

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

GESTEINE, FAST SO
ALT WIE DIE ERDE?

**Beredte Zeugen
aus der Frühzeit
unseres Planeten**



OKTOBER 2014

LINGUISTIK

**So entstehen
kreolische Sprachen**

ASTRONOMIEGESCHICHTE

**Auch Astronomen zunächst
gegen kopernikanisches System**

ALTERSKRANKHEITEN

**Der Fluch der menschlichen
Langlebigkeit**

Die Uhr in uns

Wie wir Zeit wahrnehmen

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

10/14

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



UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Cappuccino-Effekt: Klänge aus dem Milchschaum
 • Bermuda-Dreieck: Lassen gigantische Gasblasen Schiffe sinken?
 • Heiz-Paradoxon: Woher stammt die Wärmeenergie? • € 8,90



Maya: Kakao und Kalter Krieg • Mesopotamien: Wissen für die Elite • Jäger und Sammler: Sehen, riechen, orientieren • Pfeifsprachen: Unterhaltung nach Vogelart • € 8,90; ab 26. 9.



Irrt euch! Warum Illusionen sinnvoll sind • Bilder im Kopf: Wie Metaphern beflügeln • Wahre Worte: Was Erklärungen sexy macht • Linguistik: Gedacht wie gesprochen • € 8,90



Das Magazin für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren: Alexander Gerst – Unser Mann fürs All • Jupiters großer roter Fleck • Reise zum Mars • € 4,90; überarbeitete Neuauflage

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Wie die Zeit verfliegt – und warum

Sommerzeit – Urlaubszeit! Und wieder einmal ging sie wie im Flug vorbei. Vielleicht sogar noch ein wenig rascher als letztes Mal? Wie überhaupt das vergangene Jahr ja wirklich geradezu vorüberaste.

Apropos »Wie die Zeit vergeht«: Vier Jahre ist es schon wieder her, dass Sie in »Spektrum der Wissenschaft« eine Artikelserie über eben gerade dieses Thema »Zeit« lesen konnten. Zwischen Juli- und Oktoberheft 2010 spannten die Beiträge einen großen Bogen von der Zeitvorstellung der alten Ägypter bis hin zur naturwissenschaftlichen Betrachtung des Phänomens in der modernen Physik. Die Artikel riefen eine beträchtliche Resonanz hervor, die uns unter anderem bewog, im Mai 2011 mit »Das Ende der Zeit« einen weiteren – in diesem Fall kosmologischen – Aspekt zum Titelthema zu küren. Wieder mit überdurchschnittlichem Erfolg bei Ihnen, unseren Lesern.

Die Zeit in ihren verschiedenen Facetten spricht also offenbar viele Menschen an. Ein Grund dafür besteht möglicherweise darin, dass wir uns dem unbeirrbar fortschreitenden der Zeit hilflos ausgeliefert fühlen. Sekunde um Sekunde verrinnt sie erbarmungslos, und was in der Vergangenheit liegt, ist unwiederbringlich vorüber. Alles altert und vergeht; das erleben wir auch subjektiv – mal mehr, mal weniger intensiv.

Aber wie nehmen wir die Zeit und ihr Verstreichen eigentlich wahr, und wie entsteht das eingangs beschriebene Gefühl eines nicht konstant schnellen Zeitverlaufs? Solche Fragen möchten wir im vorliegenden Heft beantworten.

Unser Autor Marc Wittmann von der Universität Freiburg ist Experte für die Zeitwahrnehmung, die er seit Jahren unter psychologischen und neuronalen Gesichtspunkten untersucht. Bei seinen Forschungen stieß er auf überraschende Antworten. So scheint streng genommen gar kein Zeitgeber in unserem Gehirn zu existieren. Stattdessen strömen Signale aus dem Körper in eine Hirnregion namens Insula, die aus diesen Impulsen ein Gefühl für die aktuell verstreichende Zeit berechnet. Da die Insula auch höhere kognitive Funktionen mit verschiedenen Sinnesinformationen zusammenführt und daraus ein gefühltes momentanes »Ich« erzeugt, führt die Frage nach der Zeitwahrnehmung letztlich zu einer noch viel grundsätzlicheren Frage: der nach der Entstehung unseres Bewusstseins!

Diese und andere faszinierende Zusammenhänge erfahren Sie in unserem Artikel ab S. 24. Zusätzlich können Sie unseren Autor im Fernsehen erleben: In einer Sendung zum Thema »Was ist Zeit?« unterhält sich Marc Wittmann am 25. September um 21 Uhr in 3sat mit dem bekannten Wissenschaftsmoderator Gert Scobel.

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Laut **Elizabeth A. Tibbetts** von der University of Michigan und **Adrian G. Dyer** von der RMIT University in Melbourne können manche Insekten Gesichter erkennen – die von Artgenossen, aber auch menschliche (ab S. 32).



Warum die meisten Astronomen das kopernikanische Weltbild noch viele Jahrzehnte nach dessen Vorstellung ablehnten, erklären **Dennis Danielson** (links) von der University of British Columbia in Vancouver und **Christopher M. Graney** vom Jefferson College in Louisville ab S. 54.



Nora Berrah von der University of Connecticut und **Philip H. Bucksbaum** von der Stanford University untersuchen, was geschieht, wenn man den weltweit stärksten Röntgenlaser auf Atome und Moleküle richtet (ab S. 78).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Rückgang der Eisschilde • Schwämme aus Gold • Superschnelle Regentropfen • Verschwinden der Neandertaler • Solarthermie-Kraftwerke als Todesfallen • Mutierte Polioerreger

11 Bild des Monats

Kosmische Kartoffel

12 Forschung aktuell

Wurzel des Immunsystems
Haie beleuchten die Evolution der Körperabwehr

Exotisches Teilchen
Erstmals Gebilde aus vier Quarks nachgewiesen

Salzartige Solarzellen
Perowskite erreichen ähnlich hohe Wirkungs-

grade wie Silizium, sind aber viel preiswerter

Fehlerhafte Scans
Kompressionssoftware veränderte Ziffern

SPRINGER'S EINWÜRFE
Meister der Formeln
Mathematische Physik verlor einen ihrer Lehrer

32



MIT FRDL. GEN. VON ELIZABETH A. TIBBETTS UND ADRIAN G. DYER

46



NASA, JPL / CALTECH / ESA / CXC / STSC

62



JÜRGEN LANG

BIOLOGIE & MEDIZIN

32 Gesichtskontrolle im Wespennest

Elizabeth A. Tibbetts und Adrian G. Dyer

Zum Erkennen von Gesichtern braucht es kein großes Gehirn. Manche Wespen haben sich zu wahren Spezialisten darin entwickelt.

► 38 Der Preis unserer Langlebigkeit

Heather Pringle

Dass wir viel älter werden als Primaten sonst, erkaufen wir mit Alterskrankheiten – für beides sorgen dieselben Gene.

PHYSIK & ASTRONOMIE

46 Das Rätsel der fehlenden Pulsare

Heino Falcke und Michael Kramer

Ein Radiopulsar in der Nähe eines Schwarzen Lochs könnte Einsteins Vorhersagen bestätigen. Haben die Astronomen jetzt endlich ein Exemplar gefunden?

SCHLICHTING!

52 Das Geheimnis des blauen Schattens

H. Joachim Schlichting

Im Licht der untergehenden Sonne lässt der Abgasschweif einer Rakete einen rätselhaften Schattenstrahl entstehen.

► 54 Kopernikus – Revolution mit Hindernissen

Dennis Danielson und Christopher M. Graney

Nicht nur die Kirche, auch das Gros der Astronomen fand das kopernikanische System seinerzeit widersinnig.

MENSCH & KULTUR

SERIE »WELT DER SPRACHE« TEIL 6

► 62 Orientierung in einem Strom aus Lauten

Jürgen Lang

Kreolsprachen klingen wie Französisch, Spanisch oder wovon immer sie sich ableiten. Was macht sie so besonders?



► **TITELTHEMA**

WAHRNEHMUNG

24 Wie unser Gefühl für die Zeit entsteht

Marc Wittmann

Nach einer inneren Uhr, die unser Zeitgefühl im Sekunden- bis Minutenbereich steuert, suchten Hirnforscher bislang vergeblich. Neue Erkenntnisse deuten nun darauf hin, dass hier unser Körpergefühl eine zentrale Rolle spielt: Selbstwahrnehmung und Zeiterleben scheinen untrennbar miteinander verbunden zu sein.

68



TRAVIS RATHBONE

ERDE & UMWELT

► **68 Gesteine, fast so alt wie die Erde?**

Carl Zimmer

Ein Geologenteam hat Gesteine im Norden Kanadas auf 4,4 Milliarden Jahre datiert, doch ein anderes widerspricht.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

74 Moleküle in Platznot

Roald Hoffmann

Wie verhalten sich Stoffe, wenn man sie extrem quetscht?

78



SPENCER LOWELL

TECHNIK & COMPUTER

78 Die ultimative Röntgenmaschine

Nora Berrah und Philip H. Bucksbaum

Das LCLS kann chemische Reaktionen »filmen«.

Nach S. 86 finden Sie eine Sonderpublikation der Gesellschaft Deutscher Chemiker.



87 Wissenschaft im Rückblick

Von Einstein zur Venusatmosphäre

88 Rezensionen

Christian Kreiß: Geplanter Verschleiß • *Peter Nadig*: Hatschepsut • *Michael Hampe*: Die Lehren der Philosophie • *Josef H. Reichholf*: Ornis • *Erik Raidt*: Gottlieb Daimler und Robert Bosch u. a.

96 Futur III

William Meikle: Keine Gnade für Streber

98 Vorschau

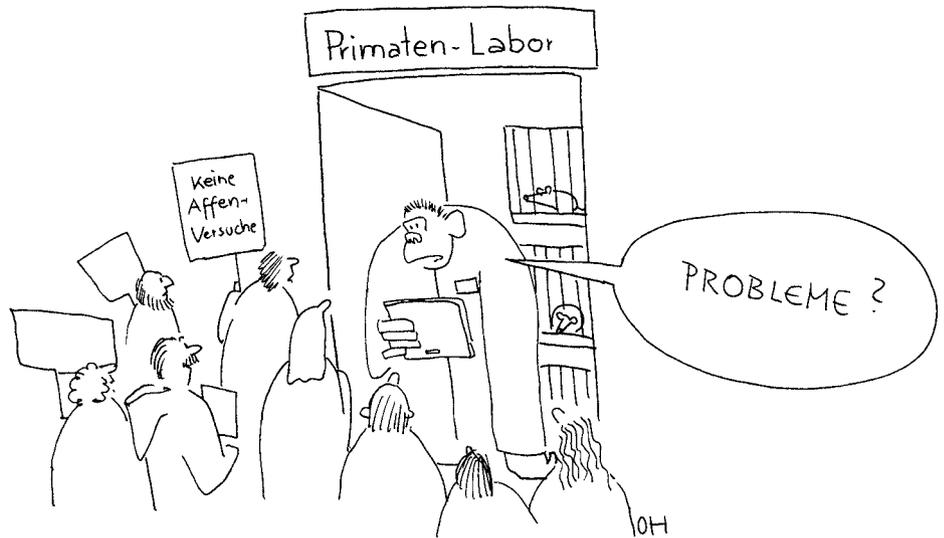
Titelmotiv: iStockphoto / Dimitris M. Stephanides [M]
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

Welche Erkenntnisse aus Primatenversuchen?

Die Journalistin Alison Abbott beschrieb, wie eine EU-Richtlinie zu Primatenversuchen in einzelnen Mitgliedsländern umgesetzt wird. (»Primatenforschung in Europa«, Juni 2014, S. 30)

Wolfgang Herzner, Wien: Ich bin Informatiker, aber seit Jahren an Hirn- und Bewusstseinsforschung interessiert. Mir ist klar, dass viele Erkenntnisse, über die ich in dieser Zeit erfahren habe, durch Versuche mit Primaten erworben wurden. Aber viele dieser Erkenntnisse legen auch nahe, dass das Bewusstsein anderer Primaten dem menschlichen deutlicher näher ist als noch vor Jahrzehnten angenommen. Neben allgemeiner Sympathie für Tiere ist es vor allem dieser Aspekt, der meine Skepsis gegenüber Primatenversuchen nicht verschwinden lässt.

Was in dem Artikel fast nicht angesprochen wird (gerade mal kurz am Ende des zweiten Absatzes) und meiner Beobachtung nach auch in der öffentlichen Diskussion zu wenig, ist der Nutzen für die Menschheit. So hat man den



Eindruck, es geht um wertfreie Forschung, in deren Rahmen halt bedauerlicherweise auch Primaten mitmachen müssen. Würde man jedoch etwa anhand von Beispielen den Nutzen der Primatenforschung darstellen, würde die Diskussion vermutlich sachlicher verlaufen. Ein weiterer Aspekt, den der Artikel ebenfalls nicht anspricht, sind Alternativen zur Primatenforschung, vor allem Computermodelle und Simu-

lationen. Natürlich werden diese wohl noch lange nicht (vielleicht nie) die Forschung am lebenden Objekt vollständig ersetzen können, aber »so viel Simulation und so wenig Tierversuche wie möglich« wäre doch ein schönes Ziel.

Walter Schimmler, Bremen: Das Thema ist komplex. Leider wird die Autorin dem nicht gerecht, insofern sie völlig einseitig einer von jeglicher ethischen

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

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

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.de

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: Barbara Kuhn

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

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Reinhard Breuer, Dr. Markus Fischer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80,

70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366,

E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-;

im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten

(gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland:

€ 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement

(Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.

Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE5260010700022706708,

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: Annette Freistühler, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1322

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 unangefordertes 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 Inchoombe, 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.



Selbstkritik freien Brachialforschung das Wort redet. Forschung an Primaten – insbesondere auch Grundlagenforschung – ist geboten und notwendig, aber sie muss sich einer kritischen Öffentlichkeit stellen und sich die Abwägung gefallen lassen, ob das Leid, welches den Tieren angetan wird, durch die zu erwartenden Ergebnisse der Forschung zu rechtfertigen ist.

Als Bremer und als Neurologe und Psychiater sind mir die Auseinandersetzungen um Prof. Andreas Kreiter bestens vertraut. Ich wäre gern zum Verteidiger der Arbeit von Herrn Kreiter geworden, und ich habe ihn deshalb mehrfach gebeten, der interessierten Öffentlichkeit Hinweise darauf zu geben, zu welchen Ergebnissen er und sein Team in jahrelanger Arbeit gekommen sind. Er hat es nie für nötig gehalten, darauf zu antworten.

Risiken von Fracking

Der Physiker Michael Springer warnte vor den Risiken der neuen Fördermethode für Gas und Öl. (»Wird Fracking den Energiehunger stillen?«, Springers Einwürfe, August 2014, S. 20)

Dietrich Klingmüller, Bonn: Auf der diesjährigen Jahrestagung der amerikanischen Endocrine Society in Chicago war dies ein wichtiges Thema (siehe Presseerklärung der Endocrine Society vom 23.6. 2014). Christopher Kassotis und seine Kollegen berichteten, dass eine Reihe der beim Fracking eingesetzten Chemikalien hormonaktiv sind und somit zu den so genannten endokrinen Disruptoren gehören. Es wurde an menschlichen Zellen gezeigt, dass Östrogen-, Androgen-, Progesteron-, Glukokortikoid- und auch Schilddrüsenhormonrezeptoren blockiert beziehungsweise gehemmt werden können. Damit können diese Stoffe vielfältige Störungen zum Beispiel der Fertilität, der Entwicklung von Hirn und Körper, des Stoffwechsels und auch des Immunsystems verursachen. Die Forscher haben bereits im Grundwasser aus Frackinggebieten in Colorado (USA) entsprechende hormonelle Aktivitäten

nachgewiesen und damit gezeigt, dass diese Gefahr real ist.

Wolfgang Monninger, Essen: Die Frage »Wird Fracking den Energiehunger stillen?« kann nur mit Nein beantwortet werden, denn der Energiehunger einer modernen Industriegesellschaft ist immer größer als die Ressourcen, und Fracking wird da nur einen begrenzten Beitrag leisten können. Aber Fracking könnte eine Brückentechnologie sein.

Der Artikel von Chris Mooney (SdW 8/2012, S. 72), der Methodik und Risiko des Frackings sehr sorgfältig und fair beschreibt, gibt allerdings keine Handhabe, diese Methode als »Technologie mit unbefristeten Umweltfolgen« zu brandmarken und sie damit auf eine Ebene mit Fukushima zu stellen – wie Springers Einwurf suggeriert.

Worum es geht, ist eine realistische Einschätzung der Risiken: Welche Stoffe können die Umwelt belasten? Und: Über welche Mengen und über welchen Zeitraum reden wir?

Die USA fracken derzeit in 30 Bundesstaaten an rund 500000 Bohrlöchern. Sie waren damit bisher erstaunlich erfolgreich, allerdings nach einer langen Phase des Experimentierens und Optimierens. Auf jeden Fall liegen nun genügend Daten vor, um von diesen Erfahrungen profitieren und die Risiken besser einschätzen zu können. Dies müssen wir nutzen und dabei auch Erfahrungen im eigenen Untergrund zu sammeln, denn die Geologie ist überall anders.

Ich gehe davon aus, dass die Mengen von entweichendem Methan (im Vergleich mit anderen Methanquellen wie zum Beispiel dem auftauenden Permafrost) sehr gering sein werden. Und sie werden beim Ende der Förderung von Schiefergas gegen null gehen – also nicht unbefristet sein. Auf der Haben-seite steht eine bedeutende Energiequelle zu bezahlbaren Preisen. Im Übrigen ist Methan aus der Wasserleitung zum Beispiel aus dem Münsterland durchaus bekannt – ohne Fracking.

Das Bundesumweltamt möchte Fracking verbieten, weil sich die Risiken dieser Technologie nicht sicher vorher-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

Google+

www.spektrum.de/googleplus

twitter

www.spektrum.de/twitter

sagen lassen (siehe dazu den herrlichen Beitrag von Dieter Nuhr in WDR2 vom 7. August 2014). Springers Einwurf folgt offenbar diesem Gedanken.

Deutschland ist ein Technologie-land, hat aber noch immer kein realistisches Verhältnis zur Politik der Technik. Es verbohrt sich in die Fülle der Gefahren und gerät in (German) Angst. Wie bitte soll Deutschland seine künftigen Energieprobleme lösen, wenn nicht durch intelligenten Einsatz aller Möglichkeiten? Haben wir keinen Zukunftswillen mehr? Würden wir die gleichen Maßstäbe, die viele für die Energietechnologien fordern, für unseren Autoverkehr anwenden (mit zirka 4000 Toten pro Jahr allein in Deutschland), so müssten wir das Auto sofort verbieten. Warum also diese Doppelmoral?

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

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

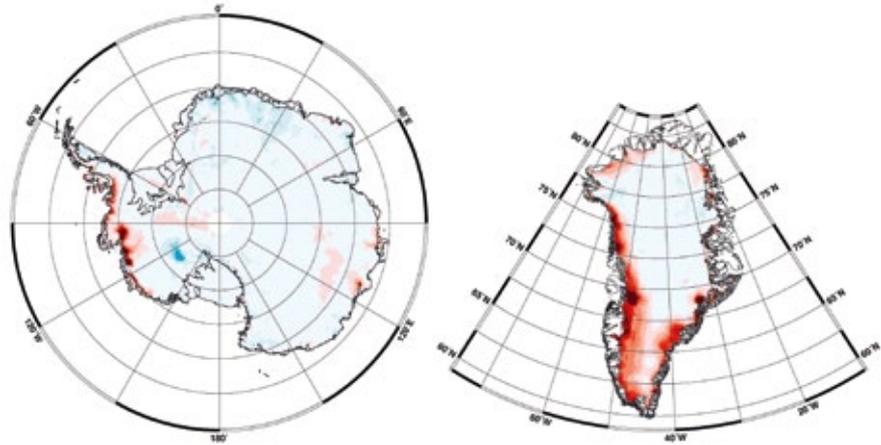
Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

KLIMAWANDEL

Satellit erfasst Eisschmelze

Anhand von Messdaten des europäischen Satelliten CryoSat-2 haben Forscher jetzt den jährlichen Eisverlust in Grönland und der Westantarktis beziffert. Demnach gehen in beiden Regionen zusammengerechnet etwa 500 Kubikkilometer Eis pro Jahr verloren. Das sei der höchste Wert seit Beginn der Satelliten-Höhenmessungen vor rund 20 Jahren, schreiben die Wissenschaftler vom Alfred-Wegener-Institut (AWI) in Bremerhaven.

CryoSat-2 hat Instrumente an Bord, mit denen sich die Höhe von Eisschilde messen lässt. Die Geräte senden Radar- oder Laserimpulse zur Erde und erfassen die zurückgeworfenen Signale. Mit den dabei gewonnenen Daten erstellte das Forscherteam flächendeckende Karten der Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis. Zusätzlich dokumentierten die Wissenschaftler mit Hilfe weiterer CryoSat-2-Daten, wie sich die Mächtigkeit der Eispanzer



Die Eisschilde der Antarktis (links) und Grönlands (rechts) haben zwischen 2011 und 2014 vielerorts an Mächtigkeit verloren, hier dargestellt durch rote Farbtöne.

zwischen 2011 und 2014 verändert hat. Gegenüber früheren Ergebnissen aus den Jahren 2003 bis 2009 habe sich der jährliche Eisverlust auf Grönland verdoppelt und in der Westantarktis verdreifacht, schreibt Mitautorin

Angelika Humbert. Zwar beobachteten die Forscher einen Zuwachs des Eises in der Ostantarktis – allerdings sei dieser so klein, dass er die Einbußen in den anderen Gebieten nicht ausgleiche.

Cryosphere 8, S. 1539–1559, 2014

HELM ET AL. THE CRYOSPHERE 2014 / ALFRED-WEGENER-INSTITUT

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

TECHNIK

Kapillarwirkung auf Knopfdruck

Poröses Gold kann Flüssigkeiten aufsaugen wie ein Schwamm – vorausgesetzt, seine Hohlräume sind hinreichend klein, damit darin die Kapillarwirkung dominiert. Forscher um Huiling Duan von der Peking University berichten nun, dass sich die Saugwirkung sogar steuern lässt: Durch Anlegen von elektrischen Spannungen ist sie stufenlos regelbar.

Hierfür genügt es, die Pole einer Stromquelle mit dem porösen Gold und der anzusaugenden (elektrisch leitfähigen) Flüssigkeit zu verbinden. Mit Spannungen im Bereich von Zehntelvolt lässt sich das Eindringen des Fluids in die Hohlräume beschleunigen, verlangsamen oder anhalten. Der Mechanismus dahinter sei noch nicht vollständig verstanden, schreiben die Autoren, doch eine wichtige Rolle spiele wohl der Kontaktwinkel

zwischen Flüssigkeit und Goldoberfläche, der von der Potentialdifferenz zwischen beiden abhängt.

Gold mit nanometergroßen Poren könne möglicherweise in miniaturisierten Analyseinstrumenten eingesetzt werden, etwa in »Labs-on-a-Chip«, meinen die Forscher. Dort müssen winzige Flüssigkeitsmengen (in der Größenordnung von Mikro- oder Nanolitern) zwischen verschiedenen Kammern hin- und hertransportiert werden. Poröse Goldpartikel, an denen eine elektrische Steuerung anliegt, könnten sich hier als einfach aufgebaute Minipumpen bewähren. Andere Forschergruppen tüfteln auf dem Gebiet der so genannten Mikrofluidik schon seit längerem an Flüssigkeitstransportern, die mit Schallwellen funktionieren.

Nat. Commun. 5, 4237, 2014

Neandertaler verschwanden früher als gedacht

Wissenschaftler um Thomas Higham von der University of Oxford (England) kommen zu dem Ergebnis, die Neandertaler in Europa seien bereits vor etwa 40 000 Jahren ausgestorben. Das wäre deutlich früher als bisher angenommen. Die Forscher untersuchten Proben aus 40 archäologischen Fundstätten von Russland bis Spanien. An diesen Orten haben Archäologen Objekte aus der späten mittleren Altsteinzeit geborgen, die den Neandertalern zugeordnet werden.

Mit einer verbesserten Radiokohlenstoff-Datierungsmethode bestimmten die Wissenschaftler das Alter der Überbleibsel. Insgesamt datierten sie 196 Proben. Gemäß den Ergebnissen endete die Kultur der Neandertaler in Europa vor 39 000 bis 41 000 Jahren. Bislang lautete die gängige Annahme, der Verwandte des modernen Menschen sei erst vor rund 30 000 Jahren ausgestorben. Nach Aussage von Higham und seinen Kollegen liefert die neue Datierungsmethode aber verlässlichere Ergebnisse als frühere Verfahren.

Die Neudatierung engt den Zeitraum ein, in dem der moderne Mensch mit dem Neandertaler in Kontakt gekommen sein könnte. 2600 bis 5400 Jahre lang, je nach Region, hätten sich beide den europäischen Kontinent geteilt, schreiben die Forscher. Das wäre immer noch lang genug für einen Technologietransfer zwischen den beiden Menschenarten gewesen. Über das Ausmaß der wechselseitigen Beeinflussung streiten die Fachleute allerdings.

Nature 512, S. 306–309, 2014

SOLARTHERMIE

Sonnenwärme-Kraftwerk ist Todesfalle für Vögel

Die Gewinnung von Sonnenenergie kann fatale Folgen für die Tierwelt haben. Bei einem bestimmten Typ solarthermischer Anlagen, dem Solarturm-Kraftwerk, fokussieren hunderte Brennspiegel das Sonnenlicht auf einen zentralen Mast. Dort erhitzt die Strahlung ein flüssiges Medium, dessen Wärmeenergie anschließend zur Erzeugung von Dampf dient, um Elektrogeneratoren anzutreiben. Diese Art der Energiegewinnung berge ein erhebliches Risiko für Wildvögel, berichten Forscher der amerikanischen Behörde United States Fish and Wildlife Service (USFWS): Der stark gebündelte Lichtstrahl könne die Tiere im Flug versengen.

Für ihre Studie haben die Biologen die Solarturm-Kraftwerksanlage Ivanpah in der amerikanischen Mojave-Wüste nach toten Vögeln abgesucht. Dabei ist das Team um Rebecca A. Kagan auf insgesamt 141 Kadaver gestoßen. Mehr als die Hälfte der Tiere starb direkt oder indirekt durch die Einwirkung des Sonnenlichts – etwa indem sie mit versengten Federn zu Tode stürzten oder Raubtieren zum Opfer fielen, weil sie nicht mehr richtig fliegen konnten. Die Temperaturen im gebündelten Lichtstrahl nahe am Zentralturm erreichen bis zu 500 Grad Celsius.

Derartige Solarthermie-Kraftwerke drohen zur Vogel-falle zu werden, mahnen die Wissenschaftler. Die hell leuchtenden Anlagen zögen massenhaft Insekten an, denen wiederum die Federtiere folgten. Zudem wirkten die Brennspiegelfelder aus der Ferne wie Wasserflächen. Um

die Attraktivität für Vögel zu verringern, schlagen die Forscher vor, das Umland solcher Kraftwerke möglichst karg zu gestalten und tatsächlich existierende Wasserflächen abzudecken.

Projektbericht der USFWS, Juli 2014



BRIGHTSOURCE ENERGY INC

Sieht aus wie ein See, ist aber keiner: einer von zahlreichen Spiegeln in einem Solarturm-Kraftwerk. Die Ähnlichkeit mit einem Gewässer kann Vögeln zum Verhängnis werden.

METEOROLOGIE

Superschnelle Regentropfen

Amerikanische Wissenschaftler haben frühere Beobachtungen bestätigt, wonach Regentropfen vielfach schneller zur Erde fallen, als das physikalisch möglich zu sein scheint. Von den kleinen unter ihnen bewegen sich bis zu 60 Prozent mit überhöhter Geschwindigkeit.

Stürzt ein Regentropfen zur Erde, wirken Schwerkraft und Luftwiderstand auf ihn ein. Zunächst wird der Tropfen beschleunigt, wobei sein Gewicht konstant bleibt, der Luftwiderstand hingegen wächst. Ab einem gewissen Tempo halten sich beide die Waage, so dass keine weitere Beschleunigung stattfindet. Die jetzt erreichte Endgeschwindigkeit hängt von der Größe des Tropfens ab: je größer, desto schneller.

Doch wie Forscher schon vor Jahren feststellten, bewegen sich kleine Tröpfchen oft mit einem Tempo deutlich oberhalb dieses Limits – ein Befund, der zunächst als Messfehler verworfen wurde. Michael Larsen vom College of Charleston (USA) und seine Kollegen fanden das Ergebnis aber nun bestätigt. Das Team wertete die Daten von 22 Niederschlagsmessern aus, die bei sechs verschiedenen Regenschauern insgesamt 1,5 Millionen Tropfen analysierten. Fazit: Ein bis zwei Drittel aller Tröpfchen, die Durchmesser um 0,3 Millimeter aufweisen, bewegen sich um mindestens 30 Prozent schneller als theoretisch möglich.

Als Grund vermuten die Wissenschaftler Zusammenstöße in der Luft. Wenn große Tropfen kollidieren, könnten sie zerplatzen – und die kleinen Bruchstücke mit dem ursprünglichen Tempo weiterfliegen, bis sie auf ihre eigene Maximalgeschwindigkeit abgebremst sind. Falls das zutrifft, müsste es weit häufiger zu Zusammenstößen kommen als gemeinhin angenommen.

Geophys. Res. Lett. 10.1002/2014GL061397, 2014



ISTOCKPHOTO / PHOTONIC

Schneller, als die Physik erlaubt? Regentropfen scheinen bei Kollisionen oft einen Impuls zu erhalten, der sie »rasen« lässt.

MEDIZIN

Mutiertes Poliovirus durchbricht Impfschutz

Die Kinderlähmung ist fast ausgerottet, pro Jahr erkranken weltweit nur noch einige hundert Menschen. Vorsicht bleibt aber geboten, wie ein internationales Forscherteam berichtet. Die Wissenschaftler haben rückblickend ein mutiertes Poliovirus identifiziert, gegen das der übliche Impfschutz nicht wirkt. Es hatte im Jahr 2010 einen schweren Ausbruch im Kongo verursacht und mehrere hundert Menschen angesteckt.

Der Epidemie erlagen damals fast 50 Prozent aller Infizierten, ein ungewöhnlich hoher Anteil. Zudem hatten sich viele Menschen angesteckt, obwohl sie geimpft waren. Die Forscher

um Christian Drosten von der Universität Bonn konnten jetzt den Erreger isolieren, auf den der Ausbruch von 2010 zurückging. Analysen ergaben, dass er mutiert ist. Dies führt zu einer Veränderung der Zielstruktur, an die normalerweise jene Antikörper andocken, die der Körper nach der Polioimpfung herstellt. Darum schützt die Impfung nicht mehr. Weitere Tests ergaben, dass das mutierte Virus auch

in Mitteleuropa gefährlich geworden wäre. Das Immunsystem von 34 deutschen Medizinstudenten, die über Impfschutz verfügten und freiwillig Blutproben abgaben, zeigte sich anfällig gegenüber dem veränderten Erreger.

Nach dem Willen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) soll die Kinderlähmung in den kommenden Jahren ausgerottet werden, wie zuvor schon die Pocken. Das kann gelingen, weil das Poliovirus nur von Mensch zu Mensch springt und keine tierischen Zwischenwirte hat. Bislang herrschte die Ansicht vor, die Polioimpfstoffe wirkten sehr gut. Eine mutierte Erregervariante, die den Impfschutz durchbricht, würde den Kampf gegen die Kinderlähmung erheblich erschweren.

