. Wenn ein Hochspringer über die Latte fliegt, ein Biathlet ins Schwarze trifft oder ein Rennfahrer seine Konkurrenz weit hinter sich lässt, vollbringt der menschliche Körper Höchstleistungen. Auch der professionelle Gesang gehört in diese Kategorie. Denn ob Oper, Musical oder Rock – Musikalität ist nur die eine Seite der Medaille.

So bildet für eine Sopranistin der in der abendländischen Notation f^3 bezeichnete Ton von 1397 Hertz eine schwer zu

meisternde Messlatte. Wolfgang Amadeus Mozart setzte diese Marke 1791 in seiner Oper »Die Zauberflöte« mit einer Arie der als »Königin der Nacht« bezeichneten Figur. Eine Version der deutschen Sängerin Edda Moser strebt zusammen mit anderen Audio- und Bilddaten an Bord der Raumsonde Voyager 2 dem interstellaren Raum zu – als Zeugnis der kulturellen Leistungen der Menschheit für andere intelligente Wesen im Kosmos. Aus medizinischer Sicht entspricht dieses f^3 einem perfekten Zusammenspiel aller beteiligten Komponenten des Stimmapparats.

Wie dieser im Einzelnen funktioniert, ist jedoch trotz vielfältiger Forschungen noch immer nicht in allen Details ver-



standen. Zwar kannte schon der römische Arzt Claudius Galenus im 2. Jahrhundert die Knorpel des Kehlkopfs, und spätestens der französische Arzt Antoine Ferrein wies Mitte des 18. Jahrhunderts anhand von Tierpräparaten nach, dass die »Stimmbänder« den Ton erzeugen. Der spanische Gesangspädagoge Manuel Garcia vermochte diese etwa ein Jahrhundert später mittels Zahnarztspiegeln »bei der Arbeit« zu beobachten. Dennoch erweist sich das Gesamtsystem als so komplex, dass wir manche Aspekte erst heute untersuchen können, indem wir modernste Techniken einsetzen: Endoskope, Kernspintomografen, Drucksensoren und Computersimulationen.

Schon das Grundprinzip der Tonerzeugung sorgte für Irritationen. Für Galenus entsprach der Kehlkopf noch einer Pfeife, und Ferrein verglich die »Stimmbänder« – er bezeichnete sie als »cords vocales« – mit schwingenden Saiten. Tatsächlich hatte Galenus in einem Punkt Recht: Unser Stimmapparat ist einem Blasinstrument sehr ähnlich, doch er funktioniert nicht wie eine Pfeife über Luftverwirbelungen an einem zungenförmigen Mundstück, sondern gleicht

eher einer Trompete. Dort erzeugen die vibrierenden Lippen des Musikers eine stehende Welle in der Luftsäule des Instruments, also einen periodischen Wechsel von Druckbäuchen und -knoten. Beim Menschen sind es die Stimmbänder – beziehungsweise anatomisch korrekter: die Stimm-

AUF EINEN BLICK

RÄTSELHAFTE REGISTER

1 Die **Stimmlippen** im **Kehlkopf** erzeugen einen Klang, dessen Spektrum professionelle Sänger in vielfältiger Weise formen. Erst dank moderner bildgebender Verfahren verstehen Physiologen diesen Prozess.

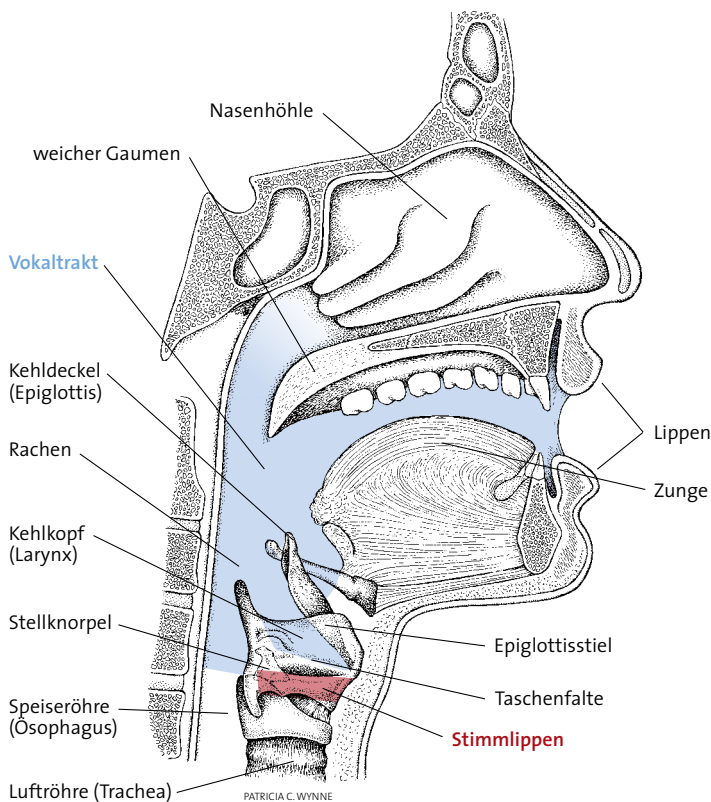
2 Sänger und Gesangslehrer unterscheiden **Stimmregister** wie **Brust- und Kopfstimme**, in denen verschieden hohe Töne ähnlich klingen. Allerdings halten diese Einteilungen wissenschaftlicher Prüfung nur bedingt stand.

3 So dürften manche Erklärungen zum **Falsett**, der hohen Männerstimme, falsch sein. Ihr dünner Klang beruht wohl unter anderem auf einer Versteifung der Stimmlippen.

Ob ausdrucksstarke Arie oder grooviger A-cappella-Rap – was Berufssänger wie der Tenor Ho-Yoon Chung und die Mezzosopranistin Elina Garanca (links) oder die Mitglieder der Band Wise Guys scheinbar mühelos darbieten, erfordert die Schulung aller Komponenten des stimbildenden Systems.



WISEGUYS PRESSEBILD / GUIDO KOLLMEYER



Die Hauptaufgabe der Grundkomponenten des Vokaltrakts ist nicht die Kommunikation, sondern der Schutz unseres Lebens: Drohen Partikel oder Tröpfchen in die Luftröhre zu gelangen, verschließen der Kehldeckel und die Stimmlippen ihnen den Weg. Im Lauf der Evolution hat sich dieses System weiterentwickelt und erlaubt dem Menschen, ein reiches Spektrum an Tönen hervorzubringen, von der Sprechstimme bis hin zum Kunstgesang. Die wichtigste Komponente dabei ist der Kehlkopf (rechts: Längsschnitt und Ansicht von vorne), in dem die Stimmlippen einen Klang erzeugen, der dann durch Resonanzen geformt wird.

Glossar

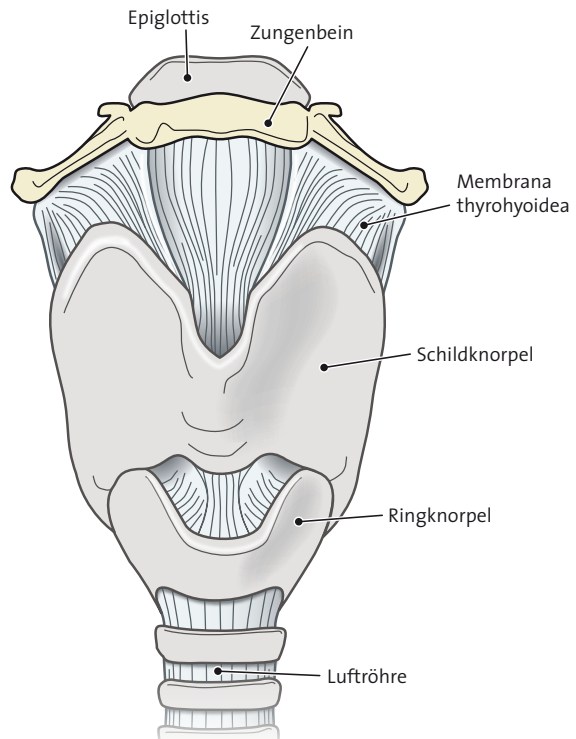
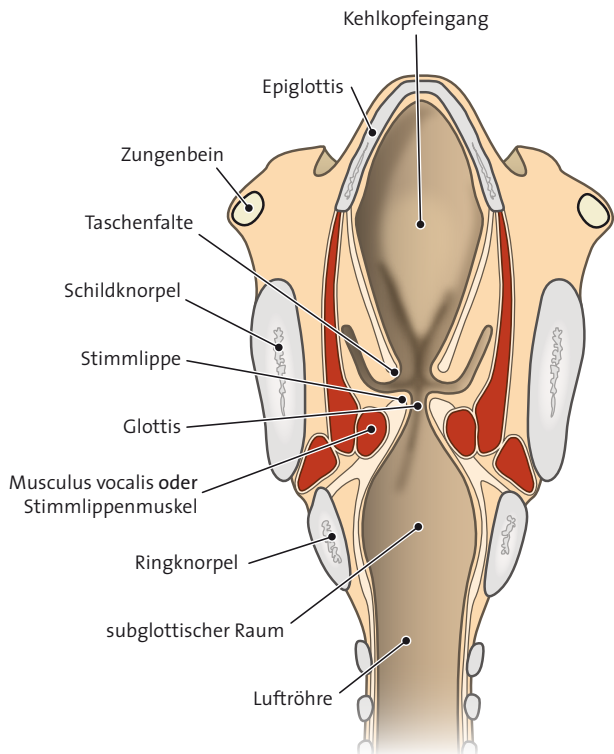
- Dezibel:** In der Akustik ist Dezibel die Maßeinheit des Schalldruckpegels. Weil ihr eine logarithmische Skala zu Grunde liegt, bedeutet eine Erhöhung um drei Dezibel einer Verdopplung der Schallintensität.
- Formanten:** Resonanzen im Vokaltrakt, Formanten genannt, verstärken Teiltöne des an den Stimmlippen gebildeten Klangs beispielsweise bei der Vokalformung. Mathematisch entspricht dies einer Filterung des ursprünglichen Frequenzspektrums.
- Glottis:** Fläche zwischen den beiden Stimmlippen, die je nach Öffnungs- oder Schließungsgrad unterschiedlich groß ist.
- Grundton / Oberton** Jeder Klang besteht aus einer Reihe von Teiltönen: dem Grundton und den ganzzahligen Vielfachen seiner Frequenz, den Obertönen.
- Passaggio:** Übergangszone im Frequenzspektrum von einem Register ins nächste.
- Register:** Der Begriff fasst Töne gleicher Klangfarbe zusammen. Sänger und Gesangslehrer unterscheiden traditionell diverse Register, deren Entstehung derzeit erforscht wird.
- Stimmlippen:** Bewegliche Falten im Kehlkopfinnen aus Muskeln und Bindegewebe, bedeckt von einer Hautschicht.

lippen in unserem Kehlkopf (siehe Grafik S. 37), die eine solche Welle generieren.

Tatsächlich handelt es sich dabei um zwei Falten, die durch Muskeln in ihrer Spannung, Form und Steifigkeit gezielt eingestellt werden. Legen sie sich aneinander, verschließen sie den Strömungskanal im Kehlkopf. Nun baut die ausgeatmete Luft einen Druck unter ihnen auf. Durch einen Kniff lässt sich der unterhalb der Stimmlippen herrschende Wert näherungsweise messen, ohne den Künstler durch Punktationen oder tief liegende Sonden zu belasten: Beim Konsonanten /p/ ist der Mund verschlossen, die Stimmlippen hingegen sind geöffnet. Der fragliche Druck entspricht daher dem im Mundraum und lässt sich über einen Sensor bestimmen. In der Praxis singt der Proband eine Abfolge der Silbe /pa/ in eine Maske hinein, die zudem den Volumenstrom misst. Der Vokal /a/ liefert den notwendigen Referenzwert, bei dem der Mund geöffnet, der Stimmspalt hingegen weit gehend verschlossen ist, was für den gleichen Druck in Mund und Maske sorgt.

Je größer der Luftdruck ist, desto lauter wird der Ton. Für eine gewöhnliche Unterhaltung reichen Drücke von etwa fünf bis sieben Millibar aus. Bei lautem Gesang wie auf der Bühne misst man Werte bis zu 30 Millibar. Im Opernfach Heldentenor hat unsere Arbeitsgruppe schon 45 Millibar ermittelt, bei Musicalsängern sogar knapp 65 Millibar. Zum Vergleich: Trompeter erreichen über 150 Millibar Luftdruck.

Dank ihrer Elastizität geben die Stimmlippen schließlich nach und öffnen kurzzeitig einen Glottis genannten Spalt. Diese Eigenschaft lässt sie auch wieder zurückfedern und den Spalt schließen; zudem entsteht ein Unterdruck durch die schnelle Strömung in der Engstelle (Bernoulli-Effekt).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Dieses Auf und Zu wiederholt sich periodisch und in rascher Folge. Die schwingenden Stimmlippen erzeugen Töne beziehungsweise Klänge also nicht wie eine Gitarrensaite, sondern indem sie den Luftstrom in Pulse von wenigen Millisekunden Dauer unterteilen.

Dadurch werden Schallwellen in das Instrument »Stimmapparat« geschickt, das den Kehlkopfeingang, Rachen und Mundraum umfasst. Es bildet sich ein Klang, der aus einer Grundfrequenz und ganzzahligen Vielfachen davon besteht, den Obertönen. Jeder Teilton dieses akustischen Spektrums hat seine eigene Lautstärke, und die des lautesten bestimmt die des Gesamtons.

Verschiedene Muskeln und insbesondere die Zunge verändern die Gestalt des Schallwegs und schwächen beziehungsweise verstärken dadurch die Obertöne. In erster Näherung lässt sich der Vokaltrakt mit einer auf der Glottis-seite verschlossenen Röhre von durchschnittlich 17,5 Zentimeter Länge vergleichen (siehe Grafik S. 38). Die sich darin durch Reflexionen ausbildende stehende Welle hat dann eine viermal so große Wellenlänge mit einer ersten Formantenfrequenz (siehe Glossar links) von 500 Hertz. Durch solche Resonanzen entstehen beispielsweise Vokale wie /a/ und /e/ oder der so genannte Schwa-Laut /ə/, im Deutschen ein unbetonter Vokal wie das »ü« in »Mücke«. Fünf Resonanzbereiche sind besonders wichtig: Die ersten beiden dieser Formanten bilden die Vokale, die anderen drei prägen durch die Obertöne den Klangcharakter und verleihen der Stimme Durchsetzungskraft. Man kann den Vokaltrakt also als Filter beschreiben. Im Bereich der Formanten werden Teiltöne des an den Stimmlippen produzierten Klangs verstärkt, während Teiltöne zwischen den Forman-

ten durch fehlende Resonanz abgeschwächt werden (siehe Grafik S. 38).

Übrigens lässt sich diese Funktion leicht im Experiment nachvollziehen. Dazu benötigt man nur einen Entenlocker aus einem Jagdfachgeschäft und einen passenden Kunststoffschlauch. Die Tröte erzeugt einen Klang, der dem unserer Stimmlippen physikalisch sehr ähnlich ist. Wird der Schlauch aufgesteckt und auf die Länge von knapp 18 Zentimetern eingekürzt, verändert sich das Quäken zu volleren Klang, der durch Eindrücken des »Stimmrohrs« verändert werden kann.

Ein großer Teil der Stimmlippen ist übrigens sowohl an ihren Seiten als auch in ihrem hinteren Bereich an der Tonerzeugung kaum beteiligt. Tatsächlich schwingt bei Frauen nur etwa ein Zentimeter, bei Männern sind es gut 1,8 Zentimeter. Auf Grund dieser größeren Länge und auch höheren Masse klingt die männliche Sprechstimme tiefer; sie liegt knapp oberhalb von 100 Hertz, Frauen sprechen eine Oktave höher in einer Tonlage von etwa 200 Hertz. Das bedeutet aber, dass sich diese winzigen biologischen Ventile schon beim Sprechen um die 100- beziehungsweise 200-mal pro Sekunde öffnen und schließen müssen. Der Vergleich mit dem Leistungssport ist daher wahrlich berechtigt.

Marathon für die Stimmlippen

Die Amplitude dieser Bewegungen beträgt zwar nur etwa einen Millimeter. Wenn man jedoch stimmintensive Berufe wie den des Lehrers betrachtet, summiert sich diese winzige Strecke pro Arbeitstag sogar auf einige Kilometer. Es gibt kaum ein anderes Gewebe in unserem Körper, das ein Leben lang höherem mechanischem Stress widerstehen muss. Dass sie das können, verdanken die Stimmlippen einem einzigartigen Auf-

bau: Ein nicht verhornendes Plattenepithel umhüllt Schichten unterschiedlich elastischen Bindegewebes und Muskelfasern.

Der Schulalltag fordert dem Sprechapparat aber nicht nur Durchhaltevermögen ab. Lehrer müssen auch eine hohe Grundlautstärke erzeugen, um den Geräuschpegel einer Schulklasse zu übertönen. Tatsächlich sind Stimmprobleme in diesem Berufsfeld ein Hauptgrund für häufige Fehlzeiten. Leider gehört ein entsprechendes Training nur in Ansätzen zur pädagogischen Ausbildung. Wie wichtig es aber wäre, zeigten auch Studien der letzten Jahre, wonach Schüler dem Unterricht schlechter folgen können, wenn ein Lehrer bereits unter Stimmstörungen leidet, also zum Beispiel heiser spricht. Derzeitig führt unser Institut im Auftrag des Landes Baden-Württemberg eine große Studie zur stimmlichen und mentalen Gesundheit von Lehrern an öffentlichen Schulen durch. Erste Ergebnisse belegen die Wirksamkeit präventiver stimmtherapeutischer Maßnahmen wie Übungen zur Vertiefung des Atems oder zur Entspannung der Stimme.

Stellt schon das Sprechen überraschend hohe Anforderungen, verblüffen die Grenzwerte aus dem musikalischen Fach umso mehr: Das »hohe C« (c^2) der Tenöre liegt bei 523 Hertz, also etwa beim Fünffachen der mittleren Sprecherstimmlage, und das erwähnte f^3 der »Königin der Nacht« sogar bei 1397 Hertz, also dem knapp Siebenfachen der weiblichen Sprechstimme. Lange galt es in der Stimmphysiologie als schwer vorstellbar, dass die Stimmlippen zu derart schnellen Schwingungen fähig sind. Vielmehr führte der pfeifenähnliche Klang zu der Vorstellung, Luftwirbel brächten seinen Grundton hervor.

Unserer Arbeitsgruppe ist es Ende 2012 jedoch gelungen, mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einer endoskopisch über die Nase eingeführten Optik den Gegenbeweis anzutreten. Mit einer Aufnahmezeit von 20 000 Bildern pro Sekunde zeigte sich, dass die Stimmlippen nicht nur vibrieren, sondern den Glottisspalt sogar vollständig schließen. Das vermochten sie sogar bis zur höchsten Frequenz, die unsere Probandin, eine professionelle Opernsängerin, trotz des sicher irritierenden Endoskops im Experiment intonierte: Ihre Stimmlippen öffneten und schlossen die Glottis 1568-mal pro Sekunde. Somit scheint die Bezeichnung »Pfeifregister« für diese Sopranstimmlage aus physiologischer Sicht nicht glücklich gewählt.

Der allgemeine Begriff Register stammt aus dem Orgelbau und fasst Töne gleicher Klangfarbe zusammen. So gibt es bei der Kirchenorgel Pfeifen, deren Bauweise flötenartige Klänge ermöglicht, während andere eher an Streichinstrumente erinnern. Auf den Gesang übertragen unterscheiden Sänger und Gesangslehrer traditionell diverse Register, denn bei Singstimmen verändert sich insbesondere mit ansteigender Frequenz der Klangcharakter.

Die falsche Stimme: Das Falsett

In einer mittleren Lage beschreibt das Register »Bruststimme«, häufig auch Modalregister genannt, einen vollen Klang. Hinter der Bezeichnung steht subjektives Empfinden: Vibrationen werden vor allem im Brustraum wahrgenommen. Demgegenüber galt früher das Falsett mit Frequenzen von 250 bis etwa 800 Hertz als eine Stimme, an deren Klang-

Bewunderte Kastraten

Häufig werden **Countertenöre** für die Aufführung alter Musik eingesetzt, um den ursprünglichen Charakter eines Stücks im Sinne einer historisch informierten Aufführungspraxis wiederzugeben. Sie nehmen dann den Platz von Sängern ein, die bis heute ein Nimbus von Tragik und Kunstfertigkeit umgibt: den Kastraten. Im 18. Jahrhundert wurden in Italien pro Jahr vermutlich etwa 4000 Jungen vor Erreichen der Pubertät kastriert, um den Stimmbruch zu verhindern. Zuverlässige Angaben darüber, wie viele Kinder an der Operation oder deren Folgen verstarben, gibt es nicht, da die Kastration verboten war. Häufig waren es Kinder aus ärmlichen Verhältnissen, denen – sofern sie ansprechende Stimmen hatten und den Eingriff bei guter Gesundheit überlebten – eine lukrative Anstellung winkte.

Warum der Kastrat so hoch im Kurs stand, kann ein Physiologe erklären: Mangels Testosteron wuchsen die Stimmlippen nicht zur vollen männlichen Länge, blieben bei etwa einem Zentimeter Länge und erzeugten weiterhin Frequenzen im Bereich von Alt oder Sopran. Gleichzeitig erreichten die Extremitäten, der Brustkorb und die Lungen hormonell bedingt erhebliche Länge und Größe, was man auf zeitgenössischen Karikaturen

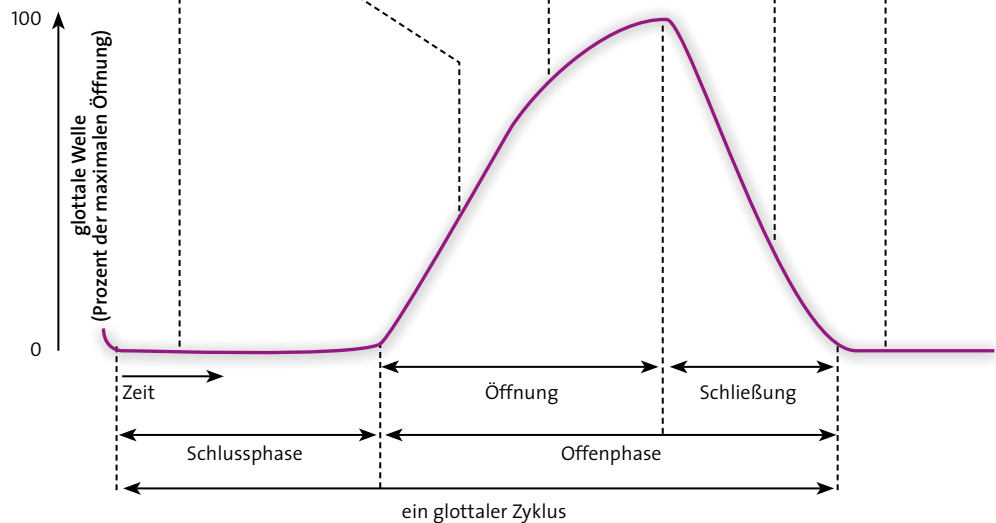


Ihr ungewöhnlicher Körperbau machte Kastraten zum Ziel von Karikaturisten (links: Farinelli, rechts: Senesino).

erkennen kann. Somit konnten Kastraten vermutlich sehr laut singen und obendrein einen Ton lange halten. Zudem war ihr Vokaltrakt länger als bei Knaben oder Frauen, wie man aus anatomischen Studien des 19. Jahrhunderts weiß. Ihre Formantenfrequenzen sorgten also trotz hoher Tonlage vermutlich für eine dunkle, maskuline Gesangsstimme.



Mit dem Laryngoskop lässt sich das Öffnen und Schließen der Glottis, also des Spalts zwischen den Stimmlippen, sehr genau untersuchen. Ein solcher Schwingungszyklus, auch als »glottaler Zyklus« bezeichnet, erzeugt Luftpulse, die Schallwellen im Vokaltrakt anregen.



formung vor allem Nase und Nasennebenhöhlen beteiligt seien – dort spüren die Sänger den Ton. Häufig wird die »falsche« Stimme – der Name leitet sich vom italienischen »falso« her – daher auch als Kopfstimme bezeichnet; die Nomenklatur ist hier aber nicht einheitlich. Die kleinen Resonanzräume der Nase schienen den im Vergleich zur Bruststimme dünnen Klang zu erklären. Heute wissen wir aber, dass selbst im Falsett der gesamte Vokaltrakt bei der Klangformung beteiligt ist und der Hauptunterschied zwischen Modalregister und Falsett von den Stimmlippenschwingungen herrührt.

Viele Forscher halten eine erhöhte Längsspannung des am äußeren Kehlkopf angreifenden Musculus cricothyroideus für den Hauptmechanismus, der dem Falsett zu Grunde liegt. Dieser Zug versteift die Stimmlippen, verringert somit den schwingenden Anteil und reduziert damit auch die schwingende Masse. Das Ergebnis wären tatsächlich eine höhere Frequenz und ein an Obertönen ärmeres Spektrum. Dass es professionellen Sängern gelingt, den als Passaggio bezeichneten Übergang zwischen Modalstimme und Falsett stufenlos zu bewältigen, lässt sich ebenfalls mit diesem Modell erklären: Training könnte sie in die Lage versetzen, die entsprechende Muskelspannung sehr fein abzustimmen, was unsere eigenen Untersuchungen an professionellen Tenören bestätigen. Wissenschaftler wie Ingo Titze vom National Center of Voice and Speech in Salt Lake City kommen aber auf Grund von Modellversuchen und physikalischen Simulationen zu dem Schluss, dass die Unterschiede zwischen Registern weit komplexer sind: Die vom Sänger eingestellten Resonanzen würden demnach auch zurückkoppeln und die Schwingungen der Stimmlippen oder den von ihnen produzierten Luftpuls verändern.

Das Passaggio untrainierter Sänger erfolgt unkoordiniert, und die Stimme kippt regelrecht in das neue Register, bis sie sich dort stabilisiert. Zur Kunstform erhebt diesen sonst unerwünschten Effekt eine nicht nur im Alpenraum praktizierte Gesangstechnik: das Jodeln. Wer kein Freund der Volksmusik ist, mag es kurios finden, dürfte aber überrascht sein zu erfahren, dass ein durch Jodler verziertes Lied hohe Ansprüche an den Sänger stellt. Denn die deutlich hörbaren Übergänge zwischen den beiden Registern erfolgen extrem schnell. Unsere eigenen Spektralanalysen bei professionellen Jodlern aus der Schweiz zeigen, dass die Tonhöhen dabei hinsichtlich Intonation und Stabilität sogar präziser als bei klassisch trainierten Stimmen angesteuert werden. Zudem spielt offenbar die genaue Formung des Vokaltrakts eine wichtige Rolle. In besonderem Maß betrifft dies die Zunge, deren Gestalt wesentlich darüber entscheidet, wie groß die Resonanzräume im Mund und Rachen sind. Laut Untersuchungen mit Kernspintomografen können Jodler diese Einstellungen deutlich genauer reproduzieren als Opernsänger.

Im Kunstgesang ist das Falsett heutzutage das Metier der so genannten Countertenöre, der männlichen Altstimme. Indem diese beispielsweise die Stimmlippen stärker zusammenführen, können sie mehr Druck aufbauen, auch wenn sie selten die Lautstärke von Tenören erreichen. In Rock und Pop, wo mangelnde Lautstärke durch die Verwendung von Mikrofon und Verstärker ausgeglichen werden kann, ist das Falsett ebenfalls zu Hause. Meist wird es als Effekt eingesetzt wie etwa in der 1970 veröffentlichten Ballade »Child in time« der Rockband Deep Purple. Sänger Ian Gillian begann sein Solo im Modalregister und schraubte die Stimme allmählich ins Falsett hoch. Am Ende kehrte er ins Modalregister zurück, das er dann aber ebenfalls in hohe Frequenzbereiche trieb.

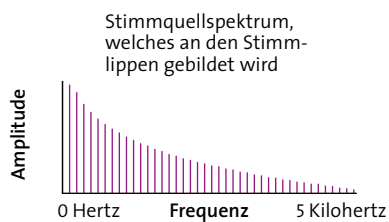
Er setzte dazu eine Technik ein, die häufig als »Belting« bezeichnet wird: Erhöhen des Atemdrucks steigert nämlich nicht nur die Lautstärke, sondern auch die Grundfrequenz des gesungenen Tons. Pro Millibar lassen sich auf diese Weise etwa drei bis vier Hertz gewinnen. Umgekehrt muss ein Sänger etwa bei der als *Messa di Voce* bezeichneten Verzierungstechnik im Barockgesang, bei der ein lang anhaltender Ton an- und abschwilt, einer ungewollten Frequenzschwankung über die Stimmlippenmechanik entgegensteuern.

Die Technik des Beltings erfordert aktuellen Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe an einer Musicalsängerin

zufolge aber auch eine Umformung des Resonanzsystems: Die Lippen werden weit geöffnet, der Rachen verengt und der Kehlkopf um mehr als einen Zentimeter angehoben. Der Grund dürfte sein, dass auf diese Weise der erste Formant zu höheren Frequenzen verschoben wird. Entsprechende Obertöne in dem von den Stimmlippen erzeugten Klang werden dann also verstärkt, und das Ergebnis wirkt insgesamt heller. Manche Ärzte halten das Belting für ungesund; in der heutigen Musicalpraxis wird es jedoch weltweit verwendet und kann nach unserer Erfahrung bei guter Stimmtechnik nicht als stimmschädigend angesehen werden.



Vokale verändern die räumliche Konfiguration des Vokaltrakts – etwa durch die Stellung der Zunge oder des Kehlkopfes (siehe MRT-Bilder), was die Formanten unterschiedlich gewichtet. Es ist sogar möglich, sie zu einem Cluster zu überlagern (rote Pfeile).



uniforme Röhre mit 17,5 Zentimeter Länge, hinten geschlossen

Vokal /ə/

Vokal /a/

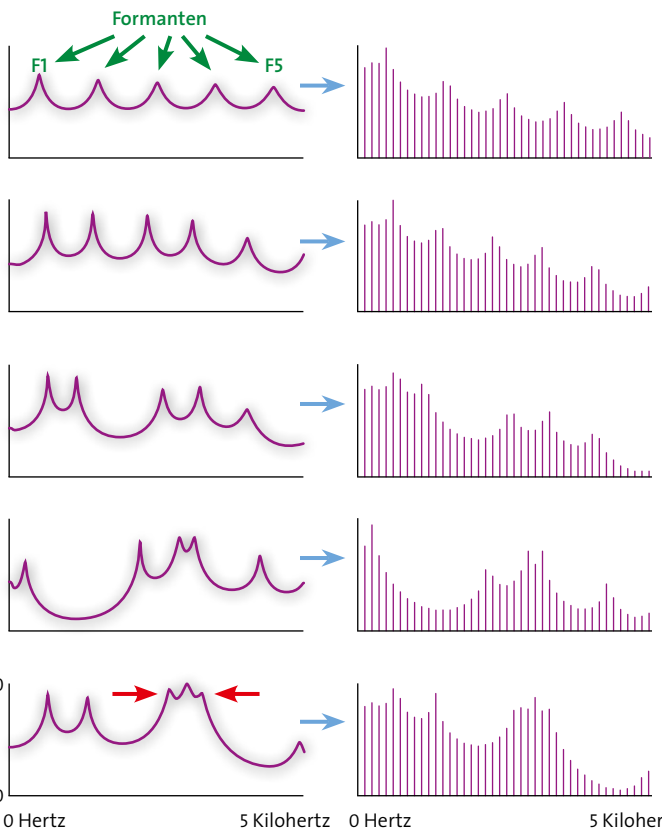
Vokal /i/

Clustering von F₃–F₅ auf Vokal /ə/

Die Schwingungen der Stimmlippen erzeugen periodisch abwechselnde Bereiche hohen und niedrigen Luftdrucks im Vokaltrakt. Schon in einer einfachen Röhre werden durch Formanten Frequenzen des ursprünglichen Spektrums verstärkt.

Vokaltraktübertragungsfunktion

Spektrum des abgestrahlten Schalls



Zu Mozarts Zeiten war das Falsett sehr wahrscheinlich die wichtigste Technik für den Tenor, um in den hohen Lagen zu singen. Damals waren die Bühnen aber deutlich kleiner, die Orchester schwächer besetzt als heute. Die Nachteile dieses Registers machten sich noch nicht bemerkbar: Der Druck unterhalb der Stimmlippen ist um mehrere Millibar geringer als im Modalregister, ein Falsettton klingt also fast immer leiser. Als dem französischen Sänger und Gesangslehrer Gilbert-Louis Duprez 1837 das hohe C von 523 Hertz in der »Bruststimme« gelang, setzte er damit neue Maßstäbe: Von da an sollten Tenöre auch in der Höhe laut singen. Niemand vermag genau zu sagen, wie Duprez einen sehr hohen Ton mit enormer Lautstärke zu Wege brachte. Heutige Tenöre schlagen dafür einen Weg ein, den unsere Arbeitsgruppe derzeit untersucht. Offenbar konfigurieren sie im Passaggio den Vokaltrakt sehr stark um. So lassen sie beispielsweise auf dem Vokal /a/ den Kehlkopf ansteigen, weiten den Rachen und öffnen den Mund sehr stark. Ersteres verkürzt die Röhre »Vokaltrakt« und verschiebt damit die Formanten zu höheren Frequenzen, was den brillanten Klang guter Operntenöre mitunter erklärt. Andere verengen aber auch den Kehlkopf oberhalb der Stimmlippen, was nach Computersimulationen von Titze deren Kontaktfläche vergrößert und dadurch höhere Frequenzen ohne Wechsel zum Falsett ermöglicht.

Die Register der weiblichen Stimme

Diese Engstellung verbessert zudem die Durchsetzungsfähigkeit gegenüber einem Orchester: Die Formanten verschieben sich so, dass sie sich in ihren Randbereichen überlagern und gegenseitig verstärken. Andere Sänger erreichen eine solche Clusterung durch Absenken des Kehlkopfs und Weitung des Rachens. Johan Sundberg von der Königlich Technischen Hochschule Stockholm bezeichnet das Ergebnis als Sängersformantencluster. Die größte Verstärkung erfolgt bei etwa 3000 Hertz. Obertöne in diesem Cluster werden um mehrere Dezibel verstärkt. In diesem Frequenzbereich ist das menschliche Gehör besonders empfindlich und kann Lautstärkeunterschiede gut wahrnehmen – die Tenorstimme kann sich vom Orchesterklang deutlich abheben.

Auch Sängerinnen kennen einen Registerübergang bei etwa 350 Hertz, was dem Ton f^1 entspricht. Dieser Übergang gilt für Alt, Mezzosopran und Sopran gleichermaßen. Er hat vermutlich ähnliche Gründe wie der Übergang zum Falsett bei Männern, nämlich eine Spannungsänderung durch höhere Aktivität des die äußeren Stimmlippen spannenden Musculus cricothyroideus.

Viele Sängerinnen erfahren zudem einen zweiten, ungefähr eine Oktave höher liegenden Registerübergang bei etwa 650 bis 800 Hertz. Die physiologischen Gründe dafür sind noch nicht geklärt, doch ist hier wieder die Lautstärkemaximierung interessant. Neben einer Drucksteigerung erreichen Trainierte in diesem Frequenzbereich nämlich Lautstärke auch durch »Formantentuning«: Die Sopranistin singt ein /a/, dessen erster Formant normalerweise bei etwa 750

Hertz die größte Energie liefert, und verschiebt diese Formantenfrequenz durch Modifikationen im Vokaltrakt – zum Beispiel durch Öffnen der Lippen oder durch Anheben des Kehlkopfs – dergestalt, dass sie stets knapp oberhalb des Grundtons platziert bleibt. Dieser wird nun durch die Resonanz verstärkt – um mehrere Dezibel.

Wie man allerdings das f^3 der »Königin der Nacht« sogar noch weit übertreffen kann, ist das Geheimnis einiger weniger Ausnahmetalente. Die brasilianische Soul- und Jazzsängerin Georgia Brown etwa erreicht – dokumentiert durch Internetvideos – mindestens das zwei Oktaven höher liegende f^5 mit 5588 Hertz. In diesen extrem hohen Lagen ähnelt der Klang der Stimme bereits dem elektronischer Instrumente wie dem Theremin.

Gleich welches Leistungskriterium man an die Stimme anlegt, ob Tonhöhe, Lautstärke, Durchsetzungs- oder Durchhaltevermögen: All dies verlangt ein langfristiges und gezieltes Training. Tägliches Üben unter der Anleitung eines Lehrers und nach den individuellen körperlichen Möglichkeiten ist entscheidend. Doch das Beste zum Schluss: Die richtige Anwendung der Stimme macht nicht nur Spaß, sondern ist auch gesund. Gunter Kreutz, heute an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, hat Sängern und Zuhörern einer Chorprobe Blut entnommen und analysiert. Demnach verbessert Singen das Immunsystem und erhöht sogar die Konzentration bestimmter Endorphine: also von Glückshormonen, wie sie auch beim Ausdauersport ausgeschüttet werden. ~

DIE AUTOREN



Die Phoniater und HNO-Ärzte **Matthias Echternach** (rechts) und **Bernhard Richter** forschen am Freiburger Institut für Musikmedizin, einer gemeinsamen Einrichtung der Hochschule für Musik und der Universitätsklinik Freiburg.

QUELLEN

- Richter, B.:** Die Stimme. Henschel, Leipzig 2013
Spahn, C. et al.: Das Blasinstrumentenspiel: Physiologische Vorgänge und Einblicke ins Körperinnere. DVD, Helbling, Esslingen 2013
Sundberg, J.: Die Wissenschaft von der Singstimme. Wißner, Augsburg (neue Auflage vorgesehen für 2014)
Titze, I.R.: Faszination Stimme – Eine leichtverständliche Einführung in die Grundlagen der Stimmbildung und die neuesten Erkenntnisse. National Center for Voice and Speech, Salt Lake City, 2012
Titze, I.R., Abbott, K.V.: Vocology – The Science and Practice of Voice Habilitation. National Center for Voice and Speech, Salt Lake City 2012

WEBLINKS

Diesen Artikel und Weblinks zu den Seiten interessanter Forschungseinrichtungen finden Sie im Internet unter:
www.spektrum.de/artikel/1224869

Mit Stromstößen gegen Krebs

Die »irreversible Elektroporation« zerstört Zellen mit elektrischen Pulsen. Ärzte setzen das Verfahren immer häufiger in der Tumorthherapie ein.

Von Michael K. Stehling, Enric Günther und Boris Rubinsky

Günther W. war 57 Jahre alt und fühlte sich gesund. Bei einer ärztlichen Untersuchung stellte sich jedoch heraus, dass sein PSA-Wert erhöht war, was auf Veränderungen in der Prostata hinwies. Eine Gewebeprobe bestätigte den Verdacht auf Prostatakrebs. Der behandelnde Urologe empfahl die sofortige chirurgische Entfernung der Vorsteherdrüse, gegebenenfalls eine Bestrahlung. Je länger Herr W. damit wartete, sagte er, desto höher sei das Risiko, dass der Tumor Metastasen bilde.

Für Günther W. war das ein Schock. Er hatte zwei Bekannte, die ebenfalls an Prostatakrebs erkrankt und nach der operativen Behandlung impotent geworden waren. Einer von ihnen litt infolge des Eingriffs zudem an Inkontinenz und musste Windeln tragen. Trotzdem war es bei ihm zu einem Rezidiv gekommen, einem erneuten Wachstum des Karzinoms, was zusätzliche Bestrahlungen erforderlich machte, mit der Folge ständiger Entzündungen in Blase und Enddarm.

W. fing an, zu recherchieren. Wie viel Zeit hatte er? Gab es Alternativen zur Operation? Er stieß auf einen Fachartikel über die Überlebenschancen von Prostatakrebskranken und

las zu seiner Erleichterung, dass er mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 Prozent die nächsten 15 Jahre am Leben bleiben würde – ohne jede Behandlung. Seine Krankheit war also nicht, wie befürchtet, ein sicheres Todesurteil. Andererseits starben 20 Prozent der Patienten im genannten Zeitraum, und jene, die überlebten, trugen oft Metastasen in sich. Günther W. entschied, er sei noch zu jung, um dieses Risiko einzugehen.

Der Krebs musste weg, aber ohne die drohenden Nebenwirkungen von Operation oder Bestrahlung. Günther W. wurde auf ein neues Verfahren aufmerksam, die »irreversible Elektroporation« (IRE), mit der sich Prostatakarzinome »fokal« behandeln lassen, also unter Entfernung lediglich des erkrankten Gewebes und Erhalt des restlichen Organs. Bald darauf stellte er sich in unserem Prostata-Center in Offenbach vor. Dort klärten wir ihn über die Vor- und Nachteile verschiedener Methoden zur Therapie des Prostatakarzinoms auf – auch der IRE. MRT-Untersuchungen und Gewebeproben ergaben, dass Herr W.'s Prostata von drei kleinen und einem größeren Tumor befallen war, die aber offensichtlich noch nicht gestreut hatten. Eine gute Ausgangslage, um die IRE anzuwenden.

Vier Wochen später behandelten wir Günther W. mit dem neuen Verfahren. Unter Vollnarkose brachten wir, präzise gesteuert und mit dreidimensionaler MRT sowie Ultraschallbildern kontrolliert, Elektroden durch seinen Beckenboden in die erkrankten Teile der Prostata ein. Mittels elektrischer Hochspannungspulse, verabreicht über die Elektroden, zerstörten wir die entarteten Zellen. Als Herr W. anderthalb Stunden wieder erwachte, spürte er zwar den Blasenkatheter, aber nichts vom Eingriff. Am nächsten Morgen zeigte eine MRT-Untersuchung, dass die Krebsherde verschwunden waren. Nur 24 Stunden nach der Behandlung konnte Herr W. wieder nach Hause gehen. Die Kontrolluntersuchungen seither belegen, dass der Krebs besiegt ist – ohne größere Nebenwirkungen. Herrn W.'s Geschichte verdeutlicht: Trotz aller Schwierigkeiten in der Krebsmedizin kann es nach wie vor gelingen, neue und wirksame Behandlungen zu entwickeln.

AUF EINEN BLICK

HEILEN MIT ELEKTRIZITÄT

1 **Irreversible Elektroporation (IRE)** ist ein neues Verfahren zur Behandlung von Tumoren. Es beruht darauf, mit starken Elektropulsen die Membranen von Tumorzellen zu durchlöchern, so dass die Zellen irreversibel geschädigt und zerstört werden.

2 Die IRE erfordert weder den Einsatz des Skalpells noch eine Bestrahlung oder Erhitzung des Gewebes. Sie lässt die **nicht-zelluläre Gewebearchitektur** unbeschädigt und erhält so wichtige Organ-, Gefäß- und Nervenstrukturen. Typische Nebenwirkungen der Tumorbehandlung – insbesondere Entzündungen, Vernarbungen und Wundschmerzen – werden bei der IRE minimiert.

3 Das neue Verfahren eignet sich auch zur Bekämpfung solcher Tumoren, die sich mit anderen Methoden nur unzureichend behandeln lassen. Ärzte setzen es bereits erfolgreich unter anderem gegen **Prostatakarzinome** ein.



MIT FOLGEN DES PROSTATA-CENTER FRANKFURT/OFENBACH

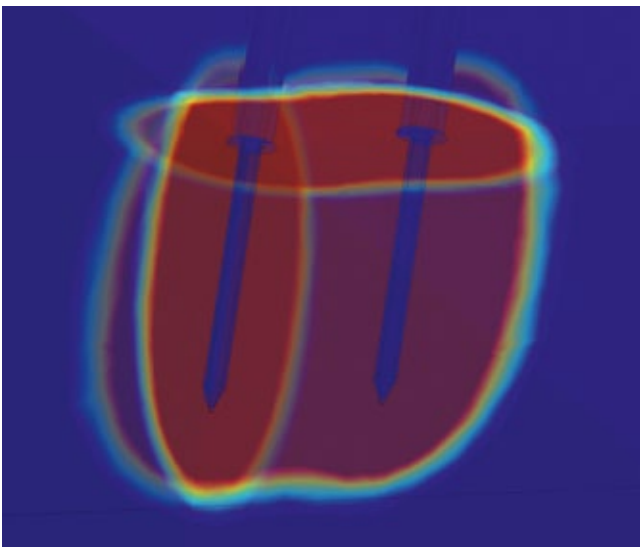
Das ist auch dringend notwendig, denn Tumorerkrankungen sind die zweithäufigste Todesursache in Deutschland (nach Herz-Kreislauf-Komplikationen). Oft gelingt es nicht, sie zurückzudrängen oder ihr Fortschreiten hinreichend zu verlangsamen, weil die Behandlungsverfahren sich nicht selektiv genug gegen Krebszellen richten. Tumoren sind in der Regel eng mit körpereigenen Strukturen wie Blutgefäßen, Nerven und lebensnotwendigen Organen verflochten. Operation, Bestrahlung und Chemotherapie verursachen deshalb häufig erhebliche Kollateralschäden an diesen Strukturen, können den gesamten Körper beeinträchtigen und ihrerseits zu Invalidität und Tod führen.

Die irreversible Elektroporation verspricht hier Abhilfe. Sie zerstört Krebszellen mit Hilfe elektrischer Pulse. Das Verfahren nutzt die Tatsache aus, dass kurzzeitig einwirkende, starke elektrische Felder die Durchlässigkeit der Zellmembran erhöhen. Dabei entstehen regelrechte Löcher oder Poren in der Lipidschicht, welche die Zelle nach außen abgrenzt, was der Methode ihren Namen gab. Abhängig von der elek-

Ärzte behandeln einen Prostatatumor mit irreversibler Elektroporation (IRE). Der Patient liegt unter Vollnarkose auf dem OP-Tisch, während der Operateur die Elektroden durch den Beckenboden hindurch in die Prostata schiebt.

trischen Feldstärke der Pulse, ihrer Länge und Anzahl schließen sich die Öffnungen entweder wieder, so dass die Zelle überlebt (reversible Elektroporation) – oder sie nehmen derart überhand, dass die Barrierefunktion der Membran zusammenbricht, was zum Tod der Zelle führt (irreversible Elektroporation). Dieser Mechanismus ermöglicht, Tumoren im Körperinneren zu zerstören.