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 10.1073/pnas.1323502111, 2014

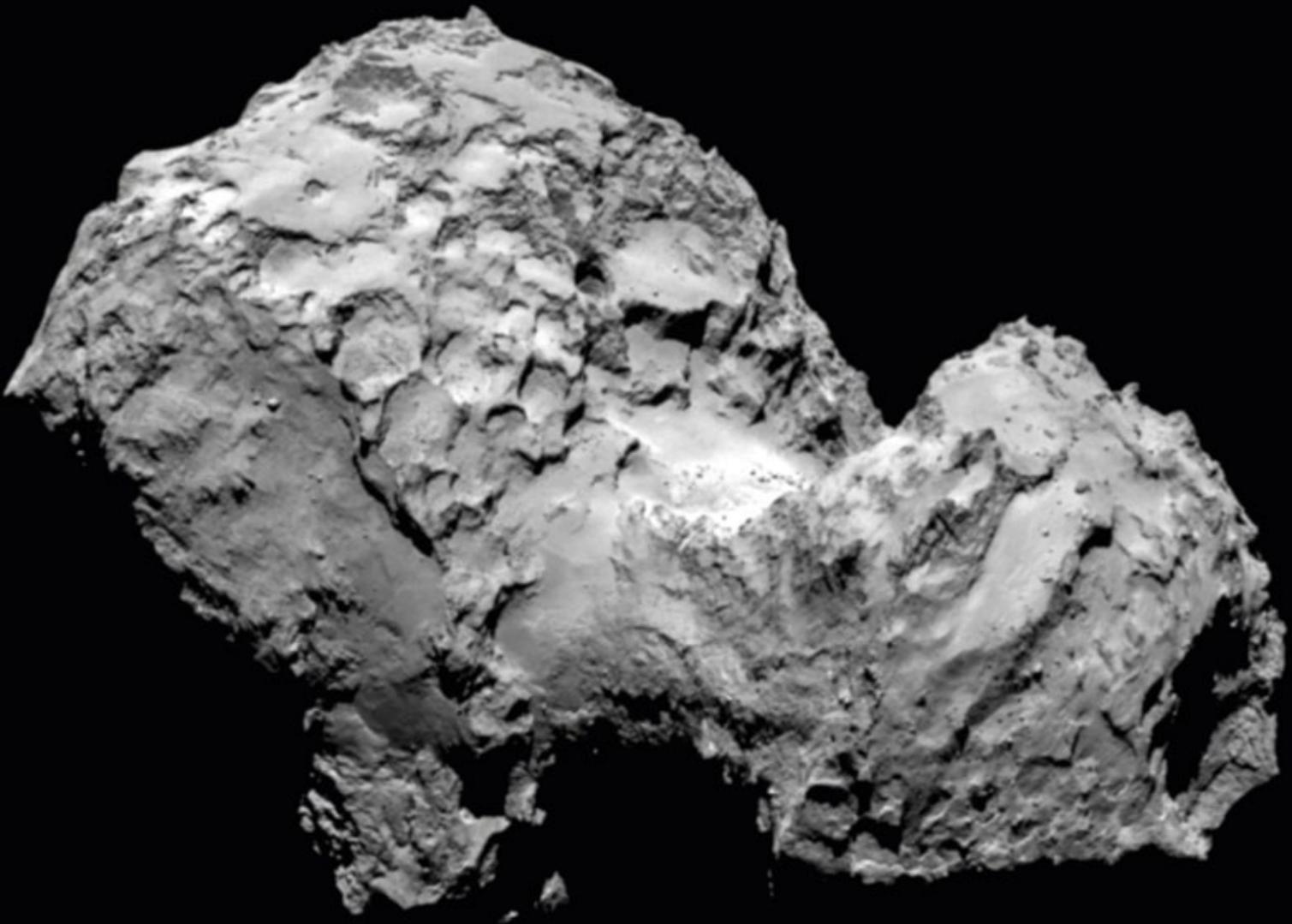
Verabreichung eines oralen Impfstoffs gegen die Poliomyelitis (kurz Polio, »Kinderlähmung«).



CDC / CHRIS ZAHNBER, B.S.N., R.N., M.P.H.

KOSMISCHE KARTOFFEL

Nach zehn Jahren Flugzeit erreichte die Raumsonde Rosetta der Europäischen Weltraumorganisation ESA im August ihr Ziel: den Kometen Tschurjumow-Gerasimenko. Sie begleitet ihn nun auf dem Weg zur Sonne. Nie zuvor befand sich ein künstlicher Satellit in der Umlaufbahn eines Kometen. Der etwa $4 \times 3,5$ Kilometer messende zerklüftete Himmelskörper besteht, wie sich überraschend herausstellte, aus zwei unterschiedlich großen, sich seitlich berührenden Klumpen. Wie alle Kometen ist er ein Relikt der Staubscheibe, aus der vor etwa 4,6 Milliarden Jahren unser Sonnensystem entstand. Die ESA-Forscher ermitteln jetzt einen geeigneten Landeplatz für das Minilabor Philae, das Rosetta im November auf dem Himmelskörper absetzen soll, um seine Zusammensetzung zu ermitteln. Aktuelle Meldungen über die Mission finden Sie unter: www.spektrum.de/rosetta.



BIOLOGIE

Haie geben Einblick in die Evolution des Immunsystems

Alle Wirbeltiere besitzen ein »adaptives« Immunsystem, das Antikörper und Oberflächenrezeptoren von Immunzellen zur Identifizierung von Fremdkörpern verwendet. Untersuchungen an Knorpelfischen bringen seine uralten evolutionären Wurzeln an den Tag.

VON MICHAEL GROSS

Haie sind nicht nur durch Überfischung und Umweltzerstörung bedroht, sondern werden gelegentlich auch aus Angst vor Angriffen auf Menschen gezielt getötet, wie etwa in letzter Zeit in Australien. Dabei sprechen die Statistiken eine klare Sprache: Durch Haiattacken sterben pro Jahr durchschnittlich weniger als zehn Menschen. Umgekehrt bringen Menschen jährlich schätzungsweise 40 Millionen Haie um – oder sogar noch mehr.

Anstatt die Meeresräuber zu jagen, sollten wir uns jedoch besser mit ihren Besonderheiten vertraut machen, denn sie zählen zu der evolutionär ältesten Abzweigung im Stammbaum der Wirbeltiere: zur Klasse der Knorpelfische. Wie der Name nahelegt, hat diese Gruppe den Entwicklungsschritt der Bildung von harten Knochen innerhalb weicher Knorpel nicht mitgemacht, obwohl sie durchaus widerstandsfähige Strukturen an deren Oberfläche bilden kann.

Rein abstammungsmäßig sind die Knochenfische, von den Guppys im Aquarium bis zum Kabeljau auf dem Teller, damit deutlich näher mit uns Menschen verwandt als mit Haien und Rochen. Deshalb kann man aus dem Vergleich von Knorpelfischen und anderen Wirbeltieren einiges über deren Anfänge vor etwa 500 Millionen Jahren lernen.

Kürzlich veröffentlichte ein internationales Team unter Leitung von Byrapa Venkatesh von der Nationaluniversität Singapur und Wesley Warren von der Washington University in St. Louis, USA, die erste entschlüsselte Genomsequenz eines Knorpelfisches. Es handelt sich dabei allerdings um die Aust-

ralische Pflughnasenchimäre (*Callorhynchus milii*), die nicht zu der Unterklasse der Plattenkiemer gehört wie Haie und Rochen, sondern zu den Holocephali. Das Erbgut dieser Art ist mit knapp einer Milliarde DNA-Buchstaben relativ klein für ein Wirbeltier, was die Spezies für das Genomprojekt attraktiv machte (*Nature* 505, S. 174–179, 2014).

Harte Konkurrenz für den Quastenflosser

Der Vergleich mit den zahlreichen schon bekannten Genomen von Knochen bildenden Wirbeltieren zeigte, dass *C. milii* von allen bisher untersuchten Arten am langsamsten evolvierte. Ihr Erbgut hat sich in den letzten 450 Millionen Jahren sogar noch gemächlicher verändert als das des Quastenflossers – des traditionellen Musterbeispiels eines »lebenden Fossils«, der mit uns Landwirbeltieren aber noch vergleichsweise nahe verwandt ist. Das Genom der Pflughnasenchimäre dürfte sich deshalb als besonders aufschlussreich für unser Verständnis der ertümlichsten Wirbeltiere erweisen, wie sie damals vor der Aufspaltung in Knochen- und Knorpelfische existierten.

Unter anderem liefert es bereits eine erste Antwort auf die ebenso grundlegende wie offensichtliche Frage: Warum bilden die Knorpelfische nur Knorpel und keine Knochen? Anhand der nun bekannten DNA-Sequenzen stellen die Genforscher fest, dass diese Tiere alle für die Knochenbildung erforderlichen Erbfaktoren besitzen außer einer Genfamilie namens *SCPP* (Abkürzung für englisch: secretory calcium-binding phosphoprotein), die entschei-

dend an der Knochenentstehung mitwirkt. Ihre Mitglieder entstanden durch Genverdoppelung aus dem so genannten *Sparc-like-1*-Gen. Das geschah vermutlich im gemeinsamen Vorfahren der Knochenfische, nachdem sich ihre Linie von jener der Knorpelfische abgespalten hatte.

Des Weiteren nahm das Team die Komponenten des Immunsystems unter die Lupe. Es zeigte sich, dass dieses bereits viele grundlegende Eigenschaften mit unserem gemeinsam hat, unter anderem auch die Rolle von Antikörpern und Killerzellen. Andererseits scheint es ein deutlich rudimentäreres System von regulierenden Immunzellen und Helferzellen zu geben. Um sicherzugehen, dass es sich um generelle Eigenheiten der Knorpelfische und nicht nur der engeren Verwandtschaft von *C. milii* handelt, bestätigten die Forscher ihre Ergebnisse am Atlantischen Ammenhai (*Ginglymostoma cirratum*).

Schon länger ist bekannt, dass Haie außer dem üblichen Typ von Antikörpern (fachlich: Immunglobulinen), der jeweils aus zwei schweren und zwei leichten Aminosäureketten besteht, zusätzlich auch solche ohne die leichten Ketten besitzen. Bei diesen dürfte daher der variable Erkennungsbereich für Antigene – der die bemerkenswerte Anpassungsfähigkeit und das Gedächtnis des Immunsystems ermöglicht – auf ein Molekül beschränkt sein, während bei Standard-Antikörpern zwei Moleküle (je eine schwere und eine leichte Kette) an der Antigenerkennung beteiligt sind.

Im Genom von *C. milii* fanden die Forscher die Gene für diese Region in



BRAPPA VENKATESH, INSTITUTE OF MOLECULAR AND CELL BIOLOGY, A*STAR, SINGAPORE

Woher die Australische Pflughnaschimäre (*Callorhynchus milii*) ihren Namen hat, ist unschwer zu erkennen. Jetzt wurde das Erbgut des urtümlichen Knorpelfischs entziffert.

enger Nachbarschaft mit denen eines T-Zell-Rezeptors. Vermutlich entstand demnach der für das Aufspüren fremder Moleküle zuständige variable Abschnitt der Schwere-Ketten-Antikörper durch Genverdoppelung aus jenem Teil eines urtümlichen T-Zell-Rezeptors, der die gleiche Aufgabe erfüllte. Als sich die Wege von knochigen und knorpeligen Arten trennten, war die Rolle der Killer-T-Zellen bei der Infektionsbekämpfung wohl schon etabliert, aber die Entwicklung von Antikörpern noch im Gang.

Die Arbeitsgruppe von Johannes Buchner an der Technischen Universität (TU) München hat nun zusammen mit Michael Groll und Michael Sattler an der TU sowie Kollegen in den USA erstmals ein vollständiges Strukturmodell eines solchen Schwere-Ketten-Antikörpers aus einem Hai erstellt. Jede der beiden identischen schweren Ketten besteht aus fünf konstanten Abschnitten (Domänen) sowie einem variablen. Die Forscher konnten die Gestalt der ersten vier konstanten Domänen mittels Röntgenstrukturanalyse und Kernresonanzspektroskopie bestimmen. Mit Hilfe von Röntgenstreumessungen (SAXS) modellierten sie dann die feh-

lenden Teile sowie die Gesamtstruktur des ganzen Antikörpers (*PNAS 10.1073/pnas.1321502111, 2014*).

Ein Knick macht flexibel

Ihr zufolge findet sich die grundlegende Architektur unserer Antikörper – die für Immunglobuline typische besondere 3-D-Faltung der Aminosäurekette – auch schon bei den Knorpelfischen. Dieses Bauprinzip ist also mindestens so alt wie die Wirbeltiere selbst. Den Schwere-Ketten-Antikörpern der Haie fehlt jedoch jenes Gelenk, mit dem unsere Abwehrmoleküle den Abstand zwischen den Armen der Y-förmigen Struktur variieren können. Stattdessen besitzen sie einen weiteren Knick, der mehr räumliche Flexibilität ermöglicht.

Betrachtet man die Vielfalt der heute lebenden Wirbeltiere, ist es erstaunlich und faszinierend, dass sich die Grundzüge des Immunsystems über 450 Millionen Jahre hinweg und trotz dramatischer Änderungen in der Lebensweise und äußeren Gestalt so gut erhalten haben. Dieses komplexe Abwehrsystem dürfte demnach einen wichtigen Beitrag zum weltweiten Erfolg der Wirbeltiere geleistet haben. Weitere Untersu-

chungen an Knorpelfischen sowie der Vergleich mit Wirbellosen dürften noch tiefere Einblicke in die Herausbildung unseres Immunsystems liefern.

Zusätzlich verspricht man sich von den Antikörpern der Knorpelfische auch interessante Anwendungsmöglichkeiten in der Biotechnologie. Das Fehlen der leichten Kette vereinfacht die biotechnische Herstellung; darüber hinaus weisen die Haiantikörper eine bemerkenswerte Stabilität auf. Denn das Blut der Knorpelfische enthält wegen des Salzgehalts der Umgebung beträchtliche Mengen an Harnstoff, der wiederum die räumliche Struktur von Proteinen zerstören kann. Um unter diesen widrigen Bedingungen zu funktionieren, enthalten die Antikörper unter anderem eine zusätzlich ionische Bindung zwischen zwei ihrer Regionen. Entsprechend sind sie auch unempfindlicher etwa gegenüber höheren Temperaturen, weshalb sie sich gut für den Einsatz in der Biomedizin eignen, zum Beispiel für die Entwicklung therapeutisch nutzbarer Antikörper.

Michael Groß ist Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford, England.

Neuer Exot im Teilchenzoo

In aller bisher bekannten Materie verbanden sich immer nur zwei oder drei der Quarks genannten Elementarteilchen. Kompliziertere Gebilde waren rein theoretische Kuriositäten – bis Physiker nun ein Teilchen aus vier Quarks fanden.

VON JENS SÖREN LANGE UND ULRICH UWER

Die gewöhnlichen Atome um uns herum bestehen aus Atomkernen und Elektronen. Die Elektronen gehören nach heutigem Verständnis bereits zu fundamentalen, nicht weiter teilbaren Bausteinen. Die Kerne setzen sich aus Protonen und Neutronen zusammen, in denen wiederum kleinere Teilchen aneinandergebunden sind – die »Quarks«. Bei diesen konnten Forscher bisher keine weitere Struktur entdecken, Quarks gehören daher offenbar genau wie die Elektronen zu den kleinsten Bausteinen der Materie.

Teilchenphysiker kennen sechs verschiedene Sorten dieser Quarks mit den Namen up, down, strange, charm, bottom und top, abgekürzt mit den Buchstaben u, d, s, c, b und t. Wie auch das Elektron tragen Quarks eine elektrische Ladung, allerdings beträgt sie immer nur ein oder zwei Drittel der Elektronenladung. Bei Atomkern und Elektron sorgt die elektrische Anziehung dafür, dass sich Atome bilden können. Komplizierter ist es bei den Quarks: Der Grund dafür, dass sich mehrere von ihnen beispielsweise zu Neutronen und Protonen verbinden können, ist nämlich nicht die elektromagnetische Kraft zwischen den Quarks, sondern die »starke Kernkraft«. Quarks tragen als Quelle dieser Kraft eine so genannte starke Ladung. Sie heißt auch Farbladung – und die Theorie, welche diese Wechselwirkung beschreibt, Quantenchromodynamik (QCD).

Die starke Kraft unterscheidet sich von der elektrischen durch einige wichtige Merkmale. Zum einen ist die Anziehung zwischen den Farbladungen um vieles stärker. Das erklärt, warum Atomkerne so stabil und kompakt sind. Zum anderen gibt es mehr als eine Farb-

ladung. Die elektrische Kraft kennt nur die negative Ladung sowie ihr positives Gegenstück als Antiladung. Bei den Farbladungen gibt es drei verschiedene Ladungen – Rot, Grün und Blau – mit ihren jeweiligen Antiladungen. So addieren sich beispielsweise Rot und Antirrot zu null, aber auch Rot, Grün und Blau ergeben einen »farbneutralen« Zustand.

Bunte, untrennbare Vielfalt

Die Kraft zwischen den Farbladungen ist so enorm groß, dass ein einzelnes Quark nicht einfach aus einem gebundenen Zustand entfernt werden und frei existieren kann, so wie etwa Elektronen oder Protonen. Die Quarks sind in den Teilchen, die sie zusammensetzen, eingeschlossen und derart gebundene Quarkzustände sind immer farbneutral.

Bisher glaubten Teilchenphysiker, dass in der Natur nur zwei verschiedene Klassen von gebundenen Quarkzuständen, so genannten Hadronen, existieren: »Mesonen« aus einem Quark und Antiquark, die jeweils Farbe und Antifarbe tragen, sowie »Baryonen«, die aus drei Quarks verschiedener Farbladung bestehen. Die Protonen und Neutronen der Atomkerne sind Baryonen. Die elektrische Ladung solcher gebundener Zustände ist immer ganzzahlig, im Fall der Kernteilchen etwa addiert sich die Ladung von drei Quarks zu null oder eins. Die QCD erlaubt dutzende Kombinationen aus den sechs Quarks und ihren sechs Antiquarks. Es gibt etwa Mesonen, die ihr eigenes Antiteilchen sind, wie das Psi-Meson aus einem c- und einem Anti-c-Quark. Die meisten dieser Teilchen sind aber nicht besonders stabil. Sie entstehen bei-

spielsweise, wenn andere energiereiche Teilchen miteinander kollidieren, und zerfallen oftmals wieder in Sekundenbruchteilen.

Hadronen mit Kombinationen aus mehr als drei Quarks – wie so genannte Tetraquarks mit zwei Quarks und zwei Antiquarks, oder »Pentaquarks« mit vier Quarks und einem Antiquark – schließt die QCD zwar nicht aus, Teilchenphysiker konnten sie bei ihren Experimenten aber bislang nicht mit Sicherheit beobachten.

Die extrem kurzen Lebensdauern vieler künstlich erzeugter Teilchen macht es schwer, sie eingehend zu studieren. Forscher leiten ihre Eigenschaften aus den Ursprungs- und Zerfallsprodukten her, aus deren Energien und den Richtungen, in die sie durch die Detektoren fliegen. Um ein Teilchen zu entdecken oder gar näher zu untersuchen, müssen sie oft die Daten aus Millionen Einzelexperimenten kombinieren.

Eine der ersten und wichtigsten Eigenschaften, anhand derer Physiker die Hadronen identifizieren, ist deren Masse. Diese setzt sich aus den Massen der beteiligten Quarks und aus der Bindungsenergie auf Grund der starken Kraft zusammen. Die Einheit ist Elektronvolt: Ein Proton hat dann beispielsweise die Masse von 1000 Megaelektronvolt (MeV).

Bereits 2008 machten die Physiker des Belle-Experiments im japanischen Tsukuba eine überraschende Beobachtung. Dort entstanden täglich bis zu eine Million so genannter B-Mesonen. Bei diesen Teilchen ist eines der Quarks ein b-Quark, das zweite ein u- oder d-Quark. In dieser »B-Mesonen-Fabrik« wollten die Forscher sehr seltene Zerfälle der Mesonen und ihrer Antiteilchen



Aufbau von Hadronen aus Quarks and Antiquarks. Die hier verwendeten Farben stehen symbolisch für die Farbladungen. Links: Meson mit einem Quark mit Farbe (Rot) und einem Antiquark mit Antifarbe. Mitte: Baryon aus drei Quarks mit drei verschiedenen Farben (Rot, Grün, Blau). Rechts: möglicher Aufbau eines Tetraquarks mit zwei Quarks und zwei Antiquarks.

untersuchen. Der aufgezeichnete Datensatz von Belle umfasste 2008 über eine Milliarde Zerfälle in eine Vielzahl unterschiedlicher leichter Teilchen.

In einer dieser Zerfallskombinationen identifizierte das Belle-Team erstmals einen bis dahin unbekanntem Zustand über seine Masse. Bei einer bestimmten Energie entstanden sehr viel mehr Teilchen, als das bei einer rein zufälligen Verteilung zu erwarten gewesen wäre – ein Hinweis, dass hier die umherfliegenden Materiebausteine kurzzeitig zu einem gebundenen Zustand zusammenfanden. Das neue Teilchen, das wegen seiner Masse von 4430 MeV $Z(4430)$ heißt, zerfiel in ein neutrales Psi-Meson und ein geladenes weiteres Meson. Da bei jedem Zerfall stets die Gesamtladung erhalten bleibt, ist also auch das $Z(4430)$ geladen.

Indem sie seinen Quarkinhalt analysierten, entdeckten die Belle-Forscher das Erstaunliche an diesem Teilchen. So muss es bereits das c - und Anti- c -Quark des beobachteten Psi-Mesons enthalten, denn die leichteren u -, d - und s -Quarks hätten die große Masse des $Z(4430)$ nicht erklären können. Die Kombination von c - und Anti- c -Quark ist aber elektrisch neutral, und um eine ganzzahlige Gesamtladung zu erhalten, muss das $Z(4430)$ zumindest noch ein u - und Anti- d -Quark aufweisen. Da keine Quarks verloren gehen oder erzeugt werden konnten, muss es sich um einen Zustand mit mindestens vier

dieser Elementarteilchen handeln. Das stellte aber die Lehrmeinung auf den Kopf, dass gebundene Quarkzustände nur als Mesonen mit zwei oder als Baryonen mit drei Quarks vorkommen. Laut einer möglichen anderen Erklärung setzte sich der Zustand aus zwei molekülartig gebundenen Mesonen zusammen.

Geduldiges Datensammeln für die ersehnte Bestätigung

Das $Z(4430)$ ist sehr selten – es entsteht nur bei einem von 30000 B-Zerfällen. Das erschwerte die Untersuchung erheblich und ist auch der Grund dafür, dass es daraufhin zunächst mit keinem unabhängigen Experiment gelang, die Ergebnisse der Belle-Gruppe zu überprüfen. Im April 2014 präsentierten Forscher vom LHC, dem weltgrößten Teilchenbeschleuniger bei Genf, dann ein weitaus stärkeres Signal. Das »LHCb«-Team identifizierte das $Z(4430)$ im gleichen Zerfall wie die Belle-Gruppe und bestätigte den exotischen Charakter des Teilchenzustands.

Das LHCb-Experiment ist eines der vier großen Messstationen am LHC. Anders als bei den bekannteren Experimenten ATLAS und CMS jagen und untersuchen die Forscher mit LHCb aber nicht das Higgs-Boson, sondern nutzen die enorme Menge von B-Mesonen, die in den Teilchenkollisionen erzeugt werden. So suchen sie ähnlich wie bei Belle nach winzigen Unterschieden zwischen

B- und Anti-B-Zerfällen. Pro Sekunde entstehen am Kollisionspunkt des Detektorapparats bis zu 200000 B-Mesonen. Für den Fund des $Z(4430)$ analysierten die Forscher Daten der Jahre 2011 und 2012 von insgesamt etwa 500 Milliarden produzierten B-Mesonen. Hier trat das Signal nun sehr deutlich hervor. Damit wiesen sie den neuen Teilchenzustand $Z(4430)$ nun zweifellos nach und bestimmten außerdem weitere Eigenschaften, wie etwa den Spin (ein quantenmechanischer Drehsinn) und die Parität, das Verhalten bei räumlicher Spiegelung. Diese Informationen halfen auch dabei, alternative Erklärungen auszuschließen. Damit ist das $Z(4430)$ das erste Teilchen aus vier Quarks, dessen Existenz eindeutig bestätigt werden konnte, wie die Forscher in ihrer Veröffentlichung (*Physical Review Letters* 112, 222002, 2014) schreiben.

Damit ist auch klar: Es muss noch mehr Tetraquarks geben – dafür gibt es auch bereits Kandidaten. Theoretisch sind sogar Systeme mit fünf, sechs oder noch mehr Quarks möglich. Bei Belle und am LHCb-Experiment verbessern die Teilchenphysiker ihre Apparaturen derzeit grundlegend, was ihnen in den kommenden Jahren erlauben wird, noch genauer nach weiteren Multi-quarks zu suchen. Sie werden die neu entdeckten Teilchen eingehend untersuchen, um ihre Struktur zu verstehen. Damit kommen dann auch die theoretischen Vorhersagen der QCD für solche Systeme – etwa dazu, wie stark die Teilchen aneinandergelassen sind – auf den Prüfstand. So werden die Forscher allmählich die komplexe Dynamik der Teilchen besser begreifen, und vielleicht sogar Lücken in unserem Verständnis dieser Materie aufzeigen. Jedenfalls stehen die Chancen für neue Überraschungen gut.

Jens Sören Lange ist Sprecher der deutschen Sektion der Belle- und Belle-II-Experimente in Japan und hat sich mit Ergebnissen zu exotischen Hadronen an der Universität Gießen habilitiert. **Ulrich Uwer** (Universität Heidelberg) arbeitet seit 2001 am LHCb-Experiment und ist Sprecher der deutschen LHCb-Physiker.

Senkrechtstarter bei Solarzellen

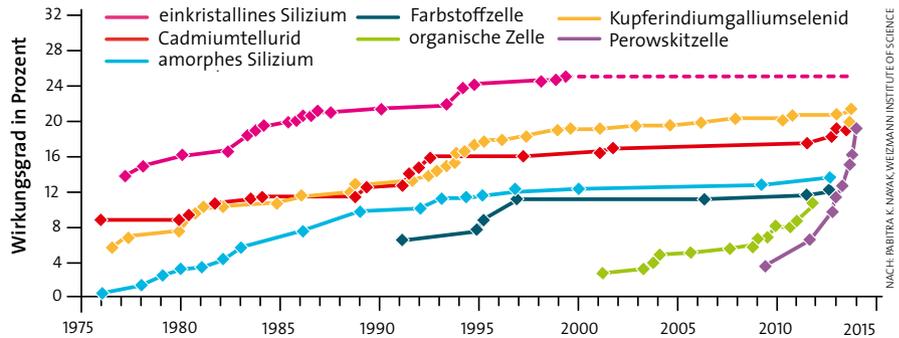
Perowskite könnten dem Silizium beim Erzeugen von Solarstrom den Rang ablaufen. Im Labor lassen sich damit bereits ähnlich hohe Wirkungsgrade erreichen. Dabei sind sie viel preiswerter.

VON ROBERT F. SERVICE

In Diagrammen, welche die Fortschritte bei den unterschiedlichen Typen von Solarzellen zeigen, sticht eine Kurve eklatant hervor (Bild rechts). Über Jahrzehnte hinweg gab es bei allen Fotovoltaikmaterialien – etwa Paneelen mit Wafern aus kristallinem Silizium oder dünnen Filmen aus Cadmiumtellurid – langsame, stetige Verbesserungen. Nun beeindruckt ein Neuzugang jedoch mit einem rasanten Schnellstart. Das Material namens Perowskit betrat die Szene erst 2009 mit Zellen, deren Wirkungsgrad gerade einmal 3,8 Prozent betrug – ein mickriger Wert angesichts der 25 Prozent, die Spitzensiliziumzellen im Labor erreichten. Bis Ende 2011 hatte er sich jedoch auf 6,5 Prozent fast verdoppelt, und 2012 kletterte er auf 10 Prozent. Als er 2013 die 15-Prozent-Marke knackte, überholte er damit Konkurrenten, die jahrzehntelang optimiert worden waren. Ende April dieses Jahres meldeten Forscher auf einem Kongress in San Francisco schließlich den neuesten Rekordwert von knapp 20 Prozent.

Und das Material hat weitere Vorteile. Perowskite lassen sich aus leicht erhältlichen Substanzen herstellen. Im Gegensatz zu manchen anderen Solarzellen sind sie zudem einfach und preiswert zu produzieren. Aber was vielleicht das Beste ist: Verbindet man Perowskit-Solarzellen mit Siliziumpaneelen, sollten Tandemzellen mit Wirkungsgraden deutlich über 30 Prozent entstehen. »Es gibt eine Woge der Begeisterung, und sie breitet sich immer weiter aus«, schwärmt Michael McGehee, Werkstoffkundler an der Stanford University (Kalifornien).

Allerdings sind die meisten Perowskitzellen bisher nicht größer als eine Briefmarke und erzeugen nur wenige Milliampere an elektrischem Strom. Außerdem zersetzen sie sich an der



Vergleicht man die Steigerung des Wirkungsgrads der verschiedenen Solarzelltypen seit 1975, stechen die erst 2009 entdeckten Perowskitzellen durch einen besonders steilen Anstieg hervor.

Luft, und die besten enthalten das giftige Blei. Doch die Forscher sind zuversichtlich, dieses Problem zu meistern. Bisher gibt es nur einige Dutzend Veröffentlichungen über die neuen Zellen, die von einer Hand voll Forschungsgruppen stammen. Das dürfte sich bald ändern. »Die Leute stürzen sich auf das Gebiet«, meint McGehee. Anhand seiner vielfältigen Kontakte mit Kollegen schätzt er, dass sich mittlerweile mehr als 100 Teams mit Perowskiten beschäftigen.

Der richtige Mix

Dabei ist die Stoffgruppe schon seit Langem bekannt. Ein russischer Mineraloge entdeckte den ersten natürlich vorkommenden Perowskit bereits 1839. Inzwischen existieren hunderte Varianten. Die Bezeichnung charakterisiert alle salzartigen Stoffe mit einer bestimmten Kristallstruktur. In ihr bilden die Anionen Oktaeder, die über die Ecken in allen drei Raumrichtungen miteinander verbunden sind (Grafik S. 18). Bei den Exemplaren für Solarzellen handelt es sich um Halbleiter. Doch die Spanne reicht von metallischen Leitern bis zu Isolatoren, wobei die be-

rühmtesten Vertreter jene Kupferoxid-Hochtemperatursupraleiter sind, die 1986 für Aufsehen sorgten.

In den 1990er Jahren verfertigte der Physiker David Mitzi am Thomas J. Watson Research Center der Firma IBM in Yorktown Heights (New York) Dünnschichttransistoren und LEDs (Licht emittierende Dioden) aus einem halbleitenden Perowskit. Die Geräte funktionierten. Obwohl viele Licht emittierende Materialien auch gute Absorber sind – und damit potenziell geeignet für Solarzellen –, schätzte der Forscher seine Perowskite aber als zu instabil für die Fotovoltaik ein, bei der sie Jahrzehnte unbeschadet überdauern müssen, um eine Chance als kommerzielle Produkte zu haben.

Knapp zehn Jahre später versuchte sich Tsutomu Miyasaka an der Lösung des Stabilitätsproblems. Der Chemiker von der Toin-Universität in Yokohama (Japan) arbeitete zusammen mit Kollegen an so genannten Farbstoffsolarellen, die nach ihrem Erfinder Michael Grätzel von der Eidgenössischen Technologischen Hochschule in Lausanne auch Grätzelzellen genannt werden. Sie enthalten in einem Elektrolyten winzi-

MACH: BIBITRA K. NARAK-WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE



„Meine Energiewende ist einfach und spart bares Geld!“

Macht den Kühlschrank zum Sparschrank:
Die Sparkassen gratulieren der
Gewinnerin des Energiewendepreises.



Großes Finale beim Energiewendepreis der Sparkassen: Cathrin Eichbaum aus Dortmund holt den ersten Platz. Ihr Tipp: Mit Luft gefüllte Frischhaltedosen reduzieren beim Öffnen der Kühlschranktür das neue Eindringen von Warmluft – so kann jeder kinderleicht Energie sparen. Noch weiter herunterkühlen lässt sich die Temperatur übrigens mit Coolpacks. Eine von vielen Ideen, die zeigen, dass die Energiewende zu Hause anfängt. Alle Ideen auf: www.meine-energiewende.de/projekte/

ge anorganische Partikel – meist aus Titandioxid –, die mit einem organischen Farbstoff beschichtet sind. Wenn ein Farbstoffmolekül ein Photon absorbiert, geht ein Elektron in einen angeregten Zustand über, von dem es auf das Titandioxidteilchen springt. Anschließend hüpfte es so lange von Partikel zu Partikel, bis es zu einer Elektrode gelangt und von dort in den Stromkreis eintritt. Zum Ausgleich wechselt ein anderes Elektron von dem Elektrolyten zum Farbstoff und überführt diesen wieder in den Ausgangszustand.

Verbesserungen im Eiltempo

Das Problem ist laut Grätzel, dass der Farbstoff nicht jedes Photon absorbiert, das darauf trifft, was den Wirkungsgrad verringert. Hier erhoffte sich Miyasaka von den Perowskiten eine Verbesserung. Laut eigenem Bekunden brauchte einer seiner Mitarbeiter zwei Jahre zur Entwicklung eines Rezepts, um das Material zumindest stabil genug für eine kurze Demonstration zu machen. Am 6. Mai 2009 stellte die Gruppe im »Journal of the American Chemical Society« ihre neuen Solarzellen vor, die statt des Farbstoffs eine dünne Schicht aus einem lichtabsorbierenden Perowskit enthielten. Der Wirkungsgrad betrug 3,8 Prozent. Allerdings funktionierten die Zellen immer nur kurz; denn der verwendete Flüssigelektrolyt löste den Perowskit innerhalb weniger Minuten auf.

Den nächsten Schritt unternahm Grätzel zusammen mit Nam-Gyu Park und seinen Kollegen an der Sungkyunkwan-Universität in Suwon (Südkorea). Sie ersetzten den Flüssig- durch einen Feststoffelektrolyten und erreichten so einen Wirkungsgrad von knapp zehn Prozent, worüber sie am 21. August 2009 im Fachmagazin »Scientific Reports« berichteten. Damit begann die Geschichte interessant zu werden.

Als Nächstes suchte Grätzel nach besseren Züchtungsmethoden für das Material. Bisher hatten seine Gruppe und andere Forscher einfach die Ausgangssubstanzen in einem Lösungsmittel zusammengemischt und die Flüssigkeit abgedampft. Dabei kristalli-

sieren die Perowskite aus. Auf diese Weise entstehen jedoch Teilchen ganz unterschiedlicher Form und Größe. Um den Vorgang besser steuern zu können, gingen Grätzel und seine Kollegen zu einem zweistufigen Verfahren mit zwei verschiedenen Lösungsmitteln über. Das Ergebnis waren gleichmäßigere Überzüge der Titandioxidpartikel. Zugleich schnellte der Wirkungsgrad auf 15 Prozent empor, wie die Gruppe am 18. Juli 2013 bekannt gab.

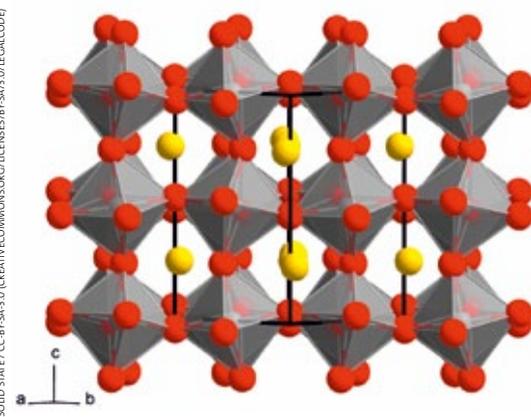
Derweil machte Henry Snaith, der zuvor bei Grätzel gearbeitet hatte, an der University of Oxford (England) eine weitere Entdeckung. Sein Team wollte wissen, ob das Titandioxid eine entscheidende Rolle spielte, und ersetzte es deshalb durch ein poröses Aluminiumoxid, das keine Ladungen zu transportieren vermag. Die Forscher erwarteten deshalb, dass die Zelle nicht mehr funktionieren würde. Doch das Gegenteil war der Fall: Sie arbeitete besser als zuvor.

Damit war klar, dass der Perowskit nicht nur als Lichtabsorber diente, sondern auch als Halbleiter Ladungen transportieren konnte. Wozu sich also mit Titandioxid oder Aluminiumoxid abgeben, dachten die Forscher und erzeugten einfach durch Gasphasenabscheidung dünne Filme ihres Perowskits, die sie zwischen die Elektroden einbettete. Der Wirkungsgrad lag auch in diesem Fall bei 15 Prozent.

Den aktuellen Rekordwert von 19,3 Prozent erzielte Yang Yang von der University of California in Los Angeles. Seine Arbeitsgruppe optimierte den Züchtungsprozess für Perowskit weiter und sorgte so dafür, dass weniger Kristalldefekte auftraten, die elektrische Ladungen einfangen. Zugleich verbesserte er die Grenzflächen zwischen dem Material und benachbarten Schichten. Mit ähnlichen Maßnahmen hatte Park zuvor bereits einen Wert knapp über 17 Prozent geschafft.

Günstige Eigenschaften

Was ist der Grund für die rasanten Fortschritte? Zum großen Teil liegt es wohl daran, dass Perowskite generell nur wenige Fehlstellen in ihrem Kristallgitter



Als Perowskite bezeichnet man Salze mit einer besonderen Kristallstruktur. Die Anionen (rot) ordnen sich darin zu Oktaedern an, die über ihre Ecken verknüpft sind. Eine Sorte von Kationen (grau) befindet sich im Zentrum der Oktaeder, die andere (gelb) zwischen ihnen.

aufweisen, meint der Werkstoffkundler David Cahen vom Weizmann-Institut in Rehovot (Israel). Diese Eigenschaft teilen sie mit anderen Spitzenmaterialien für Solarzellen wie Galliumarsenid und kristallinem Silizium. Bei Letzterem erfordert es allerdings extrem hohe Temperaturen beziehungsweise Apparate im Wert von mehreren Millionen Euro, um weit gehend defektfreie Kristalle zu züchten. Perowskite dagegen lassen sich in fast perfekter Form einfach bei 80 Grad Celsius aus einer Lösung abscheiden.

Die Abwesenheit von Fehlstellen hat eine wichtige Konsequenz: Elektrische Ladungen können in Perowskiten ungehindert weite Strecken zurücklegen. Und je größer diese Diffusionslänge, desto höher der Wirkungsgrad. Bei organischen Solarzellen beträgt sie typischerweise zehn Nanometer. In Perowskiten können die Ladungsträger dagegen ungestört bis zu einem Mikrometer weit wandern. »Damit kann man sie über größere Distanzen hinweg abgreifen«, erläutert Grätzel; also tragen mehr davon zum Stromfluss bei.

Perowskite liefern auch besonders hohe elektrische Spannungen. Darin ähneln sie kristallinem Silizium. Bei diesem braucht es Photonen mit einer Energie von mindestens 1,1 Elektron-

volt (eV), um ein Elektron von einem Atom loszureißen, so dass es sich frei bewegen kann. Wenn dieses Teilchen schließlich eine Elektrode erreicht und dort in den Stromkreis eintritt, hat es immerhin noch eine Energie von 0,7 eV – ein relativ geringer Verlust von 0,4 eV, der die überragende Bedeutung des Siliziums in der Fotovoltaik erklärt. Perowskite erreichen denselben niedrigen Wert. Bei Farbstoff- und organischen Solarzellen beträgt der Verlust dagegen 0,7 bis 0,8 eV.

Die neuen Solarzellen schneiden auch bei einer dritten Kenngröße gut ab: dem so genannten Füllfaktor. Er gibt das Verhältnis zwischen der tatsächlich erbrachten und der theoretisch maximal möglichen Leistung an. Laut Grätzel haben die besten Solarzellen aus Silizium heute Füllfaktoren von 80 Prozent. Bei den Perowskiten liegt der Wert zwischen 60 und 70 Prozent. Es besteht also noch Luft nach oben. Dasselbe gilt für die Menge an produziertem Strom. Deshalb erwartet McGehee weitere deutliche Anstiege beim Wirkungsgrad – auf weit mehr als 20 Prozent in ein bis zwei Jahren.

Noch rasantere Steigerungen könnte es mit Unterstützung des heutigen Champions geben: Silizium. Daraus gefertigte kommerzielle Solarzellen erreichen inzwischen Wirkungsgrade zwischen 17 und 23 Prozent. »Die Siliziumindustrie zu verdrängen dürfte schwer sein«, meint McGehee. Obwohl auch jetzt schon Alternativen wie dünne Filme aus Kupferindiumgalliumselenid existieren, die weit weniger Material erfordern und daher preiswerter sind, konnten sie Silizium nicht vom Thron stoßen, weil ihr Wirkungsgrad geringer ist. Dadurch benötigen die Verbraucher mehr Paneele für dieselbe Strommenge, was höhere Installationskosten mit sich bringt.

Perowskite könnten dagegen auf der Erfolgswelle des Siliziums mitreiten. Während dieses seine Stärke im roten und infraroten Spektralbereich hat, sind sie besser beim Absorbieren von blauem und grünem Licht. Und weil sich Perowskite bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts von Glas

züchten lassen, kann man sie wahrscheinlich direkt auf dem Glasüberzug von Siliziumzellen anbringen. Das Ergebnis wären Tandemzellen mit mehr als 30 Prozent Wirkungsgrad, wie McGehee vermutet.

Retter in der Not

Die Solarbranche hat in den vergangenen Jahren unter einem massiven Preisverfall gelitten, der viele Unternehmen in den Ruin trieb. Risikokapitalfirmen und selbst wissenschaftliche Fördereinrichtungen haben kalte Füße bekommen und kaum noch Mittel in stagnierende Bereiche wie die organische Fotovoltaik oder Farbstoffzellen investiert, so Grätzel. »Die Stimmung war äußerst düster.« Die Perowskite kämen folglich zur rechten Zeit, um der Branche den dringend benötigten neuen Schub zu geben.

Doch bis zur Marktreife dürfte noch einige Zeit vergehen. »Es ist sehr schwierig, große zusammenhängende Filme aus Perowskit zu fertigen«, meint Cahen. Auch für das Stabilitätsproblem existiert noch keine Lösung. Perowskitzellen sind sehr empfindlich gegenüber Sauerstoff, der die Kristallstruktur zerstört, und Feuchtigkeit, in der sich das salzartige Material auflöst. Außerdem könnte das Blei der besten Zellen ausgewaschen werden und in Böden oder Abwässer gelangen.

Cahen gibt sich trotzdem optimistisch und vertraut auf die Fähigkeiten der Materialforscher. Im Spannungsfeld zwischen den Versprechungen und den noch zu bewältigenden Herausforderungen »wird sich auf dem Gebiet in den nächsten Jahren viel tun«, prophezeit Grätzel. Und bedenkt man, dass der Solarzellmarkt weltweit immer noch 40 Milliarden Euro im Jahr umsetzt, haben die Forscher auch allen Anreiz, weiterhin für einen steilen Anstieg der Fortschrittskurve bei den Perowskitzellen zu sorgen.

Robert F. Service ist Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkt Chemie und Materialforschung in Portland (Oregon).

© Science-AAAS

Internationale Fachmesse
Ideen · Erfindungen · Neuheiten

iENA In Kombination mit:
**START
MESSE**
Gründung
Finanzierung
Nachfolge
1.+2. Nov.

2014
30. Okt. - 2. Nov.

- **Neue Ideen für den Markt.**
Die iENA 2014 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.
 - **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.
 - **iENA-Symposium**
„Erfinden und zum Unternehmer werden“, Samstag, 1.11., 10-12:30 Uhr
(Teilnahme im iENA-Eintritt enthalten)
 - **Innovationsseminar:**
„Wie schafft man Innovation“, Freitag, 31.10., 10-16 Uhr
(Teilnahme im iENA-Eintritt enthalten)
 - **Fachberatung und Information**
- Messe Nürnberg · Halle 12

In Kooperation mit:

Süddeutsche Zeitung



International
Federation of
Inventors'
Associations



PSI

Veranstalter/Organisation
AFAG Messen und Ausstellungen GmbH
☎ 09 11 - 9 88 33 - 570

iena@afag.de · www.iena.de

TECHNIK

Traue keinem Scan, den du nicht selbst gefälscht hast

Durch einen Softwarefehler haben Scankopierer der Firma Xerox bei der Datenkompression Ziffern verändert – seit acht Jahren.

VON DAVID KRIESEL

Als mir im Sommer 2013 eine Firma ein merkwürdiges Problem vorlegte, dachte ich zunächst an einen Scherz. Man habe Baupläne mit Geräten des Marktführers Xerox gescannt und in den Scans veränderte Quadratmeterzahlen entdeckt; das Problem sei reproduzierbar. Der Fehler sei nur aufgefallen, weil ein mit 21 Quadratmetern ausgezeichneter Raum deutlich kleiner gewesen sei als der daneben liegende mit nur 14 Quadratmetern.

Es war aber kein Scherz. In den Bilddateien, die das Gerät aus den Papiervorlagen angefertigt hatte, waren einzelne Zahlen sauber – und darum völlig unauffällig – durch andere ersetzt worden. Auf einem Xerox WorkCentre 7535

lieferten mehrere aufeinanderfolgende Scans desselben Dokuments immer wieder dieselben falschen Quadratmeterzahlen. Ein leistungsfähigeres WorkCentre 7556 bot unter diesen Umständen sogar Abwechslung (Bilder unten). Ich konnte den Fehler auch mit deutlich besser lesbaren Ziffern nachvollziehen (Bild S. 21).

Als Verursacher stellte sich das Bildkompressionsverfahren JBIG2 heraus. Dieser speziell für Dokumente konzipierte Algorithmus kann ein Bild, insbesondere den Scan eines Dokuments, in viele Unterbilder zerlegen. Das ist hilfreich, weil die nachfolgende Datenkompression Texte und Graustufenbilder unterschiedlich behandelt und damit ein besseres Ergebnis erzielt.

Mehr noch: Ein Unterbild kann so klein sein wie ein einzelner Buchstabe. Die Software vergleicht die Unterbilder untereinander und fasst besonders ähnliche von ihnen zu Gruppen zusammen (»pattern matching«). Eine solche Gruppe könnte beispielsweise einige hundert leicht verschiedene Versionen des Buchstabens e enthalten. Dann speichert die Software für diese Gruppe nur ein einziges e tatsächlich ab und

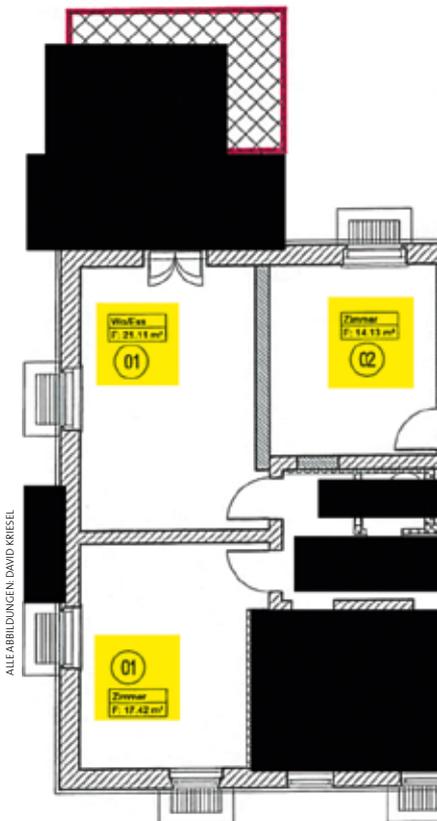
verwendet es bei der Wiedergabe immer wieder an Stelle der anderen Gruppenmitglieder. So kann man große Datenmengen einsparen.

Gleichsetzung unterschiedlicher Zeichen

Unglücklicherweise war jedoch das Pattern Matching zu grob eingestellt. Dadurch wurden ganze Zeichenblöcke als gleich angesehen und füreinander eingesetzt, obwohl sie in Wirklichkeit verschieden waren. Das Ergebnis: perfekt aussehende Dokumente, die falsche Daten enthalten.

Die Scankopierer bieten verschiedene Qualitätsstufen an; je höher die gewünschte Bildqualität, desto größer der Platzbedarf des Dokuments. Allerdings heißt die Einstellung mit der niedrigsten Qualität »normal«; um zu merken, dass es – mit den Einstellungen »higher« und »highest« – auch besser geht, muss der Anwender das Benutzermenü oder das 300 Seiten starke Handbuch sorgfältig studieren.

Bei diesen höheren Qualitätsstufen finde kein Pattern Matching statt, so die erste öffentliche Reaktion von Xerox auf meinen Bericht. Tatsächlich



In diesem Bauplan (links, teilweise geschwärzt) wurden die drei gelb markierten Stellen während des Scans verändert: Die Tabelle (rechts) zeigt sie im Original, vom Xerox WorkCentre 7535 gescannt sowie in drei verschiedenen Scans vom WorkCentre 7556.

Original	7535	7556a	7556b	7556c
Wo/Ess F: 21.11 m ² 01	Wo/Ess F: 14.13 m ² 01	Wo/Ess F: 14.13 m ² 01	Wo/Ess F: 21.11 m ² 01	Wo/Ess F: 14.13 m ² 01
Zimmer F: 14.13 m ² 02	Zimmer F: 14.13 m ² 02	Zimmer F: 14.13 m ² 02	Zimmer F: 17.42 m ² 02	Zimmer F: 14.13 m ² 02
01 Zimmer F: 17.42 m ²	01 Zimmer F: 14.13 m ²	01 Zimmer F: 14.13 m ²	01 Zimmer F: 17.42 m ²	01 Zimmer F: 17.42 m ²

ALLE ABILDUNGEN: DAVID KRIESEL

konnte ich aber nachweisen, dass die interne Software der Scankopierer ebenfalls einen Fehler enthält, so dass – entgegen den Absichten von Xerox – auch auf den höheren Qualitätsstufen Pattern Matching nicht abgeschaltet wird. Selbst ein ungewöhnlich sorgfältiger und qualitätsbewusster Anwen-

der konnte also diese Art Verfälschungen nicht verhindern.

Kopierer, die auf derart unmerkliche Weise Zeichen vertauschen, sind eine potenziell lebensbedrohliche Gefahr. Man stelle sich nur vor, dass jemand auf Grundlage der falschen Zahlen eine Autobahnbrücke baut, ein Gerichtsverfahren führt oder gar die Dosierung eines Medikaments für ein ganzes Pflegeheim bestimmt.

Nachdem ich Xerox angesprochen und zunächst keine hilfreiche Antwort erhalten hatte, dokumentierte ich den Fehler auf Deutsch und Englisch in meinem Blog unter www.dkriesel.com/xerox und fand damit nicht nur eine halbe Million Leser, sondern auch Erwähnung in Hunderten von Massenmedien weltweit. Von Xerox gab es zunächst Dementis – aber dann Neufassungen der Software für die betroffenen Kopierer. Wie sich herausstellte, steckte der Fehler in Hunderttausenden von Geräten verschiedenster Baureihen (Ta-

belle S. 22), und das seit mehr als acht Jahren.

Der Großteil der Scankopierer wird professionell von einer Vielzahl von Anwendern genutzt. Krankenhäuser, Finanzämter, Ingenieurbüros, Regierungs- und Forschungseinrichtungen scannen mittlerweile sämtliche eingehenden Schriftstücke an einer zentralen Poststelle und arbeiten nur noch mit den Scans weiter; das Original wird archiviert oder gleich entsorgt.

Risiken und irreparable Schäden

Es ist kaum abzuschätzen, welche Gefahren für Menschen oder Vermögenswerte durch acht Jahresproduktionen an möglicherweise subtil falschen Dokumenten entstanden sind – und welche Schäden irreparabel sind. Betroffen sind ja nicht nur die betreibenden Institutionen, sondern auch alle, die diesen ein Schriftstück geschickt haben und nun fürchten müssen, falsch verstanden worden zu sein.

Original	JPEG	GIF	JBIG2
1234	1234	1234	1234
5678	5678	5678	5878

Auf ein kleines Pixelbild wurden drei verbreitete Kompressionsverfahren angewandt. Während JPEG die Vorlage in 8·8 Pixel große Blöcke zerlegt und jeden Block mit Artefakten wiedergibt, neigt GIF dazu, ein Pixel mit zweifelhaftem Grauwert eher weiß als schwarz abzuspeichern. Demgegenüber sieht die JBIG2-Wiedergabe sehr sauber aus. Die gezeigten Fehler entstehen bereits bei Schriftgrößen von 7 oder 8 Punkt und Abtastraten von 200 oder 300 dpi.

ANZEIGE

Vince & Eric reisen zu den Sternen

SCHLAU & HOCH 2

Eine Wissens-Show für die ganze Familie

DIE NÄCHSTEN TERMINE

31. Oktober	MAINZ / FRANKFURTER HOF
02. November	FRANKFURT / DIE KÄS
11. November	DREIEICH / BÜRGERHAUS
18. November	WÜRZBURG / BOCKSHORN
21. Dezember	FRANKFURT / DIE KÄS

Die zwei bekannten Wissens-Moderatoren Vince Ebert (ARD, Wissen vor 8) und Eric Mayer (ZDF, pur+) reisen zusammen mit Kindern ab 8 Jahren und ihren Familien zu den Sternen, um die wirklich großen Fragen der Wissenschaft zu beantworten: Wie laut war es beim Urknall? Wie tief ist ein schwarzes Loch? Und gibt es grüne Marsmännchen?

ab 8 Jahren

Karten unter www.adticket.de und an allen VVK-Stellen. **Adticket**

Weitere Informationen unter www.schlauhochzwei.de **HERBERT MANAGEMENT**

Meister der Zeichensprache der Natur

Die mathematische Physik verlor einen ihrer Lehrer.

Manche Autoren schreiben dicke Bücher über China, ohne ein Wort Chinesisch zu können, aber wer das Reich der Mitte wirklich verstehen will, kommt ohne Kenntnis einiger tausend Schriftzeichen nicht aus. So verhält es sich auch mit der Natur: Ihr Buch ist laut Galileo Galilei in mathematischen Schriftzeichen geschrieben, und ohne Differenzial und Integral, Logarithmen und komplexe Funktionen, Matrizen und Vektorräume gibt die Natur ihre Geheimnisse nicht preis.

Das musste ich als Schüler leidvoll erfahren. Stolz hatte ich Populäres über – und sogar von – Einstein gelesen und wünschte mir darum zu Weihnachten ein Buch mit dem packenden Titel »Schwerkraft und Weltall«, verfasst von einem gewissen Pascual Jordan. Doch zu meinem Schrecken waren alle Seiten übersät mit unverständlichen Hieroglyphen, und die wenigen normalen Sätze verhöhnten mich mit Zwischenbemerkungen des Typs: »Wie sofort zu sehen ist, folgt daraus ...«

Also musste ich, wenn ich die Welt wirklich verstehen wollte, erst eine fremde Sprache lernen. So wurde ich Student der theoretischen Physik.

Mein wichtigster Lehrer an der Universität Wien war Walter Thirring. Sohn eines berühmten Vaters – nach Hans Thirring (1888–1976) ist der relativistische Lense-Thirring-Effekt benannt – und Mitautor des damaligen Standardwerks »Elementary Quantum Field Theory«. Er ließ nach Betreten des Hörsaals einen kurzsichtigen Blick über die Anwesenden schweifen, kehrte uns den Rücken, griff zur Kreide und füllte die Tafeln sukzessive mit Formeln, die er unterwegs knapp kommentierte. Was er da trieb, machte einen enorm lässigen – heute würde man sagen »coolen« – Eindruck. Manchmal entglitt ihm ein Vorzeichen, aber minus oder plus waren bei Anziehung oder Abstoßung ohnedies Konventionssache, und dass Lichtgeschwindigkeit und plancksches Wirkungsquantum der Einfachheit halber gleich eins gesetzt wurden, verstand sich von selbst.

Die Sphäre der Zeichen entfaltete sich in Thirrings Vorlesungen – heute als mehrbändiges »Lehrbuch der mathematischen Physik« erhältlich – als eine eigene Welt, in der es hinter der Alltagserfahrung ein dichtes Netz abstrakter Bezüge zu entdecken gab. Die Quantenfeldtheorie begann etwa mit dem harmonischen Oszillator, der uns Hörern als Sprungfeder oder Pendel vertraut war. Dann wurde der Raum mit infinitesimalen Oszillatoren dicht gefüllt und verwandelte sich so in ein Feld. Versah man die schwingenden Federn mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren, erlangte dieses Feld die Fähigkeit, Teilchen entstehen und vergehen zu lassen. Und so hingen alltägliche Pendel und Federn über viele Schritte abstrakter Mathematik mit exotischen Quantenprozessen zusammen.

Schon bei der klassischen Strömungslehre zeigte uns Thirring deren Verwandtschaft mit der Mathematik komplexer Zahlen. In der Relativitätstheorie unterstreicht die eigentlich »unmögliche« Wurzel aus minus eins den speziellen Charakter der Zeit gegenüber den Raumkoordinaten, und erst recht spielt die imaginäre Zahl in der Quantenmechanik eine derart zentrale Rolle, dass sie maßgeblich zu der berühmtesten Unanschaulichkeit der modernen Physik beiträgt.

Die Art, wie mein einstiger Lehrer das Spiel der Zeichen erklärte, konnte tiefen Genuss bereiten – ähnlich dem kühlen Rausch des Verstands, den ich beim Hören komplizierter Musik empfinde. Und so ist es kein Wunder, dass Walter Thirring Musik ebenso gern komponierte und praktizierte wie mathematische Physik. Am 19. August ist er im Alter von 87 Jahren verstorben.



Michael Springer

WorkCentre	232, 238, 245, 255, 265, 275, 5030, 5050, 51xx, 56xx, 57xx, 58xx, 6400, 7220, 7225, 75xx, 76xx, 77xx, 78xx
WorkCentre Bookmark	40, 55
WorkCentre Pro	232, 238, 245, 255, 265, 275
ColorQube	8700, 8900, 92xx, 93xx

Die von dem Softwarefehler betroffenen Geräte der Firma Xerox. Der Buchstabe x steht für eine beliebige Ziffer; hier geht es um ganze Gerätefamilien.

Leiter von großen Archiven, die vor Jahren ihre Bestände mit Xeroxgeräten auf PDF-Dateien umgestellt hatten, haben mich gefragt, was sie tun können, um Fehler zu finden. Die Antwort ist wenig befriedigend: Man kann zwar feststellen, ob ein Scan mit einem betroffenen Gerät ausgeführt, nicht aber, was verändert wurde. Wenn die Archivare, wie oft üblich, die Originale vernichtet haben, bleibt ihnen nur, Jahresproduktionen an Dokumenten auf Plausibilität zu überprüfen. »Xerox kann die zählendrehenden Scanner reparieren, aber nicht die veränderten Dokumente«, titelte später treffend die Wirtschaftszeitschrift »Bloomberg Businessweek«.

Xerox hat eine Korrekturdatei (einen »Patch«) für seine Software veröffentlicht; aber bis der Anwender sie installiert hat, enthält das Gerät den Fehler immer noch. Wer eines der in der Tabelle oben aufgeführten Geräte betreibt, sollte sich vergewissern, dass das Problem zumindest für die Zukunft behoben ist. Bei den Scans der letzten acht Jahre hilft nichts als eine gesunde Skepsis – wie gegenüber unserer Technikabhängigkeit insgesamt.

David Kriesel ist Diplominformatiker und arbeitet als Systemingenieur bei der IVU Traffic Technologies in Aachen. Unter dkriesel.com findet man seinen Blog zu technischen und satirischen Themen sowie sein zweisprachiges E-Book über neuronale Netze.

Eine längere Version dieses Artikels ist in den »Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung« (Band 22, S. 30–34, 2014) erschienen.

Die Energiewende kann man abonnieren!



Infos, Magazin-Bestellung und Buchverlosung:
www.neueenergie.net/abo



Bitte Gewinn-Code **SDW10** angeben!



www.andesee.de

neue energie
das magazin für erneuerbare energien

Auch erhältlich im gut sortierten Bahnhofsbuchhandel.

Der Newsletter
Schnelle Nachrichten,
über die die Branche spricht!



Anmeldung online:
www.neueenergie.net/newsletteranmeldung



TITELTHEMA: WAHRNEHMUNG

Wie unser Gefühl für die



ISTOCKPHOTO / ANDREW OSTROVSKY

Zeit entsteht



Nach einer inneren Uhr, die unser Zeitgefühl im Sekunden- bis Minutenbereich steuert, suchten Hirnforscher bislang vergeblich. Neue Erkenntnisse deuten nun darauf hin, dass hier unser Körpergefühl eine zentrale Rolle spielt: Selbstwahrnehmung und Zeiterleben sind augenscheinlich untrennbar miteinander verbunden.

Von Marc Wittmann

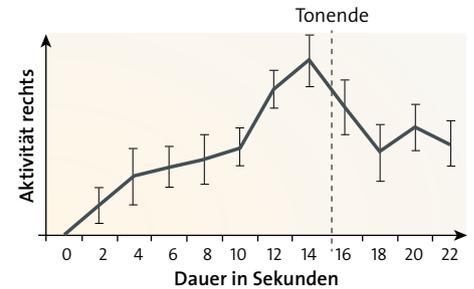
Der Deckel des Floating-Tanks schließt sich über mir, schwerelos liege ich im körperwarmen Salzwasser. Es ist stockdunkel, und kein Laut dringt von außen zu mir. Die Sinne, die normalerweise zur Orientierung in der Umwelt dienen, empfangen keine Signale. Meine Körpergrenzen verschwimmen; ich bin ganz bei mir und meinen Gedanken. Nur ein Sinn ist jetzt noch präsent, der Körpersinn. Ich spüre mich unmittelbar mit meiner Körperlichkeit – das Atmen, die Muskeln meiner Gliedmaßen, die entspannt im Wasser schweben. Und noch etwas rückt in den Vordergrund: Ich nehme deutlich wahr, wie die Zeit langsam vergeht, Sekunde um Sekunde.

Der US-amerikanische Mediziner John C. Lilly entwickelte in den 1950er Jahren am National Institute of Mental Health einen Isolationstank, um das Bewusstsein unter länger dauerndem Reizentzug zu erforschen. Heute wird der Floating-Tank in kürzer dauernden Behandlungen zur Tiefenentspannung eingesetzt. Was man in der Meditation über Jahre lernen muss, nämlich sich nicht von äußeren Sinnesreizen ablenken zu lassen, kann man hier unmittelbar erfahren. Freilich bleiben noch die Gedanken, die es zu beruhigen gilt.

Forscher erkannten bald, dass sich die Reizdeprivation auch zum Erfassen der Zeitwahrnehmung eignet. Sie unterscheiden dabei zwei wesentliche Perspektiven: zum einen das momentane Erleben der Zeit, zum anderen ihren Verlauf in der Rückschau. Wenn wir im Alltag auf die Zeit achten, dann scheint sie mal wie im Flug zu vergehen (etwa im angelegten Gespräch), mal langsam dahinzuschleichen (während langweiliger Wartezeit).

Existiert in unserem Kopf eine innere Uhr, die es uns ermöglicht, Zeitintervalle mit einer Länge von einigen Sekunden bis Minuten abzuschätzen?

In einem Experiment zur Zeitwahrnehmung hörten die Versuchspersonen einen Ton von festgelegter Dauer. Währenddessen nahm die Aktivität in der hinteren Inselrinde (gelb im Hirnschnitt) kontinuierlich bis zum Ende des durch den Ton markierten Zeitintervalls zu. Da diese Hirnregion fortlaufend körperliche Zustände repräsentiert, könnte die Aktivitätszunahme die Aufnahme von Körpersignalen widerspiegeln und so als Zeitmesser dienen.



WITTMANN, M.: THE INNER SENSE OF TIME IN NATURE REVIEW NEUROSCIENCE 14, 3:217-225, 2013, BOX 2A

Aber auch über zurückliegende Zeiträume geben wir Urteile ab, wenn wir beispielsweise feststellen, dass das vergangene Jahr wieder einmal viel zu schnell vorüberging. Dies ist leicht zu erklären: Im Nachhinein prägt die Menge an unterschiedlichen Erfahrungen, die aus dem Gedächtnis für den betreffenden Zeitraum abgerufen werden, die subjektiv empfundene Dauer. Je mehr man erlebt und sich daran auch erinnern kann, desto länger kommt einem eine Zeitspanne später vor. Ein abwechslungs- und ereignisreicher Urlaub erscheint daher länger als der gleiche Zeitraum in der Monotonie des Alltags. So vergeht das Leben für uns subjektiv wohl auch deshalb immer schneller, weil wir – verglichen mit Kindheit, Jugend und dem frühen Erwachsenenalter – im Lauf des Älterwerdens immer weniger wirklich neuartige Erlebnisse haben können und die Routine des immer Gleichen zunimmt.