Dass sich Bakterien und Hefen in Flüssigkeiten durch starke elektrische Felder abtöten lassen, weiß man schon länger. Auch das Durchlässigmachen von Zellmembranen mit Hilfe elektrischer Pulse ist in der Zell- und Molekularbiologie mittlerweile ein etabliertes Verfahren. Es erlaubt, große Moleküle wie DNA-Fragmente oder Arzneistoffe durch die sonst schwer passierbare Zellmembran zu schleusen. Als medizinische Anwendung wurde die reversible Elektroporation ab 1993 zur Unterstützung von Chemotherapien eingesetzt – in Form der so genannten Elektrochemotherapie (ECT). Hier setzen die Mediziner elektrische Pulse ein, um Poren in den Membranen von Tumorzellen zu erzeugen und dadurch Chemotherapeutika mit großen Molekülabmessungen den Zutritt ins Innere der Zelle zu erlauben. Die Methode hat den Vorteil, dass der Arzneistoff nur in der Nähe der eingebrachten Elektroden wirkt – dort also, wo das elektrische Feld hinreichend stark ist, um die Zellmembranen zu durchlöchern. Zellen außerhalb dieses Bereichs sind vor der Wirkung des Therapeutikums geschützt, weil es nicht durch ihre Membra-



MICHAEL STEHUNG, ENRIC COUNTER UND BORIS RUBINSKY

Berechnete Verteilung des elektrischen Felds um zwei IRE-Elektroden. Durch geeignetes Positionieren und Ansteuern der Elektroden wird die Feldgeometrie auf die Tumormform abgestimmt.

nen treten kann. Die bei Chemotherapien häufigen Nebenwirkungen auf den gesamten Körper bleiben somit weitgehend aus.

Vor neun Jahren zeigte einer von uns (Rubinsky) gemeinsam mit Rafael V. Davalos von der Virginia Polytechnic Institute and State University (USA) und weiteren Forschern, dass sich Weichgewebe im Körper von Säugetieren mittels irreversibler Elektroporation zuverlässig und nebenwirkungsarm zerstören lässt. Demnach genügen acht elektrische Pulse mit einer Feldstärke von je 60 000 Volt pro Meter und einer Länge von je 100 Mikrosekunden, um Leberzellen in lebenden Ratten irreversibel zu durchlöchern. Vor acht Jahren wurde die Methode unter dem Produktnamen »NanoKnife« von der US-Arzneimittelbehörde FDA zugelassen und steht seither für die Anwendung am Menschen zur Verfügung.

Um lebendes Gewebe im Körper von Patienten zu zerstören, setzen die Mediziner üblicherweise elektrische Pulse mit einer Feldstärke von 150 000 Volt pro Meter ein. Da die Elektroden bis zu zwei Zentimeter voneinander entfernt

sind, benötigt man hierfür Generatorspannungen von bis zu 3000 Volt bei Stromstärken von 30 bis 50 Ampere. Trotz der hohen Potenzialdifferenzen und der großen elektrischen Leistungen erhitzt sich das Gewebe unter diesen Bedingungen kaum. Das erklärt sich aus der geringen Dauer der Pulse von etwa 100 Mikrosekunden (millionstel Sekunden). Allenfalls direkt an der Oberfläche der Elektroden lässt sich eine Gewebszerstörung durch Erhitzung (Thermokoagulation) beobachten. Auch eine lebensbedrohliche Irritation des Herzmuskels, die gefürchtete Folge eines Stromschlags, tritt bei der IRE nicht auf – zum einen, weil die elektrischen Felder so kurz einwirken, zum anderen, weil sie lediglich in Elektrodennähe stark sind.

Bei der chirurgischen Entfernung bösartiger Tumoren ist es in der Regel kaum möglich, Krebszellen und gesunde Organstrukturen vollständig voneinander zu trennen. Daher lassen sich Wucherungen, die wichtige Blutgefäße oder Nerven, das Gehirn, das Rückenmark oder die ableitenden Gallenwege der Leber befallen haben, per Operation meist nicht

Ablauf einer Elektroporation

Folgende fünf Phasen lassen sich unterscheiden:

PHASE 1: Erhöhung der elektrischen Spannung über der Membran bis zum Einsetzen der Instabilität

Durch Anlegen eines äußeren elektrischen Felds (E, grüner Pfeil) verschieben sich binnen weniger millionstel Sekunden zahlreiche Ionen inner- und außerhalb der Zelle. Die einige millionstel Millimeter dicke Zellmembran lädt sich wie ein Kondensator auf – wie stark, hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem vom Zellradius und der Orientierung des betrachteten Membranabschnitts im äußeren Feld. Die entstehende Potenzialdifferenz über der Zellmembran überlagert sich mit dem natürlichen Transmembranpotenzial zu einer Gesamtspannung zwischen Zellinnen- und Zellaußenseite (rote Dreiecke). Diese erzeugt ein elektrisches Feld in der Zellmembran, in dem sich die Kopfgruppen der Phospholipide ausrichten.

Je stärker das äußere elektrische Feld, umso größer ist die induzierte Potenzialdifferenz über der Zellmembran und umso mehr nehmen ihre Phospholipide eine gekippte Stellung ein. Nähert sich die elektrische Feldstärke in der Membran einem kritischen Wert, beginnt die Zellhülle einzubrechen.

PHASE 2: Überschreiten des kritischen Membranpotenzials und elektrischer Durchschlag

Bei Erreichen eines kritischen Membranpotenzials erhöht sich die Durchlässigkeit der Zellmembran schlagartig. Es entstehen Poren in der Zellhülle. Die elektrische Feldstärke bestimmt dabei über die Ausdehnung des durchlöcherten Areal, die Einwirkdauer des elektrischen Felds hingegen über die Dichte der Zellmembrandefekte in den betroffenen Regionen. Je länger die überkritischen Elektropulse andauern, umso durchlässiger wird die Membran.

PHASE 3: Reorganisation der Membran nach Unterschreiten des kritischen Membranpotenzials – Rückkehr zur Membranintegrität

Sobald die Stärke des äußeren elektrischen Felds wieder unter den Schwellenwert für die Porenbildung absinkt, schließen sich die meisten (kleinen) Poren innerhalb einiger tausendstel Sekunden. Die Zellmembran nimmt erneut den (thermodynamisch stabilen) Ausgangszustand an, bleibt aber begrenzt durchlässig.

PHASE 4: Porenverschluss und – soweit möglich – Reparatur der Membran

Während sich Poren in Lipidvesikeln fast unverzüglich nach dem Abklingen des Elektropulses schließen, bleiben Membranen von lebenden Zellen mehrere Minuten lang erhöht durchlässig. Bei niedrigen Temperaturen und verminderter Stoffwechselaktivität der Zelle kann sich die Zeit bis zum Wiederverschluss sogar auf mehrere Stunden verlängern – ein Indiz dafür, dass es sich bei der Elektroporation um mehr handelt als um ein bloßes Einbrechen der Lipiddoppelschicht. Wahrscheinlich ist das Zytoskelett daran beteiligt. Gelingt es der Zelle nicht mehr, die Membranporen zu schließen, spricht man von irreversibler Elektroporation.

PHASE 5: Rückkehr in den Ausgangszustand beziehungsweise Abtransport der Zellreste

Strukturelle und funktionelle Veränderungen an Membranen von lebenden Zellen lassen sich noch Stunden nach einer Elektroporation beobachten. Wurde eine Zelle im Körpergewebe irreversibel geschädigt, nehmen Fresszellen ihr unbrauchbar gewordenen Zellmaterial auf.

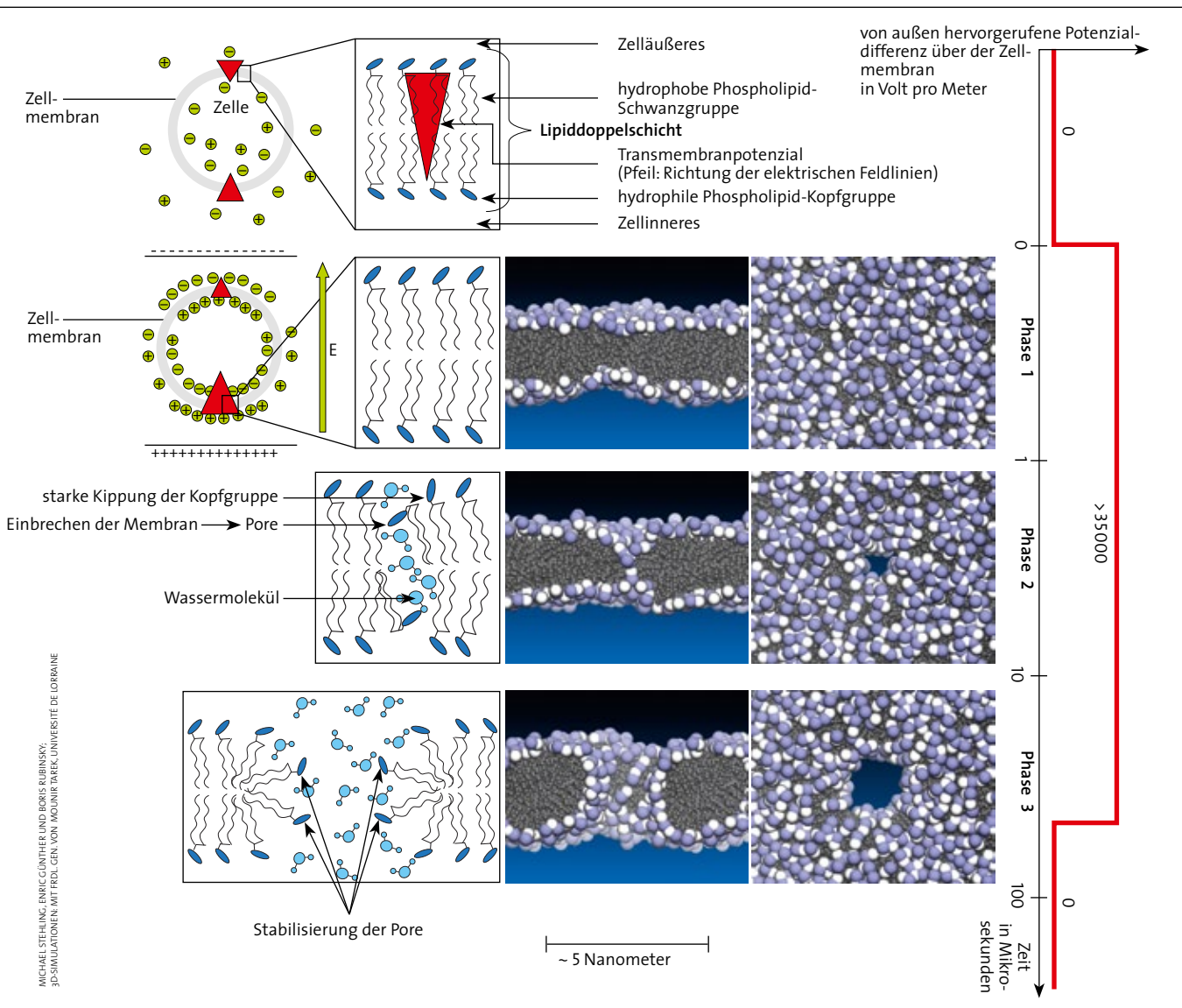
komplett entfernen. Ähnliches gilt für die Strahlentherapie. Im Gegensatz hierzu ermöglicht die irreversible Elektroporation, Tumoren zu zerstören und dabei die Architektur von Geweben und Organen zu erhalten – obwohl das Verfahren normale und bösartige Zellen gleichermaßen abtötet.

Selektiver Vernichtungsschlag

Dieser auf den ersten Blick überraschende Befund lässt sich am besten durch den Vergleich mit einem Haus erklären, das aus einem Stahlgerüst und Mauersteinen erbaut ist. Während die herkömmlichen Krebstherapien – Operation und Bestrahlung – einer Sprengung des Gebäudes gleichkommen, entspricht die irreversible Elektroporation einer Entfernung der Mauersteine unter Erhalt des Stahlgerüsts. Nach dem Einsetzen neuer Steine ist das Haus wieder intakt. Bei der IRE bleiben nämlich alle nichtzellulären Bestandteile des Körpergewebes – Kollagen- und Elastinfasern, Basalmembranen und andere Komponenten des Zellzwischenraums – erhalten, und mit ihnen die Gerüststruktur des Gewebes bezie-

hungsweise Organs. Nach der Behandlung wandern gesunde Zellen aus anderen Bereichen des Körpers entlang dieser Leitstrukturen in die Region des ehemaligen Tumors ein und ersetzen die dort verloren gegangenen Zellen. Auf diese Weise bleiben etwa Blutgefäße im behandelten Körperareal erhalten. Auch andere anatomische Strukturen mit ausgeprägtem nichtzellulärem Gerüst können sich nach der IRE selbstständig erneuern: Gallen- und Harnwege, Bronchien, Magen- und Darmwand sowie Muskeln. Es muss jedoch noch genauer erforscht werden, unter welchen Bedingungen sich die entsprechenden Organe bei der IRE so weit wie möglich schonen lassen.

Im klinischen Alltag verabreichen die Mediziner die lokalen Elektropulse für die IRE über mehrere – typischerweise zwei bis sechs – millimeterdicke Elektroden, die nahe dem Tumor oder in ihm platziert werden. Dies geschieht unter sterilen Bedingungen und unter Vollnarkose. Zwischen jeweils zwei Elektroden baut der Pulsgenerator eine entsprechende Potenzialdifferenz auf. Ein Computer berechnet, wie



MICHAEL STEHLING, ENRIKO GÜNTHER UND BOBIS RUBINSKY, 3D-SIMULATIONEN MIT FROIL GEN VON MOUJIB TAREK, UNIVERSITÄT DE LOUVAIN

die Elektroden angesteuert werden müssen, um die Zellen im anvisierten Gewebeareal mit hinreichend großer Feldstärke zu »treffen«. Damit es infolge der intensiven elektrischen Pulse nicht zu unerwünschten Muskelkontraktionen kommt, erhalten die Patienten vor der Behandlung ein Medikament zur Muskelentspannung.

Da beim Anordnen der Elektroden diverse Dinge zu beachten sind, ist ihre Platzierung im Tumor beziehungsweise im zu behandelnden Organ der zeitaufwändigste Teil einer IRE-Behandlung. Sie kann mehrere Stunden in Anspruch nehmen, während die Elektroporation selbst nur wenige Minuten dauert. Der Elektrodenabstand muss bei aktueller Ausführung der Behandlungstechnik weniger als zwei Zentimeter betragen; zu berücksichtigen sind ferner die Ausrichtung der Elektroden zueinander und die Länge, auf der sie Kontakt mit dem Gewebe haben. Die Herausforderung für den behandelnden Arzt besteht darin, durch optimale Anordnung der Elektroden das Behandlungsfeld mit der

Tumor- beziehungsweise Organform in Einklang zu bringen. Dies erfordert millimetergenaues Arbeiten, meist unter Sichtkontrolle mittels bildgebender Verfahren (Ultraschall und/oder Computertomografie).

Die Zellen, die infolge der elektrischen Behandlung irreversible Schäden erfahren, vollziehen eine Art programmierten Zelltod – eine therapeutisch hervorgerufene Apoptose. Der pathologische Untergang von Zellen und Geweben hingegen, die so genannte Nekrose, tritt relativ selten auf. Darum lassen sich bei der irreversiblen Elektroporation lästige Nebenwirkungen wie Wundschmerz und Narbenbildung, die durch nekrosebedingte Entzündungen verursacht werden, meist vermeiden. Oft sind die Patienten nach der Behandlung überrascht, dass sie weder Schmerzen spüren noch sonstige körperliche Hinweise auf den zurückliegenden Eingriff an sich wahrnehmen.

Für Erstaunen sorgt immer wieder, wie scharf begrenzt die IRE-Region ist. Der Übergang zwischen den Zonen irrever-

Elektroporation im Detail

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Elektroporation sind bislang meist an künstlichen Lipiddoppelschichten und daraus geformten Bläschen (so genannten Vesikeln) durchgeführt worden. Dies erlaubt gewisse Rückschlüsse auf die Vorgänge an echten Zellen, denn deren Membranen haben einen ähnlichen Aufbau. Eine Zellmembran setzt sich im Wesentlichen aus Phospholipiden zusammen, phosphorhaltigen Lipidmolekülen, die aus einer wasserlöslichen (hydrophilen) Kopfgruppe und einem wasserunlöslichen (hydrophoben) Kohlenwasserstoffschwanz bestehen. In wässriger Umgebung lagern sich Phospholipide zu einer Doppelschicht zusammen, in der die hydrophoben Schwanzgruppen nach innen und die hydrophilen Kopfgruppen nach außen ragen (siehe Kasten S. 42/43). Weil das Innere der Doppelschicht eine geringe dielektrische Leitfähigkeit besitzt und Wasser abweisend ist, können hier kaum wasserlösliche Moleküle und Ionen durchtreten; die Doppelschicht wirkt somit als elektrischer Isolator. Zugleich ist sie sehr flexibel und mechanisch schwer zu zerstören.

Echte Zellmembranen bestehen allerdings nicht nur aus Lipiden, sondern enthalten zusätzlich noch eingelagerte Proteine-moleküle. Das wirkt sich in komplexer Weise auf ihre mechanischen Eigenschaften und ihre elektrische Leitfähigkeit aus. Untersuchungen an Lipiddoppelschichten und Vesikeln geben die Verhältnisse bei echten Zellen daher nur vereinfacht wieder.

Dennoch lässt sich eine Zelle in guter Näherung als isolierende Hülle in einem elektrisch leitfähigen, wässrigen Medium beschreiben. Wird sie einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt, kommt es zu einer Verschiebung von Ladungen, die eine elektrische Spannung über der Membran entstehen lässt – die Zellmembran lädt sich wie ein Kondensator auf. Die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Aufladung liegt bei einigen

Mikrosekunden (millionstel Sekunden); sie hängt von den dielektrischen Eigenschaften der Zellmembran sowie von den Leitfähigkeiten des intra- und extrazellulären Raums ab.

Im Gegensatz zu künstlichen Lipidvesikeln weisen lebende Zellen eine natürliche Potenzialdifferenz über ihrer Zellmembran auf, das so genannte Transmembranpotenzial. Es hat einen Betrag von einigen hundertstel Volt, erfüllt wichtige physiologische Funktionen und wird von Ionenpumpen in der Zellmembran aktiv aufrechterhalten. Sobald ein äußeres elektrisches Feld einwirkt, überlagert die von ihm hervorgerufene Spannungsdifferenz über der Zellmembran das natürliche Transmembranpotenzial. Dies führt zu einer asymmetrischen Ladungsverteilung: Auf jener Zellseite, die zum »Plus-« Pol des äußeren Felds weist, erhöht sich die Spannung über der Zellmembran (Hyperpolarisation), während sie auf der gegenüberliegenden Seite abnimmt (Depolarisation). Übersteigt das Transmembranpotenzial einen Wert von 0,2 bis 1,1 Volt, so kommt es an der entsprechenden Stelle zum elektrischen Durchschlag: Die Zellmembran bricht ein, und es entstehen Löcher beziehungsweise Poren in ihr.

Falls die elektrischen Pulse nicht zu stark sind und nicht zu lange einwirken, kann die Zelle den Schaden wieder beheben. Bei höheren elektrischen Feldstärken, längerer Pulsdauer oder wiederholtem Verabreichen der Pulse wird die Zellmembran jedoch irreversibel verändert. Sie kann nun nicht mehr den lebensnotwendigen Ionen- und Molekülgradienten zwischen »innen« und »außen« aufrechterhalten, und die Zelle geht zu Grunde. Eine wesentliche Rolle dabei dürfte das übermäßige Eindringen von Wasser spielen. Elektronenmikroskopische Aufnahmen, die nach einer irreversiblen Elektroporation gemacht wurden, zeigen Membranstücke von zerplatzten Zellen.

sibler und reversibler Zellschädigung ist nur ein bis zwei Zeldurchmesser breit, also wenige Mikrometer. Im klinischen Alltag jedoch lassen sich die Abmessungen des irreversibel geschädigten Bereichs derzeit bestenfalls millimetergenau vorgeben. Um sicherzustellen, dass ein Tumor vollständig innerhalb dieser Zone liegt, muss das Behandlungsfeld deshalb mit ausreichendem Sicherheitsabstand über den Tumorrand hinausgehen. Das stellt aber selten ein Problem dar.

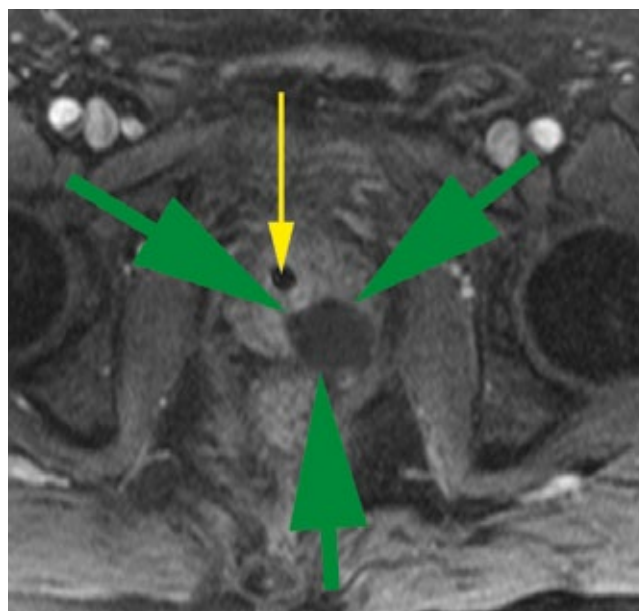
Bisher haben Mediziner weltweit mehrere tausend Patienten mit der irreversiblen Elektroporation behandelt. Die meisten dieser Eingriffe erfolgten in Körperregionen wie Lunge, Leber oder Niere, in denen Ärzte häufig Primärtumoren oder Metastasen entfernen – und zwar mit den verschiedensten Methoden, was aussagekräftige Vergleiche zwischen den Verfahren erlaubt. Die IRE, so zeigt sich dabei, hat den Vorteil, dass sie das Tumorgewebe sehr zuverlässig entfernt, und zwar bei gleichzeitigem Erhalt wichtiger anatomischer Strukturen. Demgegenüber hat beispielsweise die Thermoablation – das Zerstören von Körpergewebe durch Wärmebehandlung – den Nachteil, Krebszellen in direkter Nachbarschaft von Blutgefäßen zu schonen. Denn das durchströmende Blut sorgt dort für eine weitgehend gleich bleibende Temperatur, weshalb der kritische, zum Abtöten der Krebszellen notwendige Thermometerwert nicht erreicht wird (»Heat-Sink-Effekt«). Da die irreversible Elektroporation nicht von lokalen Temperaturen abhängt, entfällt dieser unerwünschte Effekt bei ihr.

Selektiver Vernichtungsschlag

In den Fokus der IRE-Mediziner rücken auch Tumorerkrankungen, die bislang nur unzureichend oder überhaupt nicht behandelt werden konnten. Dazu gehören etwa Pankreaskarzinome (Bauchspeicheldrüsentumoren), die sich chirurgisch meist nicht entfernen lassen, weil sie mit lebenswichtigen Blutgefäßen im Bauchraum verflochten sind. Erste IRE-Behandlungen von Patienten mit nicht operierbaren Pankreaskarzinomen deuten darauf hin, dass die irreversible Elektroporation das entartete Gewebe erfolgreich zerstört, ohne dabei lebenswichtige Gefäße und gesunde Teile der Bauchspeicheldrüse in Mitleidenschaft zu ziehen. Ähnliches gilt für Tumoren in Gesicht und Hals, im Herzen, in Darm, Leber, Niere sowie möglicherweise auch in Eierstöcken, Knochen und Gehirn. Auch sie lassen sich oft schlecht von Gefäßen und Nerven trennen, und auch bei ihnen führte die IRE-Therapie zu viel versprechenden Ergebnissen.

Unsere eigenen Untersuchungen haben ergeben, dass die IRE Hohlorgane wie Dünn- und Dickdarm, Rektum und Harnblase nicht ernsthaft beschädigt. MRT-Aufnahmen dieser Organe nach Behandlung mit entsprechenden Elektropulsen zeigen eine vorübergehende Schwellung (Ödem), die sich innerhalb weniger Tage zurückbildet.

Besonders problematisch sind Tumoren im Bereich von Sphinkteren, kreisförmigen Schließmuskeln, die unter anderem die Entleerung der Harnblase und des Darms kontrollieren. Bei Krebsbefall war es bisher meist nicht möglich, die



Nach der IRE-Behandlung eines Prostata Tumors ist dort, wo der Tumor saß, kein lebendes Gewebe mehr nachweisbar (grüne Pfeile; der gelbe Pfeil markiert einen Harnblasenkatheter). Der Körper baut das zerstörte Gewebe meist binnen sechs Monaten vollständig ab.

Funktion dieser Muskeln zu erhalten – mit der Folge von Inkontinenz. Auch hier zeigen erste Erfahrungen, dass der Blasensphinkter sowie der Schließmuskel des Afters bei der IRE-Therapie funktionell intakt bleiben, vermutlich weil ihre Gewebearchitektur nicht zerstört wird. Inwieweit das ebenso für große Wucherungen gilt und ob eine Wiederbesiedlung der verbliebenen Zellzwischenraumstrukturen durch verbleibende Muskelzellen erfolgt oder gegebenenfalls durch Verpflanzen von Stammzellen verbessert werden kann, müssen künftige Studien beantworten.

Konventionell behandelte Patienten, bei denen der Tumor wiederkehrt, können ebenfalls von der IRE profitieren. So ist es nach einer Strahlenbehandlung oft nicht möglich, erneut zu bestrahlen, da die maximal erlaubte Dosierung sonst überschritten würde. Zudem führen Strahlentherapien häufig zu chronischer Entzündung, Gewebebrüchigkeit und Narben, was spätere chirurgische Eingriffe erschwert oder unmöglich macht. Auch die OP selbst verkompliziert Folgeeingriffe, indem sie die anatomischen Verhältnisse verändert und zu Vernarbungen führt – was ebenso auf Thermoablationsverfahren zutrifft. In solchen Fällen bietet die IRE eine zusätzliche Therapiemöglichkeit, da es für ihre Anwendung keine wesentlichen Einschränkungen gibt.

Schon bald könnte die IRE zu einem Durchbruch bei der Behandlung von Prostatakarzinomen führen. Diese Tumoren sind sehr häufig und kommen im fortgeschrittenen Lebensalter wahrscheinlich bei mehr als jedem zweiten Mann vor. Meist sind sie relativ ungefährlich und bilden keine Metastasen. Trotzdem besteht ihre Standardbehandlung immer

noch in der chirurgischen Totalentfernung und/oder Bestrahlung der Prostata. Beide Verfahren zeitigen jedoch erhebliche Nebenwirkungen (siehe SdW 10/2012, S. 28).

Als Alternative setzen die Ärzte zunehmend so genannte fokale Behandlungsmethoden ein, welche die Krebsherde in der Prostata zerstören, die gesunden Anteile des Organs jedoch erhalten. Meist geschieht das durch lokales Erhitzen oder Einfrieren des Gewebes. Die bekannteste Methode ist die so genannte Hifu (High Energy Focussed Ultrasound), bei der fokussierter Ultraschall das Gewebe so stark erhitzt, dass dessen Eiweißanteile denaturieren. Der Nachteil des Verfahrens liegt darin, dass sich die Umgebung des Tumors mit erwärmt. Da die meisten Karzinome in der Außenzone der Prostata wachsen, in der Nähe empfindlicher Nerven und des Blasen-schließmuskels, besteht die Gefahr, dass diese Strukturen bei der Hifu in Mitleidenschaft gezogen werden – was dann wieder oft zu Impotenz und Inkontinenz führt. Erhitzt man andererseits schonend, um Nerven und Blasen-schließmuskel zu erhalten, schädigt man den Tumor unter Umständen nicht ausreichend stark, so dass der Krebs später zurückkehren kann. Das ist insbesondere deshalb ein Problem, weil die Wärmebehandlung zu erheblichen Vernarbungen führt, die Folgebehandlungen erschweren oder unmöglich machen.

Keine Kollateralschäden

Die klinische Anwendung der irreversiblen Elektroporation könnte dies nun ändern. Bereits vor sieben Jahren haben der Radiologe Gerry Onik (damals am Florida Hospital) und einer von uns (Rubinsky, damals an der Hebrew University of Jerusalem) die IRE zur fokalen Therapie von Prostatakarzinomen eingesetzt. Sie zeigten, dass sich mit diesem Verfahren das erkrankte Gewebe nachhaltig zerstören lässt, ohne dabei wichtige anatomische Strukturen wie Blutgefäße oder Drüsengänge zu schädigen (siehe Bild S. 45).

Am Prostata-Center in Offenbach sind in den zurückliegenden zweieinhalb Jahren mehr als 100 Patienten mit diagnostiziertem Prostatakarzinom erfolgreich mit IRE behandelt worden. Obwohl die Betroffenen sich in sehr unterschiedlichen Erkrankungsstadien befanden, gelang es bei allen, den Krebs zuverlässig zu zerstören und gleichzeitig die Funktion des Blasen-schließmuskels zu erhalten. Auch die Erektionsfähigkeit blieb bei allen Patienten erhalten, sofern sie nicht schon vor der Behandlung eingeschränkt gewesen war. Bei einigen Betroffenen war die gesamte Prostata von Tumorgewebe durchwuchert und musste daher komplett behandelt werden, was zu vorübergehender Impotenz führte. Typischerweise kehrte die Erektionsfähigkeit bei diesen Patienten jedoch nach sechs bis acht Monaten zurück.

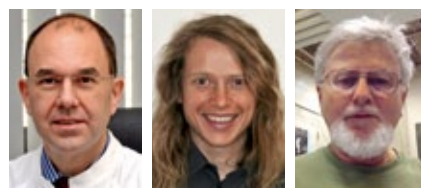
Als weitere Vorteile des Verfahrens haben sich erwiesen, dass Schäden an Blase und Darm ausbleiben, kaum Wundschmerzen und Vernarbungen auftreten sowie nur wenige Geräte in den Körper eingeführt werden müssen. Zudem lässt die IRE die Möglichkeit offen, den Patienten später mit einem beliebigen anderen Verfahren – ob Strahlentherapie, Wärmebehandlung oder wieder IRE – nachzubehandeln.

Mit der irreversiblen Elektroporation steht den Ärzten ein neues Verfahren zur Tumorbehandlung zur Verfügung, das wichtige Organstrukturen erhält und unerwünschte Nebenwirkungen minimiert. Damit lassen sich künftig mehr Patienten erfolgreich therapieren. Klare Vorteile weist die IRE schon heute bei der Behandlung von Tumoren auf, die auf Grund ihrer anatomischen Lage oder ihrer physiologischen Eigenschaften nicht oder nur unzureichend auf Chirurgie, Strahlen- oder Chemotherapie ansprechen. In der Prostatakrebstherapie hilft sie, die oft schwer wiegenden Nebenwirkungen bisheriger Behandlungsverfahren zu vermeiden.

Doch gibt es noch viel zu tun. Die Technik der IRE-Geräte steckt noch in den Kinderschuhen, nicht zuletzt wegen der langwierigen Zulassungsverfahren für Medizinprodukte. Auch verfügen nur wenige Experten über ausreichend Erfahrung, wie sich das Behandlungsverfahren für den Einsatz am einzelnen Patienten optimieren lässt. Zudem mangelt es bisher an abgeschlossenen klinischen Studien zu der Frage, bei welchen Erkrankungen die IRE einen Behandlungsvorteil gegenüber anderen Verfahren bringt. Letzteres ist dem Umstand geschuldet, dass klinische Studien viel Zeit in Anspruch nehmen und schlüssige Resultate oft erst nach zehn oder mehr Jahren vorliegen.

Was die irreversible Elektroporation grundsätzlich nicht leisten kann, ist die selektive Zerstörung von Tumorzellen im Behandlungsfeld unter Erhalt dortiger gesunder Zellen. Dies wird anderen, noch in Entwicklung befindlichen Verfahren vorbehalten bleiben, etwa in der Krebsimmuntherapie. Die IRE stellt jedoch in der Zwischenzeit eine sinnvolle Ergänzung im Methodenspektrum der Krebsmedizin dar. ~

DIE AUTOREN

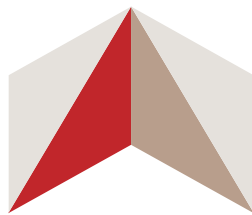


Michael K. Stehling (links) arbeitet als außerordentlicher Professor an der Boston University School of Medicine und ist Direktor am Prostata-Center in Offenbach. An letzterer Einrichtung forscht auch der Physiker **Enric Günther** (Mitte). **Boris Rubinsky** ist Professor of Mechanical Engineering an der University of California in Berkeley.

QUELLEN

Golberg, A., Yarmush, M.L.: Nonthermal Irreversible Electroporation: Fundamentals, Applications and Challenges. In: IEEE Transactions on Biomedical Engineering 60, S. 707–714, 2013
Lee, E.W. et al.: Irreversible Electroporation: A Novel Image-Guided Cancer Therapy. In: Gut and Liver 4, S99–S104, 2010
Rubinsky, B. et al.: Irreversible Electroporation: A New Ablation Modality – Clinical Implications. In: Technology in Cancer Research and Treatment 6, 1, 2006

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1224868



GEORG VON HOLTZBRINCK PREIS FÜR WISSENSCHAFTSJOURNALISMUS

AUSSCHREIBUNG 2014

Der Preis wurde anlässlich des 150-jährigen 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 allgemein verständlich 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 Jahrgang 1985 oder jünger sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit je 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 bis zum **1. April 2014** mit **3 Beiträgen (Print) bzw. 2 – 3 Beiträgen (Elektronische Medien)** aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group

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,
Holtzbrinck Publishing Group

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.

PROF. 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.

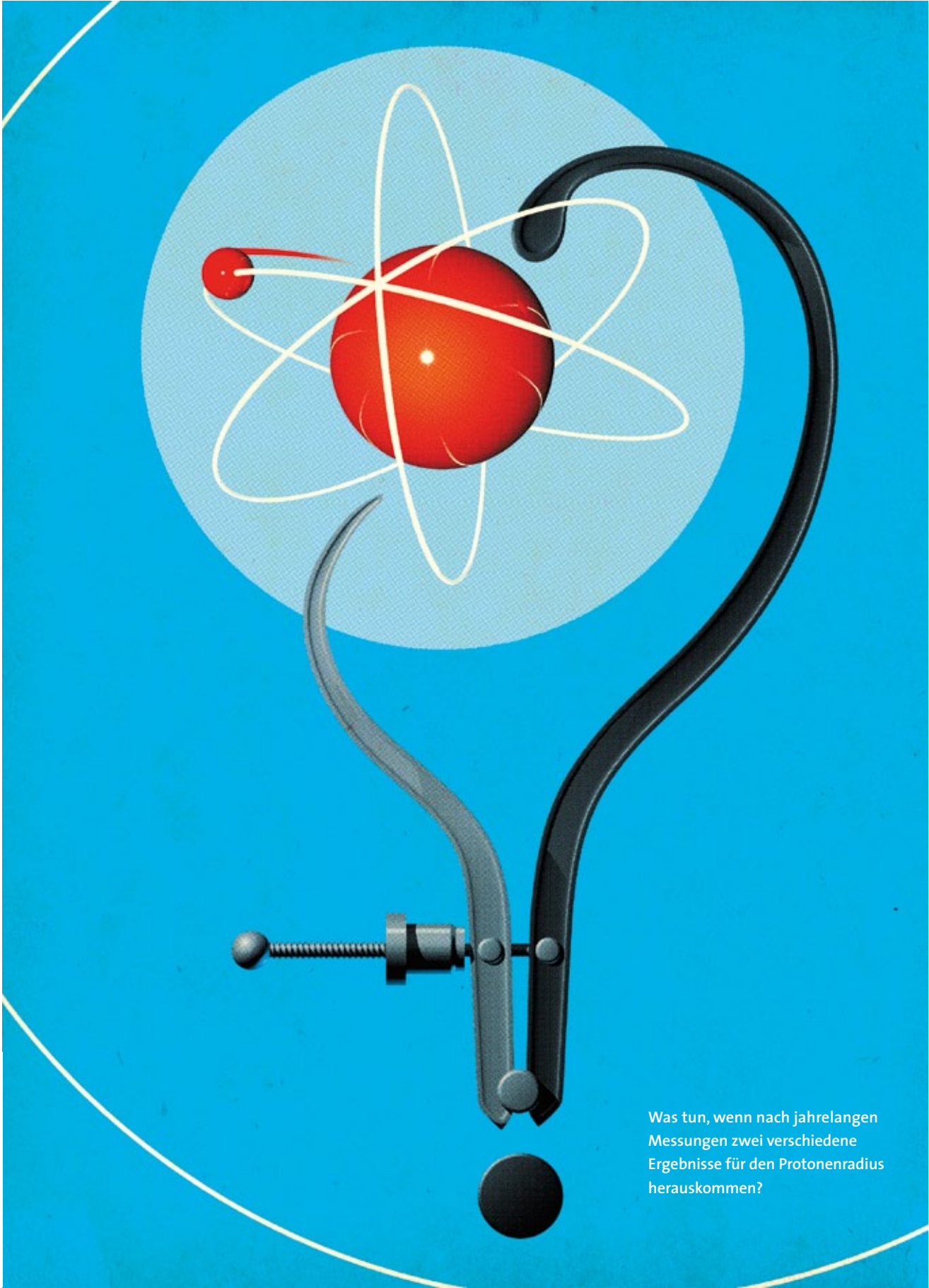


ILLUSTRATION: JAW/SCOBURN

Was tun, wenn nach jahrelangen Messungen zwei verschiedene Ergebnisse für den Protonenradius herauskommen?

TITELTHEMA: KERNPHYSIK

Das Proton-Paradoxon

Zwei ausgeklügelte Experimente lieferten verschiedene Werte für den Radius des Protons. Messfehler halten die Forscher mittlerweile für äußerst unwahrscheinlich. Sind sie auf ein bislang unbekanntes physikalisches Phänomen gestoßen?

Von Jan C. Bernauer und Randolph Pohl

Das Proton müsste eigentlich längst perfekt verstanden sein: Es ist einer der Hauptbestandteile aller Materie, die uns umgibt, der Brennstoff der Sterne im Universum und der Kern des Wasserstoffatoms, des am besten untersuchten Atoms überhaupt. Untersuchungen des Protons und des Wasserstoffatoms lösten zudem vor über 100 Jahren die quantenphysikalische Revolution aus. Das Teilchen wurde in zahllosen Experimenten genauestens vermessen, und auch am Large Hadron Collider (LHC) des europäischen Teilchenforschungszentrums CERN bei Genf sind es Protonen, die wir bei höchsten Energien miteinander kollidieren lassen, um neue Teilchen wie das Higgs-Boson entstehen zu lassen.

Kann das Proton also keine großen Überraschungen mehr für uns bereit halten? Weit gefehlt. Zusammen mit anderen Physikern haben wir beide in den letzten Jahren die bislang präzisesten Messungen des Radius dieses Partikels vorgenommen. Anfangs erwarteten wir, durch die 20-fach höhere Genauigkeit dem lange bekannten Wert des Protonenradius lediglich die ein oder andere Nachkommastelle hinzuzufügen. Das war ein Irrtum. Vielmehr lieferten unsere beiden Experimente, bei denen unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz kamen, zwei Werte, die deutlich voneinander abweichen: nämlich um mehr als das Fünffache der so genannten kombinierten Messunsicherheit. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies nur ein Zufall ist, beträgt weniger als eins in einer Million.

So viel steht fest: Irgendetwas ist da faul. Entweder begreifen wir das Proton nicht so gut, wie wir dachten, oder wir verstehen die fundamentale Physik nicht, auf der unsere Experimente beruhen. Es ist, als hätten wir uns in eine neue Welt vorgewagt und wären auf unbekannte, völlig unerklärliche Phänomene gestoßen.

Unsere Geschichte beginnt auf der kleinen italienischen Insel San Servolo in der Lagune von Venedig, die man mit dem Motorboot in zehn Minuten vom Markusplatz aus erreicht. Bis in die späten 1970er Jahre beherbergte sie ein Psychiatriekrankenhaus, inzwischen finden auf der wenige hundert Meter messenden Insel regelmäßig wissenschaftliche Konferenzen statt. 2006 kamen hier Physiker zusammen,

um sich neue Präzisionsexperimente für diejenige Theorie auszudenken, die innerhalb der Physik – wenn nicht sogar in der gesamten Wissenschaft – als die am besten verstandene gilt: die Quantenelektrodynamik, kurz QED.

Ihre Ursprünge reichen zurück bis ins Jahr 1928. Damals gelang es dem britischen Physiker Paul A. M. Dirac (1902–1984), die Theorie der Quantenmechanik mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie in einer mathematischen Formel zu kombinieren, die heute als Dirac-Gleichung bekannt ist. Aus dieser hat sich schließlich die QED entwickelt. Sie ist unsere beste Theorie des Elektromagnetismus und beschreibt vollständig, wie Licht mit Materie wechselwirkt. Zum Beispiel lässt sich mit ihrer Hilfe die Struktur der Atome allein aus den Gesetzen der Physik und aus Fundamentalkonstanten wie der Elektronenmasse ableiten. Am einfachsten gelingt das mit dem Wasserstoffatom. Physiker, welche die QED strengen Tests unterziehen wollen, haben es daher zu ihrem liebsten Versuchsobjekt erkoren und können die Ergebnisse ihrer Experimente auf 0,000000001 Prozent genau vorhersagen.

Als wir uns auf San Servolo erstmals begegneten, arbeiteten wir beide unabhängig voneinander daran, die bei der Vermessung des Protons bis dahin erreichte Genauigkeit noch weiter zu steigern. Bernauer, der mittlerweile am Massachusetts Institute of Technology forscht, promovierte seit 2005 an der Universität Mainz. An deren Elektronenbeschleuniger

AUF EINEN BLICK

VORHANG AUF FÜR EINE NEUE PHYSIK?

1 Zwei Messungen des Protonenradius, durchgeführt mit unterschiedlichen, aber gleichermaßen verlässlichen Methoden, haben unerwartet zu voneinander abweichenden Ergebnissen geführt.

2 Diese Diskrepanz könnte bedeuten, dass Physiker bisher wesentliche Eigenschaften des Protons übersehen haben. Oder aber das Problem liegt in der **Quantenelektrodynamik** – der am besten untersuchten und verstandenen physikalischen Theorie überhaupt.

3 Bestätigen sich die Ergebnisse, könnten sie die Forscher einen großen Schritt vorwärtsbringen. Denn möglicherweise deuten sie auf **bislang unbekannte Naturgesetze** hin.

MAMI (Mainzer Microtron) wollte er mit einer bewährten Technik, welche schon zuvor die präzisesten Messungen geliefert hatte, die innere Struktur des Teilchens untersuchen. Dagegen arbeitete die am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching beheimatete Gruppe um Pohl schon seit 1999 an ihrem Experiment. Sie hatte sich ein neuartiges Verfahren vorgenommen: Am Paul Scherrer Institut im schweizerischen Villigen untersuchte sie eine besondere Form von Wasserstoff, nämlich myonischen Wasserstoff. Winzigste Verschiebungen bestimmter Energieniveaus hängen hier in besonders starkem Maß mit der Größe des Protons zusammen.

Der US-amerikanische Physiker Willis E. Lamb jr. (1913–2008) hatte diesen Effekt erstmals 1947 an gewöhnlichem Wasserstoff beobachtet. Mittlerweile teilt man die nach ihm benannte Lamb-Verschiebung in zwei Komponenten auf. Den ersten Beitrag dazu liefern so genannte virtuelle Teilchen im Innern eines Atoms, die laufend aus dem Nichts auftauchen und ebenso rasch wieder verschwinden. Dank der QED lässt sich mit erstaunlicher Präzision berechnen, wie sie die Energieniveaus beeinflussen. Beim zweiten Beitrag zur Lamb-Verschiebung kämpfen Forscher dagegen mit Unsicherheiten. Um ihn genauer berechnen und so noch ausgefeiltere Tests der QED durchführen zu können, müssten sie zuvor den Protonenradius präziser bestimmen. Doch die Genauigkeit, mit der sich dieser aus Elektronenstreuexperimenten ermitteln lässt, ist mittlerweile ausgereizt. Umgekehrt lässt sich aus einer präzisen Messung der Lamb-Verschiebung der Protonenradius extrahieren.

Das Elektron kreist um den Kern – hält sich aber zuweilen auch in dessen Innerem auf

Um zu erklären, wie das funktioniert, müssen wir ein wenig ausholen. Quantenphysiker beschreiben ein Elektron als Wellenfunktion, die sich wie eine Wolke mehr oder weniger weit durch den Raum erstreckt. Ob sich das Teilchen an einem bestimmten Ort befindet, können sie lediglich in Form einer Aufenthaltswahrscheinlichkeit angeben, die aus dem Quadrat der Wellenfunktion errechnet wird. Auch ein Elektron, das um einen Atomkern kreist, ist in dieser Weise über das Volumen des Atoms hinweg »verschmiert«. Den Gesetzen der Quantenmechanik zufolge kann seine Energie in einem solchen gebundenen Zustand aber nur ganz bestimmte, diskrete Werte annehmen, also nur bestimmte atomare Energieniveaus besetzen.

Den niedrigsten dieser Niveaus, aus historischen Gründen S-Zustände genannt, entspricht eine Wellenfunktion, die im Atomkern ihr Maximum annimmt. Befindet sich also ein Elektron auf einem dieser Niveaus, hält es sich von Zeit zu Zeit auch im Inneren des Protons selbst auf. Solange das der Fall ist, »spürt« es etwas weniger von dessen elektrischer Anziehung, wodurch sich die Stärke der Bindung zwischen Proton und Elektron messbar verringert. Damit geht wiederum eine Veränderung der Lamb-Verschiebung der S-Zustände einher.

Entscheidend ist nun, dass die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons im Kern mit dem Radius des Protons

wächst. Der Radius hat also auch Einfluss auf die Bindung zwischen Proton und Elektron und damit auf die Lamb-Verschiebung, so dass wir umgekehrt aus den Messungen Letzterer auf die Ausdehnung des Protons zurückschließen können. Zwar liegt der Einfluss des Protonenradius auf die Lamb-Verschiebung bei nur rund 0,02 Prozent. Doch der Energieunterschied zwischen dem 1S-Zustand und dem nächsthöheren, dem 2S-Zustand, ließ sich bereits mit der schier unglaublichen Genauigkeit von etwa $4 \cdot 10^{-15}$ messen. Auch die genaue Kenntnis des Protonenradius spielt also eine Rolle, wenn man die QED mit Präzisionsexperimenten untersuchen will.

Zum Zeitpunkt der Tagung auf San Servolo sah es allerdings nicht so aus, als würde Pohls Experiment auch funktionieren. Das erhoffte Signal blieb einfach aus. Die Forscher kämpften an allen Fronten: mit der Komplexität ihrer technischen Apparatur, mit der zu knappen Experimentierzeit am Beschleuniger und mit der bohrenden Frage, ob sie nicht etwas Wichtiges übersehen hatten. Denn bei ihrem Experiment setzten sie erstmals nicht auf gewöhnlichen, sondern auf myonischen Wasserstoff. In diesem bewegt sich kein Elektron um das Proton, sondern dessen schwererer Vetter, das Myon. Dieses Elementarteilchen gleicht dem Elektron in fast allem, besitzt aber die 200-fache Masse und eine nur kurze Lebensdauer. Wegen der Massendifferenz umkreist es das Proton rund 200-mal enger, als es ein Elektron tun würde, wodurch sich seine Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Kern um den Faktor 200³, also um rund das Achtmillionenfache erhöht. Damit liegt der Einfluss des Protonenradius auf die Lamb-Verschiebung, die durch die größere Nähe zwischen Myon und Proton überdies stark ansteigt, nicht mehr nur bei 0,02 Prozent, sondern gleich bei zwei Prozent – ein so großer Effekt sollte sich leicht messen lassen.