Während sich das retrospektive Zeiterleben also gut erklären lässt, stellt die momentane Zeitwahrnehmung die Wissenschaftler noch vor ein Rätsel. Wie entsteht das Gefühl für die Dauer, wenn wir dafür keinen eigenen Sinn besitzen? Hirnforscher haben in den letzten Jahrzehnten deshalb so etwas wie eine innere Uhr im Gehirn gesucht, die Zeitschätzungen im Sekunden- bis Minutenbereich ermöglichen würden. Sie entwickelten dafür viele konkurrierende neuronale Modelle und verorteten sie in verschiedenen Arealen des Gehirns: in den Basalganglien, im Kleinhirn oder im rechtsseitigen Stirnlappen, um nur einige zu nennen. Diese Regionen sind tatsächlich am Zeiterleben beteiligt, weil sie elementar an neuronalen Funktionen wie der Aufmerksam-

keit und dem Arbeitsgedächtnis, aber auch der Motorik mitwirken. Schließlich achte ich ständig mehr oder weniger auf die Zeit, merke mir die Dauer eines gewissen Intervalls, reagiere zum rechten Zeitpunkt mit einer Bewegung. Der Nachweis einer echten inneren Uhr, die Dauer kodieren würde, steht bislang jedoch noch aus. Damit bleibt die Frage, wie die subjektive Wahrnehmung des Verlaufs der Zeit zu Stande kommt.

Die Erfahrungen im Floating-Tank führen auf die richtige Spur

Die eingangs beschriebenen Empfindungen im Isolationstank deuten die Antwort an: Es ist die Körperwahrnehmung, die dem Zeitbewusstsein zu Grunde liegt. Im Tank hört man nichts, sieht man nichts, riecht kaum etwas; die Schwerkraft wirkt stark verringert. Und dennoch spürt man gerade die Zeit unmittelbar. Denn das Körpergefühl lässt sich nicht ausschalten.

Neurowissenschaftliche Studien helfen, die Erfahrungen beim Floating zu verstehen. Demnach ist eine ganz bestimmte Region im Gehirn – die Inselrinde, lateinisch: *Insula* – beim Wahrnehmen von Zeitdauern im Sekundenbereich besonders aktiv. Zusammen mit meinen Kollegen Martin Paulus und Alan Simmons von der University of California in San Diego untersuchte ich zwischen 2004 und 2009, wie genau Probanden Zeit wahrnehmen, und zeichnete dazu ihre Gehirnaktivität mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT) auf.

Wir präsentierten den Teilnehmern mehrere Sekunden lange Töne, deren Dauer sie danach durch Tastendruck möglichst exakt reproduzieren sollten. Nur ein Areal feuerte in den beiden Hirnhemisphären sowohl bei Präsentation als auch Reproduktion auffällig stärker, nämlich die Inselrinde. Die neuronale Aktivität nahm in beiden Durchläufen bis zum Ende des Intervalls zu, worauf sie wieder stark abfiel (siehe Grafik oben). Anscheinend bildet diese Reaktion der *Insula* ein durch einen Außenreiz – in diesem Fall den Ton – vorgegebenes Zeitintervall ab. Längere Zeitdauer entsprach dabei größerer Aktivität.

Die Inselrinde gilt als primärer interozeptiver Kortex, also die für die Erstverarbeitung von Signalen aus der Körperwahrnehmung zuständige Hirnregion. So wie es ein primäres Areal für das Sehen im Hinterhauptslappen und für das Hören im Schläfenlappen gibt, so ist die *Insula* das primäre Areal für die Aufnahme von Körpergefühlen wie Tempera-

AUF EINEN BLICK

ZEITWAHRNEHMUNG UND ICH-BEWUSSTSEIN

- 1 Das primäre Hirnareal für die Wahrnehmung des eigenen Körpers und seiner Vorgänge (die **Interozeption**) ist die **Inselrinde**. Die Region zeigt sich in Studien mit bildgebenden Verfahren als wesentlich für die **Zeitwahrnehmung**.
- 2 Prozesse in der Inselrinde sind nicht nur an der Interozeption beteiligt, sondern auch die Grundlage für die unmittelbare Wahrnehmung der Gefühle. Starke negative wie positive Emotionen führen zur **subjektiven Zeitdehnung**.
- 3 Die vordere Inselrinde integriert umfassend alle dem Organismus zur Verfügung stehenden Informationen eines gegebenen Moments. Das erzeugt unser **Ich-Erleben** und ist eng verknüpft mit dem **Zeitbewusstsein**.

tur, Schmerz, Juckreiz, Hunger, Muskelspannung, Berührungen und Signalen aus den Eingeweiden. Diese bilden auch die Basis für komplexe Gefühle, wie etwa der Neurologe Antonio Damasio von der University of Southern California in Los Angeles betont, und sind wichtig für Intuition und Entscheidungsfindung, wie schon der gängige Ausdruck vom »Bauchgefühl« andeutet.

An der Interozeption ist das so genannte vegetative Nervensystem beteiligt. Es verbindet Körper und Gehirn und regelt autonom Organfunktionen. Dabei gelangen Körpersignale auch über spezifische Nervenkerne des Thalamus bis zur Inselrinde. Dadurch können wir sie bewusst wahrnehmen. Diese Zusammenhänge hat der Neuroanatom A.D. (Bud) Craig vom Barrow Neurological Institute in Phoenix, Arizona, erforscht. Craig erarbeitete die theoretischen Grundlagen für das Verständnis, wie Körpersignale uns Zeit wahrnehmen lassen. Das Erlebnis eines Körper-Ichs basiert demnach auf der kontinuierlichen Aufnahme und Weiterverarbeitung von Signalen aus dem Körper über die Zeit hinweg. Über diesen Aufbau der Körperrepräsentation entsteht auch ein Gefühl für den Zeitverlauf – als sich kontinuierlich veränderndes Körper-Ich. Subjektive Zeit bildet sich, wie die Erfahrung im Isolationstank anschaulich macht, eben nicht durch das Wahrnehmen äußerer sensorischer Reize, sondern durch einen selbst: Jeder Mensch ist mit seinen Körpergefühlen seine eigene innere Uhr.

Zeitlupeneffekt bei Schrecksekunden

In letzter Zeit kamen mehr und mehr mit bildgebenden Verfahren gewonnene Befunde hinzu, die ebenfalls der Inselrinde eine dominante Rolle in der Zeitwahrnehmung zuweisen. Dass emotionale und körperliche Einflüsse die Zeitschätzung massiv beeinflussen, ist allerdings schon länger bekannt. In Schrecksekunden tritt ein Zeitlupeneffekt ein, bei dem sich Abläufe in der Außenwelt scheinbar verlangsamten. Das ist durch das stark erhöhte Erregungsniveau des Körpers in einer »Fight-or-flight«-Situation bedingt, wodurch physiologische und mentale Vorgänge vergleichsweise schneller ablaufen; der ganze Organismus ist auf eine möglichst rasche Überlebensreaktion ausgerichtet.

Ebenso verlangsamt Fieber den subjektiv empfundenen Zeiteindruck. Als Anfang der 1930er Jahre die Frau des amerikanischen Physiologen Hudson Hoagland mit einer fiebrigen Erkrankung im Bett lag, fiel ihm auf, dass sie die Dauer seiner Abwesenheiten oft stark überschätzte. Hoagland traktierte sie daraufhin mit kleinen Aufgaben, in denen sie vorgegebene Zeitspannen bestimmen sollte. Dabei nannte sie systematisch zu hohe Werte, da sie die Sekunden zu schnell zählte. Hoaglands Theorie: Durch die erhöhte physiologische Aktivität beim Fieber läuft eine innere Uhr schneller ab, was die Zeit subjektiv betrachtet dehnt.

Gemäß zahlreichen experimentellen Laborstudien der letzten zehn Jahre haben auch starke Emotionen einen solchen Effekt. Präsentiert man Versuchspersonen Bilder mit ausgeprägten negativen oder positiven Inhalten – etwa Fotos

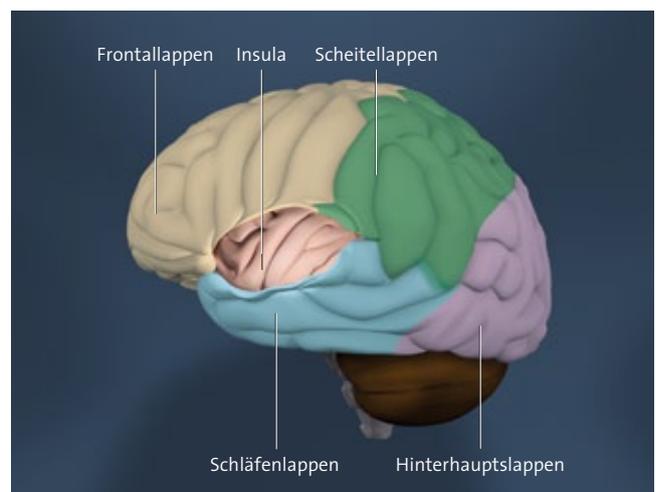
von Verletzten in Unfallsituationen oder erotische Szenen –, schätzen sie die Dauer des Betrachtens länger ein als bei eher neutralen Bildern. Wieder lautet die gängige Interpretation, dass das erhöhte physiologische Erregungsniveau die erlebte Zeit dehnt.

Wie kann man den Effekt erklären? Kognitionswissenschaftler haben dazu Prozessmodelle der Zeitwahrnehmung entwickelt. In diesen sendet ein hypothetischer Zeitgeber Impulse mit einer bestimmten Frequenz, die ein Akkumulator auffängt. Je mehr Impulse Letzterer über einen gewissen Zeitraum registriert, desto länger ist die subjektive Dauer.

Zwei Mechanismen bestimmen dabei die Anzahl der aufgenommenen Impulse – sprich die subjektive Zeit. Zum einen der oben beschriebene Aufmerksamkeitseffekt: Ist man abgelenkt, gehen im Akkumulator weniger Impulse ein; die Zeitdauer erscheint kürzer. Beim Warten fokussieren wir hingegen stark auf die Zeit, was sie subjektiv dehnt, weil mehr Impulse angesammelt werden. Zum anderen moduliert das Erregungsniveau den Zeitgeber: Ist die körperliche Aktivierung intensiviert, erhöht sich die Taktfrequenz. Dadurch können auch mehr Impulse im Akkumulator eintreffen. Das erklärt die Auswirkung emotionaler Situationen.

Laut den neuen Forschungsergebnissen dürfte es sich bei den theoretisch postulierten Impulsen im kognitiven Modell um Körpersignale handeln. Eine erhöhte Aufmerksamkeit für sich selbst, etwa beim Warten, bewirkt stärkeres Wahrnehmen von Körpersignalen – was die Zeit subjektiv dehnt. Und ein gesteigertes körperliches Aktivierungsniveau in emotionalen Situationen hat die gleiche Folge.

Aber auch dann, wenn man rückblickend ein abgelaufenes Zeitintervall beurteilen soll, wirkt sich die Körperwahrnehmung aus. Dies zeigte 2014 eine Studie von Olga Pollatos



Die Insula ist ein Großhirnlappen, der während der Gehirnentwicklung von den schneller wachsenden Frontal-, Scheitel- und Schläfenlappen verdeckt und in die Tiefe gedrängt wird (in der Grafik teilweise freigelegt). Sie spielt eine zentrale Rolle bei der Verarbeitung von Körpersignalen und ihrer Zusammenführung mit anderen Informationen.

von der Universität Ulm und ihren Kollegen aus Potsdam und Freiburg, bei der Probanden einen 45 Sekunden langen Horror-Videoclip zeitlich deutlich überschätzten. Dies geschah insbesondere dann, wenn sie auf ihre körperlichen Reaktionen achten sollten.

Bei dem Versuch sah eine Gruppe Teilnehmer zunächst drei verschiedene Videos mit unterschiedlichem emotionalem Gehalt: eine lustige Zeichentricksequenz, eine sachliche Dokumentarszene und den besagten Horrorfilm. Alle Clips liefen exakt 45 Sekunden und wurden jeder Person in einer anderen Reihenfolge dargeboten, um eventuelle Sequenzeffekte auszuschließen. Vor der Vorführung sagten die Versuchsleiter den Teilnehmern, sie sollten auf Details im Film achten, über die sie später ausgefragt würden. Erst im Nachhinein baten sie die Probanden darum, die Dauer einzuschätzen. Es handelte sich also um ein rein retrospektives Zeiturteil. Ergebnis: Die Versuchsteilnehmer hielten den Horrorfilm für länger und den Cartoon für kürzer als den Dokumentarfilm. Dies entspricht dem gängigen Gefühl, dass die Zeit dahinstrast, wenn man sich vergnügt (»time flies when you're having fun«).

In einem zweiten Test sollten andere Probanden bei denselben drei Clips ausdrücklich auf ihre körperlichen Reaktionen achten. Dieser Fokus auf die Interozeption ergab eine sogar noch stärkere Überschätzung der Dauer des Horrorfilms. Die intensiviert Wahrnehmung von Körpervorgängen dehnte also die Zeit mehr.

Eine von der Medizinerin Karin Meißner und mir 2011 an der Ludwig-Maximilians-Universität München durchgeführte Studie lässt vermuten, dass der Herzschlag beim Abschätzen von Zeitdauern eine wichtige Rolle spielen könnte. In einer ersten Aufgabe mussten Probanden einen so genannten Herzschlagwahrnehmungstest absolvieren. Bei diesem soll man ohne Hilfsmittel – wie etwa den Puls mit den Fingern zu fühlen – die Zahl der eigenen Herzschläge während eines vorgegebenen Intervalls von zum Beispiel 45 Sekunden angeben, allein dadurch, dass man in sich hinein-

spürt. Gleichzeitig zeichnen Elektroden die tatsächliche Zahl der Herztöne auf. Es zeigte sich: Die Teilnehmer, die ihre Herzschläge präziser bestimmten, waren auch bei einer anschließenden Aufgabe zur Zeitschätzung genauer.

Hierzu passen Forschungsarbeiten von Hugo Critchley und seinen Kollegen von der englischen University of Sussex. Mittels funktioneller Magnetresonanztomografie wiesen sie schon 2004 nach, dass die Genauigkeit der Herzschlagwahrnehmung mit neuronalen Aktivitäten in der Insula korrelierte. Zeitwahrnehmung, Körpersensibilität, Gefühle und die Inselrinde hängen also eng miteinander zusammen.

Achtsamkeitsmeditation: Konzentration auf das Hier und Jetzt

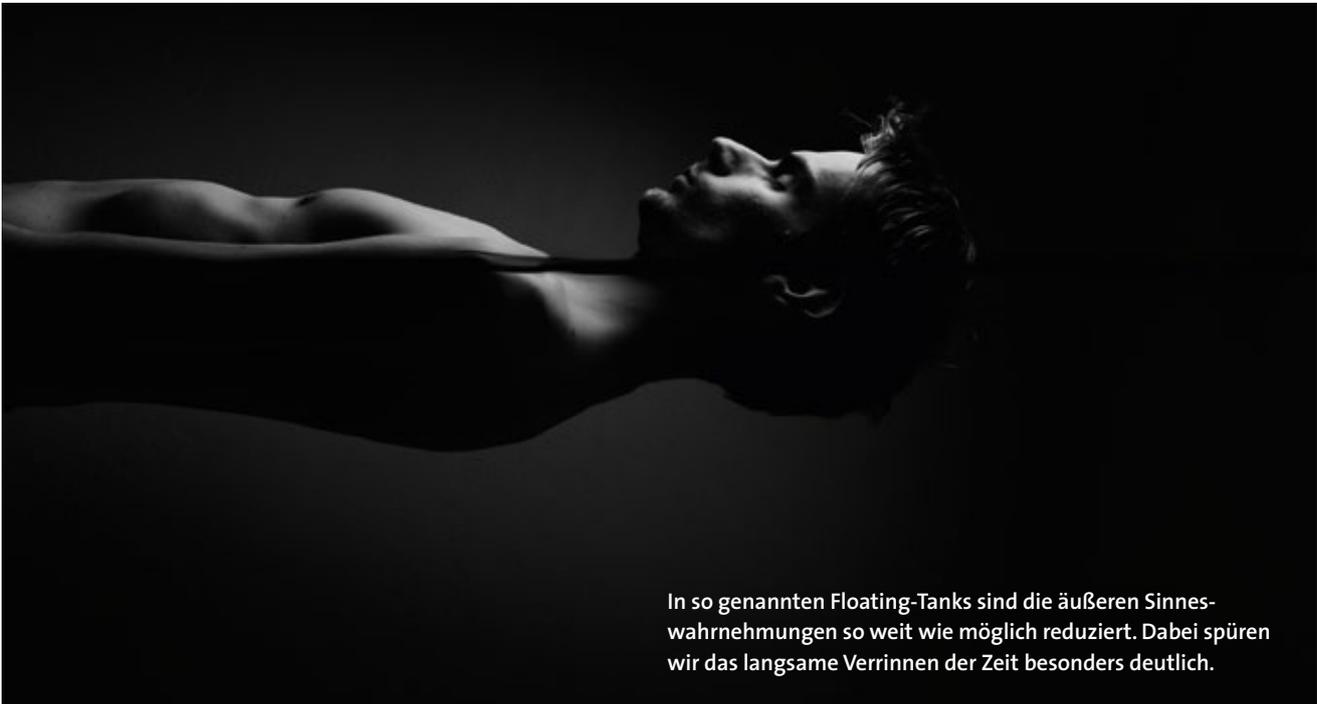
Seit einigen Jahren erkunden Forscher verstärkt die kurzfristigen und länger wirkenden Effekte von Meditation. Auch so lässt sich subjektives Zeiterleben untersuchen, geht es doch bei der Meditation um Aufmerksamkeit beziehungsweise Achtsamkeit, die Wahrnehmung von Körpervorgängen und das Zeiterleben. Laut Studien mit Meditierenden – unter anderem von Forschern um Ulrich Ott und Britta Hölzel vom Bender Institute of Neuroimaging der Universität Gießen – wird die Inselregion kurzfristig stärker aktiv, wenn die Probanden Meditationstechniken nutzen, die auf den Körper fokussieren. Bei der so genannten Achtsamkeitsmeditation beispielsweise soll man sich über den Atem ganz auf das Hier (die Körperpräsenz) und das Jetzt (die zeitliche Präsenz) konzentrieren. Dabei verlangsamt sich das Erleben des subjektiven Zeitverlaufs.

Personen mit langjährigem Training in Achtsamkeitsmeditation weisen zudem in der Inselrinde mehr graue Substanz auf, in der die Nervenzellkörper liegen. Das lässt sich als neuronales Korrelat eines intensivierten Körper- und Selbsterlebens bei erfahrenen Meditierenden interpretieren. Erste Studien zur Zeitwahrnehmung bestätigen auch die Berichte von Meditationsanfängern, dass die Zeit während der Meditation subjektiv langsamer abläuft. So überschätzten darin ungeübte Studenten vorgegebene kurze Zeitdauern schon nach einer zehnminütigen Sitzung mit Fokus auf dem Atem im Vergleich zu entsprechenden Intervallen vor der Meditation.

Bei Kontrollpersonen, die ein gleich langes Hörspiel vorgesetzt bekamen, veränderte sich dagegen die Zeitwahrnehmung nicht. Diese Befunde lassen sich mit der eingangs beschriebenen Lenkung der Aufmerksamkeit auf die Zeit erklären. Der verstärkte Fokus auf Körpervorgänge intensiviert das Zeiterleben; gesteigertes Wahrnehmen des Körperselbst dehnt die subjektive Zeit.

Gemäß A. D. Craigs Modell verarbeitet die Insula die in ihrem hinteren Teil ankommenden Körpersignale weiter. Sie verrechnet dabei die Signale, die Auskunft über den Zustand des Körpers geben, schrittweise mit Informationen aus anderen Sinnen über die gesamte momentane Situation sowie solchen über Motivation und Kognition. Die fortlaufende In-





DREAMSTIME / EVAN SHARBONAU

In so genannten Floating-Tanks sind die äußeren Sinneswahrnehmungen so weit wie möglich reduziert. Dabei spüren wir das langsame Verrinnen der Zeit besonders deutlich.

tegration aller zugänglichen Daten mündet in der vorderen Insel, wo eine umfassende Repräsentation des Jetzt-Zustands des Organismus entsteht. Craig nennt ihn den »globalen emotionalen Moment«: das gefühlte Ich des Menschen.

Dieser integrierte Bewusstseinszustand eines »Ich« bildet den jeweiligen momentanen physiologischen Zustand ab und liefert damit die Grundlage für notwendige Anpassungen und Verhaltensregulation. Wenn es beispielsweise sehr heiß ist, stellt sich der Organismus darauf ein, indem er schwitzt. Zudem suchen wir gezielt Schatten auf und trinken, um die verlorene Wassermenge zu ersetzen.

Gleichzeitig stellt das Konzept aber auch bereits eine veritable Theorie des Bewusstseins dar, die sich nun einer empirischen Überprüfung stellen muss: Über die beschriebene neuronale Aktivität, die in der vorderen Inselrinde kulminiert, sowie über nachgeschaltete Hirnareale wie dem anterioren zingulären Kortex in der Mittellinie des Gehirns, die physiologische und Verhaltensreaktionen anstoßen, entsteht demnach ein Ich, das sich seiner selbst und seiner Präsenz in Zeit und Raum bewusst ist. Dieses gefühlte Ich ist untrennbar verbunden mit den sich allmählich verändernden Körperzuständen und damit dem Gefühl des Zeitverlaufs. Ich-Vorstellung und Zeit-Erleben gehen somit Hand in Hand: Eine intensivere Ich-Wahrnehmung läuft mit dem Gefühl eines langsameren Zeitverlaufs parallel; ein weniger ausgeprägtes Ich-Empfinden korrespondiert mit einer erlebten Beschleunigung des Zeitverlaufs.

Verschiedene Bewusstseinszustände verdeutlichen diese Zusammenhänge. So sind wir in der Langeweile des Wartens ganz auf uns zurückgeworfen und spüren uns selbst intensiv – und die Zeit will einfach nicht vergehen. Anders das so genannte Flow-Erleben: Bei ihm führen stark fordernde Tä-

tigkeiten, die sich aber mit den eigenen Ressourcen bewältigen lassen, zu beschleunigtem Zeitempfinden. Beispiele sind etwa das Schreiben eines Textes, Musizieren oder Basteln. Die Absorption in der Beschäftigung reduziert die Ich-Wahrnehmung stark, und neben ihr verliert sich auch das Zeitgefühl. Während man im Flow oft beeindruckende Resultate hervorbringt, erfasst das Gehirn die Dauer des kreativen Schaffens nur unzureichend.

Halluzinogene lassen Zeit und Ich verschwinden

Im Extremfall außergewöhnlicher Bewusstseinszustände können sowohl Ich- als auch Zeitwahrnehmung ganz verschwinden, etwa bei langjähriger Meditationserfahrung oder unter Einfluss von bestimmten Drogen, so genannten Halluzinogenen. Franz X. Vollenweider und seine Kollegen an der Psychiatrischen Universitätsklinik Zürich erforschen solche Grenzerfahrungen mit Hilfe von Psilocybin. Unter Einfluss der Substanz verzerrt sich das Zeiterleben stark, neben massiven Veränderungen des Ich-Erlebens. Wie wir in einer gemeinsamen Studie zeigten, geht dies mit messbaren Beeinträchtigungen der Zeitschätzung einher. Die Probanden neigten unter der Droge zu einer langsameren spontanen Klopfrequenz und konnten vorgegebene Intervalle von mehr als etwa zweieinhalb Sekunden nicht mehr korrekt reproduzieren.

Diese Laborbefunde decken sich mit Berichten zu außergewöhnlichen Erfahrungen beim Meditieren nach langjähriger Praxis, bei selten auftretenden mystischen Erlebnissen, mitunter auch beim Übergang zwischen Wachen und Schlafen, in der Hypnose, in durch Rhythmus und Musik ausgelöster Trance sowie bei so genannten Nahtoderfahrungen. In solchen veränderten Bewusstseinszuständen kann es vor-



Den Autor dieses Artikels können Sie am 25.9.2014 um 21 Uhr in 3sat erleben – zu Gast bei Gert Scobel in der Sendung »Was ist Zeit?«.

kommen, dass die erlebte Zeit immer langsamer wird, bis hin zu einem subjektiv empfundenen Zeitstillstand. Damit verbunden ist ein stark verändertes Körper- und Raumgefühl, das in der Auflösung der Ich-Vorstellung kulminiert.

Einblicke durch epileptische Anfälle

Neurologen interessieren sich besonders für Patienten mit eng umgrenzten epileptischen, »ekstatischen« Anfällen, die sich nachweislich auch auf die vordere Inselrinde auswirken. Wie Fjodor Dostojewskij im Roman »Der Idiot« beschreibt, verstärkt sich das bewusste Erleben während der ekstatischen Auren: »Diese Momente waren ja nichts anderes als eine außergewöhnliche Intensivierung des Bewusstseins seiner selbst, wenn man diesen Zustand möglichst knapp bezeichnen wollte, des Bewusstseins und gleichzeitig der in höchstem Maße unmittelbaren Empfindung seiner selbst.«

Im Jahr 2009 untersuchte Fabienne Picard an der Universitätsklinik Genf solche Epilepsiepatienten. Gemäß ihren Ergebnissen sind während eines Anfalls die Ich- und Körperpräsenz intensiver, und ekstatische Glücksgefühle mit spirituellem Anklang breiten sich aus. Zudem gerät aber auch das Zeitgefühl durcheinander. Die Patienten berichten von Déjà-vus und schwer zu beschreibenden Anomalien der Empfindung von Raum und Zeit. Solche Erlebnisse dauern einige Sekunden bis Minuten, führen dann zur Auflösung des Zeit- und Raumgefühls und münden schließlich in Bewusstlosigkeit.

Eine solche ekstatisch-epileptische Episode geht mit ungewöhnlich starker Aktivität der vorderen Inselrinde einher. Diese ruft zunächst ein intensiveres Selbst- und Körperbewusstsein hervor. Ab einem bestimmten Grad der neuronalen Aktivierung bricht schließlich die Wahrnehmung von Ich und Zeit zusammen.

Allen bisherigen Erkenntnissen zufolge ist das Rätsel der subjektiven Zeit eng verknüpft mit dem großen Rätsel des

Bewusstseins. Auch jene Tiere, die nachweislich Selbst-Bewusstsein besitzen, weisen ein zumindest rudimentäres Zeitbewusstsein auf. Bei Menschenaffen und Krähenarten beispielsweise sowie Walen, Delfinen und Elefanten lässt sich mit dem Spiegeltest ein Selbst-Bewusstsein nachweisen. Dabei erkennen die Tiere einen Fleck an einer ihnen sonst nicht einsehbaren Körperstelle und versuchen, diesen zu entfernen: ein Indiz dafür, dass sie sich selbst und die Änderung im Selbstbild – den Fleck – erkennen. Solche Tiere haben auch ein Zeitbewusstsein.

Zum Beispiel können sie lernen, auf ein höherwertiges Futter zu warten, wenn ihnen ein weniger attraktives angeboten wird. Derartiges Wartenkönnen haben Forscher bei Menschenaffen und Krähen nachgewiesen. Tiere wie diese haben also nicht nur ein Gegenwartsselbst, wie der Spiegeltest zeigt, sondern auch ein Zukunftsselbst, in das sie sich projizieren können. Sie besitzen demnach ein Bewusstsein für sich und für die Zeit.

Von der subjektiven Zeiterfahrung im Alltag führt ein großer Bogen zur Frage des Selbst-Bewusstseins und zur Beschreibung von außergewöhnlichen Bewusstseinszuständen. Die Erforschung des Zeiterlebens entpuppt sich demnach als Wissenschaft von Körperselbst und Bewusstsein. An diesem theoretischen Fundament wird sich die zukünftige Forschung orientieren können. ~

DER AUTOR



Marc Wittmann ist seit 2009 wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Grenzgebiete der Psychologie und Psychohygiene in Freiburg. Er leitete von 2000 bis 2004 das Generation Research Program der Ludwig-Maximilians-Universität München in Bad Tölz und war von 2004 bis 2009 Research Fellow am Department of Psychiatry an der University of California in San Diego.

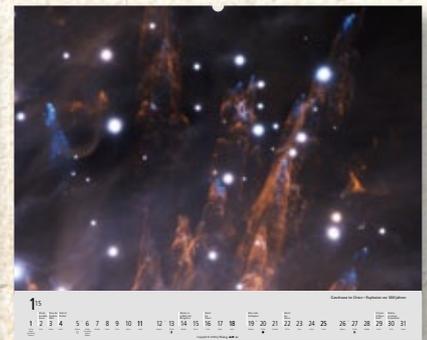
QUELLEN

- Craig, A.D.:** Emotional Moments across Time: A Possible Neural Basis for Time Perception in the Anterior Insula. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 364, S. 1933–1942, 2009
- Meissner, K., Wittmann, M.:** Body Signals, Cardiac Awareness, and the Perception of Time. In: *Biological Psychology* 86, S. 289–297, 2011
- Pollatos, O. et al.:** Interoceptive Focus Shapes the Experience of Time. In: *PLoS One* 9, e86934, 2014
- Wittmann, M.:** The Inner Sense of Time: How the Brain Creates a Representation of Duration. In: *Nature Reviews Neuroscience* 14, S. 217–223, 2013
- Wittmann, M., Schmidt, S.:** Mindfulness Meditation and the Experience of Time. In: Schmidt, S., Walach, H. (Hg.): *Meditation – Neuroscientific Approaches and Philosophical Implications*. Springer International 2014, S. 199–210.