2006 begann auch Bernauers Team in Mainz mit seinen Messungen. Die Forscher beschäftigten sich jedoch nicht mit Energieniveaus, sondern beschossen Wasserstoffatome mit Elektronen, um zu untersuchen, wie diese gestreut werden. Im Wesentlichen kann man sich einen Schwarm aus Protonen vorstellen, die einige der negativ geladenen Elektronen des Strahls aus deren ursprünglicher Richtung ablenken und im Gegenzug einen Teil von deren Impuls erhalten. Im Rahmen der QED beschreibt man diesen Streuvorgang dadurch, dass die beiden Partner ein virtuelles Photon austauschen. Streift das Elektron sein Ziel nur ein wenig, überträgt es auch nur wenig Impuls auf das Proton. Prallt es hingegen sozusagen mittig auf ein Proton, überträgt es den maximal möglichen Impuls. Der QED zufolge sind die ausgetauschten virtuellen Photonen in diesem Fall energiereicher, haben also kürzere Wellenlängen.

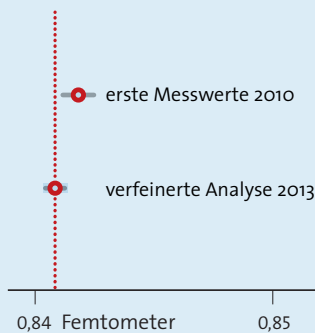
Wie bei einem Lichtmikroskop lassen sich auch bei Elektronenstreuexperimenten mit den kürzesten Wellenlängen die jeweils kleinsten Strukturen auflösen. Bernauer und sein Team wollten diese nutzen, um die magnetische und elektrische Ladungsverteilung im Inneren der Protonen zu untersuchen, genauer gesagt die so genannten Formfaktoren. An-

Messungen im Widerspruch

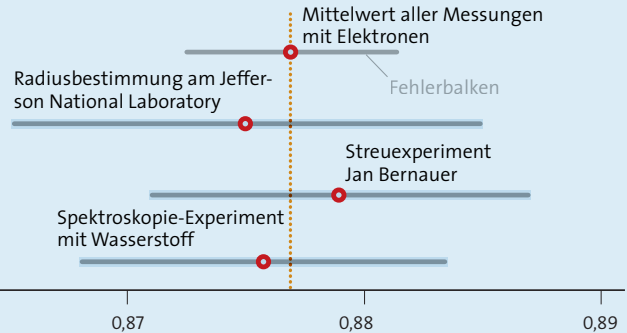
Physiker vermaßen den Radius des Protons bislang vor allem mit Hilfe von Streuexperimenten sowie mit der spektroskopischen Untersuchung bestimmter Energieniveaus von Wasserstoffatomen. Bis 2010 stimmten die Ergebnisse innerhalb der experimentellen Fehlergrenzen noch überein. Doch dann lie-

fernte die Analyse der Energieniveaus myonischer Wasserstoffatome – also solcher, bei denen statt eines Elektrons ein Myon um ein Proton kreist – einen deutlich niedrigeren Wert als alle anderen Experimente. Trotz vieler Erklärungsansätze ist dieses Rätsel bislang ungelöst.

Protonenradius,
gemessen bei Experimenten
mit myonischem Wasserstoff



Protonenradius,
gemessen bei Experimenten
mit gewöhnlichem Wasserstoff



ders als die punktförmigen Elektronen sind Protonen ja aus noch kleineren Bausteinen zusammengesetzt, den Quarks. Auf San Servolo drängten einige der dort versammelten QED-Physiker Bernauer aber, sein Experiment zu erweitern. Denn für die Bestimmung des Protonenradius brauchten sie Messungen nicht von kleinen, sondern im Gegenteil von großen Wellenlängen. Um die Ausdehnung des Protons zu vermessen, bedarf es im Prinzip sogar einer unendlich großen Wellenlänge; nur dann nämlich, wenn gar keine Streuung mehr stattfindet, könnte ein Photon das vollständige Proton »sehen«. Praktisch ist das natürlich nicht möglich. Ein Elektron muss zumindest ein bisschen abgelenkt werden, damit sich überhaupt etwas messen lässt.

Gewaltiger Datenberg

Bernauer gab dem Drängen seiner Kollegen nach und vermaß in der Folgezeit nicht nur die mittleren Werte, für die er sich eigentlich interessierte, sondern auch den kleinsten messbaren Impulstransfer, den das Experiment hergab und damit die größten Wellenlängen. Die Lücke zum Impulswert null schloss er durch das bewährte Verfahren der Extrapolation. Am Ende der 2006 und 2007 durchgeführten Messreihen hatten die Forscher rund doppelt so viele Daten gesammelt wie alle Experimente vorher zusammen und sie benötigten drei weitere Jahre für deren Analyse. Doch weil sie die Lücke zwischen dem kleinsten Messwert und dem Wert null gegenüber früheren Messungen halbiert hatten, war ihre Extrapolation viel zuverlässiger.

Für die Gruppe um Pohl gingen die Schwierigkeiten unterdessen erst einmal weiter. Die Myonen für ihr Experiment lieferte ein Teilchenbeschleuniger am Paul Scherrer

Institut. Dann wurden die Teilchen abgebremst und ein nach dem anderen in eine Wolke aus gewöhnlichen Wasserstoffmolekülen geschossen. Immer wenn sie darin den Platz eines um seinen Kern kreisenden Elektrons einnahmen, entstand hochangeregter myonischer Wasserstoff.

Sobald ein Myon in das Gefäß eindrang, wurde mit einer Verzögerung von etwa einer Mikrosekunde auch ein Laserpuls hineingeschossen. Dabei galt es, die Wellenlänge des Lasers und damit die Energie seiner Photonen exakt so zu justieren, dass er ein Atom im 2S-Zustand in den energetisch höheren 2P-Zustand katapultieren konnte. Diesem Zustand entspricht eine andere Wellenfunktion; die Wahrscheinlichkeit, das Myon dann noch im Inneren des Protons anzutreffen, ist praktisch gleich null (Kasten S. 54). Aus dem gemessenen Energieunterschied zwischen den 2S- und 2P-Zuständen kann man dann ablesen, wie viel Zeit das Myon im Protoneninneren verbrachte, und daraus den Protonenradius ableiten.

Entscheidend war, dass der Laser genau die richtige Wellenlänge besaß, denn nur dann würde er die Myonen auf das höhere Energieniveau anheben. Lag sie auch nur knapp daneben, würde gar nichts passieren. Ob die Atome den Sprung tatsächlich vollführten, ließ sich leicht feststellen: Jedes angeregte Atom im 2P-Zustand verliert seine Energie binnen einiger Pikosekunden (10^{-12} Sekunden) wieder, indem es ein Röntgenphoton niedriger Energie abstrahlt. Sobald man solche Photonen registriert, hat man also die richtige Laserenergie eingestellt.

Dies alles klingt recht einfach, aber tatsächlich sind diese Experimente ziemlich knifflig. Ähnliche Versuche schlugen Forscher bereits in den 1960er Jahren vor, als sie nach Präzisionstests für die damals noch junge QED-Theorie suchten.

Streuschüsse auf das Proton

Bei Streuexperimenten wie dem von Jan Bernauer wird der Radius des Protons gemessen, indem man einen Elektronenstrahl auf Wasserstoffatome schießt, also mitten in einen Schwarm von Protonen hinein. Gelegentlich gerät dabei ein Elektron einem Proton so nahe, dass es von diesem aus seiner Bahn abgelenkt wird (a).

Nach der Theorie der Quantenelektrodynamik (QED) wird diese Wechselwirkung durch den Austausch eines so genannten virtuellen Photons beschrieben, das die elektromagnetische Kraft überträgt (b). Je enger ein Elektron am Proton vorbeifliegt, desto kürzer ist die Wellenlänge des virtuellen Photons.

Kurze Wellenlängen bedeuten hohe Energien; dann wird die Bahn des Teilchens entsprechend stark beeinflusst. Bei einem Vorbeiflug in größerem Abstand (c) entsteht ein virtuelles Photon mit längerer Wellenlänge, entsprechend kleiner ist der Ablenkungswinkel.

Für die Messung des Protonenradius müssen die Photonen sehr große Wellenlängen besitzen; nur dann wechselwirken sie näherungsweise mit dem gesamten Proton (d). Daher untersuchen Forscher bei Elektronenstreuexperimenten vor allem die kleinsten gerade noch nachweisbaren Ablenkungen.

Doch waren sie schwieriger zu realisieren als Experimente mit gewöhnlichem Wasserstoff oder anderen Atomen, so dass das Interesse wieder erlahmte. Das änderte sich erst, als in den 1990er Jahren die einfacher durchführbaren Experimente an ihre Grenzen stießen, weil der Protonenradius nicht genau genug bekannt war, um die QED-Tests weiter zu verfeinern.

1997 beantragte Pohls Arbeitsgruppe am Paul Scherrer Institut darum das Projekt, in dessen Rahmen es die Lamb-Verschiebung an myonischem Wasserstoff messen wollte. Ab 1999 verbrachte sein Team drei Jahre damit, einen geeigneten Laser, Röntgendetektoren sowie eine Vorrichtung zu entwickeln, mittels derer sich die Myonen aus dem Beschleuniger abbremsen ließen. Auch erste Tests am Beschleuniger führten die Gruppe damals schon durch.

Nach monatelanger Vorbereitung blieben für die eigentliche Messung nur wenige Stunden

2002 konnte sie das Experiment dann vollständig aufbauen. Doch die meiste Zeit, die man den Wissenschaftlern für den ersten großen Probelauf am Beschleuniger gewährt hatte, verstrich mit den Vorbereitungen und der Behebung der technischen Probleme, auf die sie nach und nach stießen. Als auch diese endlich gelöst waren, blieben tatsächlich nur noch ein paar Stunden, bevor die so genannte Strahlzeit am Beschleuniger auslief. Während Pohl enttäuscht war, galt es den erfahreneren Physikern in der Gruppe bereits als großer Erfolg, dass nur kleinere technische Probleme aufgetaucht waren, und sie nahmen es auch gelassen hin, dass die kurze Messzeit schließlich ergebnislos blieb. Die Probleme würden sich bis zum nächsten großen Lauf beheben lassen, bei dem sie zweifellos fündig werden würden, so die Hoffnung.

2003 konnten wir dann, wieder nach mehreren Monaten der Vorbereitung, endlich eine dreiwöchige Messkampagne durchführen. Doch sie lieferte – nichts. Es gab nicht den geringsten Hinweis auf ein Signal. Und das, obwohl der Laser alle denkbaren Wellenlängen abgetastet hatte, die sich aus den bekannten, leicht unterschiedlichen Werten für den

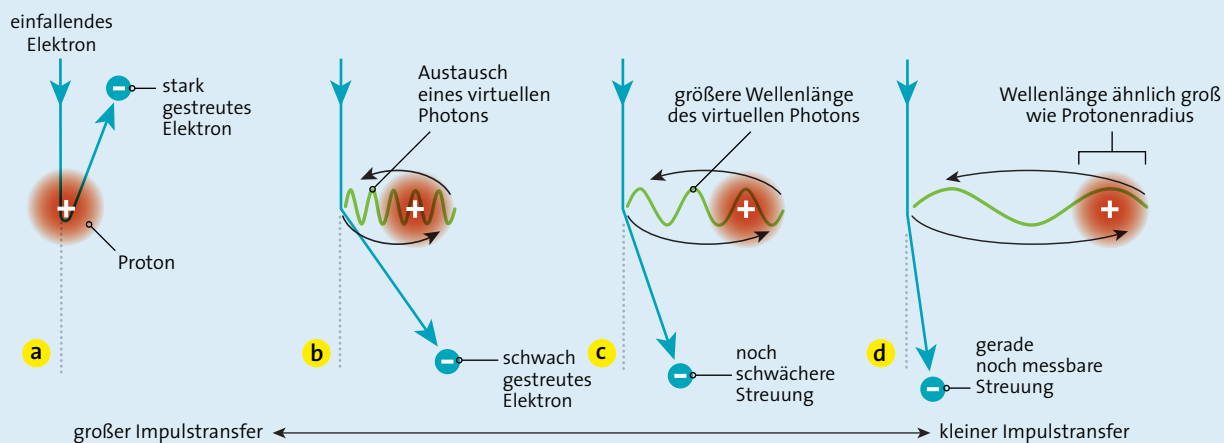
Protonenradius ergaben. Irgendwo in unserem Experiment musste ein Fehler stecken.

Nach langen Debatten kamen wir zu dem Schluss, dass wir das Lasersystem optimieren müssten, und machten uns an einen umfangreichen Umbau des Experiments, der erst 2006 endlich abgeschlossen war. In diesem Jahr bekamen wir allerdings keine Strahlzeit, weil ein anderes Experiment Vorrang hatte. Erst 2007 absolvierten wir dann eine neue Messreihe, die nach mehrmonatigem Aufbau ebenfalls drei Wochen lang lief – und wieder nichts erbrachte.

Zum Glück bekamen wir 2009 noch eine Chance. Im Verlauf von einigen Monaten brachten wir die komplexe Apparatur erneut zum Laufen. (Nach jeder Strahlzeit mussten wir das Areal, in dem unser Experiment aufgebaut war, für andere Gruppen freiräumen). Aber nach einer Woche Messungen folgte, obwohl alles perfekt lief, wieder die Ernüchterung: Erneut entdeckten wir kein Signal, nicht einmal einen Hinweis darauf.

Jetzt stand uns am Beschleuniger nur noch eine allerletzte Woche für unsere Beobachtungen zur Verfügung. Würde sie nicht das erwartete Ergebnis liefern, stand zu befürchten, dass uns der ein oder andere Verantwortliche die Aufgabe nicht mehr zutrauen würde. Das Experiment würde nach einem Jahrzehnt vielleicht als gescheitert betrachtet und eingestellt werden.

Wir überlegten fieberhaft. Könnten die Ursachen unseres Problems vielleicht tiefer liegen, als wir bis dahin vermutet hatten? Was wäre denn, wenn wir nach dem Protonenradius an der falschen Stelle, also bei den falschen Wellenlängen, suchten? Wir beschlossen, unseren Suchradius zu erweitern. Allerdings wurde die Zeit immer knapper, und wir mussten bei jeder Wellenlänge mehrere Stunden lang messen, um entscheiden zu können, ob sich tatsächlich ein Signal in den Daten zeigte. Doch in welche Richtung? Gemeinsam fassten wir den Entschluss, nach einem größeren Protonenradius Ausschau zu halten, schienen die alten Messungen der Elektronenstreuung dies noch am ehesten nahezu legen. Doch etwas später an diesem Abend kam Pohls Kollege Aldo Antognini von der ETH Zürich in den Kontrollraum des Experi-



JEN CHRISTIANSEN

ments und meinte, wir sollten stattdessen nach einem kleineren Protonenradius suchen. Vielleicht würde sich ja der eine oder andere Ausreißer aus den Daten von 2003 tatsächlich als Signal erweisen.

Zu diesem Zeitpunkt arbeiteten wir längst in 20-Stunden-Schichten. Da uns die Zeit davonlief, steuerten Pohl und Antognini die experimentellen Parameter schließlich sogar in Richtung noch kleinerer Werte als jemals vermutet. Dann die Überraschung: Die ersten Hinweise auf ein Signal tauchten auf! Wir waren elektrisiert, konnten aber die Messungen nicht fortsetzen, weil der Beschleuniger tags darauf für die übliche monatliche Überholung vier Tage lang heruntergefahren wurde. Dann, am Abend des 4. Juli 2009, fingen wir endlich das eindeutige Signal der gesuchten Lamb-Verschiebung ein – zwölf Jahre nach dem Beginn des Projekts.

Anschließend verbrachte das Team noch einige Wochen mit weiteren Messungen und Eichungen sowie mehrere Monate mit der Datenanalyse. Unser Endergebnis lautete 0,8409 Femtometer plus/minus 0,0004 Femtometer. Dies ist der Wert für den mittleren quadratischen Ladungsradius. Weil das Proton kein festes Teilchen mit eindeutigen Grenzen ist, behilft man sich mit dieser zumindest mathematisch präzise definierten Größe; sie beschreibt grob den Raumbereich, in dem sich zwei Drittel der Ladung des Protons aufhalten. Unsere Messgenauigkeit ist etwa zehnmal besser als bei allen bisherigen Messungen, doch das Ergebnis weicht um vier Prozent ab – eine drastische Diskrepanz. Das Proton im myonischen Wasserstoff ist deutlich kleiner, als irgendjemand erwartet hätte.

2010 präsentierten unsere beiden Gruppen ihre Resultate auf einer weiteren QED-Tagung in Les Houches in den französischen Alpen. Pohl machte seine Ergebnisse am myonischen Wasserstoff dabei zum ersten Mal öffentlich und war fest davon überzeugt, dass Bernauers Analyse seinen neuen Wert bestätigen würde. Er war völlig überrascht, als es anders kam. Die Ergebnisse aus Mainz, die auch die Formfaktoren einschlossen und Bernauer inzwischen den Dokortitel eingebracht hatten, stützten für den Protonenradius den bekannten Wert, 0,879 Femtometer, der genau zu allen frühe-

ren Messungen passte. In der Forschergemeinde verursachte dies einige Aufregung. Die meisten unserer Kollegen glaubten schlicht, dass ein Fehler im Spiel sein müsste: entweder bei den Experimenten oder bei den Berechnungen, aus denen wir den Protonenradius abgeleitet hatten. Schon bald nach der Konferenz in Les Houches meldete sich eine ganze Reihe voneinander unabhängiger Forscher mit Vorschlägen, wo dieser stecken könnte.

Zum Beispiel hatten bis zu Pohls Experiment nur drei Theoretiker die komplizierten Berechnungen durchgeführt, mit denen sich aus den Messungen der Laserwellenlänge der Protonenradius ableiten lässt. Andere Forscher, welche die aufwändigen Kalkulationen daraufhin wiederholten, fanden allerdings keine Fehler. Wieder andere analysierten die Methode, mit der Bernauer aus seinen Streudaten den Ladungsradius (siehe oben) extrapoliert hatte. Könnte man aus diesen Messergebnissen nicht vielleicht doch einen kleineren Radius ableiten? Aber auch hier hieß es: Fehlanzeige.

Die Physiker haben ihr Arsenal an Erklärungsversuchen erschöpft

Mit jedem fehlgeschlagenen Erklärungsversuch wuchs die Bedeutung unserer Messergebnisse. 2013 veröffentlichte die Gruppe um Pohl im Fachjournal »Science« dann eine weitere Messung, welche den Wert des myonischen Ladungsradius erneut bestätigte und die Messunsicherheit noch einmal fast halbierte. Vier Jahre, nachdem das Rätsel vom Protonenradius aufgetaucht ist, haben die Physiker ihr Arsenal an kritischen Fragen zu unserem Versuch weit gehend erschöpft. Mittlerweile nehmen sie das Problem so ernst, dass sie allenthalben neue Experimente planen.

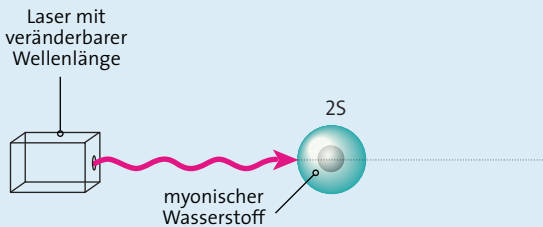
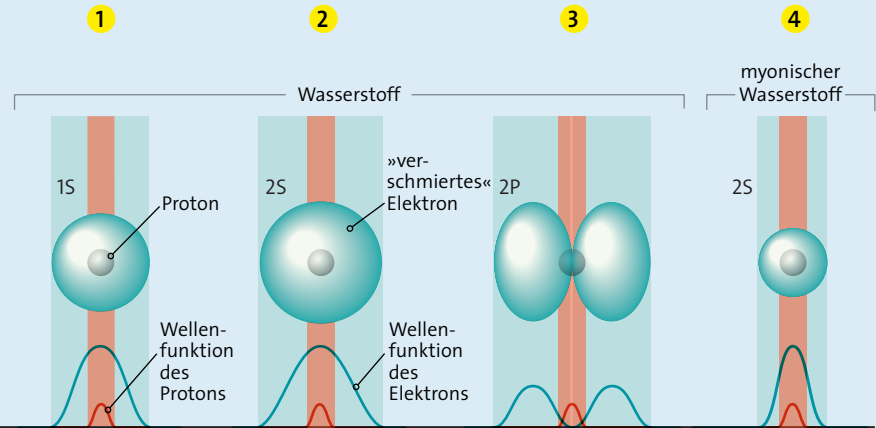
Denn es ist Zeit, von Interessanterem zu träumen. Verstehen wir wirklich, wie das Proton reagiert, wenn das Myon an ihm zieht? Immerhin deformiert die elektrostatische Kraft des Myons das Proton – ähnlich wie die Schwerkraft des Mondes die irdischen Gezeiten auslöst –, wodurch es zu einer geringfügigen Änderung des 2S-Zustands im myonischen Wasserstoff kommt. Zwar sind die meisten Physiker der Ansicht, dass dieser Effekt gut verstanden sei. Andererseits ist

Die Vorteile von myonischem Wasserstoff

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons, das in einem Wasserstoffatom ein Proton umkreist, kann selbst im Inneren des Protons größer als null sein. Ist das der Fall, befindet sich das Elektron mit seiner negativen elektrischen Ladung gelegentlich auch dort. Weil es von der positiven Ladung des Protons dann nicht so stark angezogen wird wie sonst, ändert sich messbar die so genannte Lamb-Verschiebung der Energieniveaus des

Elektrons. Aus dieser lässt sich schließlich die Größe des Protons ermitteln. Um den Effekt zu vergrößern und so die Messung zu erleichtern, greifen die Forscher um Randolph Pohl zu einem Trick: Sie ersetzen die Elektronen durch ihre 200-mal schwereren Vettern, die Myonen. Diese umkreisen das Proton auf 200-mal engeren Bahnen und halten sich entsprechend häufiger in seinem Inneren auf.

Die Wellenfunktionen von Teilchen beschreiben, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie sich an einem bestimmten Ort aufhalten. In den S-Zuständen (1 und 2) überlappen die Wellenfunktionen von Proton und Elektron einander; das Elektron hält sich also bisweilen im Inneren des Protons auf, was zur Lamb-Verschiebung beiträgt. Bei den angeregten, also energiereicheren 2P-Niveaus kommt es praktisch nicht zum Überlappen (3). Eine besonders große Lamb-Verschiebung messen die Forscher, wenn sie Elektronen durch schwerere Myonen ersetzen (4). Deren Wellenfunktion ist räumlich weniger ausgedehnt, also schmaler; das verstärkt die Überlappung mit dem Proton.

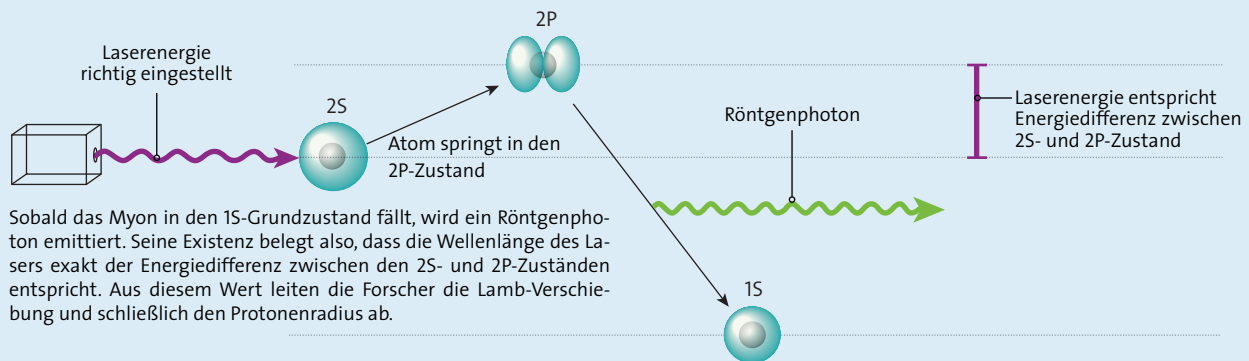


Ist die Laserenergie nicht präzise auf die Energiedifferenz zwischen dem 2S- und dem 2P-Zustand eingestellt, passiert – nichts.

Das Experiment: Um myonischen Wasserstoff zu produzieren, schießen die Forscher ein Myon nach dem anderen in ein Gefäß mit gewöhnlichem Wasserstoff. Die meisten Myonen nehmen darin den Platz des Elektrons ein und kreisen an dessen Stelle um ein Proton. Etwa jedes Hundertste dieser myonischen Wasserstoffatome tritt im 2S-Zustand auf.

Rund eine Mikrosekunde später fällt ein Laserstrahl (Grafik links) mit präzise eingestellter Wellenlänge auf die Probe, der die Myonen energetisch vom 2S- auf einen 2P-Zustand anheben soll. Die genaue Größe dieses Energieunterschieds hängt von der Lamb-Verschiebung und damit auch vom Protonenradius ab.

Woher wissen die Forscher, ob ein Myon tatsächlich auf das 2P-Niveau gelangt ist? Sobald es von dort auf das niedrigste mögliche 1S-Niveau fällt, emittiert das Atom ein Röntgenphoton (Grafik unten). Solange dieses ausbleibt, muss der Laser nachjustiert werden. Werden hingegen Röntgenphotonen registriert, dann entspricht seine Energie genau der gesuchten Energiedifferenz zwischen dem 2S- und dem 2P-Zustand.



Sobald das Myon in den 1S-Grundzustand fällt, wird ein Röntgenphoton emittiert. Seine Existenz belegt also, dass die Wellenlänge des Lasers exakt der Energiedifferenz zwischen den 2S- und 2P-Zuständen entspricht. Aus diesem Wert leiten die Forscher die Lamb-Verschiebung und schließlich den Protonenradius ab.

das Proton aber sehr komplex, und wir haben vielleicht doch etwas übersehen. Am schönsten wäre es freilich, wenn diese Messungen Hinweise auf eine Physik lieferten, die über das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik hinausgeht. Vielleicht enthält das Universum ja ein bislang unentdecktes Elementarteilchen, das mit Myonen anders wechselwirkt als mit Elektronen. Wissenschaftler haben diese Idee tatsächlich lange untersucht. Aber es hat sich als schwierig erwiesen, das theoretische Bild eines solchen Partikels zu zeichnen, das nicht zugleich zu beobachtbaren Konsequenzen führen würde, die im Widerspruch zu anderen Experimenten stehen. Trotzdem haben sie noch nicht aufgegeben. Dass bei den hohen Energien, die der LHC-Beschleuniger mittlerweile erreicht, bislang nur das Higgs-Teilchen gefunden wurde, sonst aber nichts, hat ihr Interesse nämlich wieder auf Präzisionsmessungen bei niedrigen Energien gelenkt.

Zwei Fliegen mit einer Klappe?

Ein weiteres Myonenrätsel harrt der Aufklärung

Außerdem kämpfen sie mit einem weiteren Problem. Sowohl Myonen als auch Elektronen haben ein so genanntes magnetisches Moment. Das bedeutet, dass aus ihrem Spin, also der Drehung der Partikel um die eigene Achse, ein Magnetfeld wie das eines Stabmagneten resultiert. Im Fall des Myons passt der gemessene Wert des magnetischen Moments aber nicht zu den Berechnungen der QED. Das erhöht den Druck, das Protonenproblem zu lösen – denn erst dann lässt sich auch die Frage des anomalen magnetischen Moments des Myons beantworten. Vielleicht gibt es ja bislang unbekannte physikalische Phänomene, die beide Rätsel auf einen Schlag lösen könnten.


In jedem Fall brauchen wir aber neue Daten. Zumindest zwei Streuexperimente werden schon aufgebaut: eines an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Newport News im US-Bundesstaat Virginia; ein weiteres am Mainzer Microtron MAMI, wo auch Bernauer sein Experiment durchgeführt hat. Sie sollen die Genauigkeit der Streuversuche weiter verbessern und bei dieser Gelegenheit einige der vorgeschlagenen Erklärungen für das Protonenrätsel testen.

Die Gruppen um Pohl und in Mainz arbeiten beide daran, den Radius von Deuterium zu messen, also eines Atomkerns, der nicht nur aus einem Proton, sondern darüber hinaus aus einem Neutron besteht. Denn möglicherweise treten die Diskrepanzen auch bei diesem schweren Wasserstoffisotop auf.

In einem weiteren Projekt, wieder am Paul Scherrer Institut, widmet sich Pohls Gruppe der Messung der Lamb-Verschiebung in myonischen Heliumionen. Außerdem ist er Teil einer Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, die seine Messungen an gewöhnlichem Wasserstoff mit noch höherer Genauigkeit wiederholen will.

Viele Physiker haben darauf hingewiesen, dass Messungen atomarer Energieniveaus sowohl an elektronischen als auch an myonischen Atomen durchgeführt wurden, Streu-

versuche bislang aber nur mit Elektronen. Was also noch fehle, seien Streuversuche mit Myonen. Am Paul Scherrer Institut werden Forscher, unter ihnen Bernauer, mit Hilfe des Myon Proton Scattering Experiment MUSE darum sowohl Myonen als auch Elektronen an Protonen streuen lassen. Sie wollen direkt zwischen den Teilchensorten vergleichen und dabei die wichtigsten der für das Protonenproblem vorgeschlagenen Erklärungsversuche überprüfen. Das gegenwärtige Hauptarbeitsgebiet Bernauers aber heißt OLYMPUS. Dieses Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg untersucht, ob bei Streuprozessen möglicherweise mehr virtuelle Photonen ausgetauscht werden als angenommen.

Es wird wohl noch etwas dauern, bis wir wirklich wissen, ob sich das Rätsel vom Protonenradius lediglich einem Fehler bei seiner Messung verdankt oder ob seine Lösung zu einem tieferen Verständnis des Universums führt. Das Buch der Natur liegt jedenfalls offen vor uns. Vielleicht schlagen wir gerade das nächste Kapitel darin auf. 

DIE AUTOREN



Jan C. Bernauer (links) ist Kernphysiker am Laboratory for Nuclear Science des Massachusetts Institute of Technology in Boston. Die beschriebenen Experimente führte er als Doktorand am Institut für Kernphysik der Universität Mainz

durch. **Randolf Pohl** widmet sich am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching der Laserspektroskopie von Wasserstoff und von wasserstoffähnlichen exotischen Atomen. 2012 erhielt er, zusammen mit Aldo Antognini, den Gustav-Hertz-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und 2013 den Francis M. Pipkin Award der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Antognini, A. et al.: Proton Structure from the Measurement of 2S-2P Transition Frequencies of Muonic Hydrogen. In: *Science* 339, S. 417–420, 25. Januar 2013

Bernauer, J. C., et al.: High-Precision Determination of the Electric and Magnetic Form Factors of the Proton. In: *Physical Review Letters* 105, Art.-Nr. 242001, 10. Dezember 2010

Pohl, R. et al.: The Size of the Proton. In: *Nature* 466, S. 213–216, 8. Juli 2010

Pohl, R. et al.: Muonic Hydrogen and the Proton Radius Puzzle. In: *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 63, S. 175–204, Oktober 2013

LITERATURTIPP

Hänsch, T. W., Schawlow, A. L., und Series, G. W.: Das Spektrum des Wasserstoffatoms. *Spektrum der Wissenschaft* 5/1979, S. 58–72

1979 führten die Nobelpreisträger Theodor W. Hänsch (in dessen Arbeitsgruppe am MPI für Quantenoptik Randolph Pohl als Postdoc arbeitet) und Arthur L. Schawlow mit ihrem Kollegen George W. Series »Spektrum«-Leser in die Geheimnisse des Wasserstoffs ein.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1224870

Katastrophenabwehr beim Coffee to go

Vorsicht vor Resonanzeffekten: Wer gefüllte Pappbecher durch die Gegend trägt und den Kaffee am Überschwappen hindern will, macht instinktiv das Falsche.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Coffee to go ist aus unserer schnelllebigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Es scheint das Selbstverständlichste auf der Welt, dass wir Kaffeebecher aus Papier oder Plastik durch Bahnhofshallen und Fußgängerzonen, Büroflore und Sitzungssäle transportieren und womöglich auch noch im Gehen daraus trinken. Dabei bedarf, physikalisch gesehen, das unfallfreie Gehen mit einem vollen Becher einiger motorischer Geschicklichkeit und zwingt uns überdies in eine völlig unnatürliche Haltung. Zwar hat die Industrie längst reagiert und hält das Problem seither unter dem Deckel. Die Physik im Becher entfaltet sich aber natürlich trotzdem.

Die Abläufe beim uns so vertraut erscheinenden Vorgang des Gehens sind

tatsächlich äußerst verwickelt. Biomechanische Studien zeigen, dass Menschen, die einem Ziel zustreben, dies üblicherweise unter Minimierung des dafür nötigen Energieaufwands tun. Dankenswerterweise vereinfachen sie das Problem damit ganz erheblich: Sie vermeiden nämlich seitliche Bewegungen und halten auch die Auf- und Abbewegungen des Körpers sehr klein.

Kompliziert wird die Angelegenheit dennoch, und zwar vor allem dadurch, dass die Beine eine Art Pendelbewegung ausführen. Diese überträgt sich auf den gesamten Körper, wobei die Beine ihn abhängig von ihrer Pendelfrequenz, Masse und Bewegungsrichtung beschleunigen beziehungsweise abbremsen. Einer empirischen Untersuchung zufolge, bei der 100 Menschen beim Gehen in unterschiedlichen Situationen beobachtet wurden, schwankt die Frequenz der Beinschwingung zwischen 1,4 und 2 Hertz. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt man, wenn man die Beine als physikalisches Pendel betrachtet – wobei allerdings einige Feinheiten zu beachten sind – und mit der zugehörigen Schwingungsformel die Frequenz bestimmt.

Betrachtet man genauer, wie ein Mensch einen gefüllten Becher trägt, erkennt man, dass er dabei jede zusätzliche Bewegung seiner Hand vermeidet. Das Gefäß ist starr mit ihr, mit dem Arm und schließlich mit dem Körper verbunden und schwingt folglich mit dessen Frequenz. Dahinter steckt unser Bemühen, einen weiteren Bewegungsfreiheitsgrad zu vermeiden – in der mehr oder weniger bewussten Hoffnung, eine bessere Kontrolle über das Geschehen zu erlangen. Das zahlt sich aber nicht aus. Sobald wir mit der Tasse

Divergente Schwingungen jeder Art waren so ziemlich die schlimmste Bedrohung ...

*Thomas Pynchon (*1937)
in »Die Enden der Parabel«*

loslaufen, bleibt die Flüssigkeit auf Grund ihrer trägen Masse zunächst einmal wo sie ist. Erst der Zusammenprall mit der auf sie zukommenden Tassenwand setzt sie in Bewegung.

Ob der Kaffee im Folgenden weiter angeregt oder eher beruhigt wird, hängt dann von seiner Eigenfrequenz ab. Es ist wie bei dem Kind auf einer Schaukel: Um es gut in Schwung zu bringen, schubst man es immer dann an, wenn die Schaukel gerade im Umkehrpunkt zur Ruhe gekommen ist. Anders gesagt: Der Antrieb ist optimal, wenn er auf die Eigenfrequenz der Schaukel abgestimmt ist und mit einer Phasenverschiebung von nahezu 90 Grad erfolgt. Während man beim Loslaufen automatisch für die »richtige« Phasenverschiebung sorgt, schaukelt sich die Flüssigkeit nur dann an den Wänden der Tasse auf, wenn ihre Eigenfrequenz und die Schrittfrequenz des Kaffeeträgers zueinander passen.

Im Alltag ist die Resonanzbedingung fast immer erfüllt

Genau diese Resonanzbedingung ist in der Realität meist erfüllt, denn bei gängigen Trinkgefäßen variiert die Frequenz zwischen 2,6 und 4,3 Hertz, je nach Tassendurchmesser und Füllhöhe. Die Flüssigkeit schwingt also bei jedem Schritt ziemlich genau einmal hin und her und zwar so, dass sie sich etwa in derselben Position befindet, wenn wir zum jeweils nächsten Schritt ansetzen – beides wie beim Kind auf der Schaukel.

Die Konsequenz ist klar: Selbst wenn wir von vornherein versuchen, die Flüssigkeit nur wenig anzuregen, erleben wir nach einer hinreichenden Zahl von Schritten – und nicht zu kleiner Füllhö-



Der Kaffee schwappst beim Gehen nicht deshalb aus dem Pappbecher, weil wir zu unachtsam laufen. Vielmehr regen wir das Getränk recht genau mit seiner Eigenfrequenz an – und können die unvermeidlichen Resonanzeffekte schließlich nicht mehr beherrschen.

DREAMTIME / EVGENSKRIKO (M)



Man muss die Hand mit dem Kaffeebecher keineswegs starr mit dem Körper verbinden, um das Überschwappen zu verhindern. Es gibt bessere, wenn auch nicht unbedingt alltagstauglichere Wege. Die Fotos zeigen, wie man die Eigenschwingungen einer Pendelkonstruktion so verstärkt, dass der Kaffee relativ zu seinem Behältnis in Ruhe bleibt.

he – zwangsläufig eine Resonanzkatastrophe. Kaffee schwappt nicht unbedingt deshalb über, weil wir nach den ersten vorsichtigen Schritten entspannter und damit unkontrollierter gehen, sondern vielmehr als unvermeidliche Konsequenz phasen- und frequenzreicher Anregung.

Was ließe sich gegen das Überschwappen unternehmen? Natürlich könnte man die Dimensionierung von Tassen und Bechern so verändern, dass die Flüssigkeiten darin andere Eigenfrequenzen besitzen. Doch einfaches Nachjustieren von Höhe und Durchmesser würde nicht reichen; damit sich die Frequenzen um das nötige Maß verändern, wären drastischere Eingriffe nötig. Vor allem aber müssen wir Größe und Form von Tassen und Bechern wohl weit gehend als kulturelle Konstante betrachten. Ähnlich unwahrscheinlich ist es, dass wir uns angewöhnen, beim Kaffeetransport unsere Schrittfrequenz deutlich zu verändern.

Doch es gibt eine weitere Lösung, die zunächst paradox erscheinen mag. Dabei schränkt man die Bewegungsfreiheitsgrade nicht ein, sondern nimmt umgekehrt eine zusätzliche Bewegungsmöglichkeit in Anspruch. Stellt man nämlich den gefüllten Becher auf

ein an Schnüren hängendes Tablett, kann man durch geeignete Handbewegungen die Eigenschwingungen dieses Pendels bewusst verstärken statt ihnen entgegenzuwirken. So bleibt die Flüssigkeit relativ zum Gefäß weit gehend in Ruhe. Das liegt an der Trägheit: Jeder bewegte Körper »möchte« seinen Bewegungszustand beibehalten und sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegen. An Schnüren pendelnd – oder gar in kühnem Schwung im Kreise geschleudert –, wird er aber von der haltenden Hand zum Zentrum der Drehbewegung gezogen; senkrecht zu der Richtung, in die ihn seine Trägheit bewegen möchte. Dabei zwingt der Becherboden die Flüssigkeit nach innen, und umgekehrt drückt die Flüssigkeit mit derselben Kraft nach außen, was sie sicher im Becher hält. Die beteiligten Kräfte sind schon bei leichtem Schwenken so groß, dass die Störungen durch das Gehen nicht mehr ins Gewicht fallen.

Solche Überlegungen haben nicht nur theoretischen Wert. In arabischen Ländern trifft man gelegentlich die Praxis an, dass Getränke auf Tablettis transportiert werden, die ihrerseits an Schnüren hängen. In gleicher Weise zielen die schwungvollen Bewegungen

von Kellnern hier zu Lande, die Suppenteller oder Getränke zu den Tischen balancieren, weniger auf Effekthascherei als schlicht auf (Resonanz-)Katastrophenabwehr.

Vor nicht einmal zwei Jahren war das Überschwappen von Getränken Gegenstand einer Publikation im renommierten Fachjournal »Physical Review E«. Wohl ihrer Kuriosität wegen wurde die Arbeit, in der die Autoren ein mathematisches Modell für den Transport von Getränken entwickelt hatten, 2012 sogar mit dem Ig-Nobelpreis ausgezeichnet. Doch die Probleme, auf die sie hinweist, sind so wenig kurios wie ihre Lösung überflüssig ist. Transportiert man Flüssigkeiten in Lastwagen, Schiffen, Flugzeugen oder gar Raketen, können sich ihre Schwingungen derart aufschaukeln, dass sie das jeweilige Verkehrsmittel destabilisieren – mit unkalkulierbaren Folgen. Um die Erforschung des Schwappens und seiner Wirkungen bemühen sich daher seit Jahrzehnten zahlreiche Wissenschaftler. Zu ihren Ergebnissen zählt, dass Tanks typischerweise in Kammern unterteilt und mit speziellen Schwallblechen versehen werden, die großräumiges Aufschaukeln unterbinden. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

Jaiswal, O. R. et al.: A Study on Sloshing Frequencies of Fluid-Tank System. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12. – 17. 10. 2008, Peking
Mayer, H. C., Krechetnikov, R.: Walking With Coffee: Why Does it Spill? In: Physical Review E 85, 046117, 2012

WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1224871

Machen Quanten Sprünge?

Die Quantentheorie scheint zu besagen, dass sich die Natur auf der kleinsten Ebene sprunghaft verhält. Doch bei genauerer Betrachtung gelten auch im Mikrokosmos stets kontinuierliche Gesetze: Die Welt funktioniert im Grunde nicht digital, sondern analog!

Von David Tong

Von dem deutschen Mathematiker Leopold Kronecker (1823–1891) stammt der Ausspruch: »Die ganzen Zahlen hat der liebe Gott gemacht, alles andere ist Menschenwerk.« Er meinte damit, die Zahlen Null, Eins und so weiter spielten eine fundamentale Rolle in der Mathematik. Doch für heutige Physiker nimmt das Zitat eine Überzeugung vorweg, die sich in den letzten Jahrzehnten immer fester etabliert hat: Die Natur sei im Grunde diskret, die Bausteine der Materie und der Raumzeit ließen sich einzeln abzählen. Diese Idee geht auf die Atomisten der griechischen Antike zurück, gewinnt aber im digitalen Zeitalter zusätzliche Plausibilität. Viele Physiker stellen sich das Universum als einen gewaltigen Computer vor (siehe Spektrum Spezial 3/2007), in dem die physikalischen Gesetze als Algorithmus für diskrete Informationsbits dienen – wie der grüne Ziffernregen, den die Hauptfigur Neo am Ende des Films »Matrix« an Stelle der vermeintlichen Realität sieht.

Aber funktionieren die Naturgesetze wirklich so? In scheinbarem Gegensatz zum Zeitgeist glaube ich wie viele andere auch, dass die Realität letztlich nicht digital, sondern analog ist. Nach dieser Ansicht ist die Welt ein echtes Kontinuum. Selbst bei noch so feiner Vergrößerung wird man kei-

ne irreduziblen Bausteine finden. Physikalische Daten sind nicht ganze, sondern reelle Zahlen – das heißt kontinuierliche Größen mit unendlich vielen Dezimalstellen. Auch wenn es »Matrix«-Fans enttäuschen mag: Niemand weiß, wie ein noch so gigantischer Computer sämtliche Details der bekannten physikalischen Gesetze simulieren soll. Nur mit dieser Einsicht lässt sich eine umfassend vereinheitlichte Theorie der Physik entwickeln.

Ein altes Rätsel

Seit jeher herrscht in der Physik eine Debatte zwischen digitalen und analogen Ansätzen. Während die antiken Atomisten die Realität als diskret beschrieben, stellte sich der Philosoph Aristoteles (384–322 v. Chr.) ein Kontinuum vor. In der Ära von Isaac Newton (1642–1726) schwankten die Naturphilosophen zwischen Theorien mit diskreten Teilchen oder kontinuierlichen Wellen. Zu Kroneckers Lebzeiten schließlich leiteten Atomisten – insbesondere die Briten John Dalton (1766–1844) und James Clerk Maxwell (1831–1879) sowie der Österreicher Ludwig Boltzmann (1844–1906) – chemische und thermodynamische Grundgesetze her. Doch viele Forscher überzeugte der atomistische Ansatz nicht.

Der deutsche Chemiker Wilhelm Ostwald (1853–1932) wandte ein, die thermodynamischen Gesetze bezögen sich nur auf kontinuierliche Größen wie die Energie. Auch Maxwells Theorie des Elektromagnetismus beschreibt elektrische und magnetische Felder als kontinuierlich. Im Jahr 1882 erklärte ausgerechnet der junge Max Planck (1858–1947), der später die Quantentheorie begründen sollte, »dass man trotz der bisherigen Erfolge der atomistischen Theorie sich schließlich doch einmal zu einer Aufgabe derselben und zur Annahme einer kontinuierlichen Materie wird entschließen müssen«.

Eines der stärksten Argumente der Kontinuumsverfechter war die Beliebigkeit des Diskreten. Wie viele Planeten gibt es im Sonnensystem? In der Schule lernte ich: neun. Doch 2006 strichen die Astronomen Pluto offiziell aus der Liste und ließen nur acht übrig. Zugleich schufen sie eine Nebenliste von

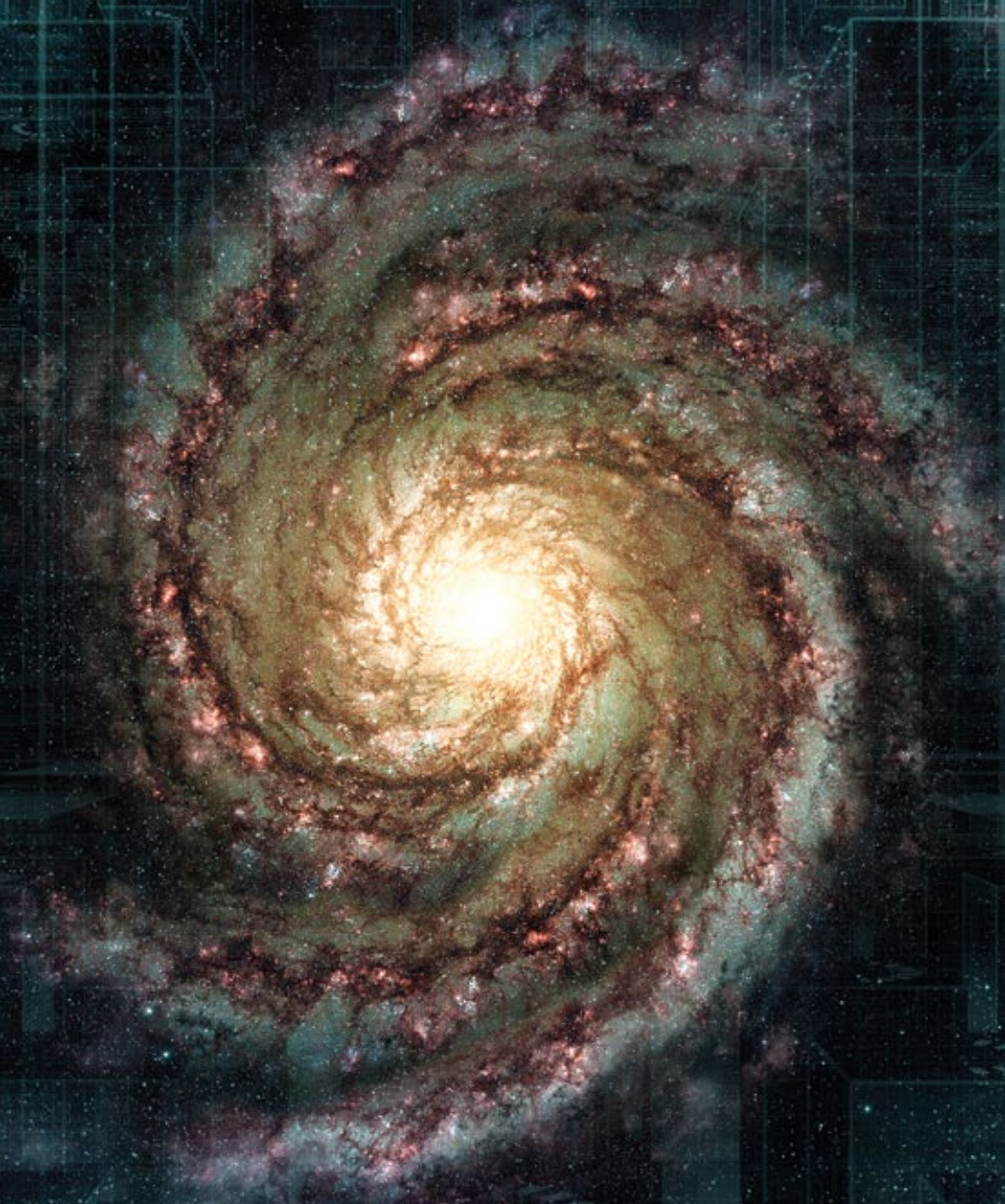
AUF EINEN BLICK

GLATT ODER DISKRET, ANALOG ODER DIGITAL

1 Die Quantenmechanik gilt als in ihrem Wesen »diskret«, das heißt als portioniert und sprunghaft. Doch ihre **Gleichungen** beschreiben **kontinuierliche Größen**. Erst die Eigenschaften des jeweiligen Systems rufen diskrete Werte hervor.

2 Verfechter des digitalen Aspekts argumentieren, die kontinuierlichen Größen seien bei näherer Betrachtung diskret; sie lägen auf einem feinmaschigen Gitter, das – wie die Pixel auf einem Bildschirm – die **Illusion eines Kontinuums** erzeugt.

3 Der Idee eines gekörnten, diskreten Raums widerspricht jedoch einer Tatsache: der **Asymmetrie** zwischen rechts- und linksdrehenden Elementarteilchen.



Die Welt im Großen, wie sie die Kosmologie erforscht, wird von kontinuierlichen Feldern – Gravitation und Elektromagnetismus – beherrscht. Doch im Kleinen herrschen digitale Quantenaspekte. Gleicht das Universum am Ende einem Computer?

Zwergplaneten. Wenn man diese dazuzählt, steigt die Gesamtzahl auf 13. Das heißt, die Anzahl der Planeten hängt von der Zählweise ab. Der jenseits von Neptun liegende Kuiper-gürtel umfasst Objekte, deren Größe von wenigen tausendstel Millimetern bis zu einigen tausend Kilometern reicht. Man kann die Anzahl der Planeten nur feststellen, wenn man eine ziemlich beliebige Unterscheidung zwischen Planeten, Zwergplaneten und bloßen Fels- oder Eisbrocken trifft.

Doch dann gab die Quantenmechanik der Digital-Analog-Debatte eine neue Wendung. Die Definition eines Planeten mag Ansichtssache sein, aber nicht die eines Atoms oder Elementarteilchens. Die Ordnungszahlen der chemischen Elemente, die, wie wir heute wissen, die Anzahl der Protonen im Atomkern angeben, sind objektive ganzzahlige Größen. Ich nehme gern jede Wette an, dass wir – ungeachtet aller künftigen physikalischen Errungenschaften – niemals ein Element mit $\sqrt{500} = 22,360679775$ Protonen beobachten werden, das im Periodensystem zwischen Titanium (Ordnungszahl 22) und Vanadium (23) sitzt. Die ganzen Zahlen werden in der Atomphysik ihren Platz behaupten.

Ein weiteres Beispiel bietet die Spektroskopie, welche die Emission und Absorption von Licht durch Materie analysiert. Eine bestimmte Atomsorte vermag nur gewisse typische Wellenlängen auszusenden, die quasi einen Fingerabdruck des Atoms liefern. Im Gegensatz zu menschlichen Fingerabdrücken gehorchen die Atomspektren festen mathematischen Regeln, in denen ganze Zahlen eine entscheidende Rolle spielen. Die ersten Versuche, die Quantentheorie zu deuten, insbesondere durch den dänischen Physiker Niels Bohr (1885–1962), stellten denn auch die Diskretheit der Spektrallinien in den Mittelpunkt.

Emergente Ganzzahligkeit

Doch Bohr behielt nicht das letzte Wort. Der österreichische Theoretiker Erwin Schrödinger (1887–1961) entwickelte 1925 einen anderen Ansatz, der auf einem Wellenmodell beruht. Die Gleichung, die solche Quantenwellen beschreibt, enthält keine ganzen Zahlen, sondern nur kontinuierliche Größen. Erst wenn man die Schrödinger-Gleichung für ein spezielles System löst, geschieht ein kleines mathematisches Wunder. Im einfachen Fall des Wasserstoffatoms umkreist ein Elektron ein Proton in ganz speziellen Abständen. Die diskreten Umlaufbahnen definieren die charakteristischen Spektrallinien. Das Atom entspricht einer Orgel, die eine diskrete Tonfolge erzeugt, obwohl die Luft sich kontinuierlich bewegt. Zumindest für das Atom gilt, unter Bezugnahme auf Krockers Ausspruch: Gott hat die ganzen Zahlen nicht gemacht. Er schuf kontinuierliche Größen, und der Rest resultiert aus der Schrödinger-Gleichung.

Demnach sind die ganzen Zahlen nicht die Inputs der Theorie, sondern Outputs. Sie stellen ein Beispiel für eine so genannte emergente Größe dar. Somit trifft die Bezeichnung »Quantenmechanik« eigentlich nicht zu, denn die Theorie ist im Grunde nicht quantenhaft. Erst die durch die Theorie beschriebenen Prozesse formen in Systemen wie dem Was-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



Unser Online-Dossier zum Thema »Quantenphysik« finden Sie unter



www.spektrum.de/thema/quantenphysik/950163

serstoffatom diskrete Resultate aus einer tiefer liegenden Kontinuität.

Was vielleicht noch überraschender ist: Auch die Existenz von Atomen oder Elementarteilchen ist kein Input unserer Theorien. Physiker lehren gewöhnlich, die Natur sei aus diskreten Teilchen wie Elektronen oder Quarks zusammengesetzt. Das ist falsch. Die Bausteine unserer Theorien sind nicht Teilchen, sondern Felder: kontinuierliche Objekte, die den Raum ähnlich erfüllen wie Gase oder Flüssigkeiten. Bekannte Beispiele sind Elektrik und Magnetismus, doch es gibt auch ein Elektronfeld, ein Quarkfeld, ein Higgsfeld und einige mehr. Was wir fundamentale Teilchen nennen, sind gar keine grundlegenden Objekte, sondern Kräuselungen kontinuierlicher Felder.

Ein Skeptiker könnte einwenden, dass die physikalischen Gesetze doch einige ganze Zahlen enthalten. Zum Beispiel beschreiben die Gesetze drei Arten von Neutrinos, sechs Arten von Quarks – von denen jede in drei so genannten Farben vorkommt – und so fort. Überall ganze Zahlen! Aber stimmt das? All diese Beispiele geben die Anzahl der Teilchentypen im Standardmodell an, und diese Größe ist mathematisch ungeheuer schwer zu präzisieren, wenn Partikel miteinander wechselwirken. Teilchen können sich verwandeln: Ein Neutron zerfällt in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino. Sollen wir es als ein, drei oder gar vier Teilchen zählen? Die Behauptung, es gebe drei Arten von Neutrinos, sechserlei Quarks und so weiter, ignoriert die Wechselwirkungen.

Ein weiteres Beispiel für eine ganze Zahl betrifft die Anzahl der Raumdimensionen, die wir beobachten, nämlich drei. Aber der prominente Mathematiker Benoît Mandelbrot (1924–2010) wies darauf hin, dass Raumdimensionen keine ganze Zahl ergeben müssen. Die Küstenlinie von Großbritannien etwa hat eine Dimension von rund 1,3. Außerdem sind in vielen Ansätzen zu einer vereinheitlichten Theorie der Physik, etwa in der Stringtheorie, die Raumdimensionen nicht eindeutig definiert: Sie können entstehen oder vergehen.

Ich wage zu behaupten, dass es in der gesamten Physik nur eine echte ganze Zahl gibt, die Eins. Denn die physikalischen Gesetze beziehen sich auf nur eine Dimension der Zeit. Ohne exakt eine Zeitdimension scheint die Physik widersprüchlich zu werden.

Obleich unsere gängigen Theorien annehmen, dass die Realität kontinuierlich ist, glauben viele meiner Kollegen

dennoch, dem Kontinuum liege eine diskrete Realität zu Grunde. Sie verweisen auf Beispiele für die Emergenz von Kontinuierlichem aus Diskretem. In der makroskopischen Größenordnung der Alltagserfahrung erscheint das Wasser im Glas als glatt und kontinuierlich. Erst bei viel genauerer Betrachtung werden die atomaren Bestandteile sichtbar. Könnte ein derartiger Mechanismus die Grundlage der Physik bilden? Vielleicht werden wir hinter den glatten Quantenfeldern des Standardmodells – oder gar hinter der Raumzeit selbst – eine diskrete Struktur entdecken.

Vom Quantum zum Kontinuum

Die Antwort auf diese Frage wissen wir nicht; aber nachdem 40 Jahre lang versucht wurde, das Standardmodell auf dem Computer zu simulieren, können wir eine Vermutung riskieren. Um eine solche Simulation durchzuführen, muss man zunächst Gleichungen für kontinuierliche Größen nehmen und dafür eine diskrete Formulierung finden, die zu den in Computern verarbeiteten Informationsbits passt. Trotz jahrzehntelanger Anstrengung ist das noch niemandem gelungen. Dies bleibt eines der wichtigsten – obwohl selten erwähnten – offenen Probleme der theoretischen Physik.

Immerhin haben die Physiker eine diskrete Version von Quantenfeldern entwickelt, die so genannte Gitterfeldtheorie. Sie ersetzt die Raumzeit durch eine Punktmenge. Computer berechnen an diesen Punkten Werte, um näherungsweise ein kontinuierliches Feld darzustellen. Doch das Verfahren hat seine Grenzen. Die Schwierigkeit steckt in den Elektronen, Quarks und anderen Materieteilchen, so genannten Fermionen. Wenn man ein Fermion um 360 Grad dreht, findet man seltsamerweise nicht mehr dasselbe Objekt vor; erst nach einer Rotation um 720 Grad erhält man wieder das ursprüngliche Fermion. Das ist eine Folge der speziellen Quantenstatistik für diese Partikel; sie hat insbesondere das so genannte Ausschließungsprinzip zur Folge, welches verbietet, dass zwei Elektronen eines Atoms in allen Quantenzahlen übereinstimmen. Diese Teilchen lassen sich deshalb nicht ohne Weiteres auf ein Gitter setzen. In den 1980er Jahren bewiesen Holger Bech Nielsen vom Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen und Masao Ninomiya vom Okayama-Institut für Quantenphysik in Japan ein berühmtes Theorem, wonach es grundsätzlich unmöglich ist, den einfachsten Fermionentyp zu diskretisieren.

Solche Theoreme sind freilich nur so stark wie ihre Annahmen. In den 1990er Jahren gelang es David Kaplan von der University of Washington in Seattle, Herbert Neuberger von der Rutgers University in New Jersey und anderen Theoretikern mit unterschiedlichen Tricks, Fermionen auf dem Gitter zu platzieren. Es gibt alle möglichen Quantenfeldtheorien, jede mit anderen Fermionentypen, und heute lässt sich fast jede Teilchenart auf einem Gitter darstellen. Nur bei einer einzigen Klasse von Quantenfeldtheorien gelingt das nicht, und dazu gehört leider ausgerechnet das Standardmodell. Wir können alle Arten von hypothetischen Fermionen behandeln, aber nicht diejenigen, die wirklich existieren.

Die Fermionen des Standardmodells haben eine sehr spezielle Eigenschaft. Diejenigen, deren Spin einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn entspricht, spüren die schwache Kernkraft, die mit Spin im Uhrzeigersinn jedoch nicht. Die entsprechende Theorie heißt chiral. Eine chirale Theorie ist delikat: Subtile Effekte, so genannte Anomalien, drohen sie fortwährend in Widersprüche zu verwickeln. Solche Theorien lassen sich bisher nicht im Computermodell darstellen.

Doch die Chiralität ist kein Makel des Standardmodells, der im Rahmen einer tiefer liegenden Theorie verschwinden würde; sie ist ein wesentlicher Bestandteil. Auf den ersten Blick erscheint das Standardmodell, das auf drei verketteten Kräften beruht, als eine beliebige Konstruktion. Erst wenn man die chiralen Fermionen bedenkt, offenbart sich seine wahre Schönheit. Es gleicht einem perfekten Puzzle, dessen drei Stücke auf die einzig mögliche Art verbunden sind. Die Chiralität der Fermionen sorgt dafür, dass im Standardmodell alles zusammenpasst.

Die Forscher wissen noch nicht so recht, was sie von unserer Unfähigkeit halten sollen, das Standardmodell im Computer zu simulieren. Es ist schwierig, aus dem Scheitern an einem Problem solide Schlüsse zu ziehen. Möglicherweise handelt es sich nur um ein besonders kniffliges Rätsel, das darauf wartet, mit herkömmlichen Verfahren gelöst zu werden. Doch gewisse Aspekte des Problems sprechen dagegen. Die Hindernisse hängen eng mit mathematischen Details von Topologie und Geometrie zusammen. Vielleicht besagt die Schwierigkeit, chirale Fermionen auf dem Gitter zu platzieren, etwas Wichtiges: Die physikalischen Gesetze sind in letzter Instanz nicht diskret – wir leben nicht in einer Computersimulation. ~

DER AUTOR



David Tong ist Professor für theoretische Physik an der University of Cambridge. Davor forschte er in Boston, New York, London und Mumbai. Seine Interessen umfassen Quantenfeldtheorie, Stringtheorie, Solitonen und Kosmologie.

QUELLEN

- Kaplan, D. B.:** Chiral Symmetry and Lattice Fermions. <http://arxiv.org/abs/912.2560>
Tanedo, F.: Helicity, Chirality, Mass, and the Higgs. www.quantumdiaries.org/2011/06/19/helicity-chirality-mass-and-the-higgs
Zee, A.: Quantum Field Theory in a Nutshell. Princeton University Press, Princeton 2012

WEBLINKS

Ein Interview mit dem Autor (in englischer Sprache) finden Sie unter scientificamerican.com/dec2012/digital

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1221323

WISSENSCHAFTLER UND NOBELPREISTRÄGER IN IHREM BRIEFKASTEN.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT-Abo mit exklusiven Extras



1. »Meine kurze Geschichte« von Stephen Hawking

Zum ersten Mal lässt der Physiker sein ganzes privates und wissenschaftliches Leben Revue passieren – in einem Buch voller Weisheit und Humor.

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK.

2. Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format.



3. Erzähl mir was vom Himmel und der Erde

Auf diesen 3 Audio-CDs beantworten Harald Lesch und Gudrun Mebs Kinderfragen zur Astronomie. Ein Erlebnis für große und kleine Astro-Fans.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



SICHERN SIE SICH ALLE VORTEILE IM ABO ...

... und verpassen Sie keine Ausgabe des großen Wissensmagazins.

VORTEILSABO

ABOPLUS+ – EXKLUSIVE VORTEILE FÜR ABONNENTEN!

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** fast 10 % günstiger und portofrei ins Haus. Sie können jederzeit wieder kündigen

+ WUNSCH-GESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten

+ EXKLUSIVE ABOPLUS+-VORTEILE:

2 IN 1:

Sie erhalten nicht nur die Print-, sondern auch Zugriff auf die digitale Ausgabe im PDF-Format

KOSTENLOSER ARCHIVZUGANG

zum kompletten Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** ab 2004 mit über 9000 Artikeln

VERGÜNSTIGUNGEN:

Rabatte bei unseren Sonderheften sowie mit dem Mitgliedsausweis bei zahlreichen Museen, wissenschaftlichen Institutionen und Filmtheatern.

EXTRAS:

ausgewählte Hefte zum kostenlosen Download



**MEHR UNTER:
WWW.SPEKTRUM.DE/ABOPLUS**

Der lange Weg zur Landwirtschaft

Pflanzen zu züchten, galt Forschern lange als Technologiesprung. Sie erachteten die neolithische Lebensweise als Revolution, die von einem einzigen Ursprungsort ausging. Jetzt mehren sich die Hinweise, dass es in Wirklichkeit anders war.

Von Simone Riehl

Nur ein Drittel der Weltbevölkerung betreibt Ackerbau, doch ohne diesen könnte die Menschheit nicht überleben. Mehr als die Hälfte unseres Kalorienbedarfs decken wir – über alle Kulturen und Völker gemittelt – seit Jahrtausenden durch Kohlenhydrate, deren Löwenanteil wiederum aus Getreiden stammt. Die Entwicklung der Landwirtschaft an Stelle von Jagen und Sammeln war deshalb mehr als eine Innovation: Vor allem der Getreideanbau stellt einen wichtigen Schritt in der Evolution der Menschheit dar.

Vorbereitet wurde er Zehntausende von Jahren, bevor der erste Bauer einen Acker bestellte. So aßen jene Neandertaler, die vor mindestens 44 000 Jahren am heutigen nordirakischen Fundplatz Shanidar III lebten, bereits Wildgerste und andere Gräser Samen. Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig haben die Grabungsfunde, die seit den 1970er Jahren in Archiven schlummerten, mit neuen mikroskopischen Methoden vor Kurzem untersucht. Sie entdeckten auf allen Zähnen Stärkekörner. Weil einige davon offenbar erhitzt worden waren, gehen die Forscher davon aus, dass die Mahlzeit gekocht wurde. In mindestens 40 000 Jahre alten Schichten der israelischen Fundstelle Gesher Benot Ya'aqov entdeckten Archäobotaniker

Überreste von Hülsenfrüchten, Weintrauben und möglicherweise sogar von Oliven. Die Bewohner der zeitgleichen, ebenfalls in Israel gelegenen Stätten Amud Cave und Kebara Cave (siehe Karte rechts) bereicherten ihren Speiseplan wohl systematisch durch Linsen, Pistazien und Eicheln.

Gehören diese Fundplätze in das Mittelpaläolithikum (200 000–40 000 Jahre vor heute; diese Angabe bezieht sich nach internationaler Konvention auf das Jahr 1950), so datieren die ältesten mit entsprechenden Hinweisen in Europa erst in das Jungpaläolithikum (um 40 000–10 000 vor heute). Es sind vor allem Stärkepartikel auf Mahlwerkzeugen und Mörsern, die hier für eine intensive Nutzung wilder Getreide oder Hülsenfrüchte sprechen. Getreidekörner, deren Größe der von Kulturpflanzen ähnelt, kamen erstmals am syrischen Fundplatz Abu Hureyra zu Tage, dessen älteste archäologische Schichten etwa 11 500 Jahre alt sind.

Die Zeit vorher, in der Menschen begannen, Wildgetreide zu kultivieren, beschäftigt Archäologen und Botaniker seit mehr als 100 Jahren. Um 1870 definierte der Bankier und Hobbyarchäologe Sir John Lubbock in seinem Werk »On the Origin of Civilization« erstmals den Begriff »Neolithikum« als jenes Zeitalter, in dem der Mensch sesshaft wurde, Ton zu Gefäßen formte und diese trocknen ließ, später auch brannte, Steinäxte mit polierten Klingen herstellte sowie Kulturpflanzen anbaute und Tiere domestizierte. 1936 prägte der Australier Gordon Childe die Forschung mit seiner Idee von einer »neolithischen Revolution«: Ähnlich bedeutsam wie die industrielle Revolution sollte demnach dieser Umschwung mit großer Dynamik abgelaufen sein. Childe legte auch ein schlüssig wirkendes Modell vor: Nach der letzten Eiszeit hätte eine Phase der Trockenheit die Menschen in Südwestasien gezwungen, sich in den verbliebenen Oasen und Flusstälern anzusiedeln, statt weiterhin als Nomaden umherzuziehen.

Der an der University of Chicago lehrende Robert Braidwood überprüfte diese These nach dem Zweiten Weltkrieg durch gezielte Ausgrabungen in Kurdistan, Iran und der Südosttürkei. Er war der erste Archäologe, der auch Botaniker

AUF EINEN BLICK

NEOLITHISCHE EVOLUTION

1 Gleich der Industrialisierung im 19. Jahrhundert wurde auch das Aufkommen der **Landwirtschaft** vor fast 12 000 Jahren lange als revolutionärer Einschnitt in die Menschheitsgeschichte angesehen.

2 Dementsprechend suchten Archäologen nach einem **Ursprungsort** oder zumindest nach wenigen **Kerngebieten** dieser neuen Technologie.

3 Jüngste **Grabungen im Iran** lassen aber vermuten, dass sich der Landbau in mehreren Gebieten des Fruchtbaren Halbmonds parallel entwickelte. Möglicherweise basiert die **Neolithisierung** auf den kognitiven Fähigkeiten des Menschen und seinem Vermögen, sich optimal an seine Umwelt anzupassen.

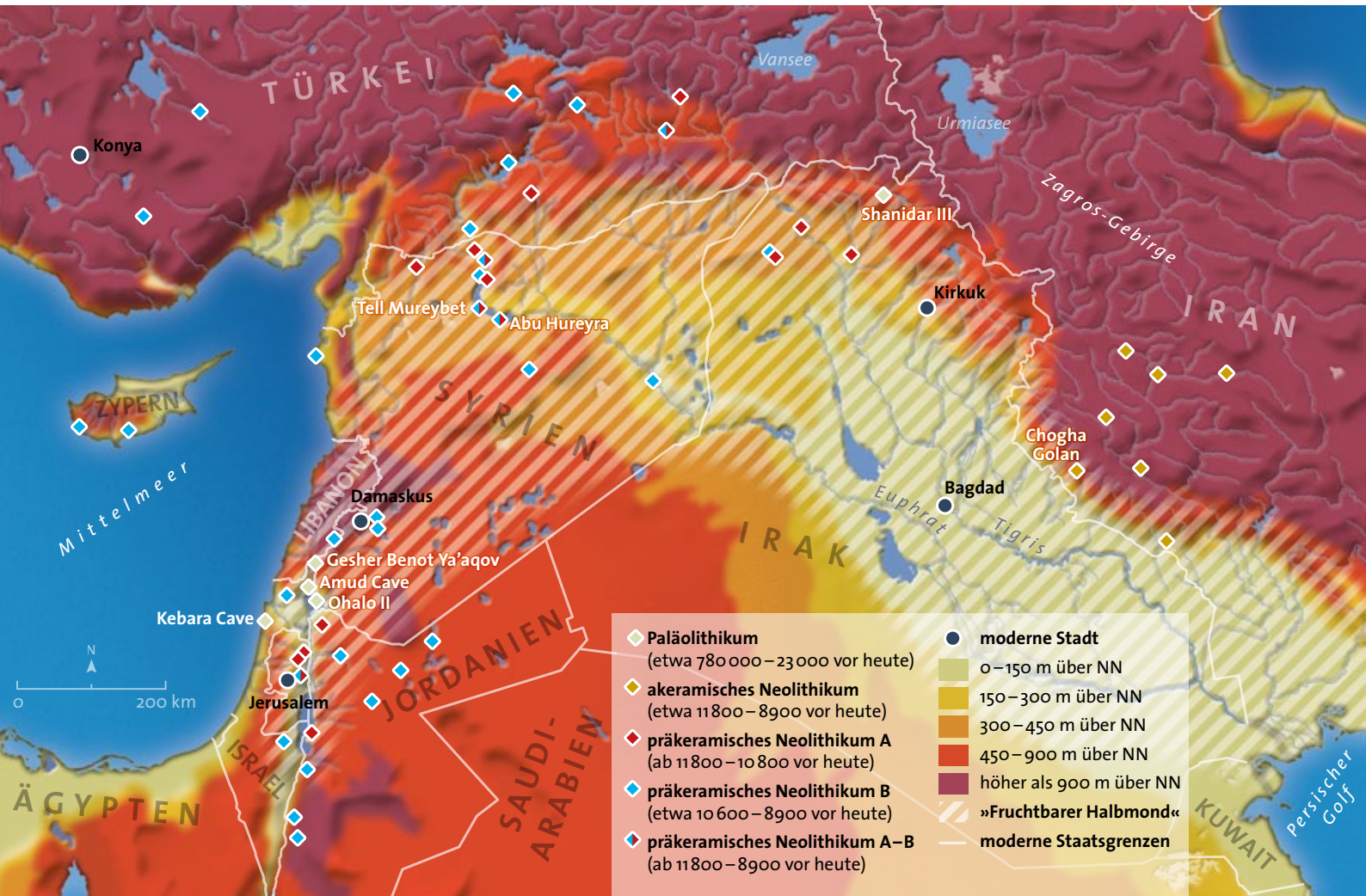
und Zoologen mit in sein Team aufnahm. Dem interdisziplinären Ansatz trug das von ihm entwickelte Modell Rechnung: Weil auf den Ausläufern des Zagros-Gebirges im westlichen Iran zahlreiche neolithische Fundplätze lagen und zudem in reichem Maße die wilden Vorfahren unserer heutigen Getreide wuchsen, wäre die Landwirtschaft in jenem Kerngebiet entstanden.

Heute geht man davon aus, dass dieser Prozess unabhängig voneinander in verschiedenen Teilen des Fruchtbaren Halbmonds ablief, eines im Winter niederschlagsreichen Ge-

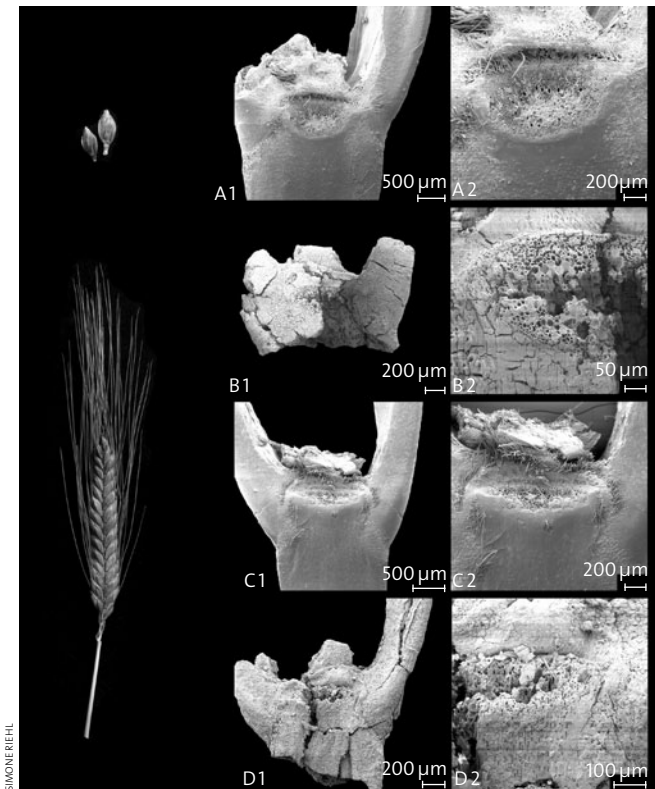
biets, das die westliche Levante, das Grenzgebiet Nordsyriens zur Türkei, den Nordirak und den nordwestlichen Iran umfasst. Schon der russische Botaniker und Pflanzengenetiker Nikolai Vavilov hatte 1928 dieses Gebiet anhand seiner Biodiversität als einen möglichen Ursprung heutiger Kulturpflanzen in der Alten Welt ausgemacht.

Mit der Erweiterung des archäologischen Methodenspektrums ab den 1960er Jahren rückten die Veränderungen von Wirtschaft und Umwelt ins Zentrum der Erklärungsmodelle. Die als »processual archaeology« oder auch »new archaeolo-

Vor 12 000 Jahren begannen Menschen in der heute als Fruchtbare Halbmond bezeichneten Region erstmals Wildgetreide systematisch zu sammeln. Vermutlich hegten und pflegten sie zunächst die Vorkommen, bevor sie durch die Auswahl und Anpflanzung ertragreicherer Pflanzen die domestizierten Formen züchteten. Lange Zeit suchten Prähistoriker und Archäobotaniker nach einem Ort, an dem diese Entwicklung ihren Anfang nahm. Doch mehr und mehr zeichnet sich ab, dass die »Neolithisierung« nicht derart lokalisierbar ist, sondern in einem engen Zeitraum an mehreren Siedlungsplätzen aufkam. Dies bestätigen auch die Grabungen der Autorin und ihrer Kollegen in Chogha Golan (siehe Foto rechts), einem iranischen Fundort am Fuße des Zagros-Gebirges.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: SIMONE RIEHL



Emmer gehörte zu den ersten Wildgetreiden, die der Mensch durch Züchtung verändert hat. Im Fundgut der Archäobotaniker finden sich zwar keine vollständigen Ähren mehr (links oben: zwei Ährchen, also Körner mit Bespelzung; links unten: domestizierte Ähre). Doch blieben immerhin Bruchstücke mit charakteristischen »Abbruchnarben« erhalten. Bei der Wildform sind dies Sollbruchstellen, damit die Ährchen abfallen, wenn die Samen reif sind. Unter dem Mikroskop stellen sie sich als ovale, leicht konkave Flächen zwischen den Hüllspelzen dar (A 1 und 2: heutiger Wildemmer, B 1 und 2: in Chogha Golan gefundener Wildemmer). Domestizierte Ährchen hingegen brechen erst beim Dreschen, es bleibt eine unregelmäßig ausgebrochene Narbe (C 1 und 2: moderner, domestizierter Emmer, D 1 und 2: domestizierter Emmer aus Chogha Golan).

Die Übersicht auf der rechten Seite zeigt, dass die Phasen der Neolithisierung, vom Sammeln von Wildgetreiden bis zu ihrer Domestikation, im Gebiet des Fruchtbaren Halbmonds eng verzahnt abliefen (die Phasen sind hier feiner aufgegliedert als in der Karte auf S. 65).

gy« bezeichnete Denkschule propagierte, die kulturelle Evolution des Menschen anhand archäologischer Artefakte und der mit naturwissenschaftlichen Methoden gewonnenen Daten zu erschließen. Allerdings läuft dieser Ansatz Gefahr, bei der Interpretation archäologischer Befunde den für die betreffende Zeit rekonstruierten Umweltbedingungen eine geradezu deterministische Bedeutung zuzusprechen.

Der amerikanische Archäologe Kent Flannery von der University of Michigan prägte um 1965 bezüglich der Neolithisierung das Modell der »Ökonomie des breiten Spektrums«, das später in Anlehnung an Childe als »broad spectrum revolution« bezeichnet wurde. Demnach hätten zwei klimatische Veränderungen die Zahl der großen Jagdtiere wie Damwild und Wildschwein jeweils stark reduziert: die Erwärmung am Ende der letzten Eiszeit um 15 000 vor heute sowie ein erneuter Kälteeinbruch etwa 13 000 bis 11 600 vor heute, Jüngere Dryas genannt. Die Jäger seien gezwungen gewesen, auch kleinere Tierarten wie Gazelle und Hase zu erbeuten – und die Landwirtschaft zu entwickeln. Nicht zuletzt aus methodischen Gründen ist es bisher aber nicht gelungen, für den Fruchtbaren Halbmond einen sicheren Nachweis für einen solchen Einfluss klimatischer Schwankungen zu erbringen.

Stressfaktoren als Auslöser kulturellen Wandels diskutierten die Archäologen in den 1970er Jahren, inspiriert durch die politischen Veränderungen jener Zeit. Die Neolithisierungsmodelle von Lewis Binford, der bis in die 1990er Jahre an verschiedenen amerikanischen Universitäten lehrte, und von Mark Cohen von der Princeton University nennen Po-

pulationsdruck und Nahrungsmangel infolge von Klimaveränderungen als mögliche Ursachen der Neolithisierung. Um solche Modelle zu überprüfen, müsste man aber die Populationsdichte in Relation zu den damals vorhandenen Ressourcen setzen, was mangels eindeutiger Belege bis heute ebenfalls nicht möglich ist.

Landwirtschaft erfordert soziale Kompetenz

Ab den 1980er Jahren brachte vor allem Ian Hodder von der Stanford University kulturelle Bedürfnisse als Auslöser ökonomischer Entscheidungen ins Spiel, wie etwa Veränderungen im rituellen und sozialen Miteinander, die Modifikationen bei Arbeitsteilung und Arbeitsabläufen zur Folge hatten. In jüngster Zeit bereichert die Kognitionspsychologie das Spektrum der Erklärungen. So geht Trevor Watkins, Emeritus der University of Edinburgh, davon aus, dass das menschliche Sozialverhalten erst vor etwa 12 000 Jahren ein Niveau erreichte, das Interaktionen möglich machte, wie die Landwirtschaft sie erfordert – auch die Fähigkeit, dauerhaft mit einer Vielzahl von Menschen an einem Ort zusammenzuleben. Mag die Logik dieser Argumentation bestechen, so sind hier eindeutige archäologische Beweise kaum zu finden.

Inzwischen glauben die meisten Experten nicht mehr an einen einzigen Faktor, der die neolithische Lebensweise hervorbrachte, sondern an ein Ursachengeflecht. Dementsprechend gab es wohl auch keinen einzelnen Ort, an dem alles begann.

Fortschritte bei der Unterscheidung von wilden und domestizierten Getreiden ermöglichten diesen Meinungs-

wandel. Heute weiß man, dass Körner allein keine eindeutige Differenzierung zwischen wilden und domestizierten Arten erlauben, wohl aber die Einbeziehung von Spelzen, also von jenen kleinen Hüllen und Stielchen, die in der Ähre die Körner umschließen und halten. Während die Vermehrung wilder Pflanzen bedingt, dass die Ähre zur Reifezeit aufbricht und der Samen zu Boden fällt, soll dies bei der Kulturpflanze unterbleiben (siehe Bilder S. 66).

Problematischer ist es freilich, Wildformen, die nur gesammelt wurden, von solchen zu unterscheiden, die zwar noch nicht durch Züchtung verändert, aber doch bereits gezielt angebaut wurden. Dabei hilft die Vermessung von Getreidekörnern, deren Größen sich im Lauf der Kultivierung änderten. Und natürlich liefern Vorratsgefäße oder -gruben sowie Geräte zur Ernte und zur Verarbeitung von Getreide wie Sichelklingen, Mahlplatten und Mörser einen Hinweis darauf, dass die betreffenden Wildpflanzen einen wichtigen Platz im Nahrungsspektrum einnahmen.

Überraschende Funde im Iran

Nach diesen Kriterien galten bislang als älteste Fundplätze für die systematische Nutzung von Wildgetreiden: Ohalo II in Israel mit einem Alter von 23 000 Jahren vor heute sowie Tell Abu Hureyra mit rund 13 000 Jahren. Der Archäobotaniker Gordon Hillman vom University College London fand hier Roggen mit Merkmalen von Domestikation. In den zentralen Teil des Fruchtbaren Halbmonds gehört der Tell Mureybet (11 400 vor heute), wo Einkorn nachgewiesen wurde.

Insgesamt zeigt sich für das Gesamtgebiet, dass Getreide mit Merkmalen gezielter Züchtung innerhalb des Fruchtbaren Halbmonds zwischen 10 300 und 9700 vor heute auftauchte. Archäobotaniker sprechen von drei bis fünf Kerngebieten, wobei diese Einschätzung kritisch gesehen werden muss, da aus den dazwischenliegenden Gebieten keine Untersuchungen vorliegen, bis vor Kurzem auch nicht aus dem Iran – in diesem Fall aus politischen Gründen.

Entstand das Knowhow dort jeweils eigenständig, oder verbreitete es sich durch einen Austausch von Ideen und Techniken? Dass Menschen bereits im Paläolithikum große Distanzen zurücklegten und Objekte tauschten, beweisen beispielsweise Meeresmuscheln, die im Binnenland ausgegraben wurden, oder Werkzeuge aus einer Gesteinsart, die am Fundort nicht vorkommt. So ist schon seit Langem bekannt, dass bereits am Ende der Eiszeit (um 16 000 vor heute) Obsidian aus Anatolien über mehrere hundert Kilometer bis nach Syrien und in den Iran gehandelt wurde.

Doch wie verhält es sich mit Wildgetreiden? Pollenanalysen aus verschiedenen Gebieten des Fruchtbaren Halbmonds belegen, dass dort gegen Ende der Jüngeren Dryas (um 11 600 vor heute) überall Süßgräser wuchsen. Ihre bislang früheste Nutzung fand im Westen der Region statt, um 23 000 vor heute. Im zentralen Teil der Region kamen um 10 400 vor heute dann domestizierte Typen auf. Bis vor Kurzem erklärte man sich das durch einen Transfer per Kulturdiffusion aus dem Westen in den Osten.

Kürzlich aber hat unser Archäologenteam von der Universität Tübingen in Kooperation mit dem Iranischen Zentrum für Archäologische Forschung (ICAR) dieses Modell in Frage gestellt. Am Fundplatz Chogha Golan am Fuße des Zagros-Gebirges konnten wir die Kultivierung der Wildgerste über einen Zeitraum von 11 400 bis 9600 vor heute nachvollziehen. Offenbar gab es im Osten eine eigenständige Tradition der Kultivierung von Wildgetreiden, denn der frühe Zeitpunkt macht eine Übernahme aus den zentralen Regionen unwahrscheinlich.

Archäobotanische Untersuchungen zu späteren Phasen im Fruchtbaren Halbmond zeigen auch, dass die Menschen dort nach dem Aufkommen der Landwirtschaft das Sammeln und Jagen nicht aufgaben, sondern ihr Nahrungsspektrum dadurch ergänzten. Vermutlich handelt es sich um ein dem Menschen eigenes Verhaltensprinzip, alle natürlichen Ressourcen zu nutzen. So gesehen erscheint die Landwirtschaft weniger als technologische Innovation denn als Ergebnis eines evolutionären Prozesses von Anpassungen. Dank seiner kognitiven Fähigkeiten vermochte der Mensch die natürlichen Zusammenhänge zu verstehen. Dann übernahm ein neues Verhaltensmuster das Regiment – im Wissen um die Wankelmütigkeit der Natur galt es, Notständen vorzubeugen. Es begann als Bestandssicherung durch Pflege und entwickelte sich zur Überschussproduktion. Domestikation ereignete sich dabei eher zufällig: Indem Wildpflanzen mit brüchigen Ährchen immer seltener in die Erntegefäße und zur Aussaat gelangten, überwogen schließlich solche Mutanten, die stabile Ährchen hervorbrachten, was den Ernteertrag verbesserte. Ab wann Bauern solche Zusammenhänge durchschauten und aktiv mit der Züchtung ertragreicher Sorten begannen, ist eine der Fragen an die künftige Forschung. ~

DIE AUTORIN



Simone Riehl ist Umweltarchäologin am Senckenberg Zentrum für Menschliche Evolution und Paläoumwelt der Universität Tübingen.

QUELLEN

Braidwood, R. J.: The Agricultural Revolution. In: *Scientific American* 203, S. 131–148, 1960

Fuller, D.: Contrasting Patterns in Crop Domestication and Domestication Rates: Recent Archaeobotanical Insights from the Old World. In: *Annals of Botany* 100, S. 903–924, 2007

Riehl, S. et al.: Emergence of Agriculture in the Foothills of the Zagros Mountains of Iran. In: *Science* 341, S. 65–67, 2013

WEBLINKS

Diesen Artikel sowie einen Link zur Webseite des Projekts finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1224872

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Was ist eine psychische Krankheit?
Was heißt „Normal sein“?
Wie messen wir psychische Gesundheit?
Was bewirken Diagnosen?

MI 09.04.2014 / 19.00 / HANNOVER
WIE LANGE DARF MAN TRAUERIG SEIN?

MIT **Prof. Dr. Frank Jacobi** Technische Universität Dresden und Psychologische Hochschule Berlin,
Prof. Dr. Thomas Bock Universitätskrankenhaus Hamburg-Eppendorf, **Prof. Dr. Thomas Schramme**
Universität Hamburg, **Edgar Selge** Schauspieler, Schirmherr BASTA (tbc)
MODERIERT VON **Christiane Gelitz** Redaktionsleitung Gehirn+Geist

VERANSTALTUNGSORT Tagungszentrum Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de

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

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Die Milchrevolution

Eine einzige genetische Mutation veränderte das Leben der frühen Bauern Europas grundlegend: Sie erlaubte ihnen, Milch zu trinken.

Von Andrew Curry

Bei Ausgrabungen einer frühen jungsteinzeitlichen Siedlung in den fruchtbaren Ebenen Zentralpolens in den 1970er Jahren stieß der amerikanische Archäologe Peter Bogucki auf merkwürdige Tonscherben: Sie waren mit feinen Löchern übersät, als hätten die Leute Gefäße aus rotem Ton vor dem Brennen mit Strohhalmen durchbohrt (siehe Bild, S. 73). Die Menschen, die vor rund 7000 Jahren an diesem Ort gelebt hatten, zählten zu den ersten Bauern Mitteleuropas.

In der Fachliteratur fand Bogucki daraufhin Berichte über ähnliche Funde. »Gerade weil perforierte Töpferware höchst ungewöhnlich erschien, erwähnte man sie meistens in seinen Publikationen«, erinnert sich der Forscher, der heute an der Princeton University (New Jersey) arbeitet. Er selbst dachte beim Anblick dieser Fragmente an Siebe zur Käseherstellung, die er einmal gesehen hatte. Aber ob seine Idee zutraf, konnte er damals nicht klären.

Erst 2011 nahm sich Mélanie Roffet-Salque, eine Geochemikerin an der University of Bristol (England), jener Artefakte wieder an – und fand daran Rückstände von Milchfett. Offenbar wurden die durchlöchernten Tongefäße tatsächlich einst bei der Herstellung von Quark oder Käse benutzt – vermutlich dazu, die Molke von der kompakten, fetten Masse abzutrennen. Das wäre der weltweit früheste Hinweis auf Käseproduktion überhaupt.

Dieser Befund fügt sich in eine Reihe weiterer jüngerer Entdeckungen zur frühen Milchnutzung in Europa, die er-

kennen lassen, wie sehr die Besiedlungsgeschichte des Kontinents von der Milchwirtschaft geprägt wurde. Etliche dieser neuen Ergebnisse kamen im Rahmen eines übergreifenden Forschungsprojekts zu Stande, für das die Europäische Union 3,3 Millionen Euro bereitstellte und das Archäologen, Chemiker und Genetiker beteiligte.

Noch während der letzten Kaltzeit – die viele gern, jedoch unzutreffend, »letzte Eiszeit« nennen – vertrugen Erwachsene unfermentierte Milch überhaupt nicht. Ihnen wurde davon schlecht, denn sie bildeten nicht mehr das Enzym Laktase, das bei Kindern den Milchzucker, die Laktose, im Darm in einfache Zuckermoleküle zerlegt. Ohne Laktase bekommt man von Milchzucker Blähungen, Darmkrämpfe und schweren Durchfall.

Im Nahen Osten fanden die Menschen allerdings schon früh heraus, dass sie besser verträgliche Milchprodukte herstellen konnten – ungefähr zu der Zeit, als dort vor etwa 11000 Jahren die Landwirtschaft entstand, womit dort die Jungsteinzeit, das Neolithikum einsetzte (siehe den Artikel S. 64). Viehhalter entdeckten damals, wie durch Fermentierung aus Milch Frischkäse (Quark) oder Joghurt wird. Weil dabei Bakterien den meisten Milchzucker zersetzen, enthalten solche Produkte deutlich weniger Laktose. Einige Jahrtausende später breitete sich dann in Europa eine neue Mutation aus, dank der jene Menschen, die sie trugen, nun ihr Leben lang unbeschwert Milch trinken konnten – weil sie auch als Erwachsene noch das Enzym Laktase herstellten. Diese Anpassung erschloss den betroffenen Gruppen somit eine gehaltvolle Nahrungsquelle, die sie wohl auch Missernten überstehen ließ.

Vielleicht erlaubten es vor allem diese beiden revolutionären Neuerungen den frühen Ackerbauern und Viehzüchtern, sich bald weit über Europa auszubreiten – in Gebiete, wo bis dahin Wildbeutekulturen existiert hatten. »Nach archäologischen Maßstäben gelangten Milchbauern wirklich enorm schnell ins nördliche Europa«, kommentiert der Populationsgenetiker Mark Thomas vom University College London. Jene Verbreitungswelle hat bis heute bleibende genetische Spuren hinterlassen: Ein Großteil der Europäer trägt Milch gut – was für die Menschen vieler anderer Weltregionen nicht gilt.

»Gut möglich«, meint Thomas, »dass ein Großteil der heutigen Europäer von den ersten europäischen Milchbau-

AUF EINEN BLICK

URSPRUNG DER EUROPÄISCHEN BAUERN

1 Schon am Anfang des Neolithikums, der **Jungsteinzeit**, haben Viehhalter Milch verwertet – im Orient schon zu Zeiten des ersten Ackerbaus vor über 10 000 Jahren. Vermutlich machten sie daraus **Käse** oder **Joghurt**. Milch selbst konnten damals nur kleine Kinder verdauen.

2 Ein paar Jahrtausende später trat unter den Menschen Europas eine **Mutation** auf, die auch für Erwachsene Milch verträglich machte. Diese Mutation verbreitete sich schnell, besonders im nördlichen **Mittel- und in Nordeuropa**.

3 Auf diese Weise erschlossen sich die Menschen eine wertvolle zusätzliche **Nahrungsquelle**. Erst damit gewann die **Milchkultur** in vielen bäuerlichen Bevölkerungen die Oberhand.

ern abstammt, denen das Milchzuckerenzym zeitlebens zur Verfügung stand.« Auf der ganzen Welt stellen die allermeisten kleinen Kinder dieses Enzym her. Dadurch können sie den Milchzucker in der Muttermilch verdauen.