LITERATURTIPP

Wittmann, M.: Gefühlte Zeit. Eine kleine Psychologie des Zeitempfindens. C.H.Beck, München 2012
Populärwissenschaftliches Buch des Autors zum Thema

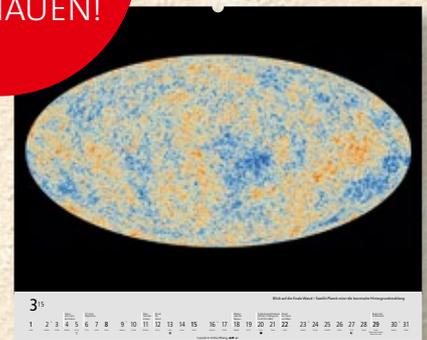
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304055



**MOTIVE
JETZT SCHON
ONLINE
ANSCHAUEN!**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2015

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« insgesamt 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Vom Valles Marineris auf Mars geht es zu Gas- und Staube nebeln im Milchstraßensystem, von fernen Galaxien bis hin zur Finalen Wand, als die Strahlung nach dem Urknall von der Materie entkoppelte. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2015 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte. *14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand*



So einfach erreichen Sie uns:

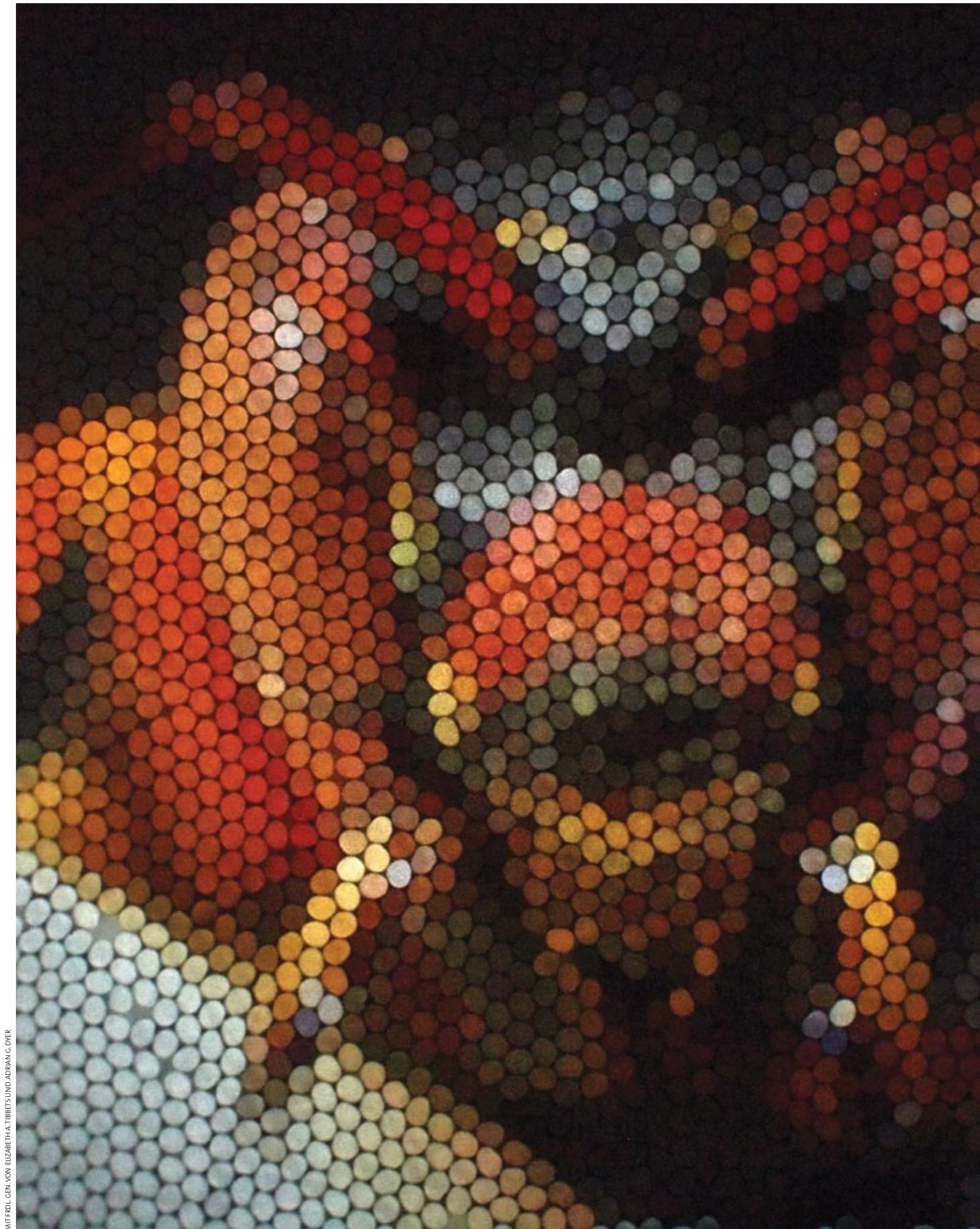
Telefon: 06221 9126-743

sterne-und-weltraum.de/kalender2015

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



MITFRIEDL GEN. VON ELIZABETH A. TIBBETS UND ADRIAN C. DYER

SOZIALVERHALTEN

Gesichtskontrolle im Wespennest

Um Gesichter voneinander zu unterscheiden, braucht es kein großes Gehirn. Manche Wespen haben sich sogar zu Spezialisten auf diesem Gebiet entwickelt.

Von Elizabeth A. Tibbetts und Adrian G. Dyer

Große geistige Leistungen traut man Bienen und Wespen eigentlich nicht zu. In ihrem kurzen Leben geben angeborene Verhaltensprogramme weit gehend vor, wie sie Nester bauen, Nektar sammeln und die Brut großziehen. Bei den meisten Arten überwintern nur junge Königinnen, gründen im nächsten Jahr ein neues Nest und sterben im selben Sommer. Umso erstaunlicher, dass manche von ihnen Artgenossen am Gesicht erkennen – was an sich als herausragende Fähigkeit von Primaten gilt.

Eine von uns (Tibbetts) entdeckte dies bei einer nordamerikanischen Feldwespe, *Polistes fuscatus*. Die Insekten merken sich die Gesichter ihrer Nestgenossen und unterscheiden daran bei zukünftigen Kontakten, ob sie eine Wespe kennen oder nicht. Wie der andere Autor dieses Artikels, Dyer, daraufhin herausfand, lassen sich auch Bienen, die solche Unterscheidungen an sich nicht vornehmen, entsprechend trainieren. Sogar menschliche Gesichter können sie bisweilen lernen auseinanderzuhalten.

Unser Gehirn ist mindestens 10 000-mal so groß wie das dieser Insekten. Nach einer verbreiteten Vorstellung wuchs es im Vergleich zu anderen Primaten besonders deshalb dermaßen an, weil wir uns in komplexen Gesellschaften zurechtfinden und eine größere Anzahl Individuen auseinanderhalten müssen. Wenn Insekten mit einem winzigen Gehirn im Grunde Ähnliches leisten, fragt sich, welche Hirnstrukturen und Mechanismen bei ihnen daran beteiligt sein mögen und wie sie entstanden. Erkenntnisse hierzu sollten auch für Informatiker interessant sein, die Software für Gesichtserkennung entwickeln.

Überraschenderweise erkennt die Feldwespe *Polistes fuscatus* individuelle Artgenossen an ihren Zügen.

Tibbetts' Entdeckung im Jahr 2001 war reiner Zufall. Als sie gerade als Doktorandin anfang, wollte sie einige Einzelheiten des Soziallebens besagter Feldwespe genauer untersuchen, über die Verhaltensforscher schon eine Menge wussten. Diese Wespen bilden überschaubare kleine Kolonien mit oft mehreren Königinnen. Um die sozialen Kontakte zu erfassen, pflegte Tibbetts alle Tiere eines Nests auf dem Rücken mit Farbtupfern zu markieren und filmte dann das Geschehen. Doch einmal hatte sie zwei Wespen übersehen. Damit waren die Aufnahmen wertlos – es sei denn, es gelänge ihr, diese beiden Individuen trotzdem irgendwie auseinanderzuhalten.

Beim Betrachten des Films merkte die Forscherin plötzlich, dass sie ihre Gesichter anhand der gelben, braunen und schwarzen Streifen und Flecken unterscheiden konnte. Neugierig fragte sie sich, ob diese Insekten das untereinander wohl auch taten.

Als Erstes dokumentierte Tibbetts nun eine Anzahl von Gesichtern von *Polistes fuscatus*, deren Vielfalt und Unterschiedlichkeit überrascht (siehe Bilder S. 36/37). Anschließend prüfte sie, ob die Wespen eines Nests ihre Artgenossen daran erkennen. Mit Hilfe von Zahnstochern und Farbpaste veränderte sie einzelne Gesichter etwas. Und tatsächlich erfuhr die so geschminkten Tiere plötzlich deutlich mehr Aggression, als in den Kolonien normal ist. Zur Kontrolle bekamen Wespen Farbe ins Gesicht, ohne dass dies ihr Aussehen veränderte. Solche Tiere wurden von anderen Nestgenossen nicht angegriffen. Ganz klar erkannten diese Insekten einander an der Gesichtszeichnung.

Der Befund verblüfft umso mehr, wenn man überlegt, was das Gesichtererkennen beim Menschen alles voraussetzt. Wenn wir jemandem erstmals begegnen, erfassen wir das Gesamtbild der individuellen Züge – etwa Form und Verhältnis von Nase, Mund, Augen und Ohren – und deren Zusammenspiel meist rasch und verknüpfen das Aussehen mit abstrakterer Information über die Person, also etwa dass es ein

Nachbar ist oder der neue Chef. Sehen wir diesen Menschen wieder, kommt es stets darauf an, beides wiederum zusammenzubringen.

Auffallend ist dabei, dass wir uns Gesichter schneller und genauer einprägen als viele andere Arten komplexer visueller Information. Zum Beispiel können die meisten Menschen die Gesichter von anderen Partygästen rasch und mühelos abspeichern. Viel schwerer fällt es uns und es dauert deutlich länger, ähnlich komplexe Muster wie chinesische Schriftzeichen zu behalten. Dabei stellt auch solch ein Schriftzeichen – wie ein Gesicht – ein Ganzes dar, zusammengesetzt aus einer Anzahl verschiedener Elemente. Die Evolution hat unser Gehirn

Auffallend ist, dass wir uns Gesichter schneller und genauer einprägen als viele andere Arten komplexer visueller Information

offenbar speziell dafür ausgerüstet, gerade Gesichter rasch zu lernen.

Insbesondere eine Hirnregion nimmt beim Menschen wesentlich an diesem Vorgang teil: Sie liegt im Schläfenlappen der Großhirnrinde im Gyrus fusiformis und wird englisch als »fusiform face area« (FFA) bezeichnet. Der Mechanismus der individuellen Gesichtserkennung ist so hoch spezialisiert, dass er uns bereits im Stich lässt, wenn ein Abbild nur auf dem Kopf steht. Selbst kleine Umstellungen einzelner entscheidender Gesichtspartien, gerade auch der Augen, befremden und verunsichern vor allem bei vertrauten Gesichtern oft stark (siehe Bilder rechts).

Gestörte Gesichtserkennung bei Menschen

Während die allermeisten Menschen Gesichter hervorragend behalten, gelingt das ungefähr zwei Prozent schlecht oder im Extremfall gar nicht. Meistens dürfte dann ein angeborener Defekt vorliegen. Allerdings kann der Ausfall ebenfalls Folge einer Verletzung der erwähnten Hirnregion sein. Eine solche Einschränkung kann den sozialen Umgang stark behindern. Manche Betroffenen erkennen nicht einmal ihre engsten Angehörigen an den Gesichtszügen. Es gibt zudem Hinweise, dass etwa beim Autismus Defizite bei der Gesichtserkennung mindestens teilweise für die behinderte soziale Entwicklung mitverantwortlich sind.

Beruhet nun das Gesichtererkennen bei der Feldwespe *Polistes fuscatus* ebenfalls auf einer Spezialisierung, vergleichbar der bei Primaten, die sich vom normalen Erlernen anderer Muster abgrenzt? Wenn ja, müsste es evolutionär unabhängig entstanden sein. Oder handelt es sich bei diesen Insekten um einen grundsätzlich anderen Vorgang? Tibbetts wollte das austesten, indem sie die Wespen auf unterschiedliche Bilder trainierte, die sie dann auseinanderhalten mussten. Und zwar sollten sie lernen, unter zweien jeweils das »richtige« zu erkennen.

Zuerst musste Tibbetts eine für die Wespen geeignete Lernmethode finden. Honigbienen lassen sich leicht mit einer Zuckerbelohnung trainieren. Es gehört zu ihren Haupt-

AUF EINEN BLICK

INSEKTEN ERKENNEN GESICHTER

1 Individuelle Gesichter auseinanderzuhalten, trauten Forscher bisher nur höheren Wirbeltieren mit einem großen Gehirn zu, insbesondere Säugetieren. Doch auch einige **Insekten** können das leisten.

2 Während sich **Honigbienen** darauf immerhin trainieren lassen, verfügt die Feldwespe *Polistes fuscatus* sogar über einen **speziellen Wahrnehmungsmechanismus**, durch den sie Gesichtszeichnungen von Artgenossen leicht erfasst. Das Prinzip ähnelt dem von **Primaten**.

3 Das winzige Insektengehirn könnte Informatikern Anregung geben, wie sich **Software zur Gesichtserkennung** weiter verbessern ließe.



MIT FREI GEBEN VON PETER THOMPSON, UNIVERSITY OF YORK

Diese bekannte »Margaret-Thatcher-Illusion« stammt von Peter Thompson von der University of York. Sie zeigt, dass es uns schwer fällt, Manipulationen bei Gesichtern zu erkennen, die auf dem Kopf stehen (oben rechts). Ähnlich geht es Insekten, die ein spezielles Programm für Gesichter besitzen.

aufgaben, Futter zu sammeln und dieses mit ihren Stockgenossen zu teilen. Doch Wespen können wochenlang ohne Futter überstehen. Anfängliche Versuche, sie mit Zucker zu schulen, schlugen fehl. Tibbetts und ihr Doktorand Michael Sheehan, der inzwischen an der University of California in Berkeley arbeitet, fanden schließlich eine andere Lösung: Bei einer falschen Entscheidung erhielt die Wespe einen ganz schwachen Elektroschock.

In den Tests, bei denen wie gesagt immer zwei Bilder zur Wahl standen, lernten die Insekten folgende fünf Kategorien auseinanderzuhalten: normale Gesichter von Artgenossen; einfache geometrische Schwarz-Weiß-Muster; ganze Raupen (ihre normale Beute); Wespengesichter ohne Fühler (diese waren durch Bildbearbeitung entfernt worden); und Wespengesichter, deren Teile verkehrt zusammengesetzt waren.

Normale Gesichter von den anderen Kategorien zu unterscheiden, lernten die Wespen rasch und sicher in nur 20 Versuchen. Zwischen den anderen Bildsorten zu differenzieren, fiel ihnen deutlich schwerer. Eindrucksvoll war, wie sehr manipulierte Gesichtsaufnahmen ihre Leistung beeinträchtigten: Fehlende Fühler oder falsch arrangierte Teile verzögerten das Lernen dramatisch.

Dass die Fühler nicht fehlen dürfen, spricht stark dafür, dass das Gehirn von *Polistes fuscatus* darauf eingestellt ist,

Wespengesichter auf spezielle Weise in ihrer Gesamtheit zu registrieren. Denn in jeder anderen Hinsicht, so in den Farben und Mustern, unterschieden sich die antennenlosen Gesichter nicht von den normalen. Trotzdem schienen die Tiere die verfälschten Bilder nicht sicher als Gesichter wahrzunehmen. Es sieht folglich so aus, als würden sie, ähnlich wie der Mensch, über einen Mechanismus verfügen, der Gesichter ganzheitlich auffasst. Sie scheinen also nicht sukzessive die Einzelkomponenten jede für sich zu lernen, sondern vor allem den Gesamteindruck aufzunehmen. Und das ist ihnen offensichtlich nur möglich, wenn die dafür wesentlichen Einzelelemente vorhanden und einander korrekt zugeordnet sind. Beim Menschen ist es ähnlich: Es fällt uns ausgesprochen schwer, auf dem Kopf stehende, uns im Negativ gezeigte oder falsch zusammengesetzte Gesichter einzuprägen und wiederzuerkennen.

Wenn eine derart spezifische Wahrnehmung bei so völlig unterschiedlichen Lebewesen wie dem Menschen und dieser Wespe vorkommt, ist nicht auszuschließen, dass sich ein ähnlicher Mechanismus auch noch anderswo im Tierreich herausgebildet hat – passende soziale Randbedingungen vorausgesetzt. Die Feldwespe *P. fuscatus* hat ein selbst für Staaten bildende Insekten recht komplexes Sozialleben. Mehrere Königinnen gründen gemeinsam ein Nest und arbeiten zusammen. Bei der Fortpflanzung herrscht allerdings Konkurrenz, und eine von ihnen dominiert. Wahrscheinlich zahlt es sich in einer derartigen Situation aus, einander individuell zu erkennen und zu wissen, wer wo in der Hierarchie steht. Vor einem solchen Hintergrund könnten in der Evolution der Art so auffallend unterschiedlich aussehende Gesichter entstehen. Falls diese Überlegungen stimmen, sollten andererseits Arten, bei denen sich Nestgenossen normalerweise nicht individuell unterscheiden müssen, über keinen speziellen Erkennungsmechanismus für Gesichter verfügen.

Bei nur einer Königin braucht es keine unterschiedliche Zeichnung

Diese These prüften Tibbetts und Sheehan bei einer weiteren nordamerikanischen Feldwespenart: *Polistes metricus*. Sie ist eng mit *P. fuscatus* verwandt, doch bei ihr gründet jeweils eine Königin allein ein Nest. Zunächst wiesen die Forscher nach, dass diese Wespen keine unterschiedlich gezeichneten Gesichter haben, und auch, dass sie unter natürlichen Bedingungen Individuen nicht erkennen. Dann ließen sie sie verschiedene Abbildungen lernen wie oben für *P. fuscatus* beschrieben.

Wie sich zeigte, lassen sich *P. metricus*-Wespen durchaus darauf trainieren, einzelne Gesichter voneinander zu unterscheiden. Das fällt ihnen allerdings ziemlich schwer: Sie prägen sie sich nicht rascher oder genauer ein als andere Bilder. Ob die Antennen vorhanden sind oder nicht, ist dafür egal. Offensichtlich verfügt diese Art somit über keine spezielle, ganzheitliche Gesichtserkennung. Mit solchen Abbildungen geht sie anscheinend um wie mit jeder anderen Darstellung



MIT FREDL GEN DER UNIVERSITY OF MICHIGAN

Jede Wespe der Art *Polistes fuscatus* hat ein anders gezeichnetes Gesicht, und Nestgenossinnen erkennen einander daran. Sie nutzen das im Umgang miteinander in der Ranghierarchie.

auch – wie mit einer Ansammlung von unabhängigen Details, vielleicht so wie wir zunächst mit chinesischen Schriftzeichen.

Wie weit lässt sich die Gesichtsunterscheidung bei Insekten treiben, die darauf nicht spezialisiert sind? Können sie sogar lernen, Menschengesichter auseinanderzuhalten? Diese Idee kam einem von uns (Dyer) durch Tibbetts' erste Studien an den Feldwespen. Dyer erforscht die visuelle Wahrnehmung von Honigbienen – genauer von *Apis mellifera*, der Westlichen oder Europäischen Honigbiene.

Schwieriger Prüfstein: Bilder von ähnlichen Menschengesichtern

Bei seinen Versuchen verwendete er Bilder menschlicher Gesichter aus einem standardisierten neurowissenschaftlichen Test. Die Gesichter ähneln sich ziemlich, so dass selbst menschlichen Teilnehmern manchmal Fehler unterlaufen. Den Bienen wollte Dyer beibringen, dass von zwei präsentierten Gesichtern nur eines das richtige ist. Wählten sie korrekt, erhielten sie Zuckerwasser, andernfalls einen bitteren Chininsaft. Zwar benötigten die Insekten dafür ein Weilchen, aber in 50 Versuchen lernten sie, recht zuverlässig die Unterscheidung zu treffen. Und mehr noch – sie konnten ein »richtiges« Gesicht zwischen mehreren für sie neuen Gesichtern finden.

Obwohl die Honigbienen diese Aufgaben vergleichsweise mühsam lernten, zeigten sie in weiteren Studien ein paar

verblüffende Leistungen, die an menschliche Gesichtserkennung erinnern. Zum einen scheinen sie mit der Zeit doch die Antlitze in gewissem Maß als Ganzheit wahrzunehmen, trotz fehlender fester neuronaler »Verdrahtung« für eine solche Wahrnehmung. Zum anderen kann man ihnen beibringen, dass Aufnahmen desselben Gesichts aus verschiedenen Richtungen zusammengehören, und sie ordnen danach ein weiteres, aus einem neuen Blickwinkel aufgenommenes Bild vom selben Menschen richtig zu. Kennt die Biene beispielsweise die Frontalansicht und das Profil, sucht sie eine halb von der Seite gemachte, unbekannte Aufnahme des Gesichts korrekt heraus. Diese Befunde sind deswegen so überraschend, weil das Sozialgefüge der Honigbienen insofern deutlich einfacher ist als das der Feldwespe *Polistes fuscatus*, als es im Stock nur eine Königin gibt und dazu eine Menge praktisch identischer Arbeiterinnen, die altersabhängig alle die gleichen Aufgaben erledigen. Außerdem haben diese Bienen keine erkennbar unterschiedlichen Gesichter. Bei Sozialkontakten im dunklen Stock orientieren sie sich ohnehin kaum visuell, sondern unter anderem stark an Duftstoffen, etwa komplexen Signalen durch Pheromone. *P. fuscatus* legt dagegen ihre kleinen Nester im Offenen an, so dass einiges Licht hineinfällt.

Die hier vorgestellten Erkenntnisse könnten die Entwicklung von automatischen Gesichtserkennungssystemen weiter voranbringen. Ein Gesicht aus verschiedenen Richtungen zu identifizieren, gilt dabei als besondere Herausforderung.



MIT FROLDGEN DER UNIVERSITY OF MICHIGAN

Wenn die Forscher erst wissen, wie dies einem winzigen Bienehirn gelingt, das so viel einfacher angelegt ist als jenes von Primaten, müsste es gelingen, mit ähnlichen Feinheiten die Software für die Informationsverarbeitung zu verbessern.

Die Befunde bei den Insekten liefern Ideen, wie die Evolution einer spezialisierten Gesichtswahrnehmung abgelaufen sein könnte. Eine Art wie die Honigbiene, die es lernen kann, zwischen einzelnen Gesichtern zu unterscheiden, obwohl sie nicht über ein zugehöriges spezifisches Erkennungssystem verfügt und es in ihrem normalen Leben auch nicht benötigt, benutzt stattdessen vielleicht ihr großes Talent zur Mustererkennung. Dieses dient sonst vornehmlich dem Nahrungssammeln.

Für die Herausbildung eines speziellen Systems zur Gesichtserfassung mag das ein evolutionärer Zwischenschritt gewesen sein. Vorfahren von *Polistes fuscatus* könnten sich irgendwann in einer Umwelt wiedergefunden haben, wo es für Überleben und Fortpflanzung günstig war, zwischen Individuen zu differenzieren. Zunächst benutzten die Tiere dafür vermutlich die gewöhnliche Mustererkennung. Doch mit der Zeit förderte die natürliche Selektion Wespen, denen dieses Lernen leichter fiel – bis das Gehirn irgendwann einen Mechanismus entwickelt hatte, der das Gesichtererkennen fast wie von selbst geschehen ließ.

Diese Evolution kann nicht lange gedauert haben, denn die beiden Feldwespen *P. fuscatus* und *P. metricus* sind eng miteinander verwandt. Wahrscheinlich besaß der letzte gemeinsame Vorfahr ein eher einfaches Erkennungssystem wie *P. metricus*. Doch das genügte bereits als Grundlage für alles Weitere. ~

DIE AUTOREN



Elizabeth A. Tibbetts ist Professorin an der University of Michigan in Ann Arbor in der Abteilung für Ökologie und Evolutionäre Biologie. **Adrian G. Dyer** hat eine Professur an der RMIT University in Melbourne. Als Wahrnehmungsforscher und Fotograf untersucht er in Verhaltensstudien, wie das visuelle System verschiedener Tiere komplexe Information verarbeitet.

QUELLEN

- Avargues-Weber, A. et al.:** Configural Processing Enables Discrimination and Categorization of Face-Like Stimuli in Honeybees. In: *Journal of Experimental Biology* 213, S. 593–601, 2010
- Dyer, A.G., Vuong, Q.C.:** Insect Brains Use Image Interpolation Mechanisms to Recognise Rotated Objects. In: *PLOS One* 3, e4086, 2008
- Sheehan, M.J., Tibbetts, E.A.:** Specialized Face Learning Is Associated with Individual Recognition in Paper Wasps. In: *Science* 334, S. 1272–1275, 2011
- Tibbetts, E.A.:** Visual Signals of Individual Identity in the Wasp *Polistes fuscatus*. In: *Proceedings of the Royal Society of London B* 269, S. 1423–1428, 2002
- Tibbetts, E.A., Dale, J.:** Individual Recognition: It Is Good to Be Different. In: *Trends in Ecology and Evolution* 22, S. 529–537, 2007

LITERATURTIPP

Tierische Tricks. Spektrum der Wissenschaft Spezial Biologie, Medizin, Hirnforschung 4/2014
Beiträge über raffinierte und komplexe Verhaltensleistungen verschiedenster Tierarten

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304059

Der Preis unserer Langlebigkeit

Menschen werden viel älter als andere Primaten. Die biologischen Gründe hierfür reichen weit in die Urzeit zurück. Allerdings erkaufen wir unser langes Leben mit Alterskrankheiten – verursacht durch die gleichen Genmutationen.

Von Heather Pringle

Ein heruntergekommener Stadtteil von Lima an einem Sonntagmorgen. Im Hinterhof des peruanischen Nationalen Instituts für Neurowissenschaften wartet gespannt eine Gruppe gut gekleideter Männer. Bald erscheint ein kleiner weißer Transporter. Als der Fahrer die hintere Tür öffnet, sieht man fast ein Dutzend eingehüllte Körper: Mumien. Vorsichtig heben zwei der Leute die erste auf eine bereitstehende Krankenliege und rollen sie in die Röntgenabteilung des Instituts.

Einer der Wissenschaftler, die zusammen mit Regierungsmitarbeitern das Ausladen überwachen, ist Caleb Finch. Seit Monaten hat der Biologe und Altersforscher von der University of Southern California in Davis diesen Moment herbeigesehnt. Die bis zu 1800 Jahre alten Mumien stammen von Frauen, Männern und Kindern, die in der peruanischen Küstenwüste begraben wurden. Die Toten waren nur in Stoffe gewickelt und mumifizierten dann in der Trockenheit auf natürliche Weise.



Selbst hochbetagte Menschenaffen wie dieses Gorillaweibchen erreichen lange nicht das Alter von Menschen.

Finch sucht nach einer Erklärung dafür, warum Menschen so viel älter werden als andere Primaten, ja selbst als die Menschenaffen. In reichen Industrienationen beträgt die durchschnittliche Lebenserwartung von Neugeborenen inzwischen an die 80 Jahre, in vielen Drittweltländern etwa 60 Jahre, die eines Schimpansenbabys in Afrika dagegen nur etwa 13 Jahre.

Unsere heutige hohe Lebenserwartung wird meist auf Fortschritte der Medizin und Hygiene sowie eine gesündere Lebensweise zurückgeführt: auf das Zurückdrängen von Infektionskrankheiten mit Antibiotika und Impfstoffen, auf sauberes Trinkwasser und eine durchdachte Abwasserentsorgung, aber auch darauf, dass wir zu jeder Jahreszeit frisches Gemüse und Obst essen können.

Ohne Zweifel haben solche Errungenschaften das Leben der Menschen in den letzten 200 Jahren maßgeblich verlängert. Dennoch erklären sie die menschliche Langlebigkeit im Vergleich zu anderen Primaten letztlich nicht zufrieden stellend. Finch verfolgt deswegen eine andere These, die sich auf Befunde der physischen Anthropologie, Primatologie, Genetik und Medizin stützt. Er vermutet, dass beim Menschen schon früh in der Evolution ein Trend zum langsameren Altern und zu einer generell längeren möglichen Lebensspanne einsetzte. Bereits in Urzeiten, so seine Idee, erwarben unsere Vorfahren eine zunehmend leistungsfähigere Immunabwehr gegen die vielen Krankheitserreger und Reiz-

AUF EINEN BLICK

IMMUNSTÄRKE MIT NEBENEFFEKT

1 Der Mensch wird deutlich älter als andere Primaten – und das nicht allein wegen besserer **Ernährungsbedingungen** und **gesundheitlicher Versorgung**.

2 Schon die frühen Menschen hatten auffallend **starke Abwehrkräfte** gegen Krankheitskeime erworben. Dadurch überstanden sie insbesondere die Kindheit häufiger. Und sie konnten sich die leicht verderbliche **Fleischnahrung** gut zu Nutze machen.

3 Allerdings förderten die damit einhergehenden Entzündungsprozesse **Alterskrankheiten wie Arteriosklerose**, was sich schon bei Mumien aus verschiedenen Kulturen zeigt.

stoffe, denen sie ausgesetzt waren. Sollte sich diese These bestätigen, würde sie unser Verständnis des Alterns revolutionieren. Denn die komplexen Zusammenhänge zwischen Infektionen, Immunabwehr und chronischen Erkrankungen erschienen in einem neuen Licht.

Dass unsere hohe Lebenserwartung nicht allein auf der modernen Medizin und Hygiene beruht, zeigen schon demografische Erhebungen an heutigen Jäger-und-Sammler-Völkern. Seit 1985 hat der Anthropologe Nicholas Blurton-Jones von der University of California in Los Angeles zusammen mit seinem Assistenten Gudo Mahiya im Lauf von 15 Jahren sechsmal die Hadza aufgesucht – eine isolierte, sehr



DREAMSTIME / BOWIE15

alte ethnische Gruppe mit inzwischen unter 1000 Personen, die verstreut in kleinen Gruppen am Eyasisee in Tansania lebt und eine völlig eigene Sprache spricht. Viele Hadza benutzten noch Steinwerkzeuge wie vermutlich seit Jahrtausenden, jagten Paviane und Gnus, gruben stärkehaltige Knollen aus und holten sich in der Regenzeit Honig der Afrikanischen Honigbiene (siehe Bild S. 43).

Die beiden Forscher besuchten die einzelnen Siedlungen und erfassten die Mitglieder aller Haushalte mit Namen und Alter. Diese Daten aktualisierten sie bei jedem neuen Besuch, inklusive Sterbefällen und Todesursachen. Zusätzlich konnten sie frühere demografische Aufzeichnungen zweier anderer Anthropologen auswerten.

Zu der Zeit lebten die Hadza noch in engstem Kontakt mit der Natur. Sie waren jeder Menge Parasiten und bakterieller Erreger ausgesetzt. Im Umgang mit Wasser und Abwässern folgten sie uralten, nach unseren Maßstäben völlig unhygienischen Gewohnheiten. Ihre Notdurft verrichteten sie im Umkreis von 20 bis 40 Metern um ihre Lager, Wasser holten sie aus kleinen Wasserlöchern. Moderne medizinische Hilfe nahmen sie kaum in Anspruch. Trotz alldem betrug die Lebenserwartung von Neugeborenen 32,7 Jahre, also zweieinhalbmal so viel wie die von jungen Schimpansen. Und wer das Erwachsenenalter erreichte, lebte danach im Mittel noch weitere 40 Jahre – fast dreimal so lange wie Schimpansen im Freiland. Einige von ihnen wurden sogar über 80 Jahre alt.

Seit wann altern Menschen langsamer?

Die Hadza sind aber keine Ausnahme. Das erwies eine vergleichende Analyse über alle fünf modernen Jäger-und-Sammler-Gesellschaften, von denen Forscher Lebenszeitdaten zusammengetragen hatten. Diese Studie führten die Anthropologen Michael Gurven von der University of California in Santa Barbara und Hillard Kaplan von der University of New Mexico in Albuquerque 2007 durch. Die Muster waren stets ähnlich. Infektionen verursachten 72 Prozent der Todesfälle. Die Kindersterblichkeit betrug bis zu 30 Prozent; im jungen Erwachsenenalter war die Todesrate gering, und nach dem 40. Lebensjahr stieg sie exponentiell an. Der Vergleich mit Sterblichkeitskurven sowohl von wild als auch von in Gefangenschaft lebenden Schimpansen zeigte: Bei ihnen liegt der scharfe Aufwärtsknick für die Erwachsenen wenigstens zehn Jahre früher. Sie scheinen selbst in geschützter Umgebung und bei guter Versorgung wesentlich schneller zu altern als Menschen und jünger zu sterben.

Doch wann in unserer Evolution ist dieser Unterschied aufgekommen? Die Anthropologinnen Rachel Caspari von der Central Michigan University in Mount Pleasant und Sang-Hee Lee von der University of California in Riverside kamen auf die Idee, an menschlichen Fossilien das Sterbealter anhand der Zahnabnutzung und der Weisheitszähne zu bestimmen. Sie untersuchten 768 Individuen: Vertreter des steinzeitlichen *Homo sapiens* in Europa, von Neandertalern, von einem frühen *Homo* und von Australopithecinen.



Ab dem Alter von 15 Jahren stuften sie die Individuen als fortpflanzungsfähig und erwachsen ein, ab 30 Jahren als potenzielle Großeltern. Die meisten Australopithecinen waren vor dem 30. Geburtstag gestorben; von den Neandertalern hatte immerhin ein gutes Viertel der Erwachsenen länger gelebt; aber erst von den modernen Europäern starben zwei Drittel der Erwachsenen mit über 30 Jahren (siehe SdW 4/2012, S. 24).

Die genaue Lebenserwartung lässt sich bisher für frühe Populationen des *Homo sapiens* nicht ermitteln, ja nicht einmal die für lange Spannen historischer Zeit. Die wohl ersten einigermaßen vollständigen demografischen Daten über Bevölkerungszahlen, Altersstruktur und Sterbealter wurden 1751 in Schweden zusammengetragen, also bevor moderne Hygiene und Medizin Einzug hielten. Gemeinsam mit der Gerontologin Eileen Crimmins, ebenfalls von der University of Southern California, hat Finch diese Listen durchgesehen. Demnach betrug die Lebenserwartung von Neugeborenen in Schweden Mitte des 18. Jahrhunderts 35 Jahre. Und wer in der Jugend Seuchen und Kinderkrankheiten überstand, hatte als 20-Jähriger gute Aussichten, 60 Jahre alt zu werden.