Meistens wird das zugehörige Gen später aber stillgelegt, oft schon in den ersten Lebensjahren. Nur 35 Prozent der Menschheit bildet mit über sieben oder acht Jahren noch Laktase. Dem Rest geht es schon nach einem kleinen Glas Milch richtig schlecht, inklusive explosionsartigem Durchfall. »Daran stirbt man zwar nicht«, meint der Archäologe Oliver Craig von der University of York (England). »Aber das Ganze ist reichlich unangenehm.«

Die betreffende Mutation hängt anscheinend mit einer ausgetauschten Base in einer DNA-Region nahe bei dem Laktasegen zusammen: Statt eines Cytosin-Nukleotids sitzt dort nun Thymin, und infolgedessen bleibt das Gen aktiv. Die meisten Menschen auf der Welt mit so genannter Laktasepersistenz – also Produktion des Enzyms als Erwachsene –

besitzen genau diese Mutation und haben europäische Vorfahren. Von Westafrika, dem Nahen und Mittleren Osten kennen Forscher allerdings weitere Populationen mit Laktosetoleranz. Bei ihnen beruht die Eigenschaft auf anderen Mutationen (siehe Karte S. 74).

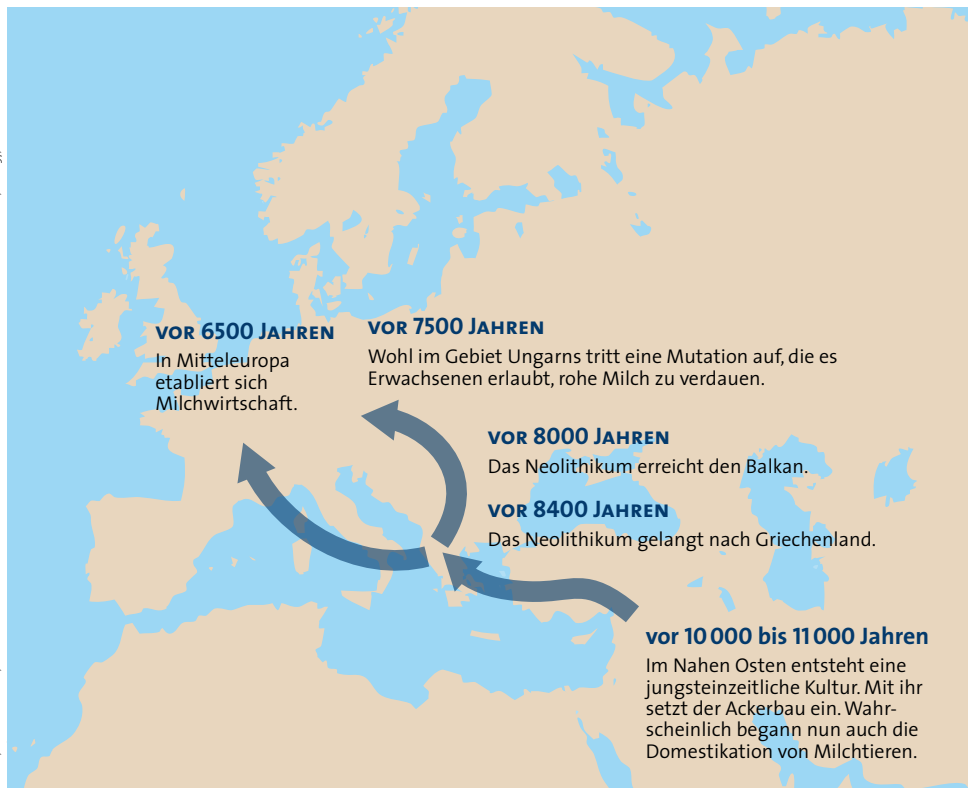
Koevolution von einem Gen und der Milchkultur

Die europäische Mutation scheint noch nicht alt zu sein. Mark Thomas und seine Kollegen berechneten, dass sie vor etwa 7500 Jahren auftrat – und zwar wohl irgendwo in den fruchtbaren Weiten Ungarns. Sie haben hierfür genetische Variationen bei verschiedenen heutigen europäischen Bevölkerungsgruppen verglichen und anhand dessen mit Computersimulationen auf den Ursprung des entscheidenden Allels für die Laktosetoleranz zurückgeschlossen. Jene neue genetische Anlage muss den Betreffenden einen enormen Selektionsvorteil gebracht haben. 2004 kamen Forscher zu dem Schluss, dass Träger des Allels fast ein Fünftel mehr Kin-

Die Milchgewinnung von Nutztieren setzte früh im Neolithikum ein – zuerst im Nahen Osten, und entsprechend zeitversetzt in Europa, wo die Jungsteinzeit später begann. Zu einer bestimmenden Kultur in weiten Regionen Europas wurde die Milchwirtschaft erst, nachdem sich in der Bevölkerung eine Mutation verbreitete, die unfermentierte Milch für die Menschen bekömmlich machte.



STOCKPHOTO / IVADIMIR SASONOV



Die Zucht von Nutztieren zum Zweck der Milchproduktion kam im Orient vermutlich fast gleichzeitig mit dem Ackerbau auf. Beides gelangte später nach Europa – anscheinend zusammen mit Menschen, die diese kulturellen Errungenschaften mitbrachten. Kurz danach erschien in Mitteleuropa eine Mutation, die auch unverarbeitete Milch für Erwachsene bekömmlich machte. Diese Mutation muss sich dann langsam nach Westen und Norden hin verbreitet haben: Denn nach einiger Zeit gewann Milchwirtschaft in diesen Gebieten die Oberhand.

der hatten, die lange genug lebten, um selbst Kinder zu bekommen. Eine ähnlich starke Wirkung kennt man bisher von kaum einem anderen menschlichen Gen. In wenigen hundert Generationen dürfte die Mutation dazu beigetragen haben, dass ihre Träger bald in großen Teilen Europas in der Bevölkerung vorherrschten. Doch Thomas schränkt ein: »Voraussetzung dafür war, dass stets Milch zur Verfügung stand, die auch genutzt wurde – also eine Koevolution von Genen und Kultur. Beides bestärkte sich gegenseitig.«

Kombiniertes Forschungsprojekt

Um diesen Prozess aus möglichst vielen Blickwinkeln genauer zu untersuchen, hat sich Thomas mit dem Anthropologen und Paläogenetiker Joachim Burger von der Universität Mainz und dem Bioarchäologen Matthew Collins von der University of York zusammengetan. Sie bauten das multidisziplinäre EU-Projekt LeCHE auf. Die Abkürzung steht für Lactase persistence in the Early Cultural History of Europe; außerdem heißt Milch auf Spanisch »leche«. Dieses eingangschon angesprochene Projekt lief von 2009 bis 2013, und an ihm nahmen auch rund ein Dutzend Nachwuchsforscher aus sieben Ländern West- und Nordeuropas teil.

Eine der Kernfragen, welche die Forscher seit Langem interessiert, gilt der Herkunft der frühen europäischen Bauern – und damit auch der von modernen Europäern. Waren die hiesigen Jungsteinzeitler aus einheimischen Bevölkerungen hervorgegangen – die sich die neuen Technologien aneigneten –, oder stammten sie von Bauern des Nahen Ostens ab, deren Nachfahren Europa neu kolonisiert und Ackerbau und Viehzucht mitgebracht hatten? Letztlich geht es auch da-

rum, ob agrarisch versierte Kolonisten lokale Populationen überschwemmten und somit die alten Jäger und Sammler mehr oder weniger verdrängten, weil sie ihnen genetisch sowie technologisch überlegen waren.

Einige wichtige Anhaltspunkte lieferten Tierknochen und -zähne bei den Grabungsstätten. Hält man Rinder vor allem wegen der Milch, werden die Kälber gern schon mit ein paar Monaten geschlachtet, weil der Mensch die Milch haben möchte. Geht es aber primär um die Fleischproduktion, lässt man die Kälber groß werden. Gleiches gilt für Schafe und Ziegen. Der Archäozoologe Jean-Denis Vigne vom Muséum national d'histoire naturelle in Paris schloss aus dem Lebensalter der geschlachteten Tiere, dass die Milchgewinnung im Nahen Osten etwa gleichzeitig mit den Anfängen der Domestikation von landwirtschaftlich genutzten Tieren einsetzte, dass es dort demnach schon vor 10 500 Jahren eine Milchwirtschaft gab. Deren Ursprünge wären dann nicht viel jünger als der dortige Beginn der Jungsteinzeit, die mit dem Ackerbau grundlegende ökonomische Umwälzungen mit sich brachte. Vignes Kollege Roz Gillis vom selben Museum vermutet sogar, dass die Milchgewinnung von Anfang an einer der Beweggründe war, überhaupt Rinder, Schafe und Ziegen einzufangen und selbst zu halten.

Laut Gillis verbreitete sich Molkerei dann im Verlauf von zwei Jahrtausenden zugleich mit der Neolithisierung auch in Europa. Überall tauchte Milchwirtschaft im selben Zeitrahmen auf wie Ackerbau. Das ergaben Vergleiche der Tierknochen von 150 Fundstellen in Europa und Anatolien. Das Schlachtalter sagt jedoch nichts darüber aus, wer die frühen Bauern waren. Wichtige Indizien hierfür hatten Rinderkno-

chen allerdings schon einige Jahre zuvor in genetischen Studien geliefert. Damals erkannten Burger und andere spätere Mitarbeiter des LeCHE-Projekts: Die domestizierten Rinder, die Bauern einst in Europa hielten, waren sehr eng mit Vieh des Nahen Ostens verwandt und viel weniger mit dem europäischen Auerochsen. Sie werteten dies als deutlichen Fingerzeig dafür, dass einwandernde Viehhalter ihre Tiere mitgebracht hatten, statt vor Ort Wildrinder zu domestizieren.

Zu diesem Szenario passen Untersuchungsergebnisse zum Erbgut von frühen Neolitikern in Mitteleuropa. Diese DNA stammt von mehreren verschiedenen Fundplätzen. Wie es demnach aussieht, waren die jungsteinzeitlichen Bauern wohl nicht Nachfahren der Jäger und Sammler, die zuvor in denselben Gegenden gelebt hatten. Burger kommentiert: »Bis dahin glaubten die meisten europäischen Archäologen, dass die neolithischen Bauern aus der einheimischen Bevölkerung des Mesolithikums hervorgegangen waren. In Wahrheit aber handelte es sich um völlig andere Menschengruppen.«

Wenn Molkerei im Nahen Osten schon betrieben wurde, als es die Mutation im Bereich des Laktasegens noch nicht gab, müssen die Menschen den Milchzuckergehalt reduziert haben. Wahrscheinlich verarbeiteten sie die Milch zu weichem oder hartem Käse oder zu Joghurt, denn dabei wird ein Großteil der Laktose abgebaut. Lange gelagerte Hartkäse enthalten sogar fast gar keinen Milchzucker mehr. Diese Vermutung überprüften die Wissenschaftler anhand alter Kochgefäße aus Ton. In deren Poren blieben Fettreste zurück, die zeigen, ob Fleisch oder ein Milchprodukt zubereitet wurden. Auch um welche Tiere es sich handelte, lässt sich erkennen.

An Gefäßen aus dem Fruchtbaren Halbmond des Nahen Ostens wiesen die Forscher, darunter der Chemiker Richard Evershed von der University of Bristol, mindestens 8500 Jahre alte Rückstände von Milchfetten nach. Dass sich die Menschen früh – vor rund 7000 Jahren – auf die Käseherstellung verstanden, bezeugen wiederum die vorn beschriebenen Studien von Mélanie Roffet-Salques an durchlöchernten Scherben aus Polen. Allerdings zählten Milchprodukte zunächst noch nicht zu den Hauptnahrungsmitteln.

Dazu entwickelten sie sich erst allmählich. Offenbar geschah dieser wichtige Schritt langsam im Zuge der Verbreitung von Milchzuckertoleranz. Denn die neue Mutation brauchte einige Zeit, bis sie sich weiträumig durchsetzte. In Norddeutschland konnte Burger sie erst in 6500 Jahre altem menschlichem Erbgut nachweisen, also rund 1000 Jahre nachdem sie im Südosten aufgetreten war.

Wie sich das neue Allel damals ausgebreitet haben könnte, hat die Populationsgenetikerin Pascale Gerbault vom University College London modelliert. Als Erstes waren demnach Menschen nach Europa eingewandert, die neolithische Kulturen des Nahen Ostens mitbrachten. Sie besaßen das neue Laktaseallel noch nicht, waren jedoch den lokalen Jägern und Sammlern durch ihre Kenntnisse von Ackerbau und Viehhaltung überlegen. Später erleichterte ihnen die Laktosetoleranz den Weg gen Norden zusätzlich.

In Südeuropa fasste das Allel schwerer Fuß. Denn hier war eine neolithische Bauernkultur schon etabliert, als die Mutation noch nicht existierte. Später allerdings eigneten sich diese Bevölkerungen sie teilweise an. Als sie nämlich weiter nach Norden und Westen in für sie neue Gebiete vordrangen, dürften sie Trägern des Allels begegnet sein, mit denen sie manchmal auch Kinder zeugten. Das persistente Gen zu besitzen, brachte so viele Vorteile, dass es sich bald auch in diesen Gruppen verbreitete. Wie Gerbault erläutert, geschieht so etwas besonders an einer Ausbreitungsfront, wo die Population rasch zunimmt. Die Spuren der Vergangenheit sind dennoch bis heute deutlich: In Griechenland und der Türkei etwa besitzen nur rund 40 Prozent der Menschen oder weniger eine Laktasepersistenz, in Großbritannien und Skandinavien dagegen 90 Prozent.

Aufschwung der Milchwirtschaft

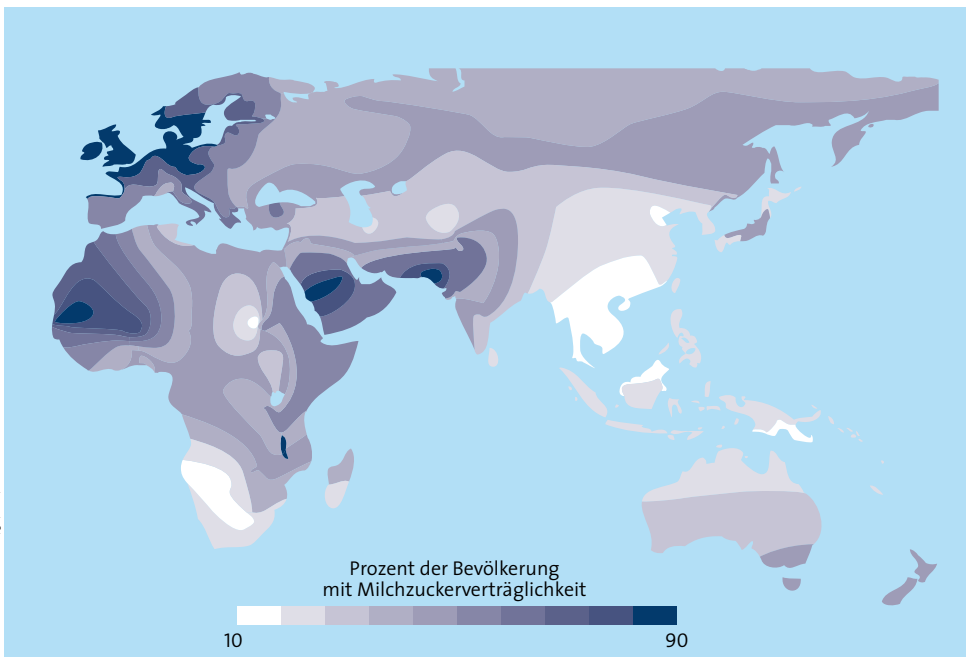
Vor ungefähr 5000 Jahren, ab der späten Jungsteinzeit oder der frühen Bronzezeit, herrschte das neue Allel für Milchzuckerträglichkeit in den meisten Gebieten Nord- und Mitteleuropas vor. Die Milchviehhaltung hatte von nun an einen wesentlichen Anteil an der damaligen Kultur. Burger zufolge haben die Menschen die Milchtierhaltung ausgebaut, als sie so weit waren, diese Nahrungsquelle wirklich ausschöpfen zu können. Bei vielen mittel- und nordeuropäischen Fundstätten aus dieser Zeit stammen über zwei Drittel der Tierknochen von Rindern.

Wieso der Milchkonsum den Menschen gerade in diesen Regionen dermaßen zum Vorteil gereichte, konnten die Wissenschaftler noch nicht endgültig erklären. Thomas vermutet, dass Milchprodukte mit ihren geballten Kalorien ihnen Missernten zu überstehen halfen, als sie sich weiter in den Norden vorgewagt hatten. Denn Tiere geben auch außerhalb der Erntezeiten Milch, und manche der Erzeugnisse lassen sich in kühlerem Klima sogar gut aufbewahren.

Für den großen Erfolg der Laktasemutation in den nördlichen Gebieten könnte es einen weiteren Grund gegeben ha-



Diese Tonscherbe aus Polen dürfte Teil eines Siebs gewesen sein, das vor 7000 Jahren zum Käsemachen diente. Anscheinend hat man den Boden des Gefäßes vor dem Brennen durchlöchernt.



Nur ein Drittel der Menschheit kann auch im Erwachsenenalter Milchzucker verdauen und deswegen Milch trinken. Diese Menschen bilden das Enzym Laktase noch nach der Kindheit. Besonders im nördlichen Europa liegt die Zahl weitaus höher (dunkelblau) als vielerorts sonst. Dort verbreitete sich ziemlich rasch eine bestimmte Mutation, die Erwachsenen Milchkonsum ermöglicht.

ben: Milch enthält Vitamin D. Menschen können dieses für zahlreiche Stoffwechselprozesse wichtige Vitamin nur bei Sonneneinstrahlung selbst bilden – im Norden und dort besonders im Winter aber oft nicht in ausreichender Menge. Dann drohen eine Reihe körperlicher Defekte und Krankheiten wie Rachitis. Allerdings erklärt der Zusammenhang nicht, wieso sich die Laktasepersistenz zum Beispiel auch im sonnigen Spanien festsetzen konnte.

Ein interdisziplinärer Ansatz wie beim LeCHE-Projekt eignet sich für viele archäologische Fragestellungen. Der Paläogenetiker Ian Barnes von der University of London war an dem EU-Projekt nicht beteiligt, ist aber davon angetan. Er meint: »So verschiedene Leute haben mitgemacht, so viele Methoden kamen zum Zug. Archäologie und Paläoanthropologie waren beteiligt, man hat alte und moderne DNA analysiert und chemische Analysen durchgeführt – letztlich alles für einen einzigen Fragekomplex. Auf die gleiche Weise könnte man sicherlich auch andere Ernährungsumstellungen in vorgeschichtlicher Zeit von allen Seiten beleuchten.«

Spannend wäre zum Beispiel die Evolutionsgeschichte des Enzyms Amylase, das Stärke in Zucker zerlegt. Menschen bilden es in der Bauchspeicheldrüse, aber auch im Mund. Der Mundspeichel enthält bei Menschengruppen von Kulturen mit einer langen Geschichte des Getreideanbaus deutlich mehr Amylase als bei Jägern und Sammlern. Das Gen des betreffenden Enzyms ist dann öfter vorhanden als bei Letzteren. Ähnliche Zusammenhänge scheint es für das Enzym Alkohol-Dehydrogenase zu geben, das Alkohol abbaut.

Einige Mitarbeiter des LeCHE-Projekts, darunter Thomas und Burger, erforschen mittlerweile die Zeit unmittelbar vor der Milchrevolution. Das neue Unterfangen heißt BEAN (Bridging the European and Anatolian Neolithic; englisch »bean« heißt zu Deutsch Bohne). Es geht darum, wie und wann die ersten Bauern und Viehhalter nach Europa ka-

men – und wer sie überhaupt waren. Ihre Spuren untersuchen die Wissenschaftler derzeit in Anatolien, wobei sie wiederum alte DNA analysieren und in Computermodellen bewerten. Sicherlich begegnen sie dabei Beyaz Peynir, dem salzigen Schafskäse, der bei keinem türkischen Frühstück fehlen darf. Ähnliche Weißkäse dürften die Neolithiker dort auch schon vor 8000 Jahren gegessen haben – vor der Zeit, als Milchgenuss möglich wurde. ~

DER AUTOR



Andrew Curry arbeitet als freier Wissenschaftsautor in Berlin.

QUELLEN

- Bramanti, B. et al.:** Genetic Discontinuity Between Local Hunter-Gatherers and Central Europe's First Farmers. In: *Science* 326, S. 137–140, 2009
- Leonardi, M. et al.:** The Evolution of Lactase Persistence in Europe. A Synthesis of Archaeological and Genetic Evidence. In: *International Dairy Journal* 22, S. 88–97, 2012
- Salque, M. et al.:** Earliest Evidence for Cheese Making in the Sixth Millennium BC in Northern Europe. In: *Nature* 493, S. 522–525, 2013

WEBLINKS

Dieser Artikel und ein Link zu Informationen über das LeCHE-Projekt unter www.spektrum.de/artikel/1224873

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature 500, S. 20–22, 1. August 2013

Täuschen, locken und intrigieren: Die verblüffenden Tricks der Pflanzen

GEOkompakt Nr. 38
Die Grundlagen des Wissens

Das geheime Leben der Pflanzen

Wie sie **FÜHLEN, RIECHEN, SEHEN**, weshalb sie warnen und täuschen – und warum sie den Planeten beherrschen

Die Zeitkapsel
Weshalb die Evolution den Samen erfand

Meister der Extreme
Von Pflanzen, die sich klonen, unter Wasser atmen oder Gold schürfen

Land-Leben
Als die grünen Wesen die Kontinente eroberten

Kampf ums Licht
Der gnadenlose Wettstreit der Tropengewächse

Die Bilder zeigen:
Dahlie, Bonsai-Baum, Fingerring, Hibiskusblüte, Wasserfrucht, Rosenstachel, Kiefernzapfen

Vertical text on the left: GEOkompakt Das geheime Leben der Pflanzen

Inset DVD cover: GEOkompakt DVD DER GRÜNE PLANET Wie sehen Pflanzen unsere Erde fragen

Red box: Auch mit DVD erhältlich

Der Jetstream schlägt Wellen

Seit Jahren scheint der schnelle Höhenwind rund um den Nordpol nachzulassen. Das bringt häufiger extreme Wetterlagen nach Europa und Nordamerika – Dürren, Fluten oder eisige Winter. Und nichts deutet eine Trendumkehr an.

Von Daniel Lingenhöhl

Der extreme Hitzesommer in Europa 2003, die katastrophale Dürre mit heftigen Waldbränden in Russland 2010 und gleichzeitig die großräumigen Überflutungen in Pakistan, dazu einige lange, kalte Winter in Europa und Nordamerika in den letzten Jahren – sie alle hatten eins gemeinsam: Über Wochen hinweg herrschte die gleiche Wetterlage. Vor allem durch ihre extrem lange Dauer richteten Hitze, klirrende Kälte oder Regen große Schäden an und kosteten viele Menschen das Leben.

Da sich derartige Extremereignisse in jüngster Zeit häufen, liegt die Frage »Ist der Klimawandel die Ursache?« nahe. Aber anders als bei der Temperatur bringt das Auszählen von Rekorden (Spektrum der Wissenschaft 2/2014, S. 80) keine brauchbaren Erkenntnisse: Die Abweichungen vom Durchschnitt haben ja beiderlei Vorzeichen – und außergewöhnlich ist zum Beispiel bei den Überschwemmungen nicht die Niederschlagsmenge pro Tag, sondern die Anzahl der Regentage. Gleichwohl fügen sich allmählich mehrere Glieder zu einer Ursachenkette zusammen, an deren Anfang in der Tat die globale Erwärmung steht.

AUF EINEN BLICK

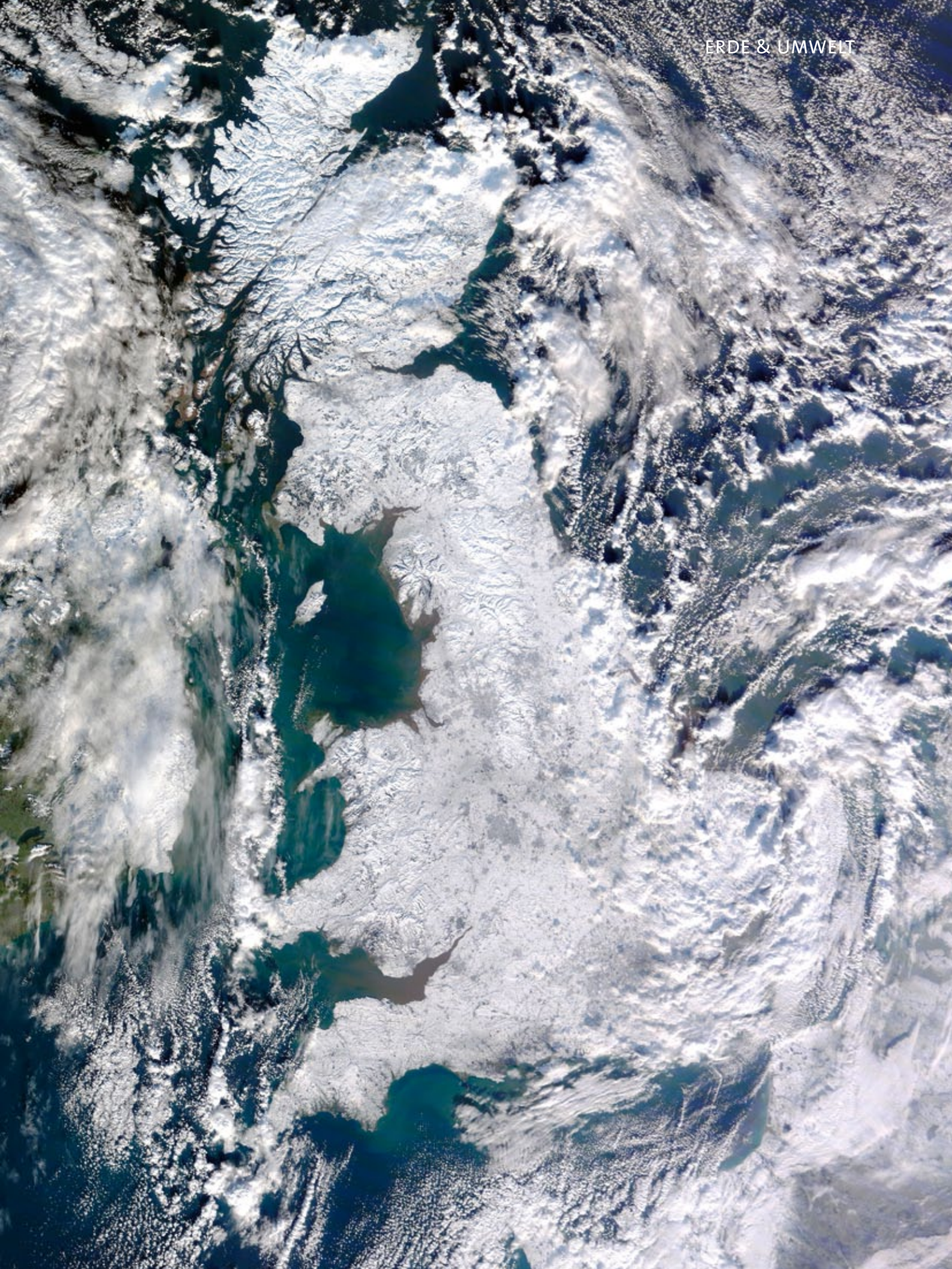
ERWÄRMUNG DER ARKTIS UND DIE FOLGEN

- Der Temperaturunterschied zwischen äquatorialen und polaren Regionen treibt einen Höhenwind an, den **Jetstream**. Durch die Erdrotation wird er nach Osten abgelenkt.
- Da sich die Arktis stärker erwärmt als der Rest der Erde, lässt dieser Antrieb nach. Der Jetstream wird schwächer und dadurch instabil: Er bildet in erhöhtem Maß **Ausbuchtungen nach Norden und Süden**.
- Häufig verharren diese **Mäander** über Wochen an Ort und Stelle und verursachen auf diese Weise **Extremwetterlagen**.

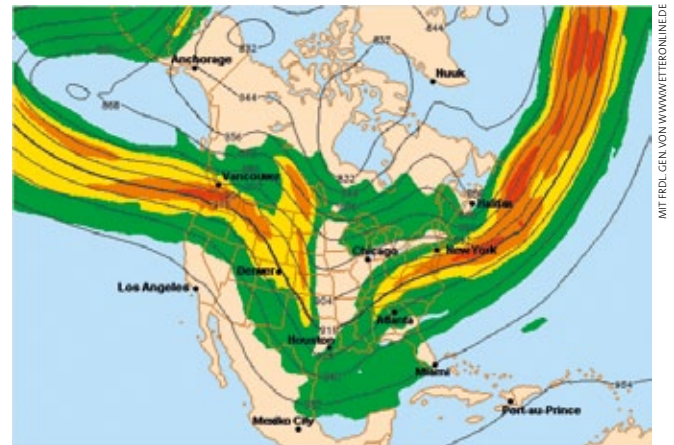
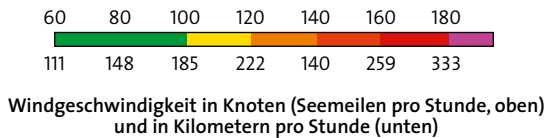
Im Januar 2010 lagen die Britischen Inseln unter einer geschlossenen Schneedecke. Nur die Großstädte London, Birmingham und Manchester sind als graue Flecken auf dem Satellitenbild erkennbar. Ursache des kältesten »englischen« Winters seit mehr als 30 Jahren war paradoxerweise eine ungewöhnlich warme Arktis. Mit dem Temperaturunterschied zwischen Nord und Süd ließen auch die von diesem angetriebenen atlantischen Westwinde nach und machten polarer Kaltluft Platz.

Die Hauptrolle spielt dabei ein alter Bekannter, der so genannte Jetstream. Der Temperatur- (und damit Druck-) unterschied zwischen den heißen Tropen und den kalten Polarregionen treibt einen polwärts gerichteten Wind an, der hauptsächlich in sieben bis zwölf Kilometer Höhe weht, an der Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre. Die Erdrotation lenkt ihn nach Osten ab. In einem erdfesten Bezugssystem ist es sinnvoll, diese Ablenkung einer Kraft, der so genannten Corioliskraft, zuzuschreiben. Sie steht mit der durch die Druckunterschiede verursachten Gradientkraft genau dann im Gleichgewicht, wenn die Luft senkrecht zum Druckgefälle strömt (Spektrum der Wissenschaft 9/2012, S. 60). Auf einer idealisierten Erde würden also große Luftmassen im Kreis um den Pol wandern, stets auf ein und demselben Breitengrad bleibend.

Die Realität kommt dieser Theorie schon ziemlich nahe. Da die Corioliskraft von der geografischen Breite abhängt, entsteht eine Art Rückstellkraft, die das bewegte Luftpaket am Zerfließen hindert. Dadurch wird die Luftströmung auf wenige Kilometer Breite und Höhe begrenzt, erreicht aber Geschwindigkeiten von mehreren hundert Kilometern pro Stunde. »Strahlströmung« nannte deshalb der deutsche Meteorologe Heinrich Seilkopf den Höhenwind, als er ihn 1939 wissenschaftlich beschrieb. So heißt er heute noch, aber auf Englisch: »Jetstream«.



So verlief der zirkumpolare Jetstream über Nordamerika, Europa und Asien (von links nach rechts) am 14. Februar 2014 um 12 Uhr UTC (Weltzeit; die Sonne stand über dem Meridian von Greenwich). Dargestellt ist die aus Berechnungen nach dem Modell GFS erschlossene Windgeschwindigkeit in der Höhe, die dem Luftdruck 300 Hektopascal entspricht; das sind ungefähr 9000 Meter. In der Spitze, zum Beispiel über dem Atlantik westlich von Frankreich, blies der Höhenwind immerhin mit reichlich 300 Kilometern pro Stunde.

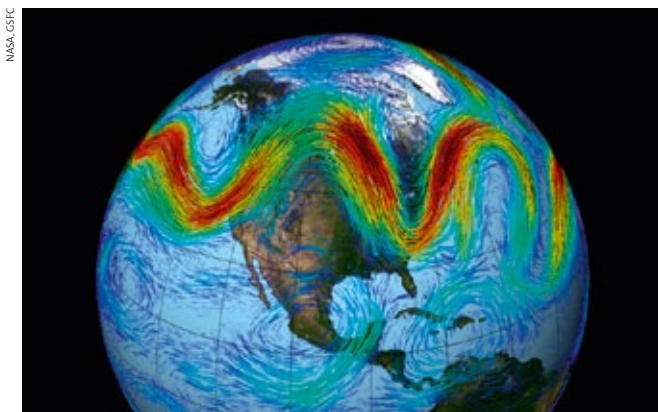


MIT FELD GEN. VON WWW.WETTERONLINE.DE

Ein Flugzeug auf dem Weg von New York nach Frankfurt kann viel Zeit gewinnen, wenn es sich von ihm ostwärts blasen lässt – und gerät in heftige Turbulenzen, wenn es ihn knapp verfehlt. Im Winter weht er stärker als im Sommer, weil dann die Temperaturgegensätze größer sind.

Südliche und nördliche Jetstreams

In »Reinform« ist der zirkumpolare Jetstream auf der Südhalbkugel zu beobachten. Ein starker, sehr stabiler Wind umrundet den Südpol auf einer fast kreisförmigen Bahn und isoliert im Verein mit ähnlich gerichteten ozeanischen Strömungen die Antarktis gegen Einflüsse aus niedrigeren Breiten – der Austausch mit wärmeren Regionen fällt daher im Wesentlichen aus. Davon macht nur die weit nach Norden ragende antarktische Halbinsel eine Ausnahme, die sich in den letzten Jahrzehnten tatsächlich überdurchschnittlich stark erwärmt hat, während der große Rest der Antarktis sich nur schwach oder gar nicht aufheizt. Im Endeffekt verstärkt sich der Temperaturkontrast zwischen den Tropen und dem Südpol damit noch weiter, was den südhemisphärischen Jetstream zusätzlich antreibt – ein sich selbst verstärkender Rückkopplungseffekt.



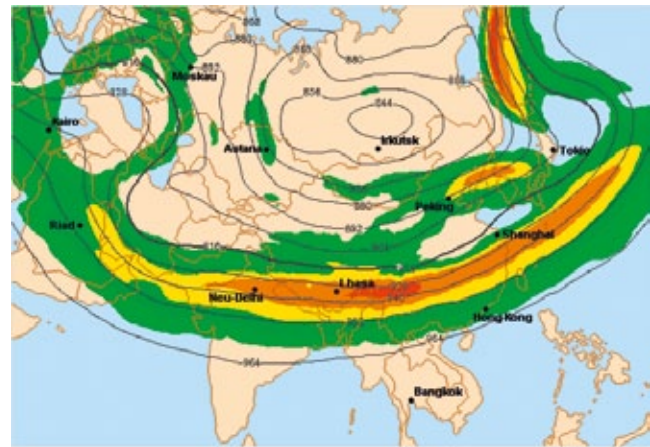
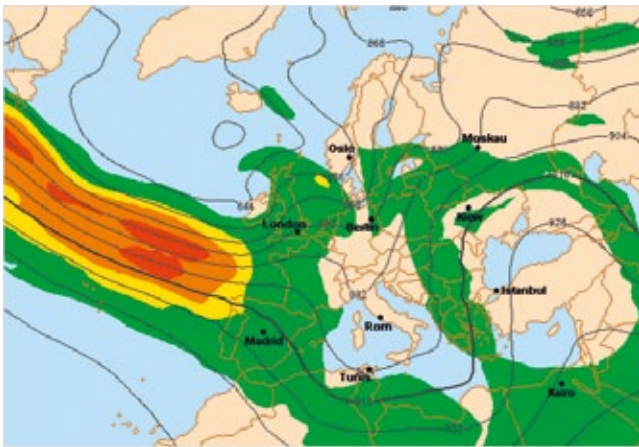
NASA, GFS

In der Computersimulation, hier vom Goddard Space Flight Center der NASA, stellt sich die Wellenbewegung des zirkumpolaren Jetstreams noch eindrucksvoller dar als in der Realität.

Dass die antarktischen Luftmassen gegen den Rest der Atmosphäre isoliert sind, ist nicht der Grund für die Entstehung des Ozonlochs, wohl aber für seine Haltbarkeit: Für das stratosphärische Ozon, das sich im Südwinter zersetzt, strömt kaum Ersatz aus niedrigeren Breiten nach. Umgekehrt hat das Ozonloch Auswirkungen auf das großräumige Klima auf der Südhalbkugel, wie vor drei Jahren Sarah Kang, damals Postdoc an der Columbia University in New York, und ihre Kollegen gezeigt haben. Aus Mangel an strahlungsabsorbierendem Ozon kühlt sich die untere Stratosphäre ab, wodurch sich die Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre nach oben verlagert. In der Folge verschiebt sich der Jetstream polwärts. Die so entstehende Lücke füllt die Hadley-Zelle, die große Luftwalze zwischen der Tiefdruckrinne am Äquator und den subtropischen Hochs, die in diesem Fall feuchte Luft südwärts führt. Im Endeffekt wurden die subtropischen Südsommer zwischen 1979 und 2000 in der Tendenz feuchter, insbesondere über dem Südwesten des Indischen Ozeans und im östlichen Australien.

Anders als sein südliches Pendant hält sich der polare Jetstream der Nordhalbkugel nicht an einen bestimmten Breitengrad. Durch die unregelmäßige Verteilung von Wasser und Land wirken auch die antreibenden Temperaturunterschiede nicht gleichmäßig. Zusätzlich stören die Gipfel von Rocky Mountains und Himalaja die ansonsten sehr reibungsarme Luftströmung. Über eine Vielzahl komplizierter Rückkopplungseffekte schaukeln sich kleine Abweichungen von der Kreisbahn zu großräumigen Wellen auf, die teilweise weit nach Nord oder Süd ausbuchten können (Bilder links und oben). Der Höhenwind mäandert zwischen 50 und 70 Grad nördlicher Breite; das entspricht etwa der Region zwischen Frankfurt und Nordkap.

Diese so genannten Rossby-Wellen bestimmen das Wetter in großen Teilen Nordamerikas, Europas und Nordasiens. Schlägt der Jetstream nach Süden aus, gibt er eisiger Luft vom Nordpol freie Bahn bis nach Nordafrika; dann fällt Schnee in Algier. Im umgekehrten Fall strömt heiße Saharaluft bis nach Sibirien, wie es im August 2010 der Fall war. Wenn sich, wie damals, der Jetstream an einer Stelle nach



BEIDE KARTEN MIT FROLD. GEN. VON WWW.WETTERONLINE.DE

Norden und wenige hundert oder tausend Kilometer weiter östlich nach Süden ausbeult, gibt es zeitgleich entgegengesetzte extreme Wetterlagen (Bild S. 80): Östlich der russischen Hitzewelle floss kühle, feuchte Luft in einem südwärts ausgerichteten »Trog« bis nach Südasien, wo sie auf den gleichzeitig herrschenden Monsun stieß. Wochenlanger Dauerregen am Rand des Himalajas und des Karakorums ließ schließlich zahlreiche Flüsse über die Ufer treten und setzte weite Teile Pakistans unter Wasser. Weniger dramatisch, aber ebenfalls überdurchschnittlich viel regnete es damals auch in Mitteleuropa, wo der Deutsche Wetterdienst von »nahezu monsunartigen Wassermassen« sprach.

Geht dem Strahlstrom die Puste aus?

Auch Rossby-Wellen wandern über die Erde, aber weitaus langsamer als die Luftströmung selbst und möglicherweise sogar in Gegenrichtung. Vor allem kann sich eine solche Ausbeulung abschnüren. Dann umweht der abgetrennte Teil des Hauptstroms zum Beispiel eine große Warmluftmasse, die es auf diese Weise weit nach Norden verschlagen hat – und die hat wegen dieser Abkopplung keinen Anlass, sich zu bewegen. Eine solche »blockierte Wetterlage« weicht teils über Wochen kaum von der Stelle. »Viele Arten von Extremwetter werden durch diese stabilen Bedingungen verursacht – Dürren, Hitzewellen, frostige Winter, Überflutungen nach tagelangem Regen«, beschreibt die Atmosphärenforscherin Jennifer Francis von der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey) die Folgen.

Diese Wetterphänomene gehören zum normalen Verhalten des Jetstreams. Verglichen mit früheren Jahrzehnten scheint er sich jedoch zu verändern. »Die von West nach Ost wehenden Winde haben sich verlangsamt«, stellt Francis fest. Cristina Archer von der University of Delaware in Newark und Ken Caldeira von der Stanford University haben nachgewiesen, dass die Windgeschwindigkeiten des Jetstreams zwischen 1979 und 2001 abgenommen haben. Auch eine Studie von Francis selbst belegt eine solche Abnahme seit 1990 um mehr als zehn Prozent. Gleichzeitig hat sich die Amplitude der Rossby-Wellen vergrößert, der Jetstream ufert

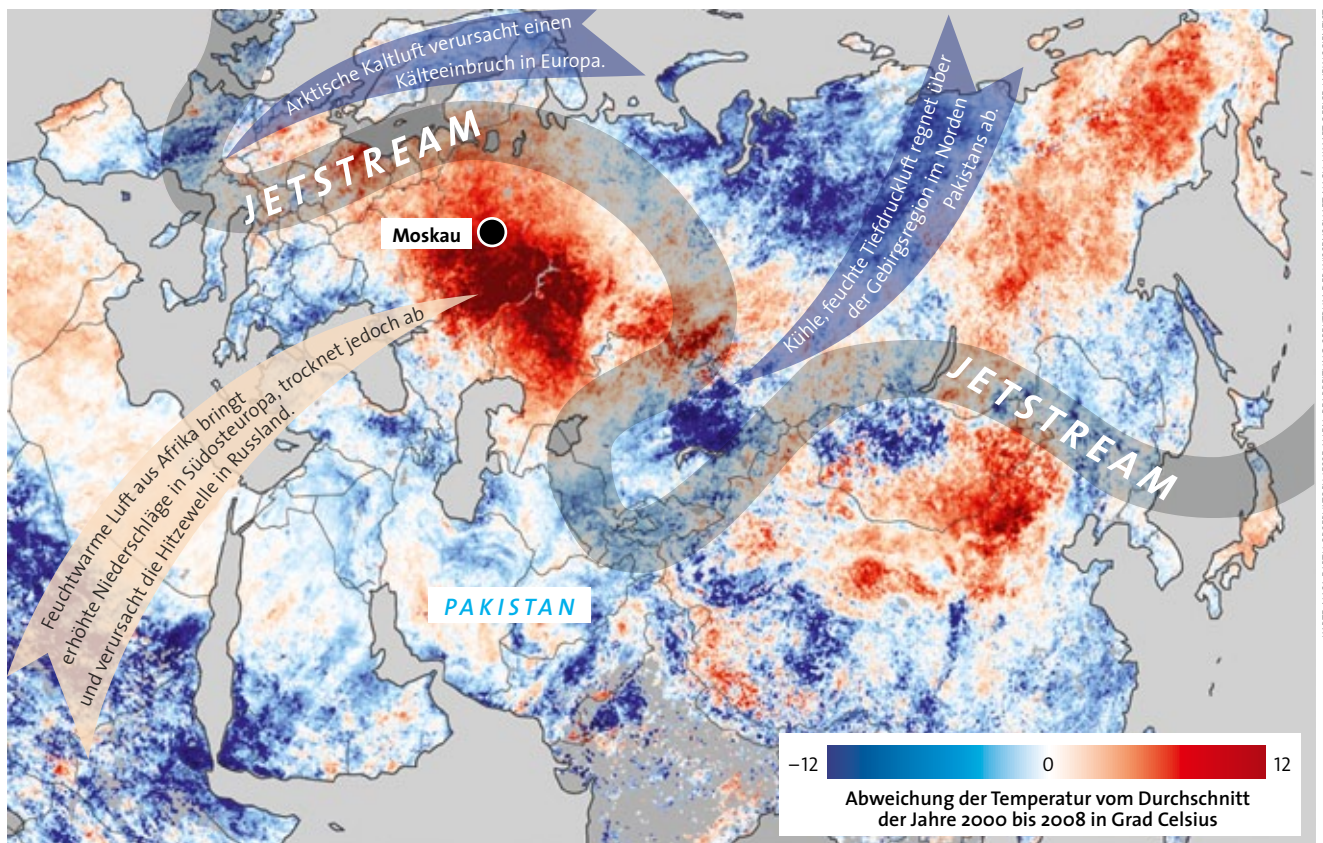
also stärker nach Norden und Süden aus. »Das gilt besonders ausgeprägt für den Herbst und Winter, macht sich aber auch im Sommer öfter bemerkbar«, schreiben die Forscherin und ihr Team. Und Hans Schipper, der Leiter des Süddeutschen Klimabüros am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), weiß ein weiteres Ergebnis hinzuzufügen: »Zwischen 1981 und 2001 hat sich der Jetstream um durchschnittlich mindestens 40 Kilometer nach Norden verlagert.«

Als Ursache für diese Veränderung haben viele Wissenschaftler vor allem einen Trend ausgemacht: die überdurchschnittlich starke Aufheizung der Arktis durch den Klimawandel. Während die globale Mitteltemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts um 0,85 Grad Celsius gestiegen ist, betrug die Erwärmung in der Arktis im gleichen Zeitraum etwa das Doppelte. Manche Regionen in Alaska oder im westlichen Kanada heizten sich sogar um drei bis vier Grad Celsius auf. Das hat Folgen, so Francis: »Verkleinert sich der Temperaturunterschied zwischen Tropen und Arktis, der die Höhenwinde antreibt, so schwächt dies den Jetstream ab, und er beginnt stärker zu mäandrieren.«

Arktische Einflüsse

Dieser Effekt wird durch eine positive Rückkopplung verstärkt. Befindet sich ein nordwärts gerichteter Mäander im Bereich der Arktis, so fließt über längere Zeiträume warme Luft in diese hinein. Daraufhin schmilzt verstärkt das Eis, das die Sonneneinstrahlung reflektiert und damit kühlend wirkt, und macht dem dunkleren, Wärmeenergie speichernden offenen Ozean Platz. Insgesamt verringert sich der Temperaturunterschied, was letztlich den Strahlstrom weiter schwächt.

Wie das im Extremfall aussehen kann, bezeugt das Jahr 2012, wie Edward Hanna von der University of Sheffield und seine Kollegen beobachtet haben: »Über Grönland wölbte sich ein Dom aus warmen Südwinden auf, der den Eisschild großflächig zum Schmelzen brachte.« Zeitweilig herrschte im Juli Tauwetter auf über 90 Prozent der grönländischen Eisfläche – weit mehr als der bisherige Rekord von 50 Prozent aus dem Jahr 2010 und mehr als jemals zuvor, seit vor 50 Jahren mit den Messungen begonnen wurde.



KARTE: NASA EARTH OBSERVATORY / JESSE ALLEN, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: UK MET OFFICE / NEW SCIENTIST

Im Juli 2010 verharteten die Mäander des Jetstreams über Wochen an Ort und Stelle und brachten Russland und Pakistan extreme, entgegengesetzte Wetterlagen.