Was könnte bereits zu jener Zeit die langen Lebensspannen ermöglicht haben? Schließlich wohnten die Schweden damals eng beieinander in Städten und größeren Dörfern. Überall lauerten Infektionen – was die kleinen, herumziehenden Horden der Schimpansen so nicht kennen. Wenn Finchs Verdacht zutrifft, dann haben sich Menschen wegen des regelmäßigen Fleischkonsums schon in Urzeiten einen besonderen erblichen Schutz gegen infektiöse Keime zugelegt: Gene, die ihnen halfen, jene besonderen Ansteckungsrisiken zu meistern, welche von diesen Mahlzeiten und ihrer Beschaffung ausgingen.

Schimpansen schlafen in ihren weitläufigen Gruppenterritorien selten zweimal im selben Nest. Zu Bäumen mit reifen Früchten, ihrer Hauptnahrung, pflegten sie größere Strecken zu wandern und dann oft in der Nähe zu übernach-

Arterienverkalkung ist keine moderne Krankheit. Sie war schon im alten Ägypten verbreitet, wie Mumien zeigen. Der zwischen 40 und 50 Jahre alte Schreiber Hatiay, der vor rund 3400 Jahren starb, hatte verkalkte Halsschlagadern (rechts). Mumien aus vier sehr verschiedenen Kulturen und Zeiten wurden in einem Computertomografen durchleuchtet (links). Stets hatte ein Teil der Menschen an Arteriosklerose gelitten.



MIT FOLGEN VON M. LINDA SUTHERLAND

ten. Zwar fressen sie ausgesprochen gern Fleisch, und es gelingt ihnen hin und wieder, zum Beispiel kleine Affen oder Huftiere zu erbeuten. Doch sie scheinen nicht regelrecht auf Jagd zu gehen. In Tansania beträgt der Fleischanteil ihrer Nahrung übers Jahr gesehen höchstens fünf Prozent. Eine Studie in Uganda ergab, dass dort vom Trockengewicht des Futters der Schimpansen lediglich 2,5 Prozent tierisches Fett sind.

Höchstwahrscheinlich, erklärt Finch, verzehrten unsere Vorfahren vor mehreren Millionen Jahren ebenfalls noch überwiegend Pflanzenkost. Doch irgendwann im Zeitraum von vor 3,4 bis vor 2,5 Millionen Jahren könnten sie darauf gekommen sein, sich regelmäßig tierische Protein- und Fettmahlzeiten zu verschaffen. Wie Fundstätten in Äthiopien zeigen, zerlegten sie nun mit einfachen Steinwerkzeugen Überreste großer Huftiere, etwa Antilopen. Schnittspuren an Oberschenkelknochen und Rippen solcher Tiere zufolge müssen sie Fleischstücke abgesäbelt haben. Auch zerschlugen sie die Knochen, offenbar um an das fettreiche Mark zu gelangen. Spätestens vor 1,8 Millionen Jahren gingen Menschen selbst auf Großwildjagd und schleppten ganze Beutetiere in ihre Lager (siehe auch SdW 7/2014, S. 34). Vermutlich trug die energie- und proteinreiche Nahrung zur Größenzunahme des Gehirns bei.

Allerdings hatte die neue Ernährungsweise auch ihre Nachteile. Auf Aas, rohem Fleisch und Eingeweiden siedeln sich leicht gefährliche Keime an. Und das Jagen und Überwältigen eines großen, wehrhaften Beutetiers bringt oft Wunden und Knochenbrüche mit sich – also Infektionsherde.

Neue Widrigkeiten kamen hinzu, als die Menschen vor vielleicht einer Million Jahren damit begannen, Nahrung zu erhitzen. Mit dem Rauch atmete man Rußpartikel und Endotoxine – hitzestabile, schädliche bakterielle Zerfallsproduk-

te – ein, und das möglicherweise täglich. Geröstetes oder gegrilltes Fleisch schmeckt zwar besser und ist leichter verdaulich; jedoch entstehen beim Bräunungsprozess so genannte AGEs: nichtenzymatisch-glykierte (verzuckerte) Endprodukte (englisch: advanced glycation end products). Solche Substanzen kann auch der Körper bei zuckeriger Nahrung selbst bilden. Sie sind toxisch und können verschiedene Entzündungen und eine Reihe von Erkrankungen wie Arthritis, Bluthochdruck oder Diabetes mellitus hervorrufen.

Der Beginn der Tierhaltung und Landwirtschaft vor ungefähr 11 500 Jahren steigerte wiederum die Ansteckungsgefahren, weil die Menschen nun am selben Ort blieben und feste Siedlungen gründeten. Auch von ihren Haus- und Nutztieren holten sie sich vielerlei Krankheiten. Überdies verschmutzten die allgegenwärtigen Abfälle, Abwässer und Fäkalien oft die nähere Umgebung und die Wasserstellen.

Umso erstaunlicher ist die doch recht hohe Lebenserwartung in Schweden Mitte des 18. Jahrhunderts. Finch hoffte, dass das menschliche Genom eine Erklärung liefern würde. Also durchforstete er die wissenschaftliche Literatur zum Erbgut von Schimpanse und Mensch. Zu etwa 99 Prozent sind die DNA-Sequenzen der Gene bei beiden gleich. Unter den vergleichsweise wenigen unterschiedlichen und einzigartigen Genen fand das Team um den Evolutionsbiologen Hernán Dopazo, der damals am Centro de Investigación Príncipe Felipe in Valencia (Spanien) arbeitete, auffallend viele, die offensichtlich unter positiver Selektion gestanden hatten. Dabei setzten sich bestimmte Allele (Genversionen) durch, vermutlich weil sie vorteilhaft gewesen waren. Die betreffenden Gene spielen Schlüsselrollen in der Erregerabwehr und im Immunsystem.

Hatte das menschliche Immunsystem wegen der Gefahren fleischreicher Nahrung aufgerüstet?

Speziell bei Entzündungsreaktionen nehmen ihre Proteine Aufgaben wahr. Hatte das menschliche Immunsystem etwa hochgerüstet, um den Gefahren fleischreicher

Ernährung besser begegnen zu können? War das womöglich sogar ein Schlüssel zu unserer Langlebigkeit? Laut Finch könnte schon der frühe Mensch Anpassungen entwickelt haben, die Pathogene und Schadstoffe effektiver bekämpfen.

Gegen Krankheitserreger verwendet unsere Abwehr zwei Streitkräfte: das »angeborene« und das »erworbene« Immunsystem. Ersteres reagiert unverzüglich am Ort der Gefahr, etwa in einer Wunde. Unabhängig von der Art der Bedrohung geht die angeborene Abwehr stets mit der gleichen Ausrüstung vor. Anders das erworbene Immunsystem: Es benötigt etwas Zeit, um voll in Fahrt zu kommen, passt derweil seine Kämpfer aber möglichst genau an den jeweiligen Angreifer an. Zugleich richtet es ein immunologisches Gedächtnis ein, das oft einen lebenslangen spezifischen Schutz gegen den Eindringling verleiht.

Die Entzündungsreaktion ist ein wichtiger Mechanismus des angeborenen Immunsystems. Sie tritt bei Gewebeschäden zum Beispiel durch Verletzungen oder Gifte auf. Schon

vor 2000 Jahren beschrieb der römische Enzyklopädist und Medizinschriftsteller Aulus Cornelius Celsus vier charakteristische Kennzeichen betroffener Gewebe: Erhitzung, Rötung, Schwellung, Schmerz (lateinisch: calor, rubor, tumor, dolor). Die ersten beiden rühren von einem verstärkten Bluteinstrom her. Die Schwellung entsteht, weil die Gefäße durchlässiger werden, so dass Zellen und Flüssigkeit in das kranke Gewebe fluten – zugleich damit aber auch Proteine, die das Vordringen von Keimen unterbinden helfen und die Wundheilung anregen. Außerdem entstehen bei Entzündungen schmerzauslösende Substanzen.

Bei seinen Nachforschungen über auffällig veränderte Gene des Menschen im Zusammenhang mit Abwehrreaktionen fiel Finch *APOE* auf, das Gen von Apolipoprotein E. Dieses Protein ist wichtig für den Fetttransport und -stoffwechsel, die Hirnentwicklung und das Immunsystem. Die drei menschlichen Hauptvarianten des Gens gibt es bei anderen Primaten nicht. Von ihnen kommen die Allele *APOE-e4* und *APOE-e3* am häufigsten vor.

APOE-e4 ähnelt noch stark dem *APOE*-Gen des Schimpansen. Diese Variante könnte vor über zwei Millionen Jahren entstanden sein, als die Gattung *Homo* auftrat, und stellt somit vielleicht die ursprüngliche menschliche Version dar. Gut möglich, dass sein Genprodukt bereits die Lebensdauer erweiterte. Denn das Protein von *APOE-e4* weist gegenüber dem Schim-

pansenprotein mehrere andere Aminosäuren auf, wodurch akute Entzündungsreaktionen viel stärker ausfallen. Und zwar treibt es die Produktion von Signalproteinen an – darunter die von Interleukin-6, das die Körpertemperatur erhöht, und vom Tumornekrosefaktor-alpha, der ebenfalls Fieber erzeugt und Viren an der Vermehrung hindert.

In der Urzeit müssen Menschen mit diesem Gen – und gerade auch schon die Kinder – gegenüber Krankheitserregern im Vorteil gewesen sein. Nicht nur die Nahrung wimmelte davon, auch die Savanne, die sie zu ihrem Lebensraum erkoren hatten. Finch malt ein drastisches Bild: Man sei dort barfuß knöcheltief im Dung von Pflanzenfressern gelaufen. Das *APOE-e4*-Gen hatte wohl noch eine weitere gute Eigenschaft. Sein Protein erleichtert die Aufnahme von Fett im Darm und

seine Speicherung im Gewebe. Das könnte den Menschen über wildarme Zeiten hinweggeholfen haben.

Dass dieses Gen noch heute vielen Kindern nützt, ergab eine Studie in einem brasilianischen Elendsviertel. Diejenigen, die das Allel *APOE-e4* besaßen, schnitten bei Intelligenztests besser ab, vermutlich weil ihr Darm mehr Cholesterin aufnahm, das die Hirnnervenzellen zur Entwicklung benötigen. Vor allem aber litten diese Kinder seltener an Durchfällen durch *Escherichia coli* oder *Giardia*, einen Einzeller, der sich an die Darmwand heftet.

APOE-e4 scheint allerdings eine gravierende Kehrseite zu haben, die sich vertrackterweise erst im höheren Alter zeigt – also erst deutlich zum Vorschein kam, als die Menschen älter wurden. Vermutlich trägt es zu typischen Altersgebrechen wie Arteriosklerose bei. Diesem Phänomen will das internationale Team von Kardiologen, Radiologen, Biologen und Anthropologen an den peruanischen Mumien nachgehen. Insbesondere sollen medizinische Experten die Arterien und Herzkranzgefäße in Augenschein nehmen, sofern sie gut genug erhalten sind.

Seit Stunden drängen sich die Forscher in der radiologischen Abteilung des Instituts in Lima. Bisher sind sie

enttäuscht. Manche Mumien passten nicht in den Computertomografen. Andere konnten zwar durchleuchtet werden, doch mehr als Skelettreste war kaum zu erkennen. Nun liegt der

nächste eingehüllte Körper im Gerät. Wieder beugen sich die Forscher über den Monitor, auf dem verschieden tiefe Ebenen einer oft kaum zu erahnenden anatomischen Landschaft erscheinen. Zum Team gehören auch die Spezialisten Gregory Thomas vom Long Beach Memorial Medical Center in Kalifornien und Randall C. Thompson von der University of Missouri in Kansas City. Als der Techniker die Bilder immer wieder hin- und herbewegt, gelingt es den beiden Kardiologen nach und nach, Weichgewebe und den Verlauf von großen Arterien zu identifizieren.

Spürbare Erleichterung im Raum. Die beiden Mediziner können nicht widerstehen: Sie schauen schon einmal, ob sie entlang der Arterien kleine, dichte weiße Flecken erkennen können. Das wären verhärtete Ablagerungen, Anzeichen für fortgeschrittene Verkalkung. Und tatsächlich – dieser Mensch hatte Arteriosklerose, die wichtigste Ursache von Herzinfarkt und Schlaganfall.

Bisher galt eine Arterienverkalkung als moderne Zivilisationskrankheit, weil zu den Ursachen Rauchen, Bewegungsmangel, eine ungesunde, zu kalorienreiche Ernährung und Übergewicht zählen. Sogar in den Schwellenländern, deren Bevölkerung mit steigendem Einkommen den westlichen Lebensstil übernimmt, bahnt sich neueren Studien zufolge mittlerweile eine regelrechte Arterioskleroseepidemie an. Im Jahr 2010 beschlossen Thomas und einige Kollegen, den vermuteten Zusammenhang an computertomografischen

Ein besonderes Gen des Stoffwechsels, das Kindern nützt, trägt zu typischen Altersgebrechen bei

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



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

www.spektrum.de/altern





In der Umwelt von modernen Jägern und Sammlern – wie den Hadza in Tansania – wimmelt es von Parasiten und anderen Krankheitserregern. Trotzdem haben diese Menschen eine wesentlich höhere Lebenserwartung als beispielsweise Schimpansen, vermutlich auch dank besonderer Immungene.

Aufnahmen von alten Mumien zu prüfen. Denn in früherer Zeit sollten die Menschen eigentlich gesunde Adern gehabt haben, dachte man damals.

Mit ägyptischen Mumien fingen die Mediziner an. Sie durchleuchteten 52 Exemplare von Menschen, die vor 2000 bis 3500 Jahren gelebt hatten. Das Sterbealter jedes einzelnen schätzte der Anthropologe Muhammad Al-Tohamy Soliman vom Nationalen Forschungszentrum in Giseh anhand der Gebisse und Skelette. Im Durchschnitt betrug es 40 Jahre. Anschließend brüteten die Kardiologen einige Monate lang über den Aufnahmen und konferierten wöchentlich per Skype. Letztlich konnten sie bei 44 (fast 85 Prozent) der Mumien Gewebe des Herz-Kreislauf-Systems ausmachen. Sie staunten allerdings, als sie bei 20 davon, also knapp der Hälfte, sichere oder wahrscheinliche Anzeichen einer Arteriosklerose erkannten. Noch mehr verwunderte sie, in welchem frühem Lebensalter die Arterienverkalkung oft aufgetreten war, wie einer der Beteiligten, James Sutherland von einem radiologischen Diagnosezentrum in Laguna Hills (Kalifornien), berichtet. Im Mittel waren die Betroffenen 45 Jahre alt gewesen, einzelne erst Mitte 30, und hatten trotzdem schon schwer verkalkte Gefäße.

Gleich nachdem die Arbeit im Frühjahr 2011 im »Journal of the American College of Cardiology« erschienen war, nahm Finch zu den Autoren Kontakt auf. Er unterbreitete ihnen eine neue Idee, die den unerwarteten Befund erklären würde. Es war inzwischen erwiesen, dass die Menschen Altägyptens häufig von Seuchen und vielerlei Infektionen heimgesucht wurden: von Malaria und Tuberkulose bis zu Wurmkrankheiten wie Bilharziose, die man sich in Gewässern einfängt. Solche Bedrohungen und alle möglichen Kinderkrankheiten hatten Träger des *APOE-e4*-Gens in jungen Jahren vermutlich oft recht gut überstanden. Allerdings

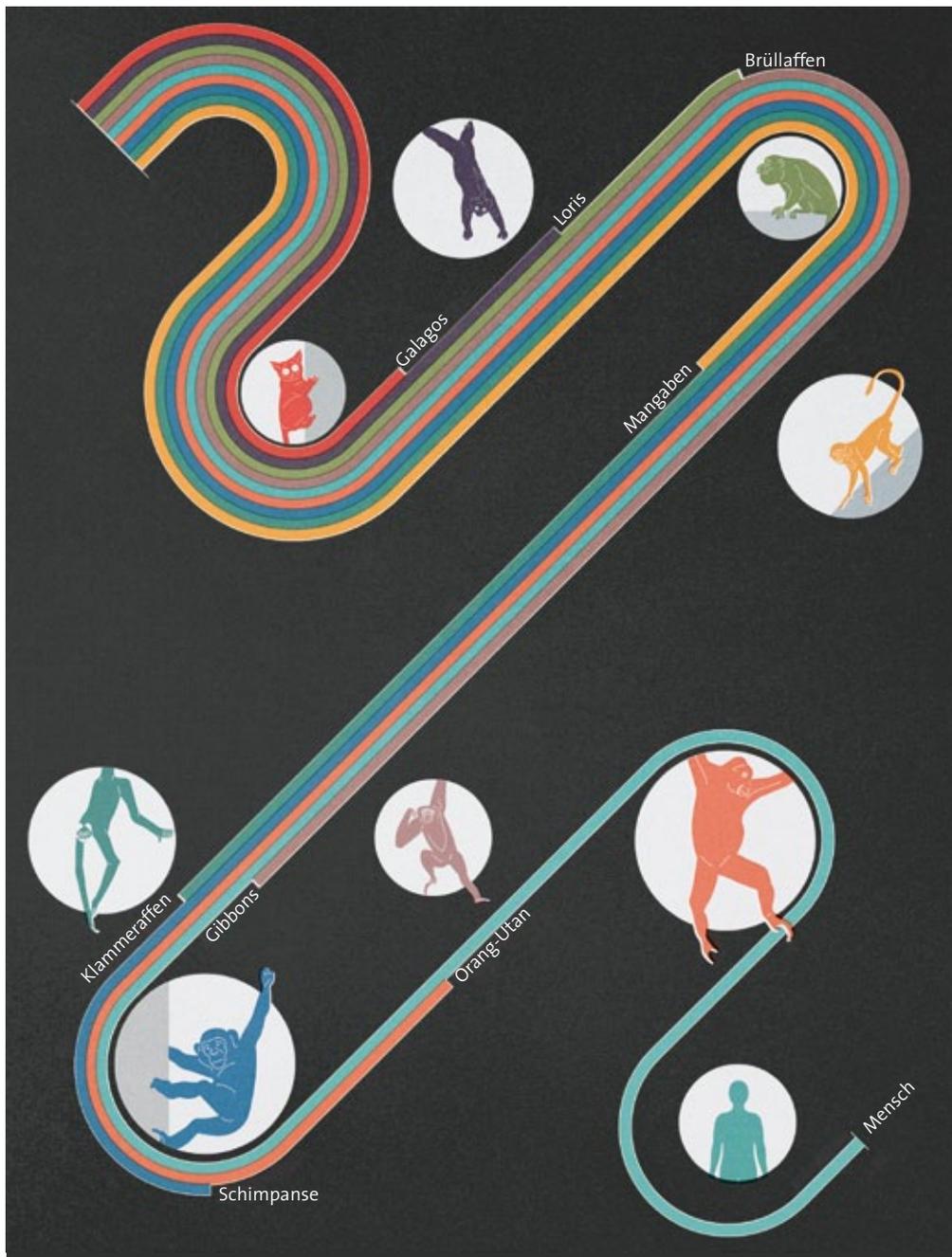
erkauften sie ihre Widerstandsfähigkeit nach der neuen Theorie mit fortwährenden Entzündungen, und das über Jahrzehnte. Dies hielt Finch für den Schlüssel, denn hohe Entzündungsgrade setzen Mediziner heute in Beziehung zu einigen schwer wiegenden Alterskrankheiten, darunter die Alzheimerdemenz – und auch Arteriosklerose.

Spätfolgen von Entzündungsreaktionen

Arteriosklerotische Ablagerungen in den Gefäßwänden scheinen während Entzündungsreaktionen und Wundheilungsprozessen tatsächlich zuzunehmen. Die Plaques der Alzheimerkrankheit mit den Verkalkungen der Gefäßwände gleichzusetzen, geht Finch zwar zu weit. Dennoch hätten die beiden Phänomene viele Gemeinsamkeiten.

Von Thomas und seinen Kollegen bekam Finch das Angebot, sich ihnen anzuschließen. Gemeinsam überlegten die Forscher, ihre Mumienstudien auf weitere frühere Kulturen und Populationen auszuweiten. Denn sicherlich hatten die bisher untersuchten Altägypter in der Regel höheren Gesellschaftsschichten angehört, die es sich leisten konnten, ihre Toten aufwändig zu erhalten. Gut möglich, dass sich jener Personenkreis körperlich wenig betätigte und kräftig aß – somit genau die Kriterien erfüllte, vor denen Ärzte heute warnen. Sollten diese Faktoren allerdings nicht allein für die Alterskrankheiten verantwortlich sein, müssten sich frühzeitige Anzeichen dafür auch bei anderen alten Völkern finden, die einfacher lebten.

Also untersuchten die Wissenschaftler nun die Mumien aus Peru. Diese Toten waren nicht extra einbalsamiert worden, sondern im Wüstenklima getrocknet. Zusätzlich begutachteten die Forscher bereits vorhandene Computertomografieaufnahmen von einigen bis über 1000 Jahre alten Mumien der Puebloindianer aus Utah sowie Mumien der



Die Grafik veranschaulicht – stark vereinfacht – die Lebensspanne verschiedener Gruppen und Arten von Primaten im Vergleich zu einander. Der Lebensfaden des Menschen ist mit Abstand der längste.

Unangan, der Ureinwohner der Aleuten vor Alaska, aus dem 19. und frühen 20. Jahrhundert. Insgesamt waren 137 der durchleuchteten mumifizierten Körper in einem ausreichend guten Zustand, um aufschlussreiche Daten zu gewinnen. Die Ergebnisse wurden im Frühjahr 2013 veröffentlicht.

Von diesen 137 Personen litten 47 (34 Prozent) eindeutig oder höchstwahrscheinlich an Arteriosklerose. Und in allen vier untersuchten Gruppen war ein recht hoher Anteil betroffen, sogar bei den Unangan, die sich überwiegend aus dem Meer ernährten und als Jäger und Sammler einzustufen sind. Die Forscher folgerten hieraus: Arteriosklerose geht nicht allein auf unsere heutige Lebensweise zurück. In ihrer Arbeit schreiben sie, dass die früher vermutlich häufigen

Entzündungen und chronischen Infektionen der Gefäßverkalkung Vorschub leisteten.

Einen Zusammenhang mit der *APOE-e4*-Genvariante hält Finch hierbei durchaus für möglich. Denn deren Träger sind zwar besser gegen Infektionen gefeit und erreichen somit leichter das Fortpflanzungsalter, bezahlen dies aber mit Entzündungsreaktionen, die ihnen später im Leben unter Umständen einen Herzinfarkt, Schlaganfall, eine Alzheimerdemenz oder ein anderes chronisches Altersleiden bescheren. Jene Genvariante scheint einen klassischen Fall von »antagonistischer Pleiotropie« darzustellen: eine Erbanlage mit mehreren, vielschichtigen Funktionen, wobei in der Jugend typischerweise die vorteilhaften hervortreten und erst später die nachteiligen.

Vor vielleicht 200 000 Jahren, ungefähr als der *Homo sapiens* in Afrika entstanden war, dürfte eine zweite wichtige *APOE*-Variante aufgetreten sein: *APOE-e3*. Dieses Allel verhilft 40- bis 70-Jährigen zu besserer Gesundheit und verlangsamt die Alterung, vor allem wenn jemand es doppelt besitzt, also von beiden Eltern geerbt hat. In heutigen Populationen tragen 60 bis 90 Prozent der Menschen es mindestens einfach. Entzündungsreaktionen, erklärt Finch, fallen bei den Betroffenen weniger vehement aus als bei Menschen mit der viel älteren Variante *APOE-e4*. Zudem vertragen solche Leute eine fleisch- und fettreiche Kost anscheinend besser. In der Regel ist ihr Cholesterinspiegel niedriger, und sie bekommen nicht so leicht Arteriosklerose und Herzinfarkt oder eine Demenz (siehe auch »Vitale Hochbetagte«, SdW 3/1995, S. 72). Weil die Lebenserwartung mit *APOE-e3* bis zu sechs Jahre höher ist als mit *APOE-e4*, vermuten Finch wie auch andere Experten, dass gerade dieses Allel bei der Evolution der Langlebigkeit eine Rolle spielte.

Wie sich Keime tarnen – und unser Organismus sie doch austrickst

Allerdings sind noch ganz andere Gene beziehungsweise deren Varianten im Zusammenhang mit hohem Alter im Gespräch. An der University of California in San Diego untersuchen Forscher um den Mediziner Ajit Varki die *SIGLEC*-Gene. Diese sitzen in den äußeren Zellmembranen insbesondere von Immunzellen und arbeiten quasi als Spürhunde. Sie sollen aber nicht Feinde melden – die zu bekämpfen wären –, sondern im Gegenteil signalisieren, dass von ihnen ausgemachte Zellen, deren äußere Moleküle sie »prüfen«, als vertraut und unbedenklich zu behandeln sind. Somit tragen sie dazu bei, Immunreaktionen wie etwa die Vermehrung bestimmter Abwehrzellen herunterzuregeln.

Es geschieht immer wieder, dass Krankheitserreger diese Erkennung durch molekulare Anpassungen unterwandern, also gewissermaßen mit Tarnproteinen täuschen. Varki und seine Mitarbeiter entdeckten diesbezüglich beim Menschen gleich für zwei von diesen Genen bemerkenswerte Veränderungen, die vor über 200 000 Jahren aufgetreten sein müssen. Im einen Fall handelt es sich um das alte Primatengen *SIGLEC 17*. Dessen menschliche Variante ist defekt, weil ein Baustein im Gen verschwunden ist. Und das alte Gen *SIGLEC 13* fehlt beim Menschen ganz. Die Forscher haben die ursprünglichen Proteine beider Gene im Labor nachgebaut. Wie sie feststellten, hatten zwei für Kleinkinder lebensbedrohliche Keime – Streptokokken der Gruppe B und *Escherichia coli* K1 – die Erkennungsfähigkeit dieser Proteine durch molekulare Anpassungen unterwandert. Im Gegenzug merzte die natürliche Selektion die beiden Genprodukte aus. Das kam den Säuglingen zugute, weil besagte Erreger nun wieder schärfer bekämpft wurden.

Nach Varki scheinen sich unsere Abwehrkräfte im Lauf der menschlichen Evolution in vieler Hinsicht verändert zu haben. Für die Zukunft erwarten die Wissenschaftler auf dem Feld der Evolution und Genetik noch manche aufschluss-

reichen Entdeckungen zu unserer langen Lebensspanne. Bereits jetzt geben die Erkenntnisse Medizinern Anlass zum Umdenken. Galten bisher Bewegungsmangel und Überernährung als Hauptursachen von Arteriosklerose, Herzinfarkt und Schlaganfall, so lassen neue Studien und insbesondere die Befunde an Mumien vermuten, dass die Erbanlagen und ein durch sie übermäßig aktiviertes und dann stark gefordertes Immunsystem bei vielen Alterskrankheiten wohl nicht ganz unschuldig sind. »Es könnte bedeuten, dass Arteriosklerose doch weniger vom Lebensstil beeinflussbar ist als gedacht«, überlegt der Kardiologe Thompson. Es wäre daher gut, verstärkt bisher unbekannte Risikofaktoren zu ergründen.

Einige Forscher rechnen damit, dass die Lebensspanne sogar in Ländern mit bereits hoher Lebenserwartung weiter ansteigen wird. Etliche Anfang dieses Jahrhunderts geborene Kinder in den reichen Industrieländern würden demnach 100 Jahre alt. Finch dagegen verweist auf die vielerorts zunehmenden Zahlen stark Übergewichtiger sowie die teils verheerenden Umweltveränderungen durch den Klimawandel. Solche Entwicklungen, die in die Berechnungen nicht einfließen, könnten die allgemeine Lebenserwartung deutlich herabsetzen, warnt der Altersforscher. ~

DIE AUTORIN



Heather Pringle ist eine kanadische Wissenschaftsjournalistin. Unter anderem schreibt sie regelmäßig für das Wissenschaftsmagazin »Science«.

QUELLEN

- Finch, C.E.:** Evolution of the Human Lifespan and Diseases of Aging: Roles of Infection, Inflammation and Nutrition. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 107, S. 1718–1724, 2010
- Thompson, R.C. et al.:** Atherosclerosis across 4000 Years of Human History: The Horus Study of Four Ancient Populations. In: Lancet 381, S. 1211–1222, 2013
- Wang, X. et al.:** Specific Inactivation of Two Immunomodulatory *SIGLEC* Gens during Human Evolution. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 109, S. 9935–9940, 2012

LITERATURTIPPS

- Hundert Jahre und mehr?** Geheimnisse eines langen Lebens. Spektrum der Wissenschaft Dossier 4/2008
- Mensch 2.0.** Können wir unsere biologischen Fesseln sprengen? Spektrum der Wissenschaft Spezial BMH 3/2014
Beide Hefte sind Artikelsammlungen zum Thema Alterung.

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/oct2013/life-span
Vergleich der Lebensspanne des Menschen und anderer Organismen

Diesen Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304060

GALAKTISCHES ZENTRUM

Das Rätsel der fehlenden Pulsare

Läge ein Radiopulsar nahe beim Schwarzen Loch im Herzen der Milchstraße, ließe sich die allgemeine Relativitätstheorie unter extremen Schwerkraftbedingungen testen. Überraschenderweise ging den Astronomen aber jahrzehntelang kein Exemplar ins Netz. Jetzt gelang der Coup – doch das Rätsel erscheint nur noch mysteriöser.

Von Heino Falcke und Michael Kramer

In der Zentralregion der Milchstraße fahnden Astronomen nach schnell rotierenden Neutronensternen, die durch Röntgen- und Radiopulse auf sich aufmerksam machen könnten. Auf diesem Falschfarben-Kompositbild ist das galaktische Zentrum in der rechten Bildhälfte als heller Fleck zu sehen. Röntgenstrahlung ist blau dargestellt, Infrarotstrahlung erscheint rötlich und gelblich.

Die allgemeine Relativitätstheorie bleibt eines der faszinierendsten Konzepte der theoretischen Physik. Mit ihrer Hilfe hat Einstein unsere traditionelle Vorstellung von Raum und Zeit in die einer Raumzeittextur verwandelt, die sich durch Materie und Energie verformen lässt. Aber stimmt die Relativitätstheorie überhaupt? Bei Präzisionsexperimenten im schwachen Gravitationsfeld der Erde ließ sie sich bislang stets bestätigen. Ob sie auch noch in physikalischen Grenzbereichen gilt, ist jedoch ungewiss.

Ideal wäre, sie im extrem starken Gravitationsfeld eines Schwarzen Lochs zu testen, das die Raumzeit so sehr verbiegt, dass die Zeit am Ereignishorizont des Schwarzkraftmonsters geradezu stillzustehen scheint. Dafür bräuchte man auch eine gute Uhr. Zum Glück lassen sich so genannte Pulsare als natürliche Zeitgeber verwenden, deren Genauigkeit der von Atomuhren in nichts nachsteht.

Bei einem Pulsar handelt es sich um den kompakten Überrest eines schweren, großen Sterns, der sein Leben spektakulär als Supernova beendet hat. Bei einer solchen

Explosion wird eine etwa 1,4-fache Sonnenmasse auf einen Durchmesser von nur 20 bis 30 Kilometern verdichtet. Das Ergebnis ist ein Neutronenstern, der sich binnen einiger Millisekunden oder auch Sekunden einmal um sich selbst dreht, ein starkes Magnetfeld mit einer Stärke von 10^4 bis 10^{10} Tesla besitzt und kegelförmig Radiowellen aussendet. Die Ausbreitungsrichtung der Strahlung rotiert dabei mit dem Stern, so dass wir diese auf der Erde in Form höchst regelmäßiger Pulse wahrnehmen – ähnlich dem Licht eines Leuchtturms, das in immer denselben Zeitabständen über uns hinweghuscht.

Doppelsternsysteme, in denen ein Pulsar um einen weiteren Neutronenstern kreist

Die Unwucht eines solchen Sterns ist so verschwindend klein, dass er wie ein extrem gleichmäßig rotierendes, gigantisches Schwungrad funktioniert. Bei manchen Pulsaren können wir die Periodendauer sogar mit Attosekundenpräzision messen, also auf den 10^{18} ten Bruchteil einer Sekunde genau. Variationen der Periodendauer lassen darauf schließen, dass sich ein solcher Pulsar in einem veränderlichen Schwerfeld bewegt. Dies ermöglicht Tests der Relativitätstheorie. Besonders geeignet sind Doppelsysteme, in denen sich ein Pulsar um einen weiteren Neutronenstern dreht. Zum Beispiel erlaubte die Vermessung des berühmten Hulse-Taylor-Pulsars PSR 1913+16 in den 1970er und 1980er Jahren den ersten indirekten Nachweis von Gravitationswellen (siehe »Nobelpreis für Physik – indirekter Nachweis von Gravitationswellen«, SdW 12/1993, S. 21). Ähnlich prominent ist PSR J0737-3039, der einzige bis jetzt bekannte Doppelpulsar – auch er half, viele Voraussagen der allgemeinen Relativitätstheorie zu bestätigen.

Was läge nun näher, als solche Tests mit einem Pulsar fortzusetzen, der das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße umwandert? Wie alle Schwarzen Löcher kennen wir auch dieses Objekt nur durch indirekte Messungen. Sagittarius A*, kurz Sgr A*, ist eine kompakte Radioquelle im Herzen der Galaxis, um die in hohem Tempo Sterne kreisen. Aus deren Bewegung, die im Wellenlängenbereich des nahen Infrarot über Jahre hinweg mit Teleskopen präzise vermes-



Ob Einsteins allgemeine Relativitätstheorie auch unter äußerst starkem Schwerkräfteinfluss gilt, lässt sich am besten an einem Pulsar (links, Illustration) überprüfen, der um ein Schwarzes Loch (rechts) kreist.

sen wurde, kann man recht verlässlich auf die Existenz eines extrem massereichen und kompakten Objekts am Ort der Radioquelle schließen. Sgr A* liegt zudem inmitten eines Sternhaufens, der Millionen Sonnen umfasst. Von solchen Ansammlungen weiß man, dass typischerweise auf etwa 10000 Sterne ein Pulsar kommt. Man würde also auch im zentralen Sternhaufen der Milchstraße hunderte, wenn nicht gar tausende Exemplare erwarten. Doch erstaunlicherweise ging den Radioastronomen trotz ausgiebiger Durchmusterungen über viele Jahre hinweg kein einziger Pulsar in jener Region ins Netz.

Für dieses noch immer ungelöste Rätsel der fehlenden Pulsare kursieren viele Erklärungen. Besonders einleuchtend scheint die Theorie, dass eine hunderte Lichtjahre große »Mattscheibe« aus heißem Gas das galaktische Zentrum einhüllt und Radiowellen so stark streut, dass wir keine einzelnen Pulse mehr wahrnehmen können. Tatsächlich gibt es deutliche Anzeichen für einen solchen galaktischen Streuschirm. Schaut man nämlich auf Sgr A* und andere Radioquellen im galaktischen Zentrum, stellt man fest, dass sie nicht kompakt und punktförmig, sondern verschwommen und vergrößert erscheinen.

Das Ausmaß dieser Unschärfe nimmt quadratisch mit der Wellenlänge der Beobachtungsfrequenz ab – ein deutliches Zeichen für Streueffekte. Diese führen dazu, dass die Radiowellen unterschiedlich lange Weglängen zurücklegen, je nachdem ob sie direkt zu uns gelangen oder einen Umweg längs des Streuscheibenrands machen (siehe Kasten S. 50). Ein Streuschirm direkt im Zentrum der Milchstraße würde zu so großen Weglängenunterschieden zwischen direkten und gestreuten Strahlen führen, dass einzelne Pulse bis zur Unkenntlichkeit zeitlich ausgedehnt, »verbreitert«, würden. Wir sähen die Pulsare nicht mehr pulsieren und könnten sie darum nicht mehr aufspüren.

In den letzten Jahren war die Hoffnung, doch noch auf Pulsare zu stoßen, daher deutlich gesunken. Manche Forscher versuchten, ihre Chancen zu verbessern, indem sie sich

AUF EINEN BLICK

WO VERSTECKEN SIE SICH?

1 Will man die allgemeine Relativitätstheorie bei **extrem starker Gravitation** testen, benötigt man einen schnell rotierenden Neutronenstern, der um ein **supermassereiches Schwarzes Loch** kreist und als hochpräzise »Uhr« fungieren kann.

2 Im **Zentrum der Galaxis** sollte ein solcher Pulsar eigentlich zu finden sein. Rätselhafterweise ging aber erst jetzt, nach Jahrzehnten vergeblicher Suche, Astronomen dort **das erste Exemplar** ins Netz.

3 Verschwinden die Pulsare hinter einer hunderte Lichtjahre großen **»Mattscheibe« aus heißem Gas** – oder sind sie in dieser Region einfach nur **ungewöhnlich selten**?

auf Beobachtungen bei hohen Frequenzen verlegten; bei diesen wirkt sich der Streuschirm nicht so stark aus, allerdings strahlen die Pulsare hier auch deutlich schwächer. Dann passierte plötzlich etwas Unerwartetes. Der Röntgensatellit SWIFT arbeitete gerade ein Beobachtungsprogramm ab, das kontinuierlich die Röntgenhelligkeit von Sgr A* überwachte. Forscher vermuteten nämlich, dass im Lauf des Jahres 2013 Teile einer interstellaren Gaswolke in das zentrale Schwarze Loch stürzen und zu großen Helligkeitsschwankungen führen würden (siehe »Kosmische Raubtierfütterung«, SdW 5/2012, S. 12).

Tatsächlich beobachtete SWIFT am 24. April 2013, wie die Röntgenhelligkeit im galaktischen Zentrum stark anstieg. Daraufhin machten sich auch an anderen Teleskopen Forscher an die Arbeit, um zu untersuchen, was da vor sich ging. Während sich Sgr A* im Radiolicht unauffällig zeigte, dauerte der Röntgenausbruch viel länger, als man es von dieser Quelle gewohnt war. Binnen Tagen entdeckten dann zwei andere Teleskope, die Röntgensatelliten Chandra und NuSTAR, dass die Röntgenstrahlung nicht von Sgr A* selbst ausging, sondern von einer pulsierenden Quelle in rund 0,4 Lichtjahren Entfernung dazu. Zwar hatte man die Teleskope schon seit vielen Jahren immer wieder auf das galaktische Zentrum gerichtet, aber auf einen solchen Ausbruch von Röntgenstrahlen in direkter Nähe von Sgr A* war noch niemand gestoßen.

Anhand der regelmäßigen Intensitätsschwankung der Strahlung stellten die Röntgenastronomen fest, dass es sich

um einen speziellen Pulsar handeln musste, nämlich um einen der seltenen Magnetare. Und obwohl ein solcher junger, extrem stark magnetisierter und schnell rotierender Neutronenstern nur selten auch Radiostrahlung produziert – bis dahin kannte man in der ganzen Milchstraße lediglich drei solcher Objekte, die gleichzeitig als Radiopulsare aufgefallen waren –, lieferte sich eine ganze Reihe irdischer Radioteleskope nun einen Wettlauf, um auch im Radiobereich fündig zu werden.

Eine seltene Strahlungsquelle genau auf der Sichtlinie zum Zentrum der Galaxis?

Als Erstes verkündeten Wissenschaftler am australischen Parkes-Radioteleskop, die Quelle entdeckt zu haben. Ihnen zufolge stand der Pulsar aber keineswegs im Zentrum der Galaxis, sondern im Gegenteil sehr nahe bei der Erde. Ihre Überlegung: Wenn Radiowellen auf ihrem Weg zu ihrem Beobachter heißes Plasma durchqueren, werden sie durch freie Elektronen darin verzögert, und zwar umso stärker, je niedriger die Frequenz ist. Das Maß dieser so genannten Dispersion erlaubt abzuschätzen, wie hoch die mittlere Dichte an freien Elektronen auf dem Weg zwischen Pulsar und Erde sein muss. Aus der recht gut bekannten Gasverteilung in der Milchstraße kann man schließlich die Entfernung ermitteln. Dennoch blieben Zweifel. Zwar gilt die Methode als gut genug, um eine Quelle im Vordergrund sicher von einer im Zentrum der Milchstraße zu unterscheiden – doch wäre es nicht extrem unwahrscheinlich, wenn eine so seltene Strahlungsquelle mitten in der Galaxis genau auf der Sichtlinie zum Zentrum der Milchstraße stehen würde?

Tatsächlich sollte sich die Parkes-Entdeckung schon bald als Irrtum herausstellen: Ein normalerweise unbedeutender Fehler in der Nachführung des Teleskops – dem Mechanismus, der es kontinuierlich auf sein Ziel ausrichtet – war mehr als 40 Jahre unentdeckt geblieben und nun unerwartet zum Tragen gekommen.

Doch gleichzeitig mit den australischen Kollegen waren auch wir selbst nach der NuSTAR-Messung aktiv geworden. Zusammen mit einem Team junger Astronomen, vor allem vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie, unter Leitung von Ralph Eatough hatten wir das 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg auf das galaktische Zentrum ausgerichtet. Als dieses erstmals wieder über dem Horizont aufging, sahen wir sofort, dass wir fündig geworden waren: Der Magnetar zeigte sich zunächst sehr schwach, dann immer stärker in den Daten. Nachdem er schon seit Tagen starke Röntgenstrahlung aussandte, hatte er offenbar begonnen, auch im

Nachdem die Röntgensatelliten NuSTAR und Chandra den Magnetar entdeckt hatten, richteten die Autoren und ihre Teams auch das 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg (Foto) auf das galaktische Zentrum aus. Mit ihm gewannen sie das internationale Wettrennen um den ersten Nachweis des Neutronensterns im Radiolicht.



NORBERT TACKEN, RADIO-OBSERVATORIUM EFFELSBERG

Radiolicht zu leuchten. Die Dispersion entsprach genau dem, was von einem Objekt im Zentrum der Milchstraße zu erwarten war – und sie erwies sich als größer, als jemals zuvor für einen Pulsar gemessen worden war.

Besonders auffällig erschien uns, dass die Radiostrahlung zu fast 100 Prozent polarisiert war und das Objekt ein sehr hohes Rotationsmaß besaß. Letzteres ist ein Maß für die frequenzabhängige Drehung des Polarisationswinkels und hängt wie auch das Dispersionsmaß von der Anzahl der Elektronen entlang der Sichtlinie ab, zusätzlich aber noch von der Stärke des Magnetfelds, das im Gas in der Umgebung des Objekts herrscht. Auch in dieser Hinsicht brach der Magnetar alle Rekorde: Bei keiner anderen Quelle in der Galaxis war je ein höheres Rotationsmaß gemessen worden – mit einer Ausnahme: Sgr A* selbst. Damit erschien ziemlich offen-

sichtlich, dass Magnetar und Schwarzes Loch einander direkt benachbart und beide in ein stark magnetisiertes Gas eingehüllt sind.

Schon zuvor hatten Röntgenmessungen gezeigt, dass die Umgebung von Sgr A* von einem 20 Millionen Grad heißen, ionisierten Gas erfüllt ist. Bei diesen Temperaturen werden Elektronen aus ihren Atomen gerissen und produzieren Röntgenstrahlung, wenn sie zufällig wieder mit den Atomkernen kollidieren. Aus der Stärke und dem Spektrum des so erzeugten Röntgenlichts lassen sich dann Temperatur und Dichte des Gases bestimmen.

Die Energieproduktion von vier Millionen Sonnen

Aus den Radio- und Röntgenmessungen gemeinsam kann man schließlich die Stärke des Magnetfelds in der Umgebung des Schwarzen Lochs bestimmen: Sie beträgt 0,8 milli-onstel Tesla. Das ist zwar nur ein Vierzigstel der Stärke des ohnehin schon schwachen Erdmagnetfelds. Doch das Feld erfüllt ein enorm großes Volumen: Die innerhalb von 0,4 Lichtjahren um Sgr A* gespeicherte magnetische Energie entspricht der jährlichen Energieproduktion von vier Millionen Sonnen.

Dennoch bleibt zu erklären, warum in direkter Nähe zum Ereignishorizont des Schwarzen Lochs sehr starke Magnetfelder mit einem 100-Fachen der Erdmagnetfeldstärke herrschen, wie man aus Modellen der Radiostrahlung von Sgr A* weiß. Möglicherweise verstärken sich vorhandene Felder, wenn das Gas beim Fall ins Schwarze Loch komprimiert wird. Damit wäre möglicherweise auch klar, warum Sgr A* ein Schwarzes Loch auf Fastenkur zu sein scheint, das kaum Materie anzieht. Falls nämlich starke Magnetfelder einen Teil des Gases gewissermaßen festhalten, bliebe die Menge des einfallenden Gases relativ gering.

In der folgenden Zeit bestätigten andere Teleskope unsere Messungen. Doch es kamen weitere Überraschungen auf uns zu. Wider alles Erwarten ließen sich auch bei niedrigen Frequenzen noch Radiopulse des Magnetars nachweisen. Außerdem war die Pulsverbreiterung viel kleiner, als wir angenommen hatten. Befand sich der Pulsar etwa gar nicht im galaktischen Zentrum, also hinter dem Streuschirm, sondern stattdessen davor, was erklären würde, warum wir die Pulse überhaupt messen konnten? Messungen mit dem hochauflösenden Very Long Baseline Array (VLBA), einem Netzwerk von Radioteleskopen, brachten dann aber Klarheit. Der Pulsar war genauso verschwommen wie Sgr A*, die Wellen mussten also durch den gleichen Streuschirm gelaufen sein.

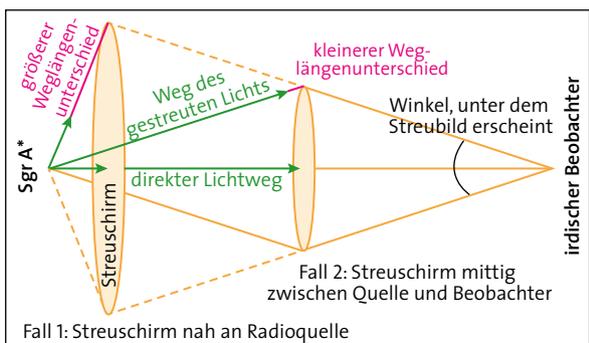
Dass Pulse bei niedrigen Frequenzen gepaart mit einer kleinen Pulsbreite auftreten, bedeutete allerdings auch, dass der Streuschirm irgendwo auf halbem Weg zwischen uns und dem galaktischen Zentrum liegen muss und nicht im Zentrum selbst (siehe nebenstehende Skizze). Aber wenn das stimmt, dürften uns auch andere Pulsare im galaktischen Zentrum nicht verborgen bleiben. Auf einen der seltenen

Schlechte Sicht auf das galaktische Zentrum?

Radiowellen vom galaktischen Zentrum, wo die Radioquelle Sgr A* sitzt, gelangen entweder direkt zum irdischen Beobachter oder sie werden gestreut, so dass sie indirekte Wege nehmen (grüne Lichtwege in der Grafik). Astronomen gehen davon aus, dass zwischen Sgr A* und der Erde ein Streuschirm aus heißem Gas existiert, der elektromagnetische Strahlung wie eine Linse in Richtung Erde umlenkt.

Seine Position und Ausdehnung ist aber unklar. Sitzt der vermutete Schirm nahe der Quelle (Fall 1), dann ist der Unterschied zwischen den Strecken (rot), die gestreute beziehungsweise ungestreute Strahlung zurücklegen müssen, größer, als wenn er näher an der Erde gelegen ist (Fall 2). In ersterem Fall würden die Strahlungspulse eines Pulsars, der sich von der Erde aus gesehen hinter dem Streuschirm befindet, verschmiert und verbreitert wirken. Weil man dies nicht beobachtet, gehen Forscher davon aus, dass eher der zweite Fall zutrifft.

In dieser vereinfachten Grafik erscheint das Abbild von Sgr A* aus Sicht irdischer Beobachter in beiden Fällen unter demselben Winkel; die Abmessungen des Streuschirms hängen dann davon ab, wie weit er von der Erde entfernt ist.





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



www.spektrum.de/kosmologie

Radiomagnetare kommen typischerweise 500 normale Pulsare – wo also sind sie?

Unwahrscheinlich ist es, dass das dichte Gas in der Zentralregion nur geringe Radioemissionen zulässt, denn »unser« Magnetar scheint dort ja fröhlich zu strahlen. Kommt es im Zentrum gar nicht erst zur Entstehung gewöhnlicher Pulsare, weil der Prozess der Sternentstehung anders als gewohnt abläuft? Auch das ist nicht wahrscheinlich. Auf Infrarotaufnahmen sieht man, dass dort in den letzten Millionen Jahren viele Sterne genau der Art entstanden sind, aus denen sich am Ende ihres Lebens in der Regel Neutronensterne bilden. Außerdem sind unter den bekannten rund zwei Dutzend Magnetaren viele junge Exemplare, die sich erst vor einigen zehntausend Jahren aus ihren explodierten Vorgängersternen entwickelten. Pulsare scheinen also auch in der Gegenwart noch zu entstehen. Ist der Streuschirm vielleicht löchrig wie ein Schweizer Käse? Dann müsste man aber erklären, warum Sgr A*, der Radiomagnetar und andere Quellen in derselben Gegend die elektromagnetische Strahlung auf genau gleiche Weise streuen. Gegenwärtig können wir nicht einmal die Möglichkeit, dass wir den Streuprozess noch nicht richtig verstehen, völlig ausschließen.

Wann taucht der »goldene Pulsar« auf, der entscheidende Tests der Relativitätstheorie erlaubt?

Eine einfache Lösung des Pulsarproblems im galaktischen Zentrum ist auch zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht in Sicht; die Puzzleteile wollen einfach nicht zusammenpassen. Immerhin wissen wir jetzt, dass Radiopulsare im galaktischen Zentrum tatsächlich vorkommen. Nur sind Magnetare wie der nun entdeckte leider keine verlässlichen Uhren – wahrscheinlich, weil ihr starkes Magnetfeld zu Verwerfungen in der Oberfläche führt. Dadurch könnte die Rotation gestört oder der Ursprungsort der Radiostrahlung beeinflusst werden, so dass sie für Tests der Relativitätstheorie nicht in Frage kommen. Aber wo sich ein solch seltenes, junges Objekt findet, müssten doch auch noch mehr aufzuspüren sein. Irgendwann wird hoffentlich der »goldene Pulsar« auftauchen, mit dessen Hilfe wir die wichtigsten Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie bestätigen oder widerlegen können.

Auf jeden Fall werden wir intensiv nach ihm suchen. Ende 2013 erhielten wir gemeinsam mit Luciano Rezzolla von der

Frankfurter Goethe-Universität 14 Millionen Euro vom Europäischen Forschungsrat, um mit Hilfe eines Netzwerks von Radioteleskopen erstmals den Ereignishorizont des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße zu »fotografieren« – als Schattenriss vor dem Hintergrund der Radiowellen, die das Gas, kurz bevor es von ihm verschluckt wurde, gerade noch aussenden konnte (siehe »Schattenrisse Schwarzer Löcher«, SdW 12/2010, S. 24). Auch die Jagd auf Pulsare gehört zu dem Projekt, und sie wird uns künftig um einiges leichter fallen. Neben dem Teleskop in Effelsberg kommt nämlich auch das neue Riesenteleskop ALMA in der chilenischen Atacama-Wüste zum Einsatz, das bei hohen Frequenzen misst, wo Streuung keine Rolle mehr spielt. Wenn das galaktische Zentrum weitere Pulsare beherbergt, sollten sie uns also bald ins Netz gehen.

Weitere Chancen liegen im Square Kilometre Array (SKA), einem Radioteleskop der Superlative, das an zwei Standorten in Afrika und Asien errichtet werden soll. Bis 2019 sollen dafür 650 Millionen Euro investiert werden, im Jahr 2024 soll eine weitere Ausbaustufe für geschätzte 1,5 Milliarden Euro abgeschlossen sein. Für einen Teil der Planungsarbeiten erhielt ein niederländisches Konsortium unter Beteiligung der Radboud-Universität in Nimwegen, an der einer von uns (Falcke) forscht, kürzlich zwölf Millionen Euro.

Deutschland hingegen will sich zu unserem Leidwesen aus dem zehn Mitgliedstaaten umfassenden Konsortium zurückziehen, wie das Bundesforschungsministerium Mitte des Jahres 2014 unerwartet verkündete. Für deutsche Radioastronomen wäre das ein Trauerspiel – wir können nur hoffen, dass die Option zum Wiedereinstieg nicht gänzlich verschlossen ist. ~

DIE AUTOREN



Heino Falcke (links) lehrt und forscht an der niederländischen Radboud-Universität Nimwegen, **Michael Kramer** ist Direktor am Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie, zu dem auch das Radioteleskop Effelsberg gehört.

QUELLEN

- Eatough, R. et al.:** A Strong Magnetic Field around the Super-Massive Black Hole at the Centre of the Galaxy. In: Nature 501, S. 391–394, 14. August 2013
- Freire, P., Tauris, T.:** Direct Formation of Millisecond Pulsars from Rotationally Delayed Accretion-Induced Collapse of Massive White Dwarfs. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 438, L86–L90, 11. Februar 2014
- Kennea, J. A. et al.:** Swift Discovery of a New Soft Gamma Repeater, SGR J1745-29, near Sagittarius A*. In: The Astrophysical Journal Letters 770, L24, 2013
- Mori, K. et al.:** NuSTAR Discovery of a 3.76-Second Transient Magnetar near Sagittarius A*. In: The Astrophysical Journal Letters 770, L23, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304063

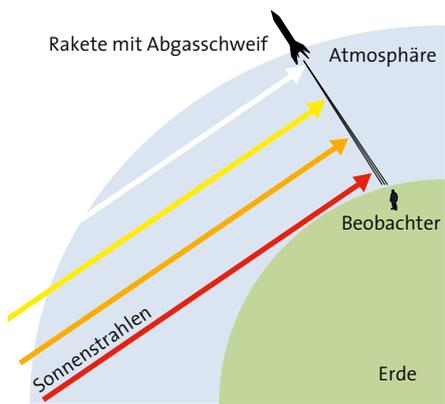
Das Geheimnis des blauen Schattens

Zwischen untergehender Sonne und aufgehendem Mond lässt der Abgasschweif einer Rakete einen rätselhaften Schattenstrahl entstehen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Als im Februar 2001 mal wieder ein Spaceshuttle huckepack auf einer Rakete abhob, zeigte sich am Himmel eine faszinierende Konstellation (Foto rechts). Zwischen dem aufgehenden Mond, den man auf den ersten Blick auch für die untergehende Sonne halten könnte, und dem Abgasschweif verlief ein schnurgerader blauer Streifen, für dessen Erklärung man allerhand physikalische Überlegungen aufbieten muss. Er ist noch nicht einmal das einzige Rätsel in diesem Bild.

Doch der Reihe nach. Auf eindrucksvolle Weise zeichnet der Abgasschweif die Bahn der Rakete nach. Ähnlich wie die Kondensstreifen von Flugzeugen besteht er zum großen Teil aus Wassertropfchen, die Luftfeuchte scheint also recht hoch zu sein. Nach unten zu wird er breiter, denn unregelmäßige Luftbe-



Für einen Beobachter des Raketenstarts ist die Sonne schon hinter dem Horizont verschwunden. Auf ihn und den unteren Teil des Abgasschweifs fällt darum nur noch diffuses Himmelslicht. Klettert sein Blick auf der »Leinwand« des Abgasschweifs einer Rakete empor, sieht er sie in Farben getaucht, wie sie sich im Lauf des Sonnenuntergangs zeigten.

wegungen sorgen bereits im Lauf von Minuten dafür, dass die Nebelschwaden allmählich auseinandertreiben, verdampfen und schließlich verschwinden.

Die erste Frage lautet, welcher Himmelskörper da im Hintergrund leuchtet. Der von der Dämmerung kolorierte Himmel könnte tatsächlich dafür sprechen, dass wir nach Westen auf die untergehende Sonne schauen. Und doch: Müsste sie dann nicht rötlich gelb verfärbt sein? Und wie ließe sich in diesem Fall der dunkle Streifen über dem Horizont erklären?

Offenbar blicken wir gar nicht auf die Sonne, sondern stattdessen auf den aufgehenden Vollmond, also in Richtung Osten. Dort dämmt es ebenfalls, denn auch aus dieser Richtung wird das Licht der untergehenden Sonne in unser Auge gestreut. Diese so genannte Gegendämmerung ist uns aber wenig vertraut. Weil das von ihr kommende Licht zweimal den langen Weg durch die Atmosphäre zurückgelegt hat – von der Sonne zum Horizont und wieder zurück zum Betrachter –, fällt sie meist so schwach aus, dass sie überhaupt nicht zu sehen ist.

Die Sonne steht also nicht vor, sondern hinter der Kamera und beleuchtet den ihr gegenüberliegenden Mond fast frontal. Allerdings ist sie schon ein wenig unter den Horizont gesunken, wie man am Erdschatten erkennt. Jener horizontale dunkelblaue Streifen steigt am Osthorizont von unten her auf und schiebt das Dämmerlicht zu einem purpurfarbenen Streifen, dem so genannten Venusgürtel, zusammen. Auf die tiefer gelegenen Bereiche des Abgasschweifs fällt daher kein direkter Sonnenstrahl mehr, sondern nur diffuses Himmelslicht. Oberhalb davon nimmt der Schweif dagegen Gelb- und

Was der Mensch sieht, hängt sowohl davon ab, worauf er blickt, wie davon, worauf zu sehen ihn seine visuell-begriffliche Erfahrung gelehrt hat.

Thomas S. Kuhn (1922–1996)

Rottöne an. Lediglich seine Spitze reicht noch in das volle Sonnenlicht hinein und erstrahlt gleißend hell.

Was ein Beobachter auf der Erde normalerweise als zeitliches Nacheinander erlebt, bildet die hoch in den Himmel reichende »Leinwand« also räumlich ab (Grafik links). Ihre oberen Bereiche »sehen« die Sonne noch relativ hoch über dem Horizont. Die mittleren reflektieren das gelbe Licht der aus ihrer Sicht bereits tief stehenden Sonne, und die darunterliegenden registrieren das rote Dämmerlicht, in dem sich die Sonne nahe dem Horizont zeigt (zur Entstehung der Himmelsfarben siehe »Sonnenaufgang in einem Opal«, Spektrum der Wissenschaft 8/2010, S. 32).

Der Sonnentälereffekt

Kommen wir nun aber endlich zu dem schnurgeraden dunkelblauen Streifen, der von der Rauchfahne zum Mond weist. Es liegt nahe, dass es sich dabei um ihren Schatten handelt. In der Tat blendet die Rauchfahne das direkte Sonnenlicht aus dem dahinterliegenden Raum aus, so dass es von dort nicht mehr ins Auge des Betrachters gestreut werden kann. Dieser Bereich erscheint daher dunkler als seine dem Sonnenlicht ausgesetzte Umgebung. Müsste eine derart unregelmäßig geformte Rauchfahne aber nicht auch einen entsprechend aussehenden Schattenraum hervorrufen? Zumindest im Querschnitt des Strahls sollten sich die Unregelmäßigkeiten doch wiederfinden; stattdessen scheint es sich um einen kreisrunden Zylinder zu handeln.

Aber eigentlich dürfte uns das nicht überraschen. Der Effekt, der ihn entstehen lässt, ist uns nämlich recht vertraut. Wer an einem sonnigen Tag unter dem



Als das Spaceshuttle Atlantis am 7. Februar 2001 zur Internationalen Raumstation startete, warf seine Abgasfahne einen merkwürdigen Schatten.

Blätterdach der Bäume durch den Wald wandert, sieht auf dem Boden »Sonnentaler« liegen. Diese Lichtflecken sind eigentlich rund – wie eine kleine Projektionsfläche zeigt, die man senkrecht zu den sie hervorrufenden Lichtstrahlen hält –, erscheinen allerdings elliptisch, weil das Licht in unseren Breiten stets schräg auf die Erde fällt. Die entscheidende Beobachtung dabei: Die Form der Taler ist offenbar völlig unabhängig von der Form der Öffnungen im Blattwerk, zumindest wenn sie in hinreichend großer Entfernung davon den Boden erreichen. Die Erklärung für dieses schon von Aristoteles beobachtete Phänomen fand erst vor 500 Jahren Johannes Kepler; in nebenstehenden Quellen lässt sie sich nachlesen.

Im Grunde handelt es sich um Lochkameraaufnahmen der Sonne – und sie geben die Form ihres Motivs getreu wieder. Unsere Rauchfahne ist allerdings keine Lücke im Blattwerk, sondern im

Gegenteil ein Hindernis im Strahlengang. Doch der Sonnentalereffekt funktioniert auch als Negativ: Liegen Blätter exponiert im Strahlengang der Sonne und in hinreichender Entfernung vom Betrachter, erscheinen ihre Schatten ebenfalls rund, unabhängig von ihrer tatsächlichen Form. So also gewinnt der Schattenstrahl in größerer Entfernung der Rauchfahne sein kreisrundes Aussehen. Seine leicht verschwommenen Ränder hängen indessen damit zusammen, dass die Rauchfahne – das inverse »Loch« der Lochkamera – trotz der großen Distanzen dann doch etwas zu ausgedehnt ist, um eine wirklich scharfe Projektion zu erzeugen.

Der Schattenstrahl wirft weitere Fragen auf. Von der Rauchfahne aus gesehen, ist er auf den Sonnengegenpunkt oder Antisolarpunkt gerichtet, also auf den imaginären Punkt, welcher der Sonne exakt gegenüberliegt. Zum Zeitpunkt der Aufnahme steht dort zufällig

gerade der Mond und erscheint vollständig beleuchtet, also als Vollmond. Wenn wir aber genauer hinschauen, stellen wir fest, dass der Schattenstrahl sein Ziel nicht exakt, sondern etwas zu tief trifft. Der Trabant hat das Maximum seiner Vollmondphase also streng genommen bereits hinter sich – auch wenn wir ihn immer noch als Vollmond wahrnehmen – und ging schon kurz vor Sonnenuntergang auf.

Noch etwas anderes mag überraschen: Der Schattenstrahl scheint nach unten gerichtet zu sein. Das kann aber nur eine perspektivische Täuschung sein, denn ganz offensichtlich strahlt die bereits untergegangene Sonne den oberen Teil der Rauchfahne von unten an. Es ginge auch gar nicht anders, schließlich liegt der Mond bezogen auf den Horizont nicht nur höher als die Sonne, sondern auch höher als die Rauchfahne. Über den Höhenverlust der Rakete, den das Foto vermuten lässt, sollte man daher ebenfalls nicht erschrecken – der optischen Irritation zum Trotz steigt sie wie von der NASA vorgesehen immer weiter. ∞

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

Schlichting, H.J.: Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 48/4, S. 199–207, 1995 (kostenfreier Download über Link unten)
Schlichting, H.J.: Sonnentaler – Abbilder der Sonne. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 43/4, 19, 1994 (kostenfreier Download über Link unten)

WEBLINKS

<http://youtu.be/zzfQIIYbSgQ?t=4m49s>
 Privates Youtube-Video des Spaceshuttlestarts, das auch den Schattenstrahl zeigt

Dieser Artikel und alle Links auf:
www.spektrum.de/artikel/1304064

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

K O P E R N I K U S -

Revolution mit Hindernissen

Das kopernikanische System, dem zufolge die Erde nicht im Mittelpunkt des Universums ruht, stieß keineswegs nur auf den Widerstand der Kirche. Auch die meisten Astronomen fanden seinerzeit, das Modell widerspreche den Beobachtungen.

Von Dennis Danielson und Christopher M. Graney

Ein Forscherteam am CERN, der Europäischen Organisation für Kernforschung bei Genf, schickte 2011 einen Neutrinostrahl auf eine 730 Kilometer lange Reise zum Gran-Sasso-Nationallaboratorium in L'Aquila (Italien). Als die Forscher die Flugzeit maßen, schienen die Daten deutlich zu besagen, die Neutrinos hätten die Vakuumlichtgeschwindigkeit überschritten. Wie reagierten die Wissenschaftler auf dieses überraschende Resultat? Fast niemand verwarf gleich Albert Einsteins tausendfach bestätigtes Postulat, wonach nichts

sich schneller bewegen darf als das Licht. Die allermeisten Fachkollegen waren davon überzeugt, die Messungen seien fehlerhaft – und sollten damit auch Recht behalten (Spektrum der Wissenschaft 5/2012, S. 21).