Wie stark der Jetstream und das arktische Eis einander beeinflussen, belegt auch der zeitliche Ablauf der gestörten Zirkulation, betont Francis in ihrer Studie: Besonders ausgeprägt treten die Anomalien im Herbst und Winter auf. Sie beginnen also kurze Zeit, nachdem der Temperaturunterschied zwischen Tropen und Polregion am geringsten ist, und setzen sich dann in der – eigentlich – kalten Jahreszeit fort, bis sich die Bedingungen im hohen Norden durch den Eiszuwachs wieder einigermaßen normalisiert haben. Deshalb stellten die Wissenschaftler in ihrem Studienzeitraum kaum abweichende Zirkulationsmuster im Frühling fest, der noch von Eis und Minusgraden geprägt ist. Erst im Lauf des Sommers mehren sich die Ausbuchtungen wieder.

Andere Einflussfaktoren schließt Francis hingegen aus: »Es gibt keine Belege dafür, dass eine veränderte Sonnenaktivität zu diesem Muster beiträgt.« Diese These wird allerdings von einigen Forschern vertreten. So hat Michael Lockwood von der University of Reading (Großbritannien) in einer Untersuchung aus dem Jahr 2010 einen statistischen Zusammenhang zwischen schwacher Sonnenaktivität und blockierten Wetterlagen ausgemacht. Laut ihm und seinen Kollegen verursacht die verringerte Strahlungsaktivität der Sonne, dass sich die Stratosphäre abkühlt, was den Jetstream schwächt. Auf noch nicht ganz geklärte Weise schlägt diese Veränderung bis in niedrigere Luftschichten durch: Die mil-

den Winde vom dauerhaften Azorenhoch zum ebenso dauerhaften Islandtief schlafen quasi ein und geben arktischer Kaltluft die Bahn nach Mitteleuropa frei (Bild S. 77). Dieser Streit ist also noch nicht entschieden.

Wie sehr die Schwankungen des Jetstreams mittlerweile unser Wetter bestimmen, zeigt eine zunehmende Zahl an Studien. Erst vor Kurzem zogen Forscher um James Screen von der University of Exeter eine Linie von den verregneten Sommern im nordwestlichen Europa zwischen 2007 und 2012 zu dem geschwächten Strahlstrom: »Normalerweise verläuft der Jetstream im Sommer zwischen Schottland und Island, weshalb Schlechtwettergebiete häufiger nördlich von Großbritannien durchziehen. Dellt er sich hingegen nach Süden ein, bringt er heftigen Dauerregen.«

Die extrem regenreichen Wintermonate Dezember 2013 bis Februar 2014 in Westeuropa führt die britische Wetterbehörde ebenfalls auf einen gestörten Jetstream zurück, der gleichzeitig der Ostküste und dem Mittleren Westen der Vereinigten Staaten extreme Minusgrade bescherte. »Großbritannien erlebte in den vergangenen Wochen die außergewöhnlichste Dauerregenperiode der letzten 248 Jahre«, so Dame Julia Slingo, die wissenschaftliche Leiterin des britischen Wetterdienstes Met Office: »Unsere Aufzeichnungen reichen bis 1766 zurück, aber wir haben nichts Vergleichbares gefunden.«

Die Analyse dieser Wetterperiode zeigt, welche Fernwirkungen das globale Jetstream-Muster auf der Nordhalbkugel haben kann. In diesem Fall spielten die Arktis und der tropische Westpazifik eine entscheidende Rolle: Überdurchschnittlich warmes Wasser sorgte nicht nur für anhaltende Niederschläge in Indonesien, sondern auch für eine Störung des nordpazifischen Jetstreams, der vor der Westküste Nordamerikas weit nach Norden ausbuchtete. In der Folge strömte sehr warme Luft bis nach Alaska und bescherte dem US-Bundesstaat einen äußerst milden Winter. In einer Ausgleichsbewegung der Luftmassen floss dagegen ein Stück weiter östlich über dem Kontinent arktische Kaltluft teilweise bis nach Florida und Texas.

An der Ostküste der USA verschärfte sich der Temperaturkontrast zwischen Nord und Süd, was die Zyklonogenese – die Ausbildung von stürmischen Tiefdruckgebieten – anheizte. Mit den intensiven Jetstream-Winden wurden diese regelrecht über den Atlantik gejagt: Ein Orkan nach dem anderen lud seine Wasserfrachten über den Britischen Inseln ab, gleichzeitig brachten die ständigen Sturmfluten den Westküsten Europas schwere Brandungen, in deren Wellen mehrere Menschen ertranken. Die vorherrschenden Südwestwinde ließen den Winter dafür hier zu Lande zumindest bis Ende Februar ausfallen.

Die weiteren Aussichten

Dass es allerdings auch umgekehrt laufen kann, belegen die letzten kalten Winter. Sie standen ebenfalls in engem Zusammenhang mit den arktischen Veränderungen und dem flatterigen Jetstream. Das legt zumindest eine Arbeit nahe, die Qihong Tang von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking zusammen mit Jennifer Francis und weiteren Forschern verfasst hat: Der Meereismangel sorgte demnach dafür, dass mehr Feuchtigkeit aus dem Nordpolarmeer verdunstet, die sich wiederum als Schnee auf dem umliegenden Festland niederschlägt. Dieser isoliert den Boden von der Atmosphäre und verhindert so die Wärmeabstrahlung, weshalb die Kontinente schneller auskühlen. Dadurch verschärfte sich an Land das Temperaturgefälle zwischen Nord und Süd, während es über dem Meer noch geringer ausfällt. Das Resultat ist in diesem Fall ebenso ein gestörtes Jetstream-Muster, in dem sich blockierende Hochs über den mittleren Breiten ausbilden und halten können – und mit ihnen die eisige Luft der letzten Jahre.

Und Francis vermutet sogar, dass der stark mäandrierende Jetstream Wirbelstürme wie »Sandy« – der Hurrikan traf letztes Jahr den US-amerikanischen Nordosten schwer – begünstigen und auf ungewöhnliche Bahnen leiten kann: »Als Sandy heranzog, buchtete der Jetstream über dem Atlantik weit nach Norden aus. Über Neufundland bildete sich deshalb ein starkes Hoch aus, das den Hurrikan auf seinen ungewöhnlichen Weg nach Westen an die US-Ostküste lenkte.« Wieder verdächtigt die Klimaforscherin den arktischen Meereisschwund: »Durch den rekordverdächtigen Verlust im letzten Jahr war die Arktis noch im Oktober ungewöhn-

lich warm. Das trug sehr wahrscheinlich dazu bei, dass der Jetstream ausdauernd stark nach Norden auswich.« Auch nach Auffassung von Cristina Archer wird die generelle Verlagerung des Jetstreams nach Norden den Weg der Wirbelstürme verändern: »Jetstream-Winde unterbinden oder behindern normalerweise die Geburt von Hurrikanen. Wenn sich der Strahlstrom also von den Subtropen entfernt, in denen die Stürme entstehen, so werden diese vielleicht häufiger und stärker.«

Momentan deutet nichts an, dass sich dieses Muster mittelfristig wieder ändern könnte, denn das arktische Meereis bedeckte 2013 erneut nur eine stark unterdurchschnittliche Fläche. Und die Region erwärmt sich weiterhin ungebremst, wie eine Auswertung von Satellitendaten durch Kevin Cowtan von der University of York und Robert Way von der University of Ottawa belegt – ungeachtet einer möglichen Erwärmungspause auf dem Rest des Planeten. »Wir erwarten, dass sich die Arktis weiter und schneller aufheizt, so dass sie den Jetstream noch deutlicher beeinflusst. Damit zusammenhängende extreme Wetterereignisse sollten also häufiger werden. Vieles spricht dafür, dass dies bereits stattfindet«, meint Francis.

Auch Ken Caldeira ist überzeugt davon, dass sich die beobachteten Trends beim Jetstream fortsetzen: »Diese Entwicklung passt in das Bild des Klimawandels – wie die Vergrößerung der Tropen, die sich abkühlende Stratosphäre und die polwärtsige Verlagerung von Sturmbahnen.« Schon 2008 meinte er deshalb: »Ich würde darauf wetten, dass sich der Jetstream weiter verlagert.« Es sieht so aus, als würde er Recht behalten. ~

DER AUTOR



Daniel Lingenhöhl ist promovierter Geograf und Redaktionsleiter von »Spektrum.de«. Folgen Sie ihm auf Twitter unter @lingenhoehl.

QUELLEN

- Cowtan, K., Way, R. G.:** Coverage Bias in the HadCRUT4 Temperature Series and its Impact on Recent Temperature Trends. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 10.1002/qj.2297, 2013
- Francis, J. A., Vavrus, S. J.:** Evidence Linking Arctic Amplification to Extreme Weather in Mid-Latitudes. In: Geophysical Research Letters 39, L06801, 2012
- Screen, J. A.:** Influence of Arctic Sea Ice on European Summer Precipitation. In: Environmental Research Letters 8, 044015, 2013
- Tang, Q. et al.:** Cold Winter Extremes in Northern Continents Linked to Arctic Sea Ice Loss. In: Environmental Research Letters 8, 014036, 2013

WEBLINKS

Diesen Artikel, weitere Literatur und zahlreiche Links finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1224874

Heute kochen wir Elemente-Suppe!

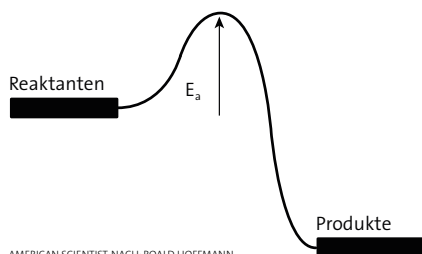
Was die stabilsten Verbindungen der Welt sind –
und warum manche davon trotzdem so selten vorkommen.

VON ROALD HOFFMANN

Angenommen, Sie hätten einen Eintopf aus sämtlichen chemischen Elementen in hinreichender Menge, einen Rührlöffel, um alles immer wieder gut zu durchmischen, eine Herdplatte, mit der Sie das Ganze von Zeit zu Zeit so hoch erhitzen, dass sämtliche Moleküle oder Festkörper, die sich zwischenzeitlich gebildet haben, in Atome oder Ionen zerfallen – und dazu jede Menge Zeit. Was käme heraus, wenn Sie den Eintopf irgendwann schließlich auf Zimmertemperatur abkühlen ließen?

Es handelt sich um ein Gedankenexperiment für ein hypothetisches Universum, bei dem ich die astrophysikalische Geschichte des realen Kosmos ignoriere. In Wahrheit existiert keine Welt, die mein Experiment widerspiegeln würde: Jeder Stern, Planet, Mond oder Asteroid hat seine eigene Historie, in der ganz sicher des Öfteren Situationen weit weg vom Gleichgewicht aufgetreten sind. Ich dagegen Sorge jederzeit für Gleichgewichtsbedingungen. Ist alles also nur eine intellektuelle Spielerei, völlig irrelevant für diese Welt?

Ganz so scheint es mir doch nicht – schließlich sind die Mineralien auf dem Mars weit gehend dieselben wie auf dem Mond oder der Erde, und die At-



AMERICAN SCIENTIST, NACH: ROALD HOFFMANN

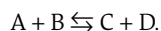
Auch wenn die Produkte einer Reaktion eine niedrigere Energie haben als die Ausgangsstoffe, muss die Aktivierungsenergie (E_a) aufgebracht werden, damit die Umsetzung in Gang kommt.

mosphäre des Saturnmondes Titan enthält keine Moleküle, die nicht ebenso auf der Erde vorkommen, wenn auch in ganz anderen Mengenverhältnissen. Unabhängig von Vorgeschichte und äußeren Umständen haben sich demnach dieselben chemischen Substanzen gebildet. Was also sind die stabilsten Verbindungen dieser Welt – oder gar einer jeden Welt? Für die Antwort brauchen wir ein wenig Thermodynamik.

Thermodynamik light

Warum jene schimmernden Messing-Dampfmaschinen in England Mitte des 19. Jahrhunderts nur einen bescheidenen Wirkungsgrad von maximal zehn Prozent hatten, konnten Wissenschaftler erst erklären, nachdem sie die Begriffe Wärme, Arbeit, Energie und Entropie präzise definiert hatten. Genau so verhält es sich mit der Stabilität chemischer Verbindungen. Von dem, was wir umgangssprachlich Energie nennen, gibt es in der Chemie drei Arten: innere Energie (U), Enthalpie ($H = U + PV$) und freie Enthalpie oder Gibbs-Energie ($G = U + PV - TS$). Dabei stehen P , V , T und S für Druck, Volumen, Temperatur und Entropie. Letztere kann man sich als Grad der Unordnung vorstellen, die auf molekularer Ebene herrscht. Sie nimmt immer dann zu, wenn Atome oder Moleküle sich freier bewegen können – etwa beim Schmelzen oder Verdampfen – oder ihre Zahl bei einer Reaktion anwächst – beispielsweise bei einer Zersetzung.

Die Änderung der Gibbs-Energie (ΔG) bestimmt die Lage des Gleichgewichts für eine chemische Reaktion der allgemeinen Form



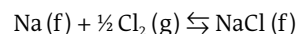
Bei negativem ΔG – also einer Abnahme der Gibbs-Energie – überwiegen

die Produkte, bei positivem die Ausgangssubstanzen.

Weiterhin benötigen wir die Wörter exotherm und endotherm, welche die Abgabe oder den Verbrauch von Wärme während der Umsetzung beschreiben. Eine exotherme Reaktion liefert Wärme, und die Enthalpie des Systems nimmt ab; ΔH ist also negativ. Im endothermen Fall verhält es sich umgekehrt. Bei sehr tiefen Temperaturen, also nahe dem absoluten Nullpunkt bei $-273,15$ Grad Celsius, verlaufen exotherme Reaktionen stets nach rechts, endotherme nach links.

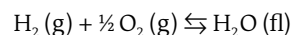
Hier sind als Beispiele zwei mögliche Umsetzungen in meiner Modellwelt bei Raumtemperatur:

1. die Bildung von Kochsalz aus metallischem Natrium und Chlorgas



$$\Delta H = -411 \text{ kJ/mol}$$

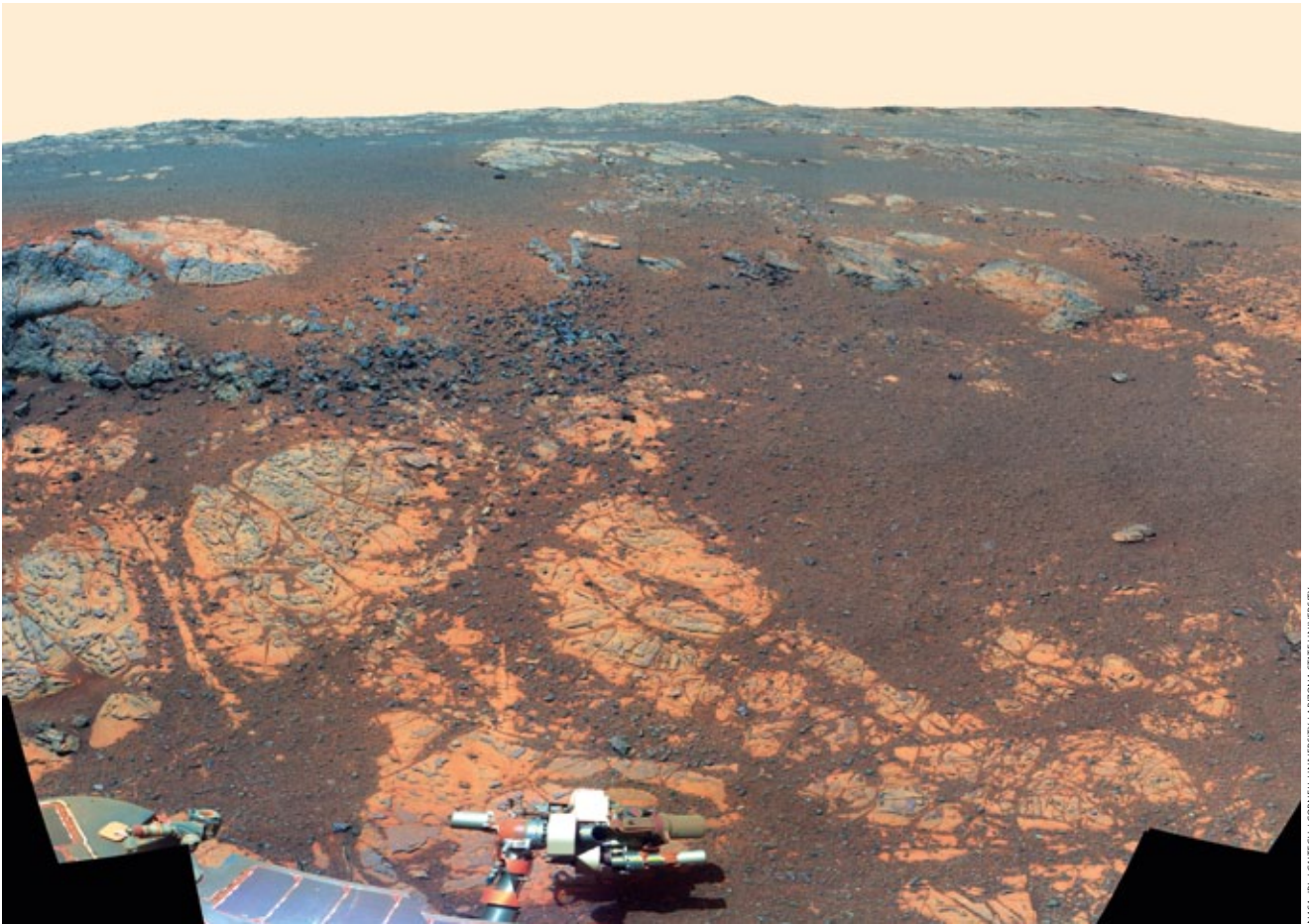
2. die Bildung von Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff



$$\Delta H = -286 \text{ kJ/mol}$$

Die Einheiten der Enthalpie bedeuten Kilojoule pro Mol (kJ/mol), während »f«, »fl« und »g« für fest, flüssig und gasförmig stehen. Als Quelle für die Wärmemengen diente mir das äußerst nützliche (aber nicht unfehlbare) NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, <http://webbook.nist.gov/chemistry>.

Ich habe diese beiden Reaktionen bewusst gewählt. Die erste illustriert die Bildung von Salzen (nicht nur Kochsalz, NaCl) und von Oxiden. Unter den Wegen zu größerer Stabilität ist sie einer der meistbegangenen. Die zweite Reaktion dient als Standardversuch in der Schule in den ersten Unterrichtsstunden in Chemie. In ein umgedrehtes Reagenzglas wird von unten Wasser-



NASA, JPL, CALTECH / CORNELL UNIVERSITY / ARIZONA STATE UNIVERSITY

stoffgas geleitet. Dreht man es dann um, passiert zunächst nichts – bis eine Flamme oder ein Funke dazukommt. Dann läuft die Reaktion augenblicklich mit einem lauten Knall ab. Um die Natrium-Chlor-Reaktion in Gang zu bringen, muss man das Natrium schmelzen oder einen Tropfen Wasser zugeben.

Beide Reaktionen verlangen zunächst die Zufuhr einer Aktivierungsenergie E_a (Diagramm links unten), damit sie starten. Diese Schwelle ist bei der Knallgasreaktion höher als bei der Bildung von Kochsalz und erklärt, warum in meinem Gedankenexperiment hohe Temperaturen vorkommen: Ich möchte alle Energiebarrieren überwinden können und am Ende nur wirklich stabile Stoffe haben.

Nichts ist einfach

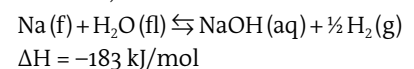
Kehren wir zu unserer Miniaturwelt aus H_2 , Cl_2 , O_2 und Na zurück. Im Gleichgewicht bei 25 Grad Celsius würden wir hauptsächlich $NaCl$ (f) und H_2O (fl) erhalten. Aber das stimmt nicht ganz;

Unser Nachbarplanet Mars unterscheidet sich chemisch nicht grundlegend von der Erde. Das ist ein Indiz für die Existenz einheitlicher thermodynamischer Senken im gesamten Universum; doch nicht überall herrschen die notwendigen Gleichgewichtsbedingungen, um sie zu erreichen. Gezeigt ist ein Foto des »Matijevic Hill«-Gebiets, aufgenommen vom NASA-Rover »Opportunity«.

denn Mischen ist erlaubt, und wie wir wissen, löst sich Kochsalz in Wasser. Außerdem sollte ich auch noch andere Reaktionen zwischen den sechs Molekülen in Betracht ziehen. Zum Beispiel reagiert Na mit H_2 zum Natriumhydrid NaH (f), Na mit O_2 zum Oxid Na_2O (f), Cl_2 mit H_2 zum Chlorwasserstoff HCl (g), der mit Wasser Salzsäure bildet, und Cl_2 mit O_2 zu den beiden bekannten Chloroxiden Cl_2O oder ClO_2 .

Dabei sind ternäre Verbindungen, die aus drei Elementen bestehen, noch gar nicht berücksichtigt. Eigentlich wollte ich meine Welt ja einfach halten und mich auf binäre, voneinander isolierte Verbindungen beschränken. Aber nichts ist einfach, und so sollten wir auch ternäre Verbindungen zulassen.

Bei einem anderen beliebten pyrotechnischen Demonstrationsversuch in der Schule lässt der Lehrer ein Stück Natrium in Wasser fallen. Es saust umher, während es sich auflöst, und beginnt zu brennen, wenn es festgehalten wird. Dabei entstehen Natriumhydroxid und Wasserstoff, der entweicht.



$NaOH$ ist eine typische einfache ternäre Verbindung, wobei das »aq« für wässrig steht; denn $NaOH$ löst sich begierig in Wasser unter Bildung von Natronlauge: Das ΔG für den Vorgang beträgt -42 kJ/mol . Stabile quaternäre Verbindungen aus allen vier Atomen existieren in diesem System zum Glück nicht.

Bei sehr hohen Temperaturen gewinnt der Entropieterm in der Gibbs-Energie die Oberhand, was Reaktionen begünstigt, bei denen die Entropie wächst. Alle Festkörper verdampfen dann und werden zu Gasen, auch NaCl (Siedepunkt 1413 Grad Celsius) und NaOH (Siedepunkt 1388 Grad Celsius). Sämtliche molekularen Gase zersetzen sich in ihre Atome. Das ΔS dieser Zersetzung ist positiv und recht hoch, weil sich dabei die Teilchenzahl vervielfacht. Die Oberfläche und das Innere von Sternen, wo unvorstellbar hohe Temperaturen herrschen, sind deshalb für Chemiker langweilig; denn es gibt dort überhaupt keine Moleküle.

Bei extrem niedrigen Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt bewegen sich die Atome dagegen nicht schnell genug, um bei Stößen noch irgendwelche Barrieren zu überwinden; alle Substanzen sind deshalb in ihrem jeweiligen Zustand buchstäblich eingefroren. Reagieren Wasserstoff und Sauerstoff schon bei Zimmertemperatur nicht miteinander, so tun sie das in dieser extremen Kälte noch weniger: Sie sind metastabil bezüglich der Bildung von Wasser.

Das Hochvakuum im interstellaren Raum wirft weitere Probleme auf. Falls einer der seltenen Stöße zwischen zwei Molekülen oder Atomen, die miteinander reagieren könnten, tatsächlich einmal stattfindet, verbleibt die gesamte freigesetzte Reaktionswärme als Schwingungsenergie beim Produktmolekül. Im Fall der Reaktion von H_2 und O (atomar) zu gasförmigem H_2O sind das immerhin 491 kJ/mol. Solange es keine weiteren Stoßpartner zum Abführen dieser Energie gibt, zerreißt sie das Produkt gleich wieder in die Ausgangsstoffe. Auch stark exotherme Reaktionen laufen im Hochvakuum deshalb nicht ab.

Diese drei Grenzfälle möchte ich als chemisch uninteressant ausschließen. Außerdem soll es in meiner Welt praktisch unbegrenzte Mengen von jedem Element geben. Anderenfalls würde das Ergebnis verfälscht. Angenommen, bei der Wasserbildung lägen die Ausgangssubstanzen O_2 und H_2 beide in dersel-

ben endlichen Menge vor – sagen wir 16 Gramm. Dann haben wir nach Ablauf der Reaktion 18 Gramm H_2O und 14 Gramm H_2 sowie eine winzige Menge Sauerstoff. Aus 32 Gramm sind am Ende wieder 32 Gramm geworden – seit Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) wissen wir, dass sich die Gesamtmasse aller Stoffe bei einer chemischen Reaktion nicht ändert. Doch dieses Ergebnis entspricht nicht dem chemischen Gleichgewicht der Wasserbildung: Es war einfach nicht genug Sauerstoff vorhanden, das mit dem zur Verfügung stehenden Wasserstoff hätte reagieren können.

Darum setze ich bei meinem Gedankenexperiment beliebig große Mengen jedes Elements voraus. In der realen Welt dagegen sind die lokalen Konzentrationen der Elemente stets begrenzt, und das schränkt das Ergebnis aller Reaktionen ein. Ich werde darauf zurückkommen.

Mit Sauerstoff ins Energietal

Zunächst einmal sollten wir uns mit etwas einfacher Chemie ein Gefühl für die thermodynamischen Senken dieser Welt verschaffen. Wir suchen dabei nach Verbindungen mit den größten negativen Bildungswärmen. Darunter versteht man die Enthalpieänderung bei der Synthese aus den Elementen unter irdischen Standardbedingungen, also 1 Atmosphäre Druck und 25 Grad Celsius. Betrachten wir die schematische Reaktion



wobei A, B und C Elemente verkörpern. Das Produkt AB_nC_m ist hier eine ternäre Verbindung, aber die Gleichung lässt sich leicht verallgemeinern und auf andere Fälle ausdehnen.

Beginnen wir mit Kohlenstoff und Sauerstoff. Die bekannten stabilen Oxide von Kohlenstoff sind CO, CO_2 und das Kohlenstoffdioxid C_3O_2 . Andere Oxide ließen sich experimentell in kleinen Mengen als Einschlüsse in einer inerten Matrix bei tiefen Temperaturen nachweisen: C_nO_2 ($n=2-7$), C_nO ($n > 2$) und C_nO_n ($n=2-6$).

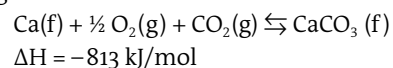
Die Bildungswärmen der geläufigen Oxide betragen -110 kJ/mol für CO (g),

-394 kJ/mol für CO_2 (g) und -122 kJ/mol für C_3O_2 (fl). Das durchweg negative Vorzeichen verrät uns, dass alle drei Verbindungen bezüglich der Elemente stabil sind.

Damit haben wir das erste allgemeine Prinzip zur Erhöhung der Stabilität, das sich schon beim Wasserstoff zeigte: die Oxidbildung. Es trifft auch für jedes andere Element zu, mit Ausnahme der Edelgase – und Gold. Übrigens ist Quarz, also Siliziumdioxid (SiO_2), noch weitaus stabiler als CO_2 ; denn seine Bildungswärme liegt bei spektakulären -911 kJ/mol. Dadurch verschlingt die Herstellung von Solarzellen aus Silizium vorab einen großen Teil der später damit erzeugten elektrischen Energie.

CO_2 ist viel stabiler als die anderen beiden Oxide des Kohlenstoffs. Man sieht das leicht, wenn man aus den obigen Bildungswärmen die Reaktionsenthalpien für alle möglichen wechselseitigen Umwandlungen berechnet, zum Beispiel $CO_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2}O_2$, $3CO_2 \rightleftharpoons C_3O_2 + 2O_2$ und so weiter. In allen Fällen ergeben sich positive Werte; die Reaktionen sind also endotherm.

Aber was passiert, wenn man zu Kohlenstoff und Sauerstoff auch noch Kalzium (Ca) in ausreichender Menge hinzugibt? Dieses würde mit CO_2 – sofern genug Wärme zum Überwinden der Aktivierungsschwelle da ist – zu Kalziumkarbonat ($CaCO_3$), also Kalk, reagieren.



Dabei handelt es sich, wie die Reaktionsenthalpie zeigt, um eine sehr tiefe thermodynamische Senke.

Geht das so weiter? Erhält man bei der Zugabe weiterer Elemente jeweils noch stabilere Verbindungen aus noch mehr Komponenten, bis bei etwa 100 Elementen – wenn wir die kurzlebigen Transurane einmal weglassen – eine superstabile »multinäre« Verbindung der Zusammensetzung $A_xB_yC_zD_w \dots$ entsteht?

Ganz sicher nicht. Chemiker kennen metastabile Moleküle mit mehr als zehn und Festkörperverbindungen mit mindestens neun Elementen. Aber wie Erfahrung und Intuition lehren, spal-



Gemäß der Gaia-Hypothese, die der 1919 geborene britische Chemiker, Mediziner und Biophysiker James Lovelock aufgestellt und die US-Biologin Lynn Margulis (1938–2011) verfeinert hat, sorgt das Leben für Abweichungen vom chemischen Gleichgewicht. Aber auch ohne es befände sich die Erde Überlegungen des Autors zufolge in einem gleichgewichtsfernen Zustand.

ten sich solche Vielelementverbindungen gerne in kleinere Moleküle auf – sind also energiereicher als diese – oder reagieren bereitwillig mit Sauerstoff.

Tief, tiefer, am tiefsten

Was also sind die tiefsten thermodynamischen Senken dieser Welt? Offensichtlich handelt es sich dabei um einfache Verbindungen mit stark negativer Bildungswärme. Vier davon haben wir schon kennen gelernt: NaCl, H₂O, CO₂, CaCO₃. Ihre Bildungswärmen betragen –411, –286, –394, –1207 kJ/mol. Das Rezept lautet folglich einfach: Man bilde Oxide, Festkörper oder ionische Verbindungen. Reine Elemente haben keine Chance, mit Ausnahme der leichteren Edelgase (die Bildungswärmen von Xenonfluoriden sind nicht groß, aber negativ).

In Einklang mit der stark negativen Bildungswärme von CaCO₃ zeigt sich, dass alle Karbonate sehr stabil sind. Dasselbe gilt für die meisten Salze, die Nitrat- (NO₃⁻), Sulfat- (SO₄²⁻), Phosphat- (PO₄³⁻) und Silikationen (SiO₄⁴⁻) enthalten. So beträgt etwa die Bildungswärme von Kalziumphosphat (Ca₃(PO₄)₂) –4132 kJ/mol und die von Eisensulfat (Fe₂(SO₄)₃) –2583 kJ/mol. Die Werte sind zwar auch deshalb so hoch, weil die betreffenden Moleküle sehr viele Elemente enthalten. Aber die Bildungswärme pro Atom – 376 kJ/mol beim Kalziumphosphat – ist immer noch beachtlich.

Hohe Bildungswärmen haben auch die Silikatgesteine, aus denen die Erdkruste zu etwa 90 Prozent besteht. Ihr Vorkommen auf terrestrischen Planeten ist ein klarer Beleg für ihre Stabilität. SiO₄⁴⁻-Ionen, wie sie zum Beispiel im

Olivin vorliegen, können sich zu einer erstaunlichen Vielfalt von Polyanionen zusammenlagern. Das Dimer (Si₂O₇)⁶⁻ findet sich im Epidot, das kettenförmige [SiO₃]_n²ⁿ⁻ im Pyroxen. Die Hornblende besteht aus Doppelketten der Zusammensetzung [Si₄O₁₁]_n²ⁿ⁻, während die Silikatgruppen in Blattsilikaten wie Ton und Glimmer zu einem zweidimensionalen Netz der Zusammensetzung [Si₂O₅]_n²ⁿ⁻ verknüpft sind. In Feldspäten schließlich liegt ein dreidimensionales Netz vor, wobei ein Drittel der Silizium- durch Aluminiumatome ersetzt ist, so dass sich für das Anion die Formel [AlSi₃O₈]_nⁿ⁻ ergibt. Ähnliches gilt für die Zeolithe, bei denen der Anteil des Aluminiums allerdings in weiten Grenzen variiert – zwischen 2 und 50 Prozent.

All diese Anionen können mit beliebigen Kationen kombiniert sein. Daraus erwächst die ungeheure Fülle der Silikatminerale.

Auf dem Weg zu immer stabileren Substanzen zeichnet sich somit ein gewisses Muster ab. Wir sind von den einfachen binären ionischen Verbindungen (NaCl, NaH) zu solchen gelangt, in denen zusammen mit einem Alkali- oder Erdalkaliation ein molekulares Anion (CO₃²⁻, SiO₄⁴⁻) auftritt. Auch in diesen Anionen verbergen sich wiederum teilweise ionische Bindungen, weil der Sauerstoff jeweils zwei Elektronen des Elements im Zentrum – also C, Si, N, P oder S – weit gehend zu sich heranzieht. Gewissermaßen haben wir es also mit Ionen in Ionen zu tun.

Aber es gibt noch stabilere Verbindungen als Oxide, nämlich die Fluoride. Beispiele sind Fluorit (CaF₂) und Kryolith (Na₃AlF₆). Dort haben die Bindungen noch stärker ionischen Charakter als bei Oxiden. Die thermodynamische Stabilität aller salzartigen Fluoride, das heißt ihre Bildungswärme pro Atom, ist enorm hoch: Sie beträgt etwa beim Fluorit –407 kJ/mol.

Das lässt sich qualitativ so erklären: Die Energie für die Spaltung eines F₂-Moleküls, der Erscheinungsform von elementarem Fluor unter Standardbedingungen, ist relativ klein, die Elektronenaffinität des resultierenden Fluor-

atoms – der Energiegewinn bei der Aufnahme eines Elektrons – dagegen sehr hoch. Und wegen der geringen Ausdehnung des F^- -Ions wird bei seinem Einbau in ein Kristallgitter viel elektrostatische Bindungsenergie (die so genannte Madelung-Energie) gewonnen.

Salze sind häufig in flüssigem Wasser löslich. Sie haben somit eine negative freie Lösungsenthalpie. Dazu leistet die Entropie aus offensichtlichen Gründen einen sehr großen Beitrag, wenn nicht gar den größten. Ich glaube nicht, dass andere polare Flüssigkeiten – jede in ihrem entsprechenden Temperaturbereich – wie Ammoniak, SO_2 , HF oder überkritisches CO_2 so viel an Stabilisierung bieten können wie Wasser.

Also lautet meine vorläufige Antwort auf die zu Beginn gestellte Frage: Das Endprodukt bei Standardbedingungen wäre eine salzige Brühe aus Wasser, in dem Protonen sowie Kationen der Metalle gemeinsam mit molekularen Anionen der Nichtmetalle gelöst sind. Als feste Brocken schwimmen außerdem einige schwer lösliche Salze ähnlicher Zusammensetzung (Mineralien!) in der Suppe. Und ein paar Edelgase sind einfach als solche da, falls sie sich nicht verflüchtigt haben.

Die Frage nach der geochemischen Relevanz

Als mir die Idee zu meinem Gedankenexperiment kam, glaubte ich, in jedem beliebigen Lehrbuch der Geochemie müsste etwas über das Resultat stehen. Ich fand zwar ein paar brauchbare Informationen – zum Beispiel im letzten Abschnitt in Konrad Krauskopfs schon etwas älterem Buch »Introduction to Geochemistry« –, aber nicht sehr viele.

Der Grund ist wohl, dass meine Frage nach den tiefsten thermodynamischen Senken der Welt die Ausgeburten eines Theoretikerhirns war und Geochemiker ausgesprochen praktisch denkende Leute sind. Für sie ist mein Gleichgewichts-Wolkenkuckucksheim einfach nicht relevant, denn die Erde (und jedes andere Objekt im Universum) hat eine Geschichte. So gibt es kein Füllhorn mit einem unendlichen Reservoir aller chemischen Elemente –

weder auf unserem Planeten noch im Universum insgesamt; denn auch dort ist die Elementhäufigkeit durch die Physik der Kernsynthese in den ersten Momenten nach dem Urknall und die nachfolgende, länger andauernde Synthese der schwereren Elemente in Sternen und Supernovae eingeschränkt.

Erinnern Sie sich an die Fluoride, diese stabilsten Verbindungen überhaupt? Warum ist die Welt nicht voll von ihnen? Ganz einfach: Weil das Element Fluor im Universum, im Sonnensystem und auf der Erde nicht sehr häufig vorkommt.

Möglichst weit weg vom Gleichgewicht

Mein Gedankenexperiment lieferte die Gleichgewichtswelt, die wir nach den Gesetzen der Thermodynamik haben sollten. So interessant das sein mag – wir haben sie aber nicht, und auch kein Exoplanet hat sie. Wie gesagt, liegt das unter anderem daran, dass die einzelnen Elemente nur in beschränkten Mengen vorhanden sind. Zusätzlich sorgen radioaktiver Zerfall und große Massen für hohe Temperaturen im Innern der Erde und erdähnlicher Planeten. Diese treiben die Plattentektonik an, was sehr spezifische Nischen für die Mineralbildung kriert.

Bei relativ kleinen Planeten entweichen wegen der geringen Schwerkraft nach und nach alle leichteren Edelgase, wie sie es auf der Erde im Großen und Ganzen schon getan haben. Wenn Planetengröße, Vulkanaktivität, Bahnradius und Strahlungsintensität des zugehörigen Sterns nicht stimmen, verschwindet auch das Wasser – oder es gefriert, so dass sich keine Salze darin lösen können.

Und obendrein gibt es das Leben, das eine stete Quelle des Ungleichgewichts ist. Unmittelbares Zeugnis davon legt der in unserer Atmosphäre vorkommende Sauerstoff ab, der doch auf so viele Arten fixiert werden kann, wie wir gesehen haben. Schließlich sollen Systeme nach – allerdings umstrittenen – Theorien durch maximale Entropieflüsse unausweichlich weg vom Gleichgewicht getrieben werden.

Ich glaube, dass Geschichte – physikalische Gesetze plus Vielfalt und Zufall – auch ganz ohne Leben einen Zustand weit abseits des Gleichgewichts schafft und seine Verbreitung fördert. Und Geschichte kann man nicht abstellen. Wir bewohnen durch glückliche Umstände einen wunderbaren Planeten mit einer Oberfläche und Atmosphäre, die sich größtenteils fern von jenem thermodynamischen Zustand befinden, den ich erforschen wollte. Wir sollten froh sein über das, was wir haben, und vor allem sorgfältig damit umgehen. ☺

DER AUTOR



Roald Hoffmann ist emeritierter Frank H.T. Rhodes Professor of Humane Letters an der Cornell University in Ithaca (New York) und Träger des Chemie-nobelpreises 1981. Er

dankt Mainak Mookherjee, Vaclav Smil, Don Rimstidt, Tyler Volk, David Schwartzman, Eugen Schwarz, Andreas Herrmann und Michael O'Keefe für erhellende Kommentare.

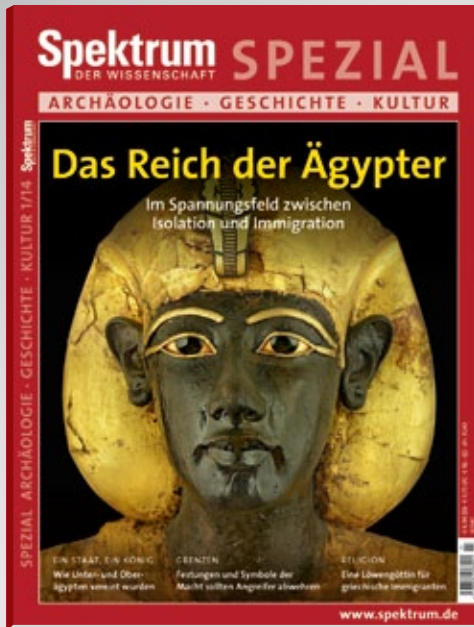
QUELLEN

- Hazen, R.M. et al.:** Mineral Evolution. In: American Mineralogist 93, S. 1693–1720, 2008
- Johnson, D.A.:** Some Thermodynamic Aspects of Inorganic Chemistry. Cambridge University Press, 1982
- Kleidon, A., Lorenz, R.D. (Hg.):** Non-Equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy. Springer, Berlin 2005
- Lovelock, J.E., Margulis, L.:** Atmospheric Homeostasis by and for the Biosphere: The Gaia Hypothesis. In: Tellus 26, S. 2–9, 1974
- Schwartzman, D.W., Volk, T.:** Does Life Drive Disequilibrium in the Biosphere? In: Schneider, S.H. (Hg.): Scientists Debate Gaia. MIT Press, Cambridge 2004, S. 129–135
- Volk, T.:** The Properties of Organisms are not Tunable Parameters Selected because they Create Maximum Entropy Production on the Biosphere Scale: A By-Product Framework in Response to Kleidon. In: Climatic Change 85, S. 251–258, 2007

© American Scientist

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1224875

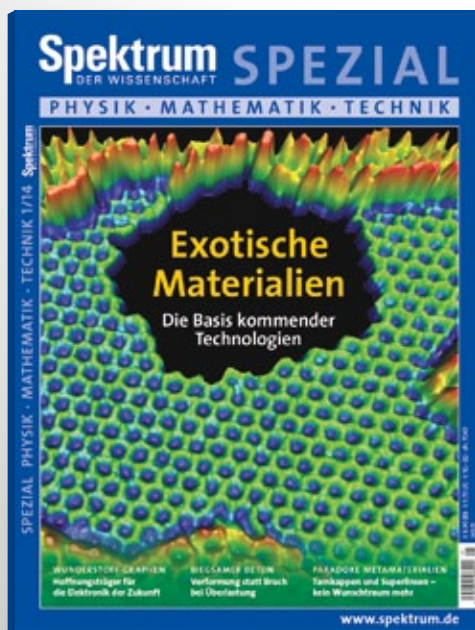
UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Die Geburt des Pharaonenstaats • Festungsbau: Wo Ägypten endete • Nachbar Nubien: Der afrikanische Rivale • Kunst: Das Blau des Himmels • € 8,90, erscheint am 21.3. 2014



Philosophie: Zufall und Determinismus • Genetik: Die Rolle des Zufalls bei der Genexpression • Wie sieht man das Unvorhersehbare vorher? • € 8,90



Quantentheorie: Wunderstoff aus dem Bleistift • Optik: Die Superlinse • Bildgebung: Antennen und Kameras der Zukunft • Baustoffe: Biegsamer Beton • € 8,90



Können Kinder schon im Bauch gefördert werden? • Wie kümmern sich Väter am besten um den Nachwuchs? • Brennpunktthema: Wochenbettdepression • € 8,90

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.com/sonderhefte

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!



Atmende Kristalle

Es klingt unglaublich: Neuartige kristalline Festkörper mit großen Hohlräumen im Innern dehnen sich bei der Aufnahme von Wasser oder Gasen teils drastisch aus – bis zum Dreifachen ihres ursprünglichen Volumens. Das macht sie für Energietechnik, Umweltschutz und Medizin interessant.

Von Gérard Férey

Feste Stoffe, die ihr Volumen drastisch ändern können, sind selten. Schwämme und Lungengewebe gehören dazu. Sie können quellen oder sich aufblähen und dabei ihren Rauminhalt um 50 Prozent oder mehr vergrößern. Allerdings handelt es sich dabei um amorphe Stoffe, bei denen die Atome nicht in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind. Gibt es auch kristalline Festkörper mit demselben Ausdehnungsvermögen? Bis zum Jahr 2002 lautete die Antwort Nein.

In jenem Jahr stellten meine eigene Arbeitsgruppe und das Team von Susumu Kitagawa an der Universität Kyoto (Japan) gleichzeitig die ersten flexiblen kristallinen Festkörper her. Bei diesen neuartigen porösen Materialien – es handelt sich um so genannte metallorganische Gerüstverbindungen oder kurz MOFs (nach englisch: metal organic frameworks) – sind anorganische und organische Einheiten in einzigartiger Weise miteinander verknüpft. Die Substanzen enthalten regelmäßig angeordnete Hohlräume, sind also eine Art Emmentaler auf molekularer Ebene. Je nachdem ob die Löcher weniger als 2, zwischen 2 und 50 oder mehr als

50 Nanometer messen, spricht man von mikro-, meso- oder makroporösen Materialien.

Zwar sind auch die meisten MOFs starr, aber einige bilden spektakuläre Ausnahmen: Sie können ihr Volumen um bis zu 200 Prozent ändern, ohne dass dabei auch nur eine einzige chemische Bindung aufbricht. Galt dieses faszinierende Phänomen anfangs noch als reine Laborkuriosität, hat es sich seither zu einem bedeutenden Forschungsgegenstand in der Werkstoffchemie entwickelt – verspricht es doch Anwendungen in so unterschiedlichen Bereichen wie der Energietechnik, dem Umweltschutz und nicht zuletzt der Medizin.

Innenansicht einer Gerüstverbindung

Das erste in meinem Arbeitskreis hergestellte hochflexible MOF war ein Chromterephthalat. Es trägt die Bezeichnung MIL-53, wobei MIL für »Material des Instituts Lavoisier« steht; denn dort befindet sich mein Labor. Es ist üblich, poröse Systeme, die oft komplizierte chemische Formeln und unhandliche systematische Namen haben, durch ein Kürzel aus drei Buchstaben zu bezeichnen, die meist mit dem Ort ihrer Entdeckung zu tun haben.

Man erhält MIL-53, indem man eine wässrige Lösung von Chrom(III)-chlorid (Chrom kann in allen Oxidationsstufen von II bis VI auftreten) und Terephthalsäure (ein sechseckiger Benzolring mit zwei Carboxyl-Gruppen [–COOH] an gegenüberliegenden Ecken) acht Stunden lang in einem Druckbehälter bei 180 Grad Celsius erhitzt. Der anorganische Teil des Gerüsts besteht aus Cr³⁺-Ionen, die oktaedrisch von Sauerstoff-Atomen umgeben und über Hydroxid-Ionen (OH[–]) zu Ketten verknüpft sind (Bild S. 90). Die organischen Terephthalat-Moleküle wirken als zusätzliche Klammern innerhalb der Kette, indem sich die beiden Sauerstoff-Atome einer ihrer zwei Carboxylat-Gruppen (–COO[–]) jeweils als so genannte Liganden an benachbarte Chrom-Ionen heften. Die zweite Carboxylat-Gruppe stellt die Verbindung zu einer anderen solchen Kette her.

Dadurch ergibt sich ein dreidimensionales Gewebe von Chrom-Sauerstoff-Oktaedern, das von Tunneln mit rautenförmigem Querschnitt durchsetzt ist, in denen sich Wasser-Moleküle aufhalten. Das Volumen der kristallografischen

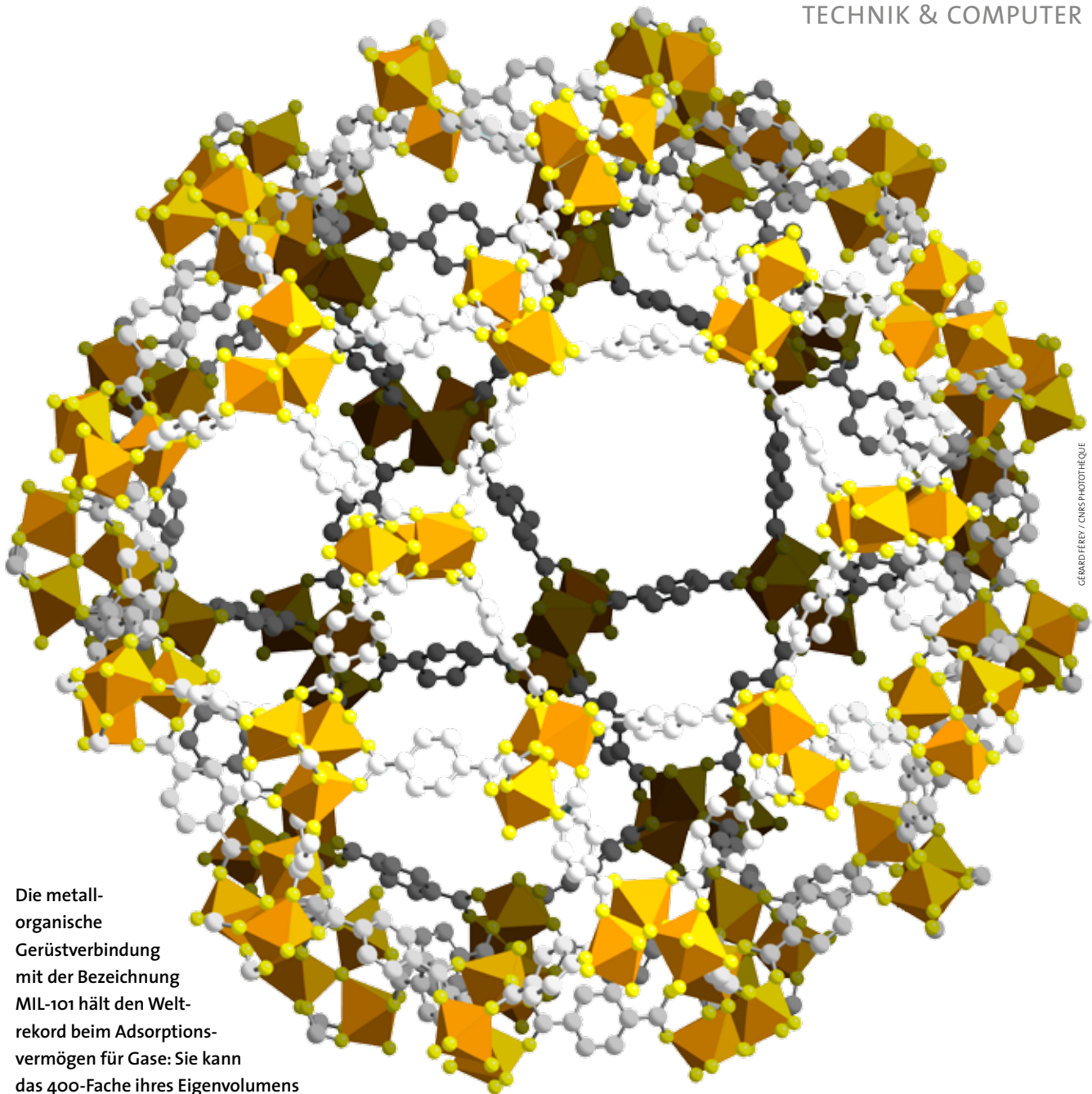
AUF EINEN BLICK

MOLEKULARE SPEICHER FÜR GASE UND MEDIKAMENTE

1 Als **metallorganische Gerüstverbindungen** oder kurz **MOFs** (nach englisch: metal-organic frameworks) bezeichnet man eine Klasse hochgradig poröser synthetischer Festkörper. Sie bestehen aus Metall-Ionen, die über Sauerstoff-Atome mit langkettigen organischen Molekülen zu einem **dreidimensionalen Gerüst** verknüpft sind.

2 Manche können je nach den äußeren Bedingungen zwischen einem Zustand mit zusammengeklappten oder offenen Poren wechseln, was mit einer **Volumenänderung um bis zu 200 Prozent** einhergeht. Ermöglicht wird diese Flexibilität durch **Scharniere und Drehachsen in der Molekülstruktur**.

3 Dank ihrer Fähigkeit, große Mengen an Gasen oder Flüssigkeiten aufzunehmen und leicht wieder abzugeben, könnten solche Materialien etwa dazu dienen, Wasserstoff als künftigen **Energieträger** zu speichern – beispielsweise in Autotanks – oder im Körper **Medikamente** zu erkrankten Organen zu transportieren.



Elementarzelle beträgt knapp einen Kubiknanometer. Beim Erhitzen entweicht das Wasser aus den Tunneln.

Verfolgt man diesen Vorgang per Röntgenbeugung, so sieht man Erstaunliches: Zwischen 110 und 120 Grad Celsius, wenn sich das Wasser nach und nach verflüchtigt, nimmt das Volumen der Elementarzelle kontinuierlich um etwa 40 Prozent zu, ohne dass ein nichtkristallines Stadium durchlaufen wird. Wenn man das getrocknete Material dann auf 25 Grad Celsius abkühlt und es feuchter Luft aussetzt, kehren die Wasser-Moleküle in die Tunnel zurück – und die Kristalle schrumpfen wieder. Dieser reversible Zyklus von Dehydratation und Hydratation unter Ausdehnen und Zusammenziehen kann Hunderte von Malen durchgeführt werden, ohne dass sich der Festkörper zersetzt.

Die spektakulärsten MOFs gehören zu einer Familie von Dicarboxylaten namens MIL-88 (Bild S. 91). Auch sie enthalten dreiwertige Metalle wie Aluminium, Chrom, Eisen oder Gallium, werden allerdings unter anderen Bedingungen hergestellt als MIL-53 und haben eine noch komplexere Struktur. Die Oktaeder sind darin nicht zu Ketten, sondern zu Dreiergruppen mit einem gemeinsamen Sauerstoff-Atom im Zentrum verknüpft.

Die nicht an Kohlenstoff-Atome gebundenen Sauerstoff-Atome an den Ecken der Oktaeder gehören zu Wasser-Molekülen. Die anderen stammen von der Carboxyl-Gruppe des organischen Teils. Dieser kann aus Terephthalat bestehen, aber auch aus Naphthalin- oder Diphenyldicarboxylat; darin sind zwei Benzolringe über eine gemeinsame Kante aneinan-

dergeschweißt (Naphthalin) beziehungsweise an einer Ecke miteinander verbunden (Diphenyl). Die resultierenden dreidimensionalen Geflechte enthalten sowohl Tunnel als auch bipyramidale Höhlen.

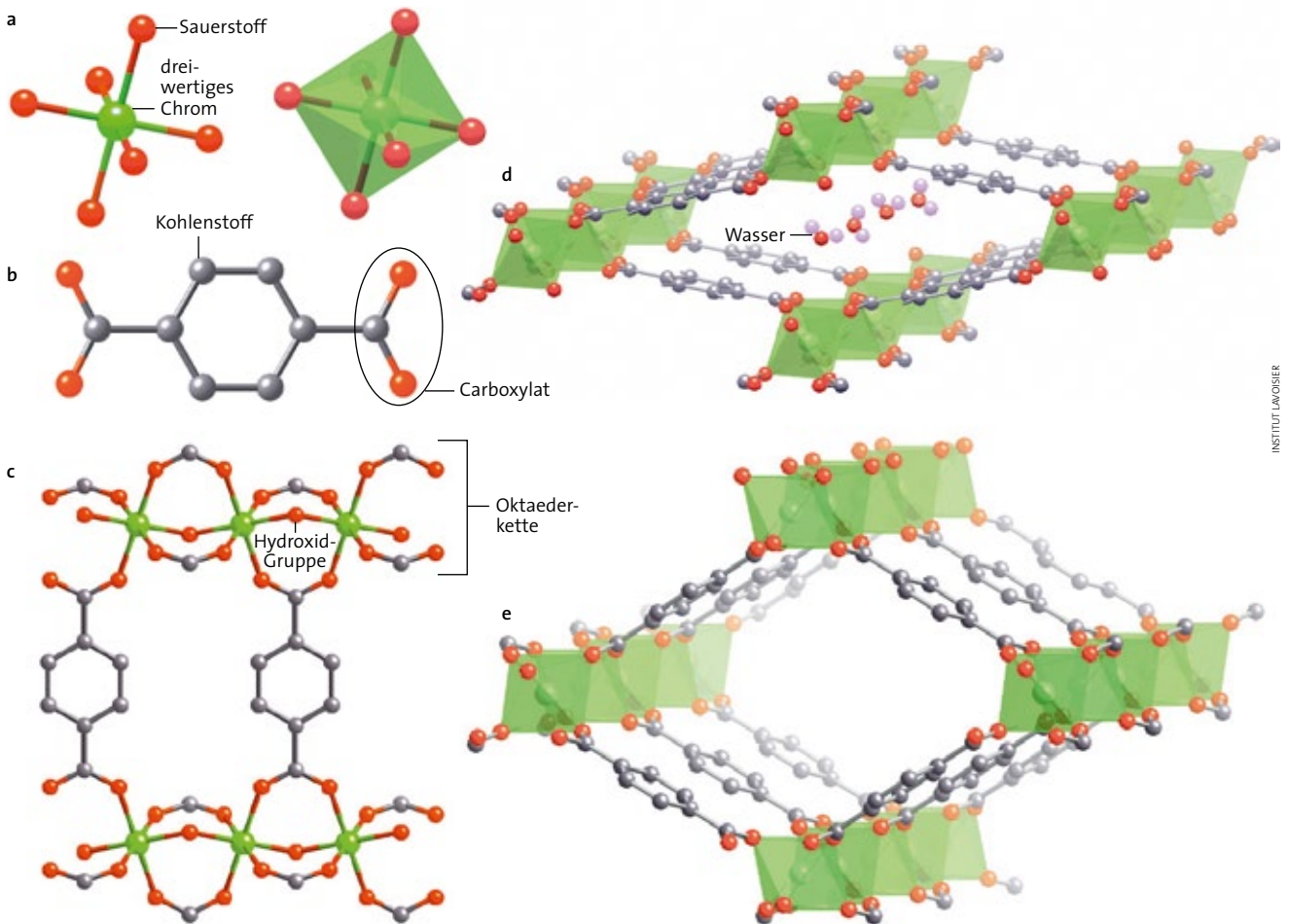
Ein Soufflee mit Nanoporen

Im getrockneten Zustand, wenn beide Arten von Hohlräumen leer sind, ist die Struktur kompakt. Schon einige Tropfen Wasser lassen sie jedoch wie ein Soufflee aufgehen – und zwar gewaltig: Je nach dem organischen Teil nimmt das Volumen zwischen 80 und 200 Prozent zu. Beim Trocknen schrumpft die Substanz wieder und nimmt die ursprüngliche kompakte Struktur an. Man beachte, dass die Volumenänderung beim Befeuchten und Trocknen genau umgekehrt ist wie im Fall vom MIL-53.

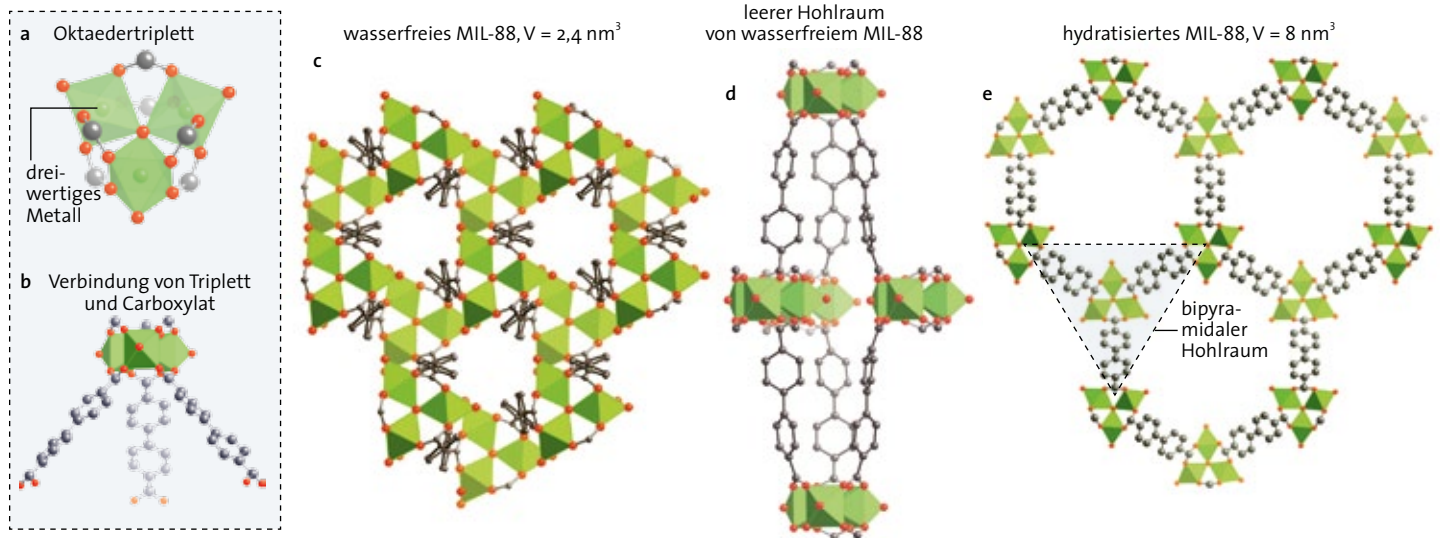
Wie lässt sich die drastische Ausdehnung bei beiden Substanztypen erklären? Auf der Suche nach der Antwort haben wir die Strukturen mit Synchrotronstrahlung in Echtzeit vor, während und nach der Umwandlung bestimmt. Als erste wichtige Erkenntnis daraus ergab sich, dass zwischendurch keine amorphe Phase auftritt – was zu erwarten wäre, wenn Bindungen gebrochen und neu geknüpft würden. Bei dem Übergang verschieben sich die Atome in einer koordinierten Bewegung derart, dass das Gesamtgefüge der Struktur erhalten bleibt.

Obwohl sich MIL-53 und MIL-88 beim Trocknen oder Benetzen entgegengesetzt verhalten, steckt dieselbe tiefere Ursache hinter der Volumenänderung. Sieht man von der speziellen Beschaffenheit der anorganischen Teile ab und betrachtet nur ihre Verknüpfung mit den organischen Komponenten, so erkennt man eine entscheidende Gemeinsamkeit: Die Car-

Das nach dem Institut Lavoisier benannte Material MIL-53 war das erste Beispiel eines flexiblen kristallinen Festkörpers. Es enthält Chrom(III)-Ionen (grün dargestellt), die oktaedrisch von sechs Sauerstoff-Atomen (rot) umgeben sind (a). Vier davon gehören zur Carboxylat-Gruppe eines organischen Terephthalat-Ions (b) und zwei zu Hydroxid-Gruppen, welche die Chrom-Atome zu Ketten verknüpfen (c). Letztere sind so an die Terephthalat-Moleküle gebunden, dass zu Tunneln verbundene Hohlräume entstehen, die in Gegenwart von Wasser ein Volumen von rund einem Kubiknanometer haben (d). Wird das Wasser durch Erhitzen ausgetrieben, dehnen sich die Kristalle um etwa 40 Prozent (e).



INSTITUT LAVOISIER



boxylat-Gruppen an den beiden Enden des organischen Moleküls sind jeweils so an zwei metallische Oktaeder gebunden, dass die Achse O–C–O als Scharnier fungiert (Bild S. 92). Zusammen mit der freien Drehbarkeit des Benzolrings der organischen Komponente um die Carboxylat-Gruppe macht das die Anordnung hochgradig flexibel. Als Reaktion auf äußere Bedingungen – wie das Trocknen oder Befeuchten –, durch die sich subtile Wechselwirkungen innerhalb der Hohlräume ändern, kann das Strukturgerüst deshalb von der kompakten in die offene Form umklappen oder umgekehrt.

Beim MIL-53 sind im feuchten Zustand die Wasser-Moleküle in den Tunneln zu einer Kette verknüpft und zugleich über Wasserstoffbrücken mit den benachbarten Oktaederketten verbunden. Dabei gibt es zwei Arten solcher Brücken (Bild S. 92). Im einen Fall interagieren Wasserstoff-Atome der Wasser-Moleküle mit den Sauerstoff-Atomen der Carboxylat-Gruppe. Beim zweiten, stärkeren Typ haften die Wasserstoff-Atome der OH-Gruppen, welche die Cr^{3+} -Ionen miteinander verknüpfen, und die Sauerstoff-Atome der Wasser-Moleküle aneinander. Diese Interaktionen wirken wie eine gespannte Feder, welche die Oktaederketten auf beiden Seiten der Tunnelachse um mehr als fünf Nanometer zueinander hin zieht. Wenn die Wasser-Moleküle beim Erhitzen entweichen, verschwinden diese Wechselwirkungen. Damit entfällt auch die Federkraft, so dass sich der Tunnel öffnet.

Bedingungen für hohe Flexibilität

Dieser Mechanismus funktioniert nur mit OH-Gruppen in den anorganischen Ketten. Wählt man nämlich als metallisches Ion Vanadium(III), so wird dieses beim Trocknen zu Vanadium(IV) oxidiert, während sich die Hydroxid- in Oxid-Ionen umwandeln. Als Folge davon öffnet sich die Struktur zwar, kehrt aber nach Zugabe von Wasser nicht mehr in den kompakten Zustand zurück, da es die OH-Gruppen für die dazu nötigen Wasserstoffbrücken nicht mehr gibt.

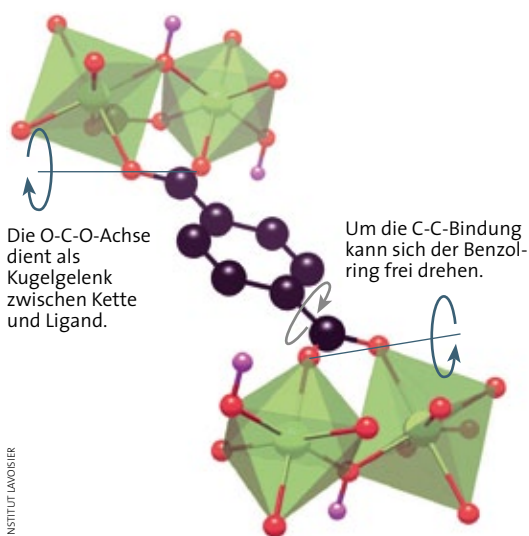
MIL-88 enthält von Anfang an keine Hydroxid-Ionen. Deshalb hat Wasser hier den gegenteiligen Effekt: Es füllt einfach

In MIL-88 sind die Oktaeder aus dreiwertigen Metall-Ionen und Sauerstoff-Atomen über eine gemeinsame Ecke zu Dreiergruppen verknüpft (a). An diesen hängen auf beiden Seiten jeweils drei Diphenyldicarboxylat-Ionen (b). Dadurch entstehen sechseckige Kanäle und bipyramidale Hohlräume, die ein Volumen von 2,4 Kubiknanometern haben (c und d) und sich bei Zutritt von Wasser auf acht Kubiknanometer vergrößern (e und f).

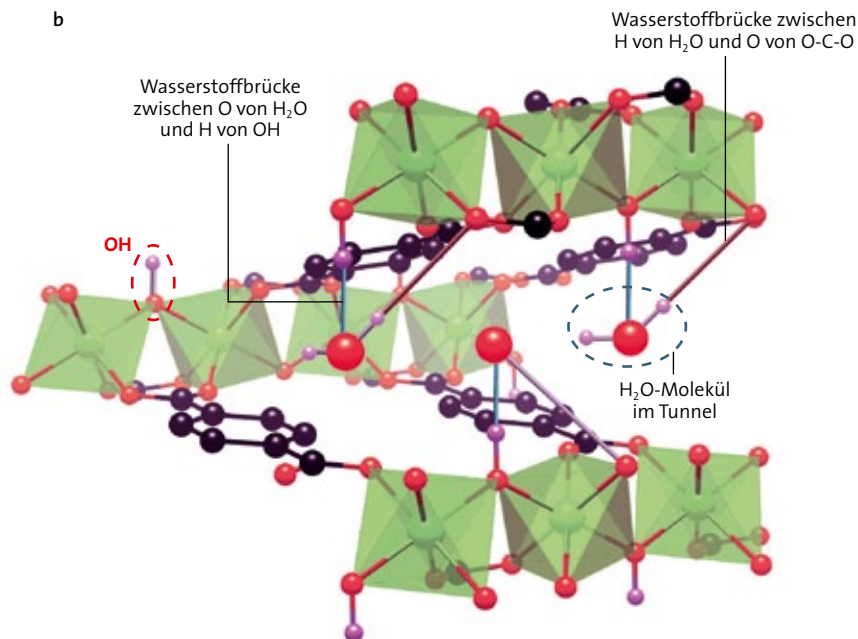
das flexible Skelett, ohne dass irgendeine Wechselwirkung mit der Wand das Anschwellen bremsen könnte, bis die Hohlräume ihre maximale Ausdehnung erreicht haben.

Obwohl Scharniere und Drehgelenke eine notwendige Bedingung für drastische Volumenänderungen sind, reichen sie allein nicht aus. Das beweisen Substanzen, die über sie verfügen, aber trotzdem starr sind. Als Beispiel sei MIL-68 genannt. Obwohl es dieselbe Summenformel hat wie MIL-53 und auch dieselben Oktaederketten enthält, kann es sich weder nennenswert ausdehnen noch schrumpfen. Die Tunnel, die es enthält, haben nämlich statt einem rautenförmigen einen sechseckigen oder dreieckigen Querschnitt. Das macht das Molekül starr. In den rautenförmigen Kanälen von MIL-53 kann kein organischer Ligand die Diagonale besetzen, um die Abplattung zu blockieren. Bei den Dreieckstunneln von MIL-68 passiert aber genau das. Deshalb können die Dicarboxylate nicht um eine Kette rotieren. Unsere Untersuchungen an vielen anderen Beispielen haben ergeben, dass Strukturen mit Tunneln, die eine ungerade Zahl von Seiten haben, durchweg nicht flexibel sind (Bild S. 93).

a



b



Die Volumenänderung flexibler Kristalle, hier MIL-53, wird durch verschiedene Rotationsachsen im Strukturgerüst ermöglicht. So dient die Carboxylat-Gruppe (O-C-O) als Scharnier (a, blauer Pfeil) zwischen den Oktaederketten und den sie verbindenden organischen Molekülen. Außerdem kann der Benzolring um die C-C-Bindung frei rotieren (grauer Pfeil). Verantwortlich für den geschrumpften Zustand sind die von den Wasser-Molekülen in den Hohlräumen gebildeten Wasserstoffbrückenbindungen (b): zum einen zwischen den Sauerstoff-Atomen der Carboxylat-Gruppen und den Wasserstoff-Atomen von Wasser-Molekülen (braun) und zum anderen zwischen den Wasserstoff-Atomen der die Oktaeder verbindenden OH-Gruppen und den Sauerstoff-Atomen von Wasser-Molekülen (blau). Diese Brückenbindungen halten die Tunnelwände eng zusammen.

Doch es gibt eine weitere Bedingung. Sie hat mit der Symmetrie des anorganischen Bausteins zu tun. Flexibilität setzt voraus, dass die Liganden synchron, koordiniert und gegenläufig um ihn rotieren können, weil nur so die Topologie des Moleküls erhalten bleibt. Dazu muss der anorganische Teil mindestens eine Symmetrieebene aufweisen, so dass auf beiden Seiten ungehinderte Bewegungen möglich sind. Außerdem haben die Scharniergelenke O-C-O alle in parallelen Ebenen zu liegen. MOF-5 ist hier aufschlussreich (Bild rechts). Dieses Molekül erlaubt zwar die koordinierte Rotation um den zentralen Baustein in der oberen Hälfte der Elementarzelle, aber nicht in der unteren, weil die Carboxylat-Gruppen senkrecht zu denen im oberen Teil stehen. MOF-5 ist folglich starr.

Beachten Sie, dass bei all unseren atmenden Kristallen die Flexibilität nur latent vorhanden ist. Sie zeigt sich erst unter einem äußeren Einfluss wie Druck- oder Temperaturänderung, Benetzung, Zugabe externer Komponenten oder Lichteinfall. Je nach externem Reiz und Struktur des Festkörpers beginnt dieser daraufhin zu schrumpfen oder sich auszuweiten.

Insgesamt müssen also die folgenden Bedingungen erfüllt sein, damit ein Kristall zu großen Volumenänderungen fähig ist:

- freie Rotation zwischen den organischen Liganden und den anorganischen Polyedern um die verbindenden Atome;
- eine gerade Seitenzahl in den Tunneln der Struktur;
- eine Spiegelebene im anorganischen Baustein;
- der organische Ligand ist ditopisch, das heißt jeweils mit zwei anorganischen Bausteinen verknüpft.

Flexible Kristalle sind zweifellos faszinierende Untersuchungsobjekte. Aber nicht nur Forscher begeistern sich dafür, auch Techniker zeigen großes Interesse daran. Die Fähigkeit der Substanzen zu drastischen Volumenänderungen auf äußere Reize hin prädestiniert sie für Anwendungen in vielen Bereichen, die für die heutige Gesellschaft bedeutsam sind. MIL-53 mag als Beispiel dafür dienen.

Wechselwirkung zwischen Gastmolekülen und Wirtsstruktur

Um seine praktischen Einsatzmöglichkeiten auszuloten, haben wir als Erstes die Wechselwirkungsenergie zwischen den eingebrachten Fremdmolekülen und der Tunnelwand bestimmt. Tatsächlich kann man das in den Hohlräumen von MIL-53 enthaltene Wasser gegen andere Lösungsmittel austauschen, insbesondere organische. Deren chemische Natur – und damit ihre Wechselwirkung mit der Tunnelwand – entscheidet über die dabei auftretende Volumen-

änderung. Dagegen spielt die Größe des eingebrachten Moleküls keine Rolle. Je stärker die Wechselwirkung, desto weniger expandiert der Kristall. Wenn die Moleküle mit der Wand so gut wie gar nicht interagieren, bildet sich die offene, voluminöse Struktur.

Die Gesamtheit der Wechselwirkungen beeinflusst auch die Anordnung der eingebrachten Moleküle. Handelt es sich dabei etwa um Pyridin, sind sie im Tunnelinnern viel dichter gepackt als im reinen Feststoff. Die Summe der Interaktionen spielt sozusagen die Rolle eines internen Drucks, der die Moleküle zwingt, enger zusammenzurücken als normalerweise. Durch Einlagerung in die Hohlräume unserer Kristalle lässt sich also unter Umständen ableiten, welche Kristallstruktur die betreffenden Moleküle bei hohem Druck bilden würden. So gelingt es vielleicht, druckabhängige Phasenübergänge vorherzusagen.

Von größerer praktischer Bedeutung ist allerdings die Fähigkeit der atmenden Kristalle, große Mengen an Gasen aufzunehmen und im Innern festzuhalten. Dabei handelt es sich um eine rein physikalische Adsorption, weil keine starke chemische Bindung zwischen Wirtsgitter und Gastmolekülen auftritt.

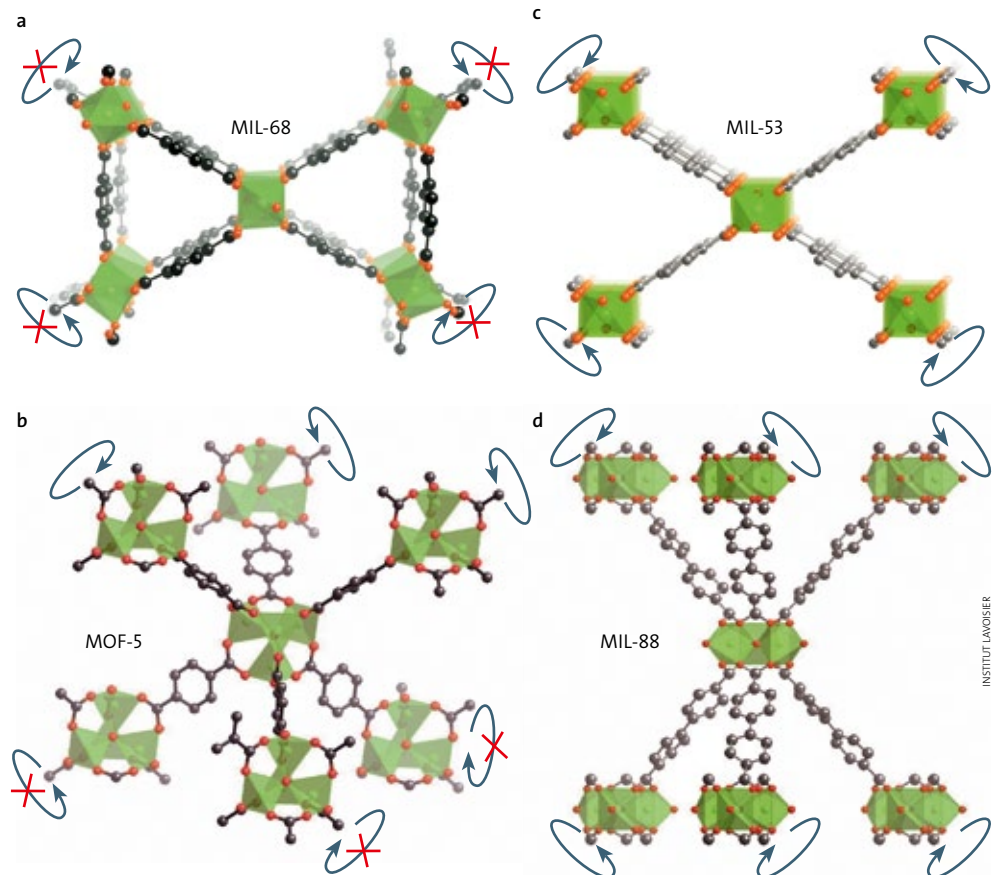
Für starre Festkörper gilt, dass die adsorbierte Gasmenge bei konstanter Temperatur gleichmäßig mit dem Druck zunimmt. MIL-53 zeigt dagegen ein bislang unbekanntes Verhalten. Nach anfänglicher normaler Adsorption erreicht es ein Plateau: Obwohl der Druck weiter ansteigt, bleibt die Menge der in den Festkörper eingebrachten Moleküle kons-

stant und beginnt erst ab einem Schwellenwert wieder zuzunehmen. Wenn man anschließend den Druck verringert, erscheint das Plateau dagegen nicht mehr. Dieses Hysterese genannte Phänomen zeigt sich bei Wasserstoff, Kohlendioxid (CO_2), Alkanen (mit Ausnahme von Methan) und anderen Gasen. Es ist die makroskopische Folge der mikroskopischen Flexibilität.

Die Erklärung dafür auf molekularer Ebene fanden wir, als wir mit Synchrotronstrahlung verfolgten, wie sich während fortschreitender CO_2 -Adsorption bei 25 Grad Celsius die Struktur von MIL-53 verändert. Dabei ließen sich mehrere Etappen unterscheiden. Unter Vakuum sind die Hohlräume zunächst offen. Doch sobald im Druckbereich zwischen einem und vier Bar jeder Tunnel zwei Moleküle CO_2 pro Elementarzelle aufgenommen hat, schließen sie sich plötzlich. Das fällt mit dem Beginn des Plateaubereichs zusammen. Bei mehr als sechs Bar beginnen sich die Hohlräume dann wieder zu öffnen.

Im Verlauf dieser Untersuchung konnten wir auch die CO_2 -Moleküle in den geschlossenen Tunneln lokalisieren. Wie die Wasser-Moleküle bilden sie eine Kette entlang der Tunnelachse. Zugleich üben sie mit ihrem großen Quadrupolmoment eine starke Anziehung auf die Dipole der OH^- -Ionen in der Wand aus. Das verhindert, dass sich der Tunnel weitet und weitere Gasmoleküle aufnimmt, während der Druck steigt. Unsere Untersuchung machte damit auch erstmals klar, worin die Adsorption im Fall von CO_2 genau besteht. Dank dieser Erkenntnisse lässt sich das Phänomen in-

Die Flexibilität metallorganischer Gerüstverbindungen hängt auch von der Topologie der Hohlräume ab. So müssen sie eine gerade Anzahl von Seiten haben, um eine Volumenänderung zuzulassen. Eine weitere Voraussetzung ist, dass der anorganische Baustein zusammen mit den daran gebundenen organischen Gruppen eine Spiegelebene enthält. Da MIL-53 (c) und MIL-88 (d) diese Bedingungen erfüllen, sind sie flexibel. In MIL-68 (a) gibt es dagegen einen dreieckigen Hohlraum, und bei MOF-5 (b) fehlt die Spiegelebene in der Oktaeder-Dreiergruppe. Beide MOFs sind deshalb starr.



INSTITUT LANGER

zwischen über den gesamten Zyklus hinweg im Computermodell nachvollziehen.

Nachdem wir nun mehr darüber wissen, wie MOFs funktionieren, lassen sich auch die möglichen Anwendungen genauer umreißen. Vier interessante Bereiche kommen in Frage: Energietechnik, Energiesparen, Umweltschutz und Gesundheit. Dabei haben sich nicht nur die flexiblen Kristalle als viel versprechend erwiesen, sondern auch die starren, weil es oftmals weniger auf die Volumenänderung als auf die Größe der Hohlräume ankommt.

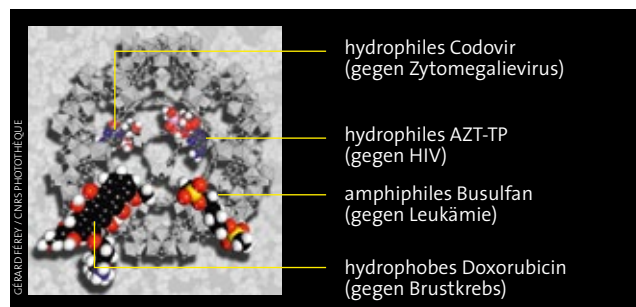
Speicherung und Trennung von Gasen

Bei der Energietechnik bieten sich zwei Einsatzmöglichkeiten an: die Speicherung von Wasserstoff, der später einmal den Platz der zur Neige gehenden fossilen Energieträger einnehmen soll, und der Betrieb von Brennstoffzellen. Unsere MIL-Substanzen eignen sich dafür, große Mengen Wasserstoff aufzunehmen und bei Bedarf leicht wieder zur Verfügung zu stellen. Insbesondere erfüllen sie die vom Department of Energy der USA festgesetzten Normen für den Gebrauch als Trägermaterial in Fahrzeugen. MIL-53 zum Beispiel kann fast vier Prozent seines Eigengewichts an Wasserstoff adsorbieren. Andere, starre MOFs mit großen Poren bringen es sogar auf mehr als zehn Prozent!

Diese Werte sind viel versprechend, allerdings sei ein technisches Problem nicht verschwiegen: Gut funktioniert die Speicherung nur bei sehr tiefen Temperaturen um etwa -200 Grad Celsius. Das liegt daran, dass beim Wasserstoff die Wechselwirkung mit dem anorganischen Teil der Wand gering ist. Sie muss für den Einsatz in Fahrzeugen deshalb verstärkt werden. Das ist möglich, erhöht jedoch die Kosten beträchtlich.

Flexible Festkörper auf der Basis von Eisen(III) eignen sich auch als Elektrodenmaterialien für Brennstoffzellen. Im ursprünglichen Zustand sind sie zwar Isolatoren, aber durch eine einfache Reaktion lassen sie sich leicht in gute Leiter umwandeln. Schaltet man sie nämlich als Kathode in einem Elektrolyten, der Lithium-Ionen enthält, dringt metallisches Lithium in die Tunnel ein. Dort reduziert es einen Teil des dreiwertigen Eisens zu Fe^{2+} und wird dabei selbst zum Li^+ oxidiert. Dadurch treten in ein und demselben Material gleich zwei unterschiedliche Arten elektrischer Leitung auf: eine ionische, weil sich die kleinen Li^+ -Ionen im Tunnel sehr schnell bewegen können, und eine elektronische durch das Hüpfen der Elektronen von Fe^{2+} zu Fe^{3+} .

Was das Energiesparen betrifft, existieren zwei denkbare Anwendungen für unsere MIL-Verbindungen: die Katalyse und die Trennung von Gasen. Als Katalysatoren könnten die porenreichen Gerüstverbindungen dafür sorgen, dass Reaktionen bei niedrigeren Temperaturen ablaufen, was Heizenergie spart. Allerdings hinkt die Forschung in diesem Bereich etwas hinterher – vor allem wegen der überkommenen Vorstellung, unsere Verbindungen seien wenig hitzebeständig. Das stimmt ganz und gar nicht, manche sind bis 600 Grad Celsius stabil!



Poröse Festkörper, wie diejenigen der MIL-Serie, könnten zum Transport und zur dosierten Freisetzung von Medikamenten dienen. Tests mit so unterschiedlichen Substanzen wie Codovir, AZT-TP, Doxorubicin und Busulfan verliefen erfolgreich. Diese Wirkstoffe sind teils Wasser liebend (hydrophil), Wasser abweisend (hydrophob) oder enthalten sowohl Wasser liebende als auch Wasser abweisende Teile (amphiphil).

Das Abtrennen von Gasen aus Gemischen wie Luft ist und bleibt ein Sorgenkind der Industrie; denn es verursacht hohe Kosten für Investitionen und verbraucht viel Energie – vor allem durch das erforderliche mehrfache Verflüssigen und anschließende Destillieren. Einige unserer patentierten Verbindungen bieten eine preiswerte Alternative – können sie doch bei Normaltemperatur, also ohne äußere Energiezufuhr, etwa das im Erdgas enthaltene Kohlendioxid vollständig vom Methan trennen. Genauso gut gelingt die noch weitaus schwierigere Trennung von Propan und Propen; Letzteres dient als Ausgangsmaterial für viele Kunststoffe.

Mit ihren außergewöhnlichen Adsorptionseigenschaften sollten sich unsere metallorganischen Gerüstverbindungen auch im Umweltschutz bewähren. Ich habe schon die Fähigkeit von MIL-53 angesprochen, große Mengen CO_2 aufzunehmen. Aber das ist nicht das einzige Treibhausgas, das flexible Festkörper zu binden vermögen. Ebenso können sie – gleichfalls bei Raumtemperatur – Stickoxide, Methan, Kohlenmonoxid und Schwefelwasserstoff in ihrem Innern festhalten. Dank der Kontraktion der Hohlräume bei der Adsorption bleibt das Gas länger und stabiler eingeschlossen als in starren porösen Festkörpern. Allerdings hält einer der letzteren, nämlich MIL-101, seit vier Jahren den Weltrekord bei der Adsorption von CO_2 : Er kann das 400-Fache seines Eigenvolumens von dem Gas aufnehmen (Bild S. 89). Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet laufen heute im Rahmen eines europäischen Partnerschaftsvertrags in Kooperationen mit Firmen aus diversen betroffenen Industriezweigen.

Transporter für Arzneimittel

Die neueste Anwendung – und zweifellos die spannendste für die Zukunft – betrifft die Gesundheit. Dabei geht es um intravenös verabreichte winzige Trägerteilchen, so genannte Nanocarrier, die gezielt und sicher Medikamente über den Blutkreislauf zum kranken Organ befördern und dort freisetzen sollen. Als solche dienen derzeit meist Liposomen: Phospho-

lipide in Form hohler Kugeln, die in ihrem Innern Medikamente einschließen. Sie sind jedoch relativ zerbrechlich und können wegen ihres geringen Durchmessers nur kleine Wirkstoffmengen tragen: maximal fünf Prozent des Eigengewichts.

Als Erstes haben wir großporige MILs mit dem Medikament Ibuprofen getestet. Die Resultate waren hervorragend, was die gespeicherte sowie auch die maximal pro Zeiteinheit freigesetzte Menge betraf. Das galt unabhängig davon, ob es sich um einen starren oder flexiblen Festkörper handelte.

Für den Einsatz am Menschen haben wir daraufhin ein striktes Lastenheft erarbeitet. Zu den Anforderungen gehören: Synthese der Substanzen in Form von Nanopartikeln für die intravenöse Injektion; ausschließliche Verwendung von MILs, deren Unschädlichkeit in vivo nachgewiesen wurde; Prüfung anhand von Medikamenten mit möglichst unterschiedlichen Eigenschaften; Nachweis der Wirksamkeit des Trägers durch Versuche in vitro und in vivo bei Mäusen.

Der erste Punkt war schnell erledigt: Die Synthese von 20 Nanometer großen Teilchen gelang problemlos. Um beim zweiten Punkt auf der sicheren Seite zu sein, nahmen wir für den organischen Teil nur Verbindungen, die sich in sechs Monate langen Tests an Mäusen als unschädlich erwiesen hatten. Diese kombinierten wir mit Fe^{3+} , das im Körper zum Beispiel in den roten Blutzellen reichlich vorkommt und garantiert unschädlich ist. Außerdem sind Eisen(III)-Verbindungen bei medizinischen Bildgebungsverfahren sichtbar, so dass sich der Weg des Medikaments in Echtzeit verfolgen lässt.

Als Arzneimittel für unsere Tests wählten wir Pharmaka mit ganz unterschiedlicher Indikation und Affinität zu Wasser (Bild oben links). Es handelte sich um AZT-TP gegen HIV und Codovir gegen Zytomegalieviren, beide Wasser liebend (hydrophil), sowie das Wasser abweisende (hydrophobe) Doxorubicin gegen Brustkrebs und das sowohl Wasser als auch Fett liebende (amphiphile) Busulfan gegen Leukämie. Sie alle wurden trotz ihres unterschiedlichen chemischen Charakters eingelagert. Dabei variierte die Speicherkapazität je nach gewähltem Festkörper – den flexiblen Verbindungen MIL-53 (mit Eisen statt Chrom) und MIL-88 oder den starren, großporigen MIL-100 und MIL-101 – zwischen 15 und 42 Prozent. Sie lag also weit über den fünf Prozent der Liposomen.

Das bedeutet zunächst einmal, dass man für eine optimale Wirkstoffdosis weniger Trägermaterial in den Organismus bringen muss, was die Gefahr der Abstoßung verringert. Außerdem setzen die porösen Festkörper den aktiven Wirkstoff komplett wieder frei. Das geschieht gewöhnlich innerhalb von drei bis elf Tagen. Bei MIL-53 kann die Freisetzungsdauer sogar drei Wochen erreichen. Es eignet sich somit für Depotpräparate, was mehr Komfort für die Patienten bedeutet.

Schließlich reichert sich der Träger nicht im Organismus an. Nach der Freisetzung des Wirkstoffs wandelt er sich in Eisenhydroxid um, das innerhalb weniger Stunden auf natürlichem Weg ausgeschieden wird. Durch Analysen von Gewebeproben aus den Organen behandelter und unbehandelter Tieren konnten wir zeigen, dass das Medikament sein Ziel sicher erreicht. Damit sind unsere porösen Festkörper ein Parade-

beispiel für einen neuen Zweig der Molekularmedizin: die Theragnostik, die Diagnose und Therapie miteinander verbindet. Das transportierte Medikament dient in diesem Fall zur Behandlung, während die Aktivität des Nanocarriers bei medizinischen Bildgebungsverfahren eine Diagnose erlaubt.

So vielversprechend die Eigenschaften neuer Substanzen sind, kommen sie der Medizin nur zugute, wenn sie den Sprung vom Laborstadium zur industriellen Produktion schaffen. Deshalb kooperieren wir schon seit Langem mit der Firma BASF. Tatsächlich sind wir im Rahmen dieser Zusammenarbeit auf einige der interessantesten MIL-Verbindungen gestoßen. Sie lassen sich in einer Pilotanlage in Ludwigshafen inzwischen schon in Mengen von mehr als einer Tonne pro Tag produzieren. Einer Steigerung je nach Bedarf steht nichts im Weg; denn alle verfahrenstechnischen Probleme einschließlich der Skalierung sind gelöst. Wir können die Substanzen dabei nicht nur als Massengut, sondern auch in Form von Pillen oder Nanoteilchen für biomedizinische Anwendungen herstellen – ferner als Schichten kontrollierter Dicke für den künftigen Einsatz bei der Speicherung von Gasen.

Abschließend sei betont, dass diese neue Klasse von Festkörpern trotz der Vielzahl bereits hergestellter Verbindungen erst in Ansätzen erforscht ist – auch was ihr Anwendungspotenzial angeht. Für Chemiker an den Universitäten, aber ebenso für Physiker und Biologen bleibt viel Raum zur Entfaltung ihrer kreativen Fähigkeiten. Zugleich bilden die flexiblen Festkörper ein Beispiel für die gelungene Verknüpfung akademischer und industrieller Forschung auf einem gesellschaftlich bedeutsamen Feld. Es macht einmal mehr deutlich, was Wissenschaft zu leisten vermag, wenn für einen nahtlosen Übergang vom Labor zur Fabrik gesorgt ist. ~

DER AUTOR



Gérard Férey gründete und leitete bis zu seiner Emeritierung das Institut Lavoisier an der Universität de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines in Versailles. 2010 erhielt er die Goldmedaille der französischen Forschungsorganisation CNRS, die höchste Auszeichnung für Wissenschaftler in Frankreich.

QUELLEN

- Férey, G. et al.:** Hydrogen Adsorption in the Nanoporous Metal-Benzenedicarboxylate $\text{M}(\text{OH})(\text{O}_2\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}_2)$ ($\text{M} = \text{Al}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$), MIL-53. In: Chemical Communications 24, S. 2976–2977, 2003
- Férey, G.:** Hybrid Porous Solids: Past, Present, Future. In: Chemical Society Reviews 37, S. 191–214, 2008
- Férey, G., Serre, C.:** Large Breathing Effects in Three-Dimensional Porous Hybrid Matter: Facts, Analyses, Rules and Consequences. In: Chemical Society Reviews 38, S. 1380–1399, 2009
- Férey, G. et al.:** Why Hybridporous Solids Capture Greenhouse Gases. In: Chemical Society Reviews 40, S. 550–562, 2011
- Horcajada, P. et al.:** Porous Metal–Organic–Framework Nanoscale Carriers as a Potential Platform for Drug Delivery and Imaging. In: Nature Materials 9, S. 172–178, 2010

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1224876

1914

Rassenkunde mit Shakespeare

»Prof. Arthur Keith hat einige Bildnisse von Shakespeare und Burns vom anthropologischen Gesichtspunkte untersucht. Die Untersuchung von Shakespeares Kopf ergab, daß er ein Repräsentant des kurzköpfigen Typus ist, nicht der frühen britischen Rasse,

sondern der Rundköpfe, die zur Bronzezeit, etwa um 2000 v. Chr., in Britannien eindringen. Seine Schädelkapazität betrug mehr als 1900 ccm, während sie sonst beim Engländer durchschnittlich 1477 ccm ausmacht. Burns andererseits bietet ein Beispiel des langköpfigen Typus. ›Ist es möglich, fragt Prof. Keith, ›daß wir den Unterschied in der Gehirntätigkeit beider durch die Verschiedenheit ihres Rassenursprungs erklären können?«
Die Umschau 17/1914, S. 356

Unsterbliche Einzeller

»Weismann stellte als erster die Behauptung auf, daß die Protozoen unsterblich seien. (Dies) wurde von Maupas angezweifelt. Maupas züchtete Exemplare von *Stylonychia* und isolierte jedesmal die durch Teilung neu entstandene Zelle. Er beobachtete, daß die Teilungsfähigkeit nachließ. Diese Versuche sind neuerdings wiederholt worden. Bei Ausschluß jeder Konjugation brachte es Woodruff im Laufe von 5½ Jahren auf 3340 Generationen. Die jüngste war ebenso kräftig wie die Stammutter.«
Prometheus 1276, S. 447, 1914

Kroko-Kiefer-Prothese

»Das Prunkstück der Krokodilsammlung des Zoologischen Gartens in Frankfurt a. M. ist ein Ganges-Gavial. Das etwa 1,65 m lange Exemplar ist zurzeit das einzige in Deutschland. Da ereignete sich Ende November 1913 ein bedauerlicher Unglücksfall; der Gavial blieb mit seiner langen Schnauze in dem klüftigen Felsgestein seines Behälters hängen und brach seinen Oberkiefer durch. Man mußte sich zur gänzlichen Entfernung des hängenden Stückes entschließen. Die Operation wurde von Oberstabsarzt a. D. Prof. Dr. Marx ausgeführt, während der Zahntechniker Fritz Fränkel ein Kieferersatzstück aus Aluminium herstellte. Die Prothese wurde gut auf den Stumpf aufgepaßt und das wertvolle Tier, das jetzt nur durch Stopfen mit Weißfischen am Leben erhalten wird, dürfte es hoffentlich bald lernen, diese selbständig nutzbringend anzuwenden.«
Die Umschau 14/1914, S. 294–296



Zahn-
techniker
Fränkel und Ober-
stabsarzt Marx
mit ihrem Patienten.

Elektroauto mit 7 PS

»Eine amerikanische Firma stellt seit kurzem ein batteriebetriebenes Elektro-Auto ›Henney Kilowatt‹ her. Man hofft, damit ein billiges Transportmittel für kurze Strecken geschaffen zu haben. Die 36 Batterien, aus denen der 7-PS-Motor seine Energie bezieht, sind unter der Motorhaube und im Kofferraum untergebracht. Ihre Lebensdauer beläuft sich auf etwa zwei Jahre. Der Wagen soll eine Spitzengeschwindigkeit von 56 Kilometern erreichen. Nach einer Strecke von 64 Kilometern müssen die Batterien wieder aufgeladen werden.«
Neuheiten und Erfindungen 338, S. 60, 1964

Kongress der Astronomen

»In einer klimatisch außerordentlich begünstigten Gegend Mexikos liegt in 1635 m Höhe, nur 32 km südwestlich von Cuernavaca, Xochicalco, eine der ältesten Kultstätten und Festungsanlagen Mittelamerikas. Nach



Priester mit untergeschlagenen Beinen am Hauptfries der großen Pyramide von Xochicalco.

dem Abschluß der letzten Forschungsperiode neigen die Archäologen zu der Ansicht, daß die monumentale Tempelpyramide zur Erinnerung an einen Priester- und Astronomenkongreß geschaffen worden ist, der hier ähnlich wie bei den Mayas stattgefunden hat, um den Kalender zu korrigieren. Ebenso wie am Altar Nr. 2 von Copán Priester und Astronomen der Maya dargestellt sind, wurden auch in Xochicalco kreuzbeinig darsitzende menschliche Figuren, hochangesehene Persönlichkeiten priesterlichen Ranges, abgebildet. Hier hat man die Zahlenkorrektur auf

1964

zweierlei Arten notiert: einmal wurden Glyphen verwendet, das andere Mal Striche und Punkte, eine Nummerierungsart, die bei den Maya üblich war und auch von den Zapoteken benutzt worden ist. Aus den bisherigen Forschungen geht hervor, daß diese Anlage auf ein hohes Alter zurückblickt. Es war in erster Linie eine Kultstätte, zu der man auf breiten Zugangsstraßen gelangte. Als die spanische Invasion begann, ist Xochicalco auch zur Festung bestimmt worden.«
Kosmos 4/1964, S. 169–175



Manfred Popp

**Deutschlands Energiezukunft
Kann die Energiewende gelingen?**

Wiley-VCH, Weinheim 2013.

316 S., € 24,90

ENERGIEPOLITIK

Wenig hoffnungsfroh

Ein Experte schätzt die Erfolgsaussichten der deutschen Energiewende ein – und kommt zu keinem guten Ergebnis.

Das bunte Titelbild verwirrt – und macht neugierig: Off-Shore-Windanlagen stehen aufgereiht in der See, und im Vordergrund qualmt ein antiquierter Kohledampfer vor einer Flotte Segelschiffe. Das Ganze ist zusammengefügt aus einem modernen Foto und einem Gemälde des Künstlers William Turner von 1838. Was wollen uns Verlag und Autor damit sagen? Etwa, dass die Konkurrenz unterschiedlicher Energieträger schon immer die Welt bewegt hat? Oder dass die industrielle Revolution wieder umgekehrt werden soll – weg vom Verbrauch fossiler Brennstoffe und (erneut) hin zur Windkraft?

Offenbar Letzteres. Buchautor Manfred Popp ist Experte für Energiethemata und hat die Höhen und Tiefen der bundesdeutschen Energiepolitik miterlebt wie kaum ein Zweiter. Faktenreich erörtert er, welche Herausforderungen die politisch gewollte Energiewende in Deutschland mit sich bringt, und wirft einen Blick in die Zukunft. Würde es tatsächlich gelingen, den Erneuerbaren wieder den Hauptanteil der Versorgung zuzuweisen, so wäre das, wie er schreibt, »ein Schritt von historischer Dimension«.

Seine Einschätzung fällt allerdings ernüchternd aus. Angesichts des weltweit weiter steigenden Energieverbrauchs sowie des einsetzenden Klimawandels sei das wichtigste Ziel der deutschen Energiewende mittlerweile nicht mehr zu erreichen. »Deutschland kann beim besten Willen keinen stabili-

lisierenden Einfluss auf das Weltklima ausüben (...).« Dies gelte auch für die Europäische Union. Popp stellt eine klare Forderung an die deutschen Politiker: Statt hartnäckig am so genannten Klimaschutz festzuhalten, solle man endlich damit beginnen, sich auf die Folgen der klimatischen Veränderungen vorzubereiten.

Der Autor hat bereits die Ölkrise von 1973 als Beamter im Bundesministerium für Forschung und Technologie mit bewältigt. Von 1976 an prägte er dort mehr als zehn Jahre lang die deutsche Energieforschung maßgeblich mit, die sich langsam, aber sicher von der Kerntechnik ab- und den erneuerbaren Energien zuwandte. Auch als hessischer Staatssekretär für Umwelt und Reaktorsicherheit, vor allem aber als Vorstandsvorsitzender des Forschungszentrums Karlsruhe (jetzt Karlsruher Institut für

Der Autor geißelt die Energiewende als »anachronistisch«

Technologie) war Popp mit dem Thema Energieversorgung befasst. Diese Expertise scheint in dem Buch deutlich durch.

Seine Bilanz der bundesdeutschen Energieforschung in den zurückliegenden Jahrzehnten fällt bescheiden aus: »Insgesamt blieb der große Traum, durch Erforschung neuer Energietechnologien die Handlungsmöglichkeiten künftiger Generationen (...) zu erweitern, (...) unerfüllt.« Auch im Schlusska-

pitel wird er deutlich. Er geißelt das Ziel der Bundesregierung, im nationalen Alleingang bis 2050 eine weit gehend klimaneutrale Energieversorgung aufzubauen, als »Anachronismus«, denn Energiemärkte und Klima würden global bestimmt. Zudem sei dieses Vorhaben ein Bruch mit den bisherigen Zielen der deutschen Energiepolitik, insbesondere hinsichtlich der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Statt die Markteinführung unausgereifter Techniken zu subventionieren (Popp nennt explizit Fotovoltaik, Biomasse und Geothermie), solle die Politik das Geld besser in Forschung und Technikentwicklung investieren. Auch verurteilt er die Zersplitterung der Zuständigkeiten in der Energieforschung. Detailliert geht er darauf ein, wie die deutsche Energiewende zu Stande gekommen ist, wie sie ethisch begründet und umgesetzt wird, welche Konsequenzen sie voraussichtlich zeitigt – und äußert nur wenig Hoffnung, dass sie gelingen wird. Seine lapidare Prognose: Wenn die Kosten explodieren, das Netz instabil wird oder bis zur Abschaltung des letzten Atommeilers die für den Umbau erforderlichen Stromtrassen und Speicher nicht realisiert wurden, »dann dürfte die Energiewende als politisch gescheitert gelten«. Diese meinungsstarken Abschnitte sind sehr fesselnd, lassen den Leser aber auch mit vielen offenen Fragen zurück.

Am Ende zählt der Autor auf, wie man seiner Ansicht nach zu einer zu-

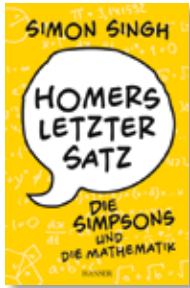
kunftsweisenden Energiepolitik kommen könnte. Er befürwortet marktwirtschaftliche Prinzipien im Energiesektor, eine vorrangig dezentrale Anwendung erneuerbarer Energien, neue Speichertechnologien, eine Eindämmung der Energieumwandlungsverluste sowie ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz.

Im Schlusswort versucht er noch einmal einen optimistischen Ausblick,

wobei es seiner Meinung nach nicht sehr wahrscheinlich ist, »dass Deutschlands Energiezukunft sich wirklich so entwickeln wird, wie (es) mit der Energiewende geplant wurde«. Doch die Menschen würden sich schon zu helfen wissen.

Trotz des wenig erbaulichen Fazits ist das Buch sehr lesenswert. Die Abbildungen hingegen, durchweg schwarzweiß, sind unzumutbar. Angesichts der heutigen technischen Möglichkeiten in Layout und Druck mutet die Bebilderung des Buchs antiquarisch an. Das

kann man dem Autor aber nicht anlasten, das ist das Versäumnis des Verlags.



Simon Singh

Homers letzter Satz

Die Simpsons und die Mathematik

Aus dem Englischen von Sigrid Schmid

Carl Hanser, München 2013.

320 S., € 15,99

MATHEMATIK

Die Simpsons und die Mathematik

Simon Singhs neues Buch »Homers letzter Satz« zeigt viele Zusammenhänge zwischen der amerikanischen Zeichentrickserie und Konzepten der Mathematik auf.

Im Zentrum dieses Mathematik-Sachbuchs steht die US-Zeichentrickserie »Die Simpsons«. Der Autor, promovierter Physiker, ergründet die Charaktere, Episoden und Handlungsstränge der Serie und arbeitet an ihnen mathematische Sachverhalte heraus – handwerklich durchweg geschickt. Jedes Kapitel ist in sich abgeschlossen; Singh erklärt darin jeweils zuerst eine Szene oder Anekdote aus einer Simpsons-Episode und untersucht anschließend deren mathematischen Gehalt. Dabei geht er etwa auf den Primzahlsatz oder auf diverse Paradoxien im Zusammenhang mit der Unendlichkeit ein.

Die Simpsons als Ausgangspunkt zur Beschreibung der Mathematik, das mag seltsam klingen. Doch wie anhand des Buchs klar wird, greift die Serie regelmäßig Konzepte aus der Mathematik auf. So macht Homer Simpson in der Folge »Im Schatten des Genies« zwei sehr lustige mathematische Entdeckungen. Zum einen findet er heraus, wie man aus einem Donut eine Ku-

gel machen kann – ein Verweis auf die berühmte Poincaré-Vermutung. Die besagt vereinfacht, dass eine geschlossene Oberfläche zu einer Kugeloberfläche deformierbar ist, wenn sie kein Loch hat (wie die Oberfläche eines Donuts). Homer zeigt, dass es auch mit Loch geht: Man isst einfach ein Stück von dem Donut weg und formt den Rest zur Kugel.

Zum anderen widerlegt Homer vermeintlich den großen fermatschen Satz. Diesem zufolge hat die Gleichung $a^n + b^n = c^n$ keine Lösung für natürliche Zahlen a, b, c, n mit $n > 2$. Homer gibt aber eine Lösung an: $(3987^{12} + 4365^{12} = 4472^{12})$. Mit dem Taschenrechner mag das stimmen, da durch kleine Rundungsfehler die Gleichung erfüllt wird. Allerdings ist sie falsch, wie Singh darlegt. Er beschreibt, wie David S. Cohen, der Autor dieser Simpsons-Folge, auf die entsprechenden Ideen gekommen ist, und umreißt kurz den Beweis des großen fermatschen Satz.

Singh setzt sich mit den Grundlagen und Hintergründen der »Simpsons-Mathematik« auseinander, zeigt Anwendungsbeispiele und Bezüge zur aktuellen Forschung auf. Zudem vermittelt er Interessantes über die Autoren der Filmepisoden, verfolgt ihre Biografien teilweise Jahrzehnte zurück, um herauszuarbeiten, welche Begebenheiten in ihrem Leben sich auf die spätere Gestaltung der Serie auswirkten. Bei alledem geht er sehr gewissenhaft vor und unternimmt auch Ausflüge in verwandte Themen hinein; unter anderem analysiert er die Funktionsweise von Komik. So gelingt es ihm, Themenfelder wie Mathematik, Wissenschaftsgeschichte, Forschung und Popkultur miteinander zu verbinden.

Der Buchautor hat früher am CERN gearbeitet und ist seit mehr als 20 Jahren als Wissenschaftsjournalist tätig. Eine TV-Dokumentation von ihm über Fermats letzten Satz war für den Emmy Award nominiert – und das gleichnamige Buch ein Bestseller in vielen Ländern. Singh schafft es mit seiner klaren Sprache, die Sigrid Schmid heraus gelungen ins Deutsche übersetzt hat, den Leser zu fesseln. Besonders gut hat mir gefallen, dass das Buch wörtliche Zitate der Simpsons stets auch im englischen Original präsentiert und erklärt, auf welche Phänomene der US-Kultur sie verweisen. Zudem sind zahlreiche Referenzen auf wissenschaftliche Veröffentlichungen enthalten. »Homers letzter Satz« kann sowohl interessierten Lesern ohne Vorbildung als auch Mathematikern empfohlen werden.

Lars Jeschio

Der Rezensent arbeitet als Diplommathematiker für mehrere Start-up-Unternehmen in Berlin.



Heinrich Barth:
Reisen und Entdeckungen in Nord- und Centralafrika 1849-1855 2 Bände
 ☎ (9-3835-2)



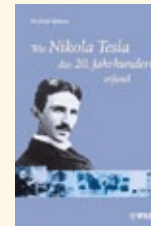
statt Originalausgabe 278.- jetzt als Sonderausgabe nur **29.95**

Heinrich Barth war einer der berühmtesten Afrikaforscher. Er lieferte u.a. einen der frühesten Berichte über die sagenumwobene Oasenstadt Timbuktu in dem vorliegenden Werk, das den Verlauf einer der bis dahin umfangreichsten Afrikaexpeditionen beschreibt. Barth bereiste zwischen 1849 und 1855 auf 18.000 Kilometern Afrika nördlich der Sahara bis Timbuktu. Von Tripolis führte ihn der Weg nach Süden bis zum Tschadsee und weiter durch das Gebiet des heutigen Niger und Mali. Er verschaffte mit dieser Expedition erstmalig einen recht präzisen Überblick über weite Teile von Nordafrika, mit bahnbrechenden geographischen und ethnologischen Beobachtungen. Er war ein Gegner der Sklaverei und des Kolonialismus und trat den Völkern Afrikas unvoreingenommen und offen entgegen, wodurch er ihre Sitten und Gebräuche besser kennen lernte, als die meisten Europäer zuvor. Reprint der Originalausgabe von 1859 und 1860. (SA) 984 Seiten, 4 Farbtafeln, zahlr. s/w-Abb., 1 Plan, 1 herausnehmbare Karte, 14 x 21 cm, gebunden.

Solar-Grashüpfer

☎ (9-2816-1) **8.99**

Wenn die Sonne scheint, beginnt sich der kleine Grashüpfer zu bewegen. Sobald die Sonne verschwunden ist, macht er eine Pause. Die Stromversorgung läuft über Solarenergie – keine Batterie erforderlich. **Länge: ca. 4 cm.**



Michael Krause: Wie Nikola Tesla das 20. Jahrhundert erfand

☎ (9-3862-1)

19.95

Tesla hat viel geschaffen, noch mehr wurde ihm zugeschrieben und angedichtet. Wie wohl kein anderer Erfinder beflügelt er die Phantasie der Menschen. Krause beschreibt, wie Tesla vom Balkan kommend über Paris in die USA auswanderte, dort seine wichtigsten Erfindungen machte und schließlich Spielball der Großindustrie wurde. Tesla war aber mehr als nur ein willfähriges Subjekt: Er folgte immer seinen Visionen, nur konnte er sich meist nicht durchsetzen. So ist dieses Buch ein Krimi um Wissenschaft, Geld, Macht und das Scheitern eines Genies. 381 S., ca. 30 Abb., Format 15 x 21 cm, Flexcover. (Wiley)

Alles was ich wissen will Tiere – Erde – Technik

☎ (9-3636-0) statt 14.95 nur **7.99**

Dieser Band zeigt alles, was Kinder über Tiere, unsere Erde, die Planeten des Weltraums und technische Erfindungen wissen wollen. In über 3000 farbigen Abbildungen und Worterklärungen werden Fragen beantwortet wie: Wie gefährlich können Tiere sein? Wie ist unser Universum entstanden? Warum fliegen Flugzeuge? (R) 319 S., zahlr. Abb., gebunden, 30 x 25,4 cm (Ravensburger)



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hg.): Kunstwerk Erde Satellitenbilder aus dem All

☎ (9-3860-0)

39.95

Jahr für Jahr umkreisen Beobachtungssatelliten den blauen Planeten und liefern dabei Millionen von Daten, die anschließend in Satellitenbilder umgerechnet werden. Ob Wüsten oder Regenwälder, Millionenmetropolen, Ozeane oder Gletscher: Die Bilder in diesem Band gewähren uns durch berausende Farbspiele sowie grafische Formen und Strukturen von beeindruckender Kraft einen besonderen Blick auf die Erde. 244 Seiten, ca. 250 Farbabbildungen, zum Teil ausklappbar, Format 29 x 29 cm, gebunden. (Frederking & Thaler)

Dr. Armin Strohmeyr: Verkannte Pioniere Abenteuer – Erfinder – Visionäre

☎ (9-3858-2) **22.99**

Sie wurden von Umwelt und Nachwelt verkannt und verspottet. Ihre Erfindungen wurden gestohlen, sie selbst als Spinner abgetan, unterdrückt, ausgebremst oder weggesperrt: Die Pioniere der modernen Naturwissenschaft und Technik waren zwar geniale Denker, aber oft keine talentierten Geschäftsleute. 22 dieser Genies werden hier mit ihren Biografien und den spannenden Geschichten ihrer Erfindungen vorgestellt. Nominiert für das 'Beste Wissenschaftsbuch 2014'. 303 Seiten, s/w-Fotos, Format 13 x 22 cm, gebunden. (Styria, 2013)



Douglas R. Hofstadter: Gödel, Escher, Bach – ein Endloses, Geflochtenes Band

☎ (9-3858-0) **35.-**

Schon die Verknüpfung von Bachschen Kompositionen, den Bildern Eschers und dem berühmten Unvollständigkeitssatz des österreichischen Mathematikers Kurt Gödel ist ungewöhnlich genug. Treten dann auch noch Achilles und eine Schildkröte auf den Plan, via Lewis Carroll einer alten griechischen Paradoxie entlehnt ..., dann wissen wir, daß wir ein rätselhaftes Jahrhundertbuch in Händen halten, das sich letztlich um eine Frage dreht, die sich in Hunderte verzweigt: Wie können selbstbewußte beseelte Wesen aus einer unbewußten, unbeselten Materie entstehen? 844 Seiten, Format 15 x 23 cm, gebunden. (Klett-Cotta)

Hören Sie Radio ohne Strom und ohne Batterie - wie in den 1920er Jahren!

Bausatz Detektorradio

☎ (9-0469-4)

nur **29.99**



Aus einer Germanium-Diode, Kabel, Kopfhörer, Schrauben und diversen Holzbauteilen können Sie sich selbst einen Empfänger bauen und mit dem Kopfhörer Radiosendungen empfangen: Einzige 'Anschlüsse' dieses Radios sind eine lange Antenne und ein Erdanschluss. **Inhalt:** Vorgefertigte Teile aus Holz, Ohrhörer, Diode, Kupferlackdraht, Schrauben und Muttern, Rändelmutter, Gewindestange, Lüsterklemmen, Leim, Schleifpapier und Anleitung.



Die 100 größten Entdeckungen

8 DVD (9-5050-2)

nur **18.-**

In acht Episoden werden die 100 größten Entdeckungen auf den Gebieten Biologie, Physik, Chemie, Medizin, Genetik, Geologie, Astronomie und Evolution vorgestellt. Es waren allesamt Entdeckungen, ohne die unser heutiges Leben nicht so aussähe, wie wir es kennen. Jede einzelne Erkenntnis hat dazu beigetragen, dass wir uns und unsere Umwelt besser verstehen können, Krankheiten schneller geheilt werden und wir grundlegende Fragen unserer Existenz beantwortet haben. All diese ausgesuchten Entdeckungen werden in dieser Gesamtausgabe eingehend gezeigt und besprochen. 8 DVD, zus. ca. 6 Std.



Eric Schlosser

Command and Control – Die Atomwaffenarsenale der USA und die Illusion der Sicherheit
Eine wahre Geschichte

Aus dem Englischen von Sven Scheer und Rita Seuß. C.H.Beck, München 2013. 598 S., € 24,95

Für den Ernstfall halten mehrere Länder ständig Atomwaffen zum sofortigen Abschuss bereit. Deren Vernichtungspotenzial, gepaart mit menschlicher Fehlbarkeit, birgt ein hohes Risiko. So kam es beinahe zur nuklearen Katastrophe, als einem Techniker am 18. September 1980 beim Warten einer Titan-II-Rakete ein Werkzeug aus der Hand fiel, das den Treibstofftank traf. In seinem aufwändig recherchierten Thriller verarbeitet der »New York Times«-Journalist und Bestsellerautor Eric Schlosser zahlreiche geheim gehaltene Pannen im Umgang mit Atomwaffen. Er zeigt die Unmöglichkeit einer sicheren atomaren Verteidigungsstrategie und erteilt der Vorstellung, man könne die Zerstörungskraft dieser Waffen unter menschliche Kontrolle bringen, eine klare Absage.

JULIA HEYMANN



Charles C. Mann

Kolumbus' Erbe – Wie Menschen, Tiere, Pflanzen die Ozeane überquerten
und die Welt von heute schufen

Aus dem Englischen von Hainer Kober. C.H.Beck, Rowohlt, Reinbek 2013. 807 S., € 34,95

Der Leser erfährt, wie die Alte und die Neue Welt mit den Reisen von Christopher Kolumbus (1451–1506) zu verschmelzen begannen. Alle Schwierigkeiten, die wir heute der Globalisierung zuschreiben, zeigten sich schon damals, etwa wachsende Wohlstandsungleichgewichte, platzende Wirtschaftsblasen, invasive Arten und Menschen verachtende Arbeitsbedingungen. Das Eingreifen in die damit zusammenhängenden Prozesse führte, so der Autor, fast nie zu vorhersehbaren Resultaten. Damit zeigt er auf, dass Geschichte nur selten absichtlich gestaltet wird; meist sei sie das Ergebnis kaum beherrschbarer, komplexer Wechselwirkungen zwischen Ökologie, Ökonomie und Zufall. Auf erzählerische Weise zeichnet das Buch ein vielschichtiges Bild unserer Vergangenheit, das sich angenehm vom personen- und politikfokussierten Geschichtsunterricht unterscheidet.

JÖRG WIPPLINGER



Ulrich von Kusserow

Magnetischer Kosmos – To B or not to B

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2013. 240 S., € 19,95

Wie entstehen Magnetfelder im Kosmos, und mit welchen Methoden untersuchen Wissenschaftler sie? Welche Bedeutung haben sie für die Strukturbildung im Universum und das Leben auf der Erde? Solche Fragen beantwortet der Astrophysiker Ulrich von Kusserow in seinem Sachbuch. Nüchtern umreißt er den aktuellen Stand der Forschung, ausführlich erläutert er die zu Grunde liegenden physikalischen Prozesse. Das Thema ist an sich hochinteressant – schade, dass das Buch in einem trockenen, lehrbuchhaften Stil verharrt. Schwarz-Weiß-Grafiken, Tabellen und weiterführende Exkurse lockern den Text ein wenig auf, farbige Abbildungen allerdings sind in den Anhang verbannt worden. In einem knappen Glossar erläutert der Autor wichtige Fachbegriffe, dennoch setzt er mathematische und physikalische Kenntnisse voraus, die das Abiturniveau deutlich übersteigen. Das Buch eignet sich daher vorrangig für Physikstudenten und andere fachnahe Leser mit solider Vorbildung.

MANUELA KUJAR



Dietmar Nill, Bernhard Ziegler

Tiere der Nacht

Kosmos, Stuttgart 2013. 160 S., € 29,99

Um Tiere in ihrem natürlichen Lebensraum zu beobachten, bedarf es schon bei Tag einigen Geschicks. Wer nachtaktive Tiere fotografieren möchte, braucht noch mehr davon – und obendrein eine besondere Ausrüstung. Die Aufnahmen, die uns Nill und Ziegler in ihrem Buch vorstellen, sind einmalig und wunderbar. Sie unterteilen sich in vier Kategorien: extreme Sinnesleistungen, Balz und Paarung, Aufzucht des Nachwuchses, Jagd. Zu jedem dieser Abschnitte gibt es einen kurzen einleitenden Text, der die jeweiligen Geschöpfe und ihre Besonderheiten beschreibt. Sämtliche Fotos sind mit kurzen Bildbeschreibungen versehen sowie mit Verweisen auf QR-Codes, die am Ende des Buchs aufgelistet sind. Anhand dieser Codes kann man mit einem geeigneten Gerät, etwa einem Smartphone, interessante Tonaufnahmen und Kurzfilme abrufen.

TAGRID YOUSEF



Ralf Jaumann, Ulrich Köhler

Der Mars

Ein Planet voller Rätsel

Edition Fackelträger, Köln 2013.

388 S., € 39,95

PLANETOLOGIE

Kaum eine Ergänzung nötig

Das umfangreiche 300-Seiten-Werk »Der Mars« hat das Zeug zum populärwissenschaftlichen Standardwerk.

Mit 2136 Gramm liegt dieses großformatige Werk schwer in der Hand. Also keine Bettlektüre, sondern etwas zum Nachschlagen und Blättern auf fester Unterlage. Das Buch von Ralf Jaumann und Ulrich Köhler, ausgewiesenen Marsexperten vom Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), ist kein klassischer Bildband. Es enthält zwar zahlreiche Aufnahmen, aber auch reichlich Text.

Das erste Kapitel befasst sich mit geschichtlichen Aspekten. Unser Nachbarplanet fasziniert schon seit Urzeiten, insbesondere wegen seiner rötlichen Farbe. Seine Wanderung am Himmel wurde im Lauf der Zeit immer genauer beobachtet. Johannes Kepler (1571–1630) leitete daraus die nach ihm benannten Bewegungsgesetze ab. Später enthüllten Teleskope »Kanäle« auf dem Himmelskörper, die als Hinweise auf eine Zivilisation gedeutet wurden – leider eine optische Täuschung.

Sodann behandeln die Autoren das Wettrennen zum Mars zwischen Amerikanern und Russen. Die NASA-Missionen kamen hier auf eine deutlich bessere Erfolgsbilanz. Man denke nur an die Mariner-Sonden und die Landung der Raumsonde Viking 1 am 20. Juli 1976, sechs Wochen später gefolgt von Viking 2. Deren Bilder zeigten eine trostlose, rote Steinwüste statt einer belebten, exotischen Welt. Triumph und Enttäuschung lagen in der Erkundung des Planeten oft dicht beieinander.

Anschließend geht es um die Struktur der Marsoberfläche mit ihren weiten Ebenen, gewaltigen Vulkanen und tiefen Tälern sowie um die Frage, wo auf dem Planeten sich möglicherweise Wasser befindet. Inzwischen haben viele Sonden den Himmelskörper hochauflösend fotografiert, etwa die europäische Mars Express, und es gab weitere Landemanöver. Wassereis haben die Forscher mittlerweile entdeckt, nach Leben suchen sie immer noch. Es bleibt also spannend.

Die Autoren verstehen es, den Leser in alle Facetten der Marsforschung einzuführen. Großes Lob gebührt der hervorragenden Darstellung. Großformatige Bilder, teils zum Aufklappen, verwöhnen das Auge; eine doppelseitige Karte im Einband zeigt Landeplätze und die Orte der Abbildungen aus den einzelnen Kapiteln. Der Text ist verständlich und fachlich fundiert. Zudem findet man Literaturempfehlungen und ein umfangreiches Register.

Leider fehlt eine Tabelle aller Marsmissionen. Dafür liegt dem Band jedoch eine DVD bei – und eine Brille zum Betrachten der Stereoaufnahmen. Das Buch hat durchaus das Zeug zum populärwissenschaftlichen Standardwerk. Wer es durcharbeitet, kommt zweifellos auf den aktuellen Stand des einschlägigen Wissens.

Wolfgang Steinicke

Der Rezensent ist Physiker und gibt das »Praxishandbuch Deep-Sky« heraus.



Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hrsg.)

Kinder brauchen Nähe

Sichere Bindungen aufbauen und erhalten

Dieses Buch ist kein Erziehungsratgeber im üblichen Sinn. Vielmehr präsentiert es wichtige Ergebnisse der Bindungsforschung und leitet daraus ab, wie sich eine vertrauensvolle Beziehung zu Kindern aufbauen lässt. Dabei ist eine sichere Bindung nicht nur entscheidend für eine gelingende Erziehung. Sie fördert auch nachweislich die seelische Gesundheit und den sozialen Erfolg im späteren Leben.

Vor diesem Hintergrund bietet »Kinder brauchen Nähe« vertiefte Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in wissenschaftlich fundierten und gleichzeitig unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.

2012. 160 Seiten, 27 Abb., kart.

€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)

ISBN 978-3-7945-2872-1

Jetzt bestellen!

Internet: www.schattauer.de/shop
E-Mail: order@schattauer-shop.de





Sally Ingleton
Die Welt der Meere
 Fernsehdokumentation
 Arte, 4.–18. April 2014,
 jeweils freitags 21.45 Uhr

ÖKOLOGIE

Wenn Wasser aggressiv wird

Der sehenswerte Fernseh-Dreiteiler »Die Welt der Meere« greift verschiedene Themen rund um die Ozeane auf, so auch den Klimawandel und seine Folgen.

Seit vielen Jahren beobachten Meeresforscher einen Prozess, der ihnen zunehmend Sorgen bereitet. Die Ozeane werden immer saurer, mit zum Teil dramatischen Konsequenzen. Korrosives Wasser greift die Kalkschalen vieler Meerestiere an, Korallenriffe sterben ab, und ganze Nahrungsketten sind bedroht. Was zur Zeit der Industrialisierung schleichend begann, nimmt zunehmend Fahrt auf. Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre steigt menschengemacht immer weiter an, das Gas tritt ins Seewasser über und bildet dort Kohlensäure, die den Meeresbewohnern zu schaffen macht.

Bei Meeresforschern und auch in der Öffentlichkeit ist das Problem der »Ozeanversauerung« inzwischen be-

stand er erstmals vor massiven Problemen bei dem Versuch, in seinen Meerwasseraquarien junge Austern heranzuziehen. Die Tiere entwickelten sich nicht normal, verendeten vielfach schon im Larvenstadium und besaßen ungewöhnlich fragile Schalen. Wie sich zeigte, war der pH-Wert des Meerwassers deutlich erniedrigt. Seither schüttet Wiegardt kiloweise Backpulver in seine Aquarien, um das Wasser zu neutralisieren.

Was Wiegardt im kleinen Rahmen noch ausgleichen kann, lässt sich nicht mehr kompensieren, wenn es ganze Korallenriffe bedroht – ökologisch äußerst wertvolle Regionen mit hoher Artenvielfalt. Diesen wendet sich der Film anschließend zu, wofür die Filme-

Austernzüchter schütten kiloweise Backpulver ins Meerwasser, um es zu neutralisieren

kannt. Dennoch sollte man die Dokumentation von Sally Ingleton, die am 4. April um 21.45 Uhr auf Arte startet, nicht verpassen. Ingleton präsentiert wunderschöne Bilder der Unterwasserwelt, beschreibt eindrücklich die Arbeit von Meeresforschern und zeigt im ersten Teil der Serie sehr lebensnah, welche konkreten Folgen die Versauerung haben kann.

Die 50-minütige Episode beginnt an der Nordwestküste der USA, auf der Farm des Austernzüchters Mark Wiegardt. Der Züchter bekommt die Folgen des ökologischen Umbruchs schon seit geraumer Zeit zu spüren. Im Jahr 2007

macher einen ungewöhnlichen Drehort aufgesucht haben: die Milne-Bucht an der Ostspitze Neuguineas. Dort arbeitet ein Team um die Meeresforscherin Katharina Fabricius vom Australian Institute of Marine Sciences. Bedingt durch vulkanische Aktivität tritt am Grund der Bucht Kohlendioxid aus. Teile des hiesigen Korallenriffs sind hierdurch Säurekonzentrationen ausgesetzt, wie die Wissenschaftler sie künftig im ganzen Pazifik erwarten. Wenige hundert Meter daneben erstreckt sich ein »normales« Korallenriff in weit gehend unversauertem Wasser. Ideale Vergleichsmöglichkeiten also.

An den Riffen haben Fabricius und ihre Kollegen Besorgniserregendes beobachtet. Die natürliche Kohlendioxidbegasung hinterlässt eine wahre Mondlandschaft. Nur die widerstandsfähigen Steinkorallen überleben das korrosive Bad, die Artenvielfalt ist um 40 Prozent reduziert, auf eigens angelegten Probestellen siedeln sich auch nach über einem Jahr kaum neue Korallen an. Im sauren Wasser verändern die Meeresbewohner sogar ihr Verhalten. Kleine Fische zeigen keine Angst mehr vor Raubfischen – und werden zur leichten Beute.

Hat das Ökosystem eine Chance, sich anzupassen? Um dem nachzugehen, suchte das Filmteam Forscher an der amerikanischen Westküste auf. Deren Arbeit bietet zumindest einen kleinen Hoffnungsschimmer: Sie zeigt, dass etwa robuste Seeigel mit dicken Kalkschalen der Ozeanversauerung trotzen und die dafür verantwortlichen Gene weitergeben. Doch auch hier schrumpft die Artenvielfalt.

Sodann nimmt Ingleton den Zuschauer mit in die hohen nördlichen und südlichen Breiten, wo Wissenschaftler ebenfalls damit befasst sind, die Folgen der Ozeanversauerung zu untersuchen. Der Zuschauer erfährt, welche Spezies besonders zu kämpfen haben – ausgerechnet jene am Anfang der Nahrungskette. Die Dokumentation endet mit der bekannten Forderung: Der Kohlendioxidausstoß muss reduziert werden, um die wertvollen Lebensräume zu erhalten.

Einen kleinen Beitrag hierzu könnten in Zukunft vielleicht Frachtsegler leisten, die vom Wind angetrieben werden. Mit dieser neuen und zugleich alten Technik wird sich der zweite Teil der Serie befassen (11. April, 21.45 Uhr). Im dritten (18. April, 21.45 Uhr) wird es um die vulkanische »Geburt« einer Insel im Pazifik gehen. Angesichts des guten Eindrucks, den die erste Episode hinterlässt, darf man auf die folgenden gespannt sein.

Tim Haarmann

Der Rezensent ist promovierter Meeresgeologe und freier Wissenschaftsjournalist in Bremen.



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hochqualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

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

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.org

WIE **BIOCOLA** MEIN LEBEN RETTETE

VON DAWN BONANNO

»Die Anonymen Alkoholiker konnten mir nicht helfen«, sagte ich zu dem kleinen Außerirdischen. Was sollte ich bloß mit ihm anfangen? Er sah eher aus wie ein Pudel, also saß ich scheinbar im Gespräch mit einem fremden Hund vor meiner Tür. Dabei fanden die Nachbarn mich ohnehin schon seltsam genug, so ganz allein in dem großen Haus. Genauer gesagt, in dem Rest davon. Zumindest der Teich sah noch gut aus; sogar ganz hübsch, wie sich die Nachmittagssonne darauf spiegelte und ein leichter Wind die Oberfläche kräuselte.

»Ano... Alko...?« Seine Hündchenaugen schielten.

»Ein Ort, an dem Trinker sich gegenseitig heilen. Wirkt bei Millionen, nur beim guten alten Harold nicht. Schuld waren die Gruppen, weißt du. Sogar die kleinsten Treffen waren mir zu überfüllt. Jemand bot mir an, mich allein anzuleiten, aber dann wäre die Anonymität futsch gewesen. Der Kerl hätte mich gekannt. Und alle Leute hätten von dem Spinner gehört, der so hinüber ist, dass ihm nicht einmal die AA helfen können.«

Der Pudeltyp nickte, wobei seine Ohrlocken hüpften. »Mein Übersetzer funktioniert jetzt einwandfrei. Darf ich mich vorstellen – «

Ich packte seine Schnauze. Nicht zu fest, nur so, dass er die Klappe hielt. »Anonymität, Kumpel. Mach's wie ich.« Damit er nicht bemerkte, dass ich mich schon vorgestellt hatte, fuhr ich rasch fort: »Das war damals, als Jenna mich sitzen ließ, und ich steckte echt in der Klemme. Ich koche nicht. Kann zum Teufel nicht putzen. Sie kümmerte sich um mich und die Kinder, aber als ich den Job verlor, wurde ihr alles zu viel. Ich starb fast ohne sie.«

»Und da rettete Biocola Ihr Leben?«

»Noch nicht, aber damals fing ich mit der Biocola an. Musste meine Abhängigkeit auf etwas übertragen, das mich nicht wieder arbeitslos machte oder unwiderruflich geschieden oder mich um den fahrbaren Untersatz brachte. Die Cola hielt ich für eine gute Idee, denn mit dem Suff hatte ich mir die Leber ruiniert. Solange ich viel Wasser trinke und ein bisschen jogge, halten meine Nieren durch. Das Laufen hat mir wirklich gutgetan. Ich habe dadurch 15 Kilo verloren.«

Ich hätte ihn gern hinter den Ohren gekraut, aber wahrscheinlich hätte ihn das beleidigt, wo er doch neu auf der Erde war und nicht wusste, wie wir zu den hier ansässigen Vierbeinern stehen. Muss ihm zugutehalten, dass er mich nur komisch ansah.

»15 Kilogramm.« Der Pudel legte den Kopf schief und nickte dann. »Durch Entfernen von 15 Prozent Ihres Körpergewichts sank die Belastung Ihrer inneren Organe beträchtlich. Und so hat Biocola Ihr Leben gerettet?«

»Aber nein. Das Laufen tat gut, aber es änderte nicht mein Leben.« War er so etwas wie ein Arzt? In dem Fall konnte er mir bei meinem Haus nicht viel helfen. »Versteh doch, ich will immer noch, dass Jenna zurückkommt. Ich rief sie heute an, erzählte ihr, was ich alles unternommen habe, lud sie zu mir ein. Verdammte, sie sagte Ja! Ich begann am ganzen Körper zu zittern, und da wurde mir klar, dass ich dringend eine Cola brauchte. Blöd nur: Ich hatte nichts mehr daheim.«

Der Pudelkerl nickte, dass seine Ohren flatterten, als hätte er aus meinen Schwierigkeiten eine wichtige Erkenntnis gewonnen. »Erschöpfte Vorräte?«

Ich lachte kurz auf. »Ich sag dir, Kumpel, in meiner Panik füllte ich alles in meinen Kofferraum, was der Supermarkt noch auf Lager hatte. Aber obwohl ich dann geheizt bin, was das Zeug hielt, und nicht einmal tankte, obwohl meine Karre dringend Benzin brauchte – ich habe Jenna verpasst. Sah sie wegfahren und fing noch ein paar richtig üble Schimpfworte auf, aber sie

bremste nicht einmal. Glaube nicht, dass sie wiederkommt.«

»Und so hat Biocola Ihr Leben gerettet?«, fragte er unsicher.

»Aber nein.« Ich grinste, und dieses Mal tätschelte ich seinen Kopf. Wahrscheinlich verwirrte ihn das mehr, als es ihn ärgerte. Ich nahm einen langen Zug von meiner leider warmen Biocola und trank die Dose aus. »Verstehst du? Die Biocola trieb mich aus dem Haus und hielt mich auf Nebenstraßen fest, als deine verdammte Untertasse ins Schleudern kam.«

»Es heißt Weltraumpod.«

»Mir egal, wie du das Ding nennst, du hast die Kontrolle darüber verloren, und dann hat es mein Haus verwüstet. Schau dir das an! Wo zum Teufel soll ich jetzt wohnen? Aber das dachte ich nicht, als ich die Getränke aus dem Wagen holte und zu dieser Ruine aus Brettern und Weltraumschrott hinüberschleppte. Ich dachte vielmehr: Ohne Biocola wäre ich zu Hause geblieben und im Zimmer auf und ab gegangen, als deine Untertasse herunterkrachte. Die verdammte Limonade hat mir das Leben gerettet.«

Das Pudelwesen schwieg, während es auf die Trümmer starrte. Das Haus selbst war mir egal. Wie gesagt, ich kann nicht putzen. Wäre Jenna tatsächlich

heimgekommen, hätte sie mich gleich wieder verlassen, weil ich so ein Chaos bin. Aber wenigstens hatte ich jetzt einen Hund. Gewissermaßen.

»Willkommen auf unserem Blauen Planeten, willkommen auf der Erde, mein pelziger Freund«, sagte ich.

»Oh nein«, bellte er und starrte mit großen Augen auf so eine Art Smartphone, dann auf die Trümmer seines Flugdings.

»Was ist denn, Kumpel?«

»Falscher Planet.« Jetzt winselte er regelrecht.


»Wow, und ich dachte, ich wäre ein Pechvogel. Werden deine Freunde kommen und dich retten?«

Er blickte aus traurigen Hundeaugen zu mir auf.

»Eigentlich sollte ich sie retten.«

Der Schutthaufen, der einmal mein Haus gewesen war, verrutschte. Holz und Metall rumpelten ineinander. Aber darauf kam es nicht mehr an. Obdachlos war ich so und so.

»Dumm gelaufen, mein Freund«, sagte ich und beschloss, ihn zu behalten. Der beste Freund des Menschen!

Ich öffnete zwei weitere warme Dosen, eine für ihn. Ob er einen Napf brauchte? »Weißt du, am besten lebt man im Augenblick. Man weiß ja nie, was als Nächstes kommt.« 

DIE AUTORIN

Dawn Bonanno ist besessen von Papier und Bleistift und liebt es, Dinge zu reparieren. Darum lag es für sie nahe, Geschichten darüber zu schreiben.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature 502, S. 586, 24. Oktober 2013

NEUE SERIE:

Die menschliche Sprache

Inwiefern unterscheidet sich die Sprache des Menschen grundsätzlich von solchen Kommunikationsformen, die unsere nächsten Verwandten im Tierreich beherrschen? Um diese Frage beantworten zu können, nehmen Forscher die Sprachverarbeitung im Gehirn genauer unter die Lupe.

Mit der nächsten Ausgabe beginnt unsere neue sechsteilige Serie, in der »Spektrum der Wissenschaft« einen Einblick in die Vielfalt der aktuellen Sprachforschung gibt.



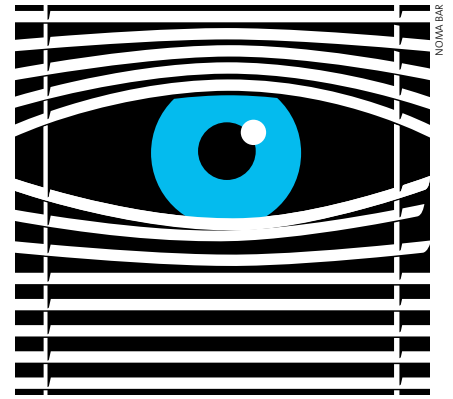
FOTOLIA / ANDREY KUZMIN [M]

Streitgespräch Biomedizin

Falsche Anreizsysteme und mangelnde Qualitätssicherung führen dazu, dass ein großer Teil der milliardenteuren Forschung nur Unnützes hervorbringt. Wie gegensteuern? »Spektrum« spricht mit Medizin-Nobelpreisträger Harald zur Hausen und dem Vorsitzenden der Unternehmensleitung von Böhlinger Ingelheim, Andreas Barner.

Wolken aus dem Weltraum

Die Erde wird gern poetisch als Blauer Planet bezeichnet, weil das Meer zwei Drittel ihrer Oberfläche einnimmt. »Weißer Planet« wäre aber genauso treffend; denn im Mittel sind 70 Prozent des Globus von Wolken bedeckt. Satelliten geben nun tiefere Einblicke in deren globale Verteilung und Struktur.



NOVA BAR

Was ist unsere Privatsphäre wert?

Im Informationszeitalter ist der Besitz großer Mengen personenbezogener Daten und die Möglichkeit, sie mit Hilfe von Computersystemen auszuwerten, gleichbedeutend mit Macht. Der Informatiker Jaron Lanier stellt Überlegungen zu einer der heikelsten Fragen der Gegenwart an.



SUREN MANVELDAN

Evolution von Komplexität

Organismen werden nicht nur durch den Einfluss der natürlichen Selektion komplexer, sondern auch durch konstruktive neutrale Evolution. So lautet ein neuer Ansatz von Evolutionstheoretikern.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO***



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

*Für Printabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* kostenlos!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/digitalabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Die Zukunft ist digital. Gestalten Sie mit.

TECHNOLOGY LAB | 2014

Gestalten Sie die digitale Zukunft der Gesundheitsversorgung. Im McKinsey Technology Lab zum Thema „Digital Healthcare“. Vom 10. bis 13. Juli an der Ostsee. Was entsteht, wenn Wissenschaft, Wirtschaft und digitale Technologie zusammentreffen? Ein Forum aus Studenten, Doktoranden, Wissenschaftlern und McKinsey Beratern, in dem Sie mit uns in echter Teamarbeit digitale Strategien für die Gesundheitsversorgung der Zukunft entwerfen. Beim Technology Lab von McKinsey lernen Sie nicht nur die strategische Seite unserer Arbeit kennen, sondern auch moderne Methoden der Datenanalyse zur Lösung drängender globaler Herausforderungen. Jetzt bis zum 11. Mai 2014 bewerben unter technology-lab.mckinsey.de