Versetzen wir uns nun 400 Jahre voraus in eine fiktive Zukunft, in der Einsteins Ideen längst überholt sind. Wie dort jeder Physikstudent lernt, haben Forscher vor langer Zeit experimentell bestätigt, dass Neutrinos tatsächlich Überlichtgeschwindigkeit erreichen. Wie würde man dann rückblickend den Widerstand heutiger Physiker ge-



KIRK CALDWELL

gen das Messresultat einschätzen? Vielleicht fände man, die Physiker des 21. Jahrhunderts seien einfach unflexibel und unempfänglich für neue Ideen gewesen – bloß ein Haufen engstirniger Einsteinianer, der blind dem Diktat von Tradition und Autorität folgte. Wir hoffen, dass unsere zögerlichen Forscher später einmal nicht so hart beurteilt werden. Denn ihre Weigerung, vernünftig erscheinende Schlussfolgerungen aufzugeben, ist kein Zeichen für hartnäckige Vorurteile, sondern gute wissenschaftliche Praxis.

Ähnliche Fälle kommen in der Wissenschaftsgeschichte gar nicht selten vor. Im 19. Jahrhundert glaubten die Astronomen, die Milchstraße umfasse das gesamte Universum. Als sie die ersten Aufnahmen der Andromedagalaxie untersuchten, hatten sie daher guten Grund zu der Annahme, der »Andromedanebel« sei ein einzelner, von einem entstehenden Planetensystem umgebener Stern – und nicht, wie wir heute wissen, eine mehrere Millionen Lichtjahre entfernte Ansammlung von Billionen Sternen. In ähnlicher Weise war Einstein davon überzeugt, das Universum sei statisch, und führte deshalb in seine Gleichungen eine kosmologische Konstante ein, die eine Expansion des Alls verhinderte. Beide Annahmen waren vernünftig – und falsch. Wie David Kaiser vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und Angela N. H. Creager von der Princeton University bereits in dieser Zeitschrift argumentierten, kann eine Annahme zugleich falsch und sehr fruchtbar sein (SdW 1/2013, S. 76).

Ein berühmtes historisches Beispiel handelt von dem preußisch-polnischen Domherrn und Freizeitastronomen Nikolaus Kopernikus (1473–1543) und seiner »heliocentrischen« Theorie, der zufolge die Erde pro Tag einmal um ihre Achse rotiert und pro Jahr einmal um die Sonne kreist. Heute wird das kopernikanische System allgemein anerkannt, doch seinerzeit stand es in direktem Widerspruch zu der seit Langem etablierten Lehre, die der griechische Astronom Claudius Ptolemäus (um 100 bis nach 160) in seinem Buch »Almagest« niedergelegt hatte: Sonne, Mond und Sterne rotieren um die im Zentrum des Universums feststehende Erde.

Kopernikus verteidigte seine revolutionäre Idee 1543 in dem Buch »De Revolutionibus Orbium Coelestium«, das vie-

le Naturforscher damals lasen, bewunderten, kommentierten und zur Verbesserung ihrer astronomischen Vorhersagen nutzten. Doch noch um 1600 – 57 Jahre später – hatte nur ein Dutzend seriöser Astronomen den Glauben an eine unbewegliche Erde aufgegeben. Die meisten Forscher bevorzugten weiterhin das geozentrische Weltbild, das unsere Alltagserfahrung besser widerspiegelt – immerhin sprechen wir noch heute ganz selbstverständlich davon, dass die Sonne auf- und untergeht.

Diese kosmologische Blockadehaltung wird manchmal so dargestellt, als habe sie auf bloßem Vorurteil beruht und sei erst von dem italienischen Naturforscher Galileo Galilei (1564–1641) aufgelöst worden, als er 1609 sein Teleskop konstruierte und damit Sterne, Planeten und Monde beobachtete. Beides trifft nicht zu. Noch lange nach 1609 hatten Astronomen gute wissenschaftliche Gründe, an Kopernikus' Theorie zu zweifeln. Ihre Argumente illustrieren besonders augenfällig, dass Forscher revolutionären Ideen zu Recht widerstehen – selbst wenn diese sich am Ende als richtig erweisen.

Tycho Brahes Kosmologie

Die meisten Astronomen favorisierten damals eine Abart des geozentrischen Systems, die der dänische Astronom Tycho Brahe (1546–1601) 1588 vorschlug (siehe Kasten rechts). Diese neue »geoheliozentrische« Kosmologie hatte zwei große Vorteile: Sie entsprach der Alltagserfahrung, und sie passte besser zu den vorhandenen Daten als das System von Kopernikus.

Brahe war eine überragende Persönlichkeit. Er betrieb ein riesiges Forschungsprogramm in einem schlossähnlichen Observatorium, mit einem scheinbar unerschöpflichen Budget sowie den besten Instrumenten und Assistenten seiner Zeit. Mit Hilfe von Brahes Marsdaten konnte sein deutscher Mitarbeiter Johannes Kepler (1571–1630) schließlich berechnen, dass die Planeten auf Ellipsenbahnen laufen. Der Wissenschaftshistoriker Owen Gingerich von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) verdeutlicht Brahes Bedeutung gern durch eine von dem bayerischen Jesuiten Albert Curtz (1600–1671) erstellte Zusammenfassung aller seit der Antike gewonnenen astronomischen Daten: Der größte Teil der in zwei Jahrtausenden gesammelten Messwerte stammt von Brahe.

Dieser ungemein versierte Astronom war von der Eleganz des kopernikanischen Systems zwar durchaus beeindruckt, doch gewisse Aspekte störten ihn. Zum einen fehlte eine physikalische Erklärung für die Bewegung unseres Planeten, dessen Größe recht gut bekannt war. Das Gewicht einer Gesteinskugel mit tausenden Kilometern Durchmesser war gewiss riesig. Welche Kraft vermochte eine solche Masse unentwegt um die Sonne zu treiben, wo es doch schon solche Mühe machte, einen beladenen Wagen die Straße entlangzuziehen? Erst mehr als 100 Jahre später sollte Isaac Newton (1642–1726) darauf eine Antwort geben, indem er die Bahnen von Körpern im Schwerfeld beschrieb.

AUF EINEN BLICK

KOSMOLOGISCHER KOMPROMISS

1 Mit der revolutionären Theorie des **Heliozentrismus** – die Erde umkreist die ruhende Sonne – beendete **Nikolaus Kopernikus** die Vorherrschaft des mehr als ein Jahrtausend gültigen antiken Weltbilds, in dem die Erde im Mittelpunkt des Universums ruhte.

2 Die meisten Naturforscher **verwarfen** die Theorie einer bewegten Erde viele Jahrzehnte lang – sogar noch lange, nachdem **Galileo Galilei** mit seinem Teleskop erstmals die Venusphasen und die Jupitermonde beobachtet hatte.

3 Die Einwände waren nicht nur theologischer Natur. Die damals zugänglichen Beobachtungsdaten waren besser mit einem **Kompromissmodell** zwischen Geozentrismus und Kopernikanismus vereinbar – dem »**Geoheliozentrismus**« des Tycho Brahe.

Hingegen war die Bewegung der Sterne, Planeten und anderer Himmelskörper scheinbar leicht zu erklären: Seit der Zeit des altgriechischen Philosophen Aristoteles (384–322 v. Chr.) postulierten die Astronomen, die Himmelskörper bestünden aus einer speziellen Äthersubstanz, die auf der Erde nicht vorkomme. Diese Substanz habe eine ebenso natürliche Tendenz zu schneller Kreisbewegung, wie ein Wagen natürlicherweise zum Stillstand neige, wenn man ihn nicht kräftig ziehe. Wie Brahe sagte, »umgeht das kopernikanische System zwar meisterhaft und vollständig alles, was am ptolemäischen System überflüssig und widersinnig ist, doch dafür schreibt es der Erde, diesem schwerfälligen, trägen, zur Bewegung ungeeigneten Körper, eine so schnelle Bewegung zu wie den ätherischen Fackeln.«

In dieser Hinsicht haben die antiken Astronomen einiges mit ihren modernen Nachkommen gemeinsam, die zur Erklärung ihrer Beobachtungen postulieren müssen, dass das Universum größtenteils aus rätselhafter »Dunkler Materie« und »Dunkler Energie« besteht, die beide nichts Bekanntem gleichen.

Zum zweiten störte Brahe die Rolle der Sterne im kopernikanischen System. Laut Ptolemäus ist die Sphäre der Sterne »unermesslich groß«. Denn wir erkennen an ihnen keine tägliche Parallaxe – also keine Veränderung ihrer relativen Orte durch allnächtlich wechselnde Winkel und Abstände zu einem irdischen Beobachter, während die Sterne am Firmament von einem Horizont zum anderen wandern. Daher muss der Durchmesser der Erde gegenüber dem Abstand der Sterne verschwindend klein sein. Die Erde ist »wie ein Punkt«, so Ptolemäus.

Kopernikus wusste außerdem, dass man nicht einmal eine jährliche Parallaxe zu entdecken vermochte; das wäre eine Verschiebung der relativen Sternorte durch den Umlauf der Erde um die Sonne. Wenn die Erde wirklich um die Sonne wandert, bedeutet das Fehlen der jährlichen Parallaxe, dass auch der Durchmesser der Erdbahn – die Kopernikus »orbis magnus« nannte, den großen Kreis – im Vergleich zur Entfernung der Sterne nur ein Punkt ist. Dadurch wurde das Universum auf ganz neue und fast unglaubliche Weise erst recht »unermesslich groß«.

Wie Brahe durchaus bekannt war, hatte das kopernikanische Modell nicht nur einschneidende Folgen für die Größe des Alls, sondern auch für die Größe einzelner Sterne. Wenn wir zum Nachthimmel aufschauen, scheinen die Sterne feste Durchmesser zu haben, die sowohl Ptolemäus als auch Brahe vermaßen. Heute wissen wir, dass die fernen Sterne praktisch punktförmige Lichtquellen sind. Ihre scheinbare Gestalt als kreisförmige Flecke entsteht beim Durchgang der Lichtwellen durch die kreisförmige Öffnung eines Teleskops oder unserer Pupille.

Doch damals hatten die Astronomen keine Ahnung von der Wellennatur des Lichts. Brahe schloss aus einfachen geometrischen Überlegungen, dass die Sterne, wenn sie in kopernikanischen Entfernungen lägen, ähnliche Durchmesser wie die Erdbahn haben müssten. Selbst gegen die kleinsten

Drei Kosmologien

Im 17. Jahrhundert kursierten unter Astronomen drei Modelle des Universums. Im geozentrischen Modell umkreisten Sonne, Mond, Planeten und Sterne die ruhende Erde. Zur Erklärung der gelegentlich »retrograden« (rückläufigen) Bewegung der Planeten dienten Epizyklen, das heißt kleinere auf den Kreisbahnen sitzende Schleifen. Das heliozentrische Universum von Nikolaus Kopernikus sah einfacher aus, warf aber neue Probleme auf; beispielsweise mussten die Sterne unvorstellbar weit entfernt liegen. Tycho Brahes geoheliozentrisches Modell bildete einen Kompromiss: Sonne, Mond und Sterne umkreisten die Erde, die Planeten liefen um die Sonne, und die Sterne rückten wieder näher an die Erde heran. (Planeten und Bahnen sind hier nicht maßstabsgetreu gezeichnet.)

- ☼ Sonne
- Erde
- Mond
- Merkur
- Venus
- Mars
- Jupiter
- Saturn

geozentrisches Modell

Himmelssphäre mit Sternen

heliozentrisches Modell

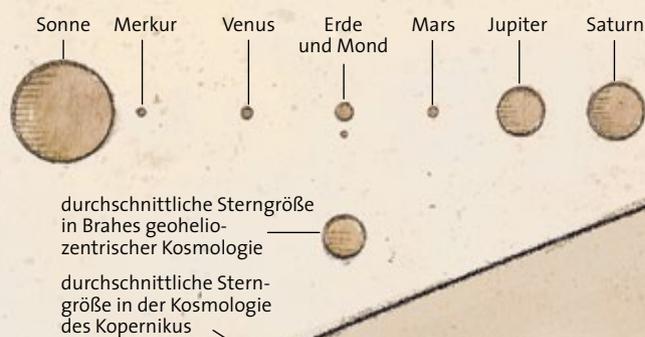
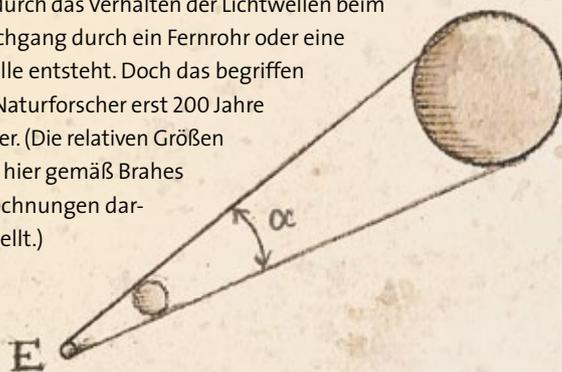
weil
entfernte
Sterne

geoheliozentrisches Modell

Das Problem der Sterngrößen

Das schlagendste Argument gegen das kopernikanische Universum war das Sterngrößenproblem. Wenn wir einen Stern am Himmel betrachten, scheint er einen kleinen, konstanten Öffnungswinkel α zu bedecken. Aus diesem Wert sowie der Entfernung des Sterns lässt sich mit einfachen geometrischen Mitteln bestimmen, wie groß der Stern augenscheinlich wirklich ist (rechts). In geozentrischen Modellen des Universums liegen die Sterne gleich hinter den Planeten, und daraus folgt, dass Erstere hinsichtlich ihrer Größe der Sonne ähneln (links unten). Doch gemäß dem heliozentrischen Modell des Kopernikus müssen die Sterne extrem weit entfernt sein. Daraus wiederum folgt, dass sie absurd groß sein müssen – hunderte Male größer als die Sonne (rechts unten). Um die abnormen Folgen seines Modells zu erklären, nahmen Kopernikaner Zu-

flucht zu göttlicher Einmischung. In Wirklichkeit sind die Sterne zwar tatsächlich weit entfernt, aber ihre scheinbare Größe ist eine optische Täuschung, die durch das Verhalten der Lichtwellen beim Durchgang durch ein Fernrohr oder eine Pupille entsteht. Doch das begriffen die Naturforscher erst 200 Jahre später. (Die relativen Größen sind hier gemäß Brahes Berechnungen dargestellt.)



KIRK CALDWELL

Sterne wäre die Sonne so winzig wie der Punkt am Ende dieses Satzes gegen eine Pampelmuse. Brahe fand solche Sterngrößen absurd. Wie der Historiker Albert Van Helden feststellt, war Brahes »Logik makellos, seine Messungen untadelig. Ein Kopernikaner musste sich diesem Argument einfach beugen.«

Manchem Anhänger des Kopernikus blieb nichts anderes übrig, als sich auf göttliche Allmacht zu berufen. »Diese Dinge, die dem Pöbel auf den ersten Blick als absurd erscheinen, sind nicht so leicht der Absurdität zu bezichtigen, denn in der Tat sind die göttliche Weisheit und Majestät viel größer, als sie begreifen«, schrieb der deutsche Kopernikaner Christoph Rothmann in einem Brief um 1590 an Brahe. »Sei die Riesenhaftigkeit des Universums und das Ausmaß der Sterne auch noch so groß – sie werden dennoch keinem Vergleich mit dem unendlichen Schöpfer standhalten. Es versteht sich, dass, je größer der König ist, umso viel großartiger und geräumiger der Palast sein muss, der seiner Majestät ziemt. Ein wie großer Palast ist also Ihrer Meinung nach GOTT angemessen?«

Von solchen Argumenten unbeeindruckt entwickelte Brahe sein eigenes System: Wie bei Ptolemäus umkreisen Sonne, Mond und Sterne die unbewegliche Erde, aber die Planeten laufen um die Sonne (siehe Kasten auf S. 57). Dieses »tychonische« System behielt die Vorteile des Geozentrismus bei. In ihm brauchte keine Bewegung der schwerfälligen, trägen Erde erklärt zu werden. Auch gab es keine unauffindbare jährliche Parallaxe, die enorm weit entfernte und riesenhafte Sterne bedingte. In Brahes System lagen die Sterne gleich hinter den Planeten und hatten ganz vernünftige Ausmaße. Und hinsichtlich der Planeten waren das tychonische und das kopernikanische System mathematisch identisch. Somit behielt sein Modell auch die kopernikanische mathematische Eleganz bei, die nach Brahes Meinung alles Überflüssige und Widersinnige am System des Ptolemäus umging.

Als Galilei den Himmel mit seinem Teleskop zu betrachten begann, machte er mehrere Entdeckungen, die der antiken Kosmologie des Ptolemäus unmittelbar widersprachen. Wie er sah, besitzt Jupiter Monde; das zeigte, dass das Universum mehr als ein Bewegungszentrum enthalten kann. Zu-

dem beobachtete Galilei die Phasen der Venus; demnach kreist sie um die Sonne. Diese Befunde bewiesen allerdings nicht, dass die Erde die Sonne umläuft, denn sie waren in vollem Einklang mit dem tychonischen System.

Die lange Konkurrenz der Weltsysteme

Mitte des 17. Jahrhunderts, geraume Zeit nach dem Tod der Pioniere Kopernikus, Brahe und Galilei, veröffentlichte der italienische Geistliche und Astronom Giovanni Battista Riccioli (1598–1671) eine enzyklopädische Bewertung der kosmologischen Theorien, die er in Anspielung auf das klassische Werk des Ptolemäus »Almagestum novum« nannte. Riccioli wog physikalische, astronomische und religiöse Argumente für und wider das kopernikanische System gegeneinander ab und kam zum Schluss, dass zwei Hauptgründe eindeutig gegen Kopernikus sprächen. Beide waren wissenschaftlicher Natur, stützten sich auf Brahes Ideen und sollten erst Jahrhunderte später endgültig widerlegt werden.

Das eine Argument beruhte darauf, dass sich bestimmte Effekte nicht nachweisen ließen, die ein rotierender Planet nach Ricciolis Überzeugung auf Geschosse und fallende Objekte ausüben musste. Schon Brahe hatte gemeint, auf einer sich drehenden Erde würde ein Projektil vom geraden Weg abweichen. Solche Ablenkungen wurden jedoch erst im 19. Jahrhundert beobachtet; damals lieferte der französische Forscher Gaspard Gustave de Coriolis (1792–1843) erstmals eine vollständige mathematische Beschreibung der Bewegungen in einem rotierenden Bezugssystem.

Das zweite Argument bezog sich auf die vermeintlichen Sterngrößen. Riccioli stützte sich dabei auf Teleskopbeobachtungen, die Brahe noch nicht zur Verfügung gestanden hatten. Mit seinem eigenen Messverfahren fand Riccioli zwar, dass die Sterne kleiner aussahen als bei Brahe. Doch mit dem Fernrohr wuchs auch die Empfindlichkeit für den Nachweis der jährlichen Parallaxe. Dass sie weiterhin nicht entdeckt werden konnte, bedeutete, dass die Sterne noch viel weiter entfernt liegen mussten, als Brahe angenommen hatte. Alles in allem blieb es dabei: Im kopernikanischen System müssten die Sterne unwahrscheinliche Monstren sein.

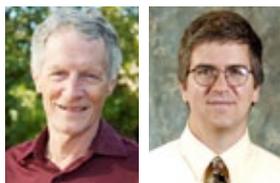
Dass der Kopernikanismus so lange nicht allgemein akzeptiert wurde, lag also am Mangel überzeugender wissenschaftlicher Beweise für seine fast unglaublichen Behauptungen über kosmische Größenmaße. Im Jahr 1674 musste der englische Naturforscher Robert Hooke (1635–1703), Kurator für Experimente der Royal Society, widerwillig eingestehen: »Ob die Erde sich bewegt oder stillsteht, ist ein Problem, das, seit Kopernikus es aufwarf, den Verstand unserer besten modernen Astronomen und Philosophen sehr beschäftigt hat, wobei dennoch unter ihnen keiner gewesen ist, der einen sicheren Beweis für entweder das eine oder das andere gefunden hat.«

Allerdings begann zu Hookes Lebzeiten dann doch eine wachsende Mehrheit der Forscher den Kopernikanismus zu akzeptieren – ungeachtet seiner weiterhin bestehenden Probleme. So konnte damals noch niemand überzeugend die

jährliche Parallaxe nachweisen. Dies gelang erst 1838 dem deutschen Forscher Friedrich Bessel (1784–1846). Ungefähr gleichzeitig lieferte der englische Astronom George Biddell Airy (1801–1892) die erste komplette theoretische Erklärung, warum die Sterne größer aussehen, als sie sind, und der deutsche Physiker Ferdinand Reich (1799–1882) maß erstmals die durch die Erdrotation hervorgerufene Ablenkung fallender Körper. Außerdem hatte die newtonsche Mechanik – die übrigens mit Brahes System nicht zusammenpasste – längst eine Erklärung für die nicht erlahmende Bewegung der »schwerfälligen, trägen Erde« geliefert.

Doch zu Zeiten Galileis und Ricciolis hatten die Gegner des Kopernikanismus einige durchaus respektable, widerspruchsfreie, auf Beobachtungen gestützte Gründe auf ihrer Seite. Zwar wurden sie letztlich des Irrtums überführt, aber das macht sie nicht zu schlechten Naturforschern. Im Gegenteil: Die kühnen Behauptungen anderer besonders streng zu prüfen, ist guter wissenschaftlicher Brauch. ~

DIE AUTOREN



Dennis Danielson (links) ist Professor für englische Literatur an der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) und erforscht die kulturelle Bedeutung der kopernikanischen Revolution. Er war kürzlich Gastprofessor für

Wissenschaftsgeschichte an der Ludwig-Maximilians-Universität München. **Christopher M. Graney** ist Professor für Physik und Astronomie am Jefferson Community and Technical College in Louisville (Kentucky). Mit seiner Frau Christine übersetzt er astronomische Texte des 17. Jahrhunderts aus dem Lateinischen.

QUELLEN

Danielson, D.: Ancestors of Apollo. In: American Scientist 99, S. 136–143, 2011

Graney, C. M.: The Telescope Against Copernicus: Star Observations by Riccioli Supporting a Geocentric Universe. In: Journal for the History of Astronomy 41, S. 453–467, 2010

Van Helden, A.: Measuring the Universe: Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley. University of Chicago Press, 1985

LITERATURTIPPS

Blumenberg, H.: Die Genesis der kopernikanischen Welt. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1981
Grundlegendes Werk zum Wandel des Weltbilds vom Mittelalter zur Neuzeit

Singh, S.: Big Bang: Der Ursprung des Kosmos und die Erfindung der modernen Naturwissenschaft. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2007
Spannende Schilderung der Auseinandersetzungen um kosmologische Fragen einst und jetzt

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/jan2014/copernicus
Ein Video zeigt, wie Epizyklen funktionieren.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304065

JAHRES- ODER GESCHENKABO

- + **ERSPARNIS:**
12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger.
- + **WUNSCHGESCHENK:**
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten dennoch Sie das Präsent.
- + **PÜNKTLICHE LIEFERUNG:**
Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.
- + **KEINE MINDESTLAUFZEIT:**
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



MINIABO

- + **ERSPARNIS:**
3 aktuelle Ausgaben von **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 16,-, das entspricht 35% Rabatt.
- + **WUNSCHGESCHENK:**
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten.
- + **PORTOFREI:**
Die Lieferung erfolgt frei Haus.

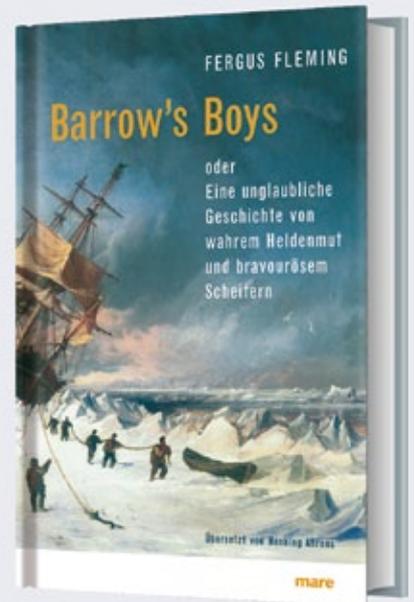


SICHERN SIE SICH ALLE VORTEILE IM ABO



SPEKTRUM-ARTBOOK

Das fadengeheftete DIN-A4-Spektrum-Artbook bietet Ihnen viel Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



BUCH »BARROW'S BOYS«

Hinter allen Expeditionen der Royal Navy in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts steckte der Zweite Sekretär der Englischen Admiralität, John Barrow. Er träumte davon, die weißen Flecken von der Landkarte zu tilgen.

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



T-SHIRT »WISSENSHUNGRIG«

Für alle, die Lust auf mehr Wissen haben: Das Spektrum-T-Shirt »wissenshungrig« aus 100% Baumwolle; Größe L.



SPEKTRUM-HIGHLIGHTS »SCHLAF«

Was bewirkt das im Schlaf ablaufende Programm und was bedeuten Störungen in diesem Programmablauf für die Gesundheit? Dieses Sonderheft gibt den aktuellen Stand der Forschung zu diesem Thema wieder.



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Orientierung in einem Strom aus Lauten

Wenn Menschen in politische oder wirtschaftliche Abhängigkeit von Sprechern einer anderen Sprache geraten, versuchen sie, diese nachzubilden, um sich zu verständigen. Entsteht so eine neue Gemeinschaftssprache, nennt man das Kreolisierung.

Von Jürgen Lang

1920 gewährte die Universität von Santiago de Chile dem deutschen Sprachwissenschaftler Rodolfo Lenz, nach 30 Jahren Lehrtätigkeit am Instituto Pedagógico de Chile, einen Heimaturlaub für das folgende Jahr. Die Reise führte Lenz auf einem holländischen Dampfer durch den Panamakanal und über die holländische Insel Curaçao nach Europa. Die Muttersprache des Schiffskochs Natividad Sillie war das Papiamentu, die spanische Kreolsprache von Curaçao. Lenz ließ den Koch Briefe auf Papiamentu schreiben, diese vorlesen und erklären. In Deutschland konsultierte er den renommierten Kreolisten Hugo Schuchardt wie auch die entsprechende Fachliteratur, um seine Kennt-

nisse des Papiamentu zu vervollständigen. Seiner 1928 auf Spanisch publizierten Beschreibung dieser Sprache gab er den Titel »Das Papiamentu. Die Kreolsprache von Curaçao« und den denkwürdigen Untertitel »Die einfachste Grammatik«.

Dieser führt mitten in Probleme hinein, welche die Kreolisten noch heute umtreiben. Wie konnte der Deutschchilene eine Sprache, die von ihren Sprechern gar nicht Kreol genannt wird, ohne Weiteres als Kreolsprache klassifizieren? Galt ihm vielleicht ihre grammatikalische Einfachheit als hinreichendes Kriterium?

Laut Lenz fehlt dem Papiamentu – wie angeblich der Grammatik aller Kreolsprachen – die Flexion. Doch dieser Eindruck ist zum Teil den an indoeuropäischen Sprachen geschulten Gewohnheiten der Linguisten geschuldet. Zwar werden Dinge wie Vergangenheit, Imperativ, Passiv in Kreolsprachen tatsächlich selten durch auf den Verbstamm folgende Endungen angezeigt. Doch gibt es stattdessen in der Regel vorangestellte Elemente. Diese ließe sich mit dem Verb zusammenschreiben und zur Flexion rechnen, sofern kein anderes Wort zwischen sie und das Verb treten kann. Zudem widerspricht sich Lenz in gewisser Weise selbst, wenn er die angeblich flexionslose Grammatik des Papiamentu gleichzeitig wegen ihrer Regelmäßigkeit lobt, denken wir dabei zuallererst doch an regelmäßige Flexion, etwa in der Pluralbildung.

Recht hatte der Pionier jedoch hinsichtlich fehlender Personalendungen. Ob etwa »ich« oder »wir« handeln, lässt sich in den mir bekannten Kreols weder am Verb selbst noch an vorangestellten Partikeln ablesen, sondern nur in dem als Subjekt bezeichneten Satzteil. Dieses Phänomen gibt es aber auch in anderen Sprachen, etwa in denjenigen, die man seit Wilhelm von Humboldt und August Wilhelm Schlegel »isolierend« nennt. Das Chinesische gehört in diese Kategorie, gilt aber nicht als Kreolsprache.

Genau besehen haben auch nicht Einfachheit, Flexionslosigkeit, Regelmäßigkeit oder irgendein anderes Struktur-



DIE SERIE IM ÜBERBLICK

WELT DER SPRACHE

- | | | |
|--------|---|---------------------|
| Teil 1 | ▶ Ende der Exklusivität
<i>Ina Bornkessel-Schlesewsky
und Matthias Schlesewsky</i>
Sprachenvielfalt als natürliches Experiment
<i>Nikolaus P. Himmelmann</i> | Mai 2014 |
| Teil 2 | ▶ Sprachenvielfalt der Anden
<i>Paul Heggarty</i> | Juni 2014 |
| Teil 3 | ▶ Sehen, riechen, orientieren
<i>Thomas Widlok und Niclas Burenhult</i> | Juli 2014 |
| Teil 4 | ▶ Das Rätsel der großen Sprachfamilien
<i>Paul Heggarty</i> | August 2014 |
| Teil 5 | ▶ Unterhaltung nach Vogelart
<i>Jan Dönges</i> | September 2014 |
| Teil 6 | ▶ Orientierung in einem Strom aus Lauten
<i>Jürgen Lang</i> | Oktober 2014 |

merkmal schon früh dazu geführt, eine Klasse von Kreolsprachen zu postulieren. Vielmehr stehen diese offensichtlich in einem ganz spezifischen Verhältnis zu anderen Sprachen. Das zeigt das Vorwort einer 1770 publizierten Grammatik des dänischen Missionars Jochum Melchior Magens, der die Sprache der Sklaven auf den karibischen Jungfernsinseln studierte, um in ihr das Wort Gottes zu verbreiten: »Die kreolische Umgangssprache auf den dänischen Inseln ist vom Holländischen abgeleitet. Das auf den französischen Inseln gebräuchliche Kreol ist vom Französischen abgeleitet. ... Die spanische Kreolsprache ist vom Spanischen abgeleitet und wird auf den spanischen Inseln und auf Curaçao gesprochen, das holländisch ist.« Ohne über das Instrumentarium moderner Linguistik zu verfügen, hatte Magens erkannt, dass keines dieser Kreols eine europäische Sprache direkt fortsetzt. Er konnte sich deshalb nicht dazu durchringen, sie einfach als Dialekte oder Tochtersprachen der europäischen

AUF EINEN BLICK

LERNEN OHNE LEHRER

1 Kreol- oder Pidginsprachen bereiten Forschern Kopfzerbrechen. Denn obwohl sie ihrer jeweilige **Basissprache wie Französisch oder Portugiesisch** ähneln, gelingt es nicht, sie anhand sprachlicher Merkmale eindeutig zu definieren.

2 Einige Linguisten verfolgen daher einen anderen Ansatz. Sie unterscheiden zwischen dem so genannten **Sprachwandel**, der Dialekte und Tochtersprachen hervorbringt, und der **Kreolisierung**, die Kreols entstehen lässt.

3 Wenn Menschen ohne Hilfe versuchen müssen, **eine fremde Sprache zu erlernen**, um zu überleben, suchen sie im Lautstrom nach scheinbaren Entsprechungen für **Elemente und Strukturen** der eigenen Sprache. Von Kreolisierung spricht man, wenn dabei eine **neue Gemeinschaftssprache** entsteht, die der Basissprache mehr oder weniger nahekommt.

JÜRGEN LANG



Sprachen zu bezeichnen, obwohl sie von diesen »abgeleitet« waren.

Tatsächlich ist die Mehrheit der Kreolisten inzwischen zu der Ansicht gelangt, dass es keine sprachliche Eigenschaft und auch keine Kombination von Eigenschaften gibt, die es erlauben würden, eine Sprache eindeutig als Kreol zu identifizieren. Daher muss es in der Forschung künftig um diese »Ableitung«, also um die so genannte Kreolisierung gehen und um die Tatsache, dass sich diese offensichtlich nicht einfach im Tempo, sondern qualitativ von dem vertrauteren Sprachwandel unterscheidet, der Dialekte und Tochtersprachen hervorbringt.

Individuen wandeln ihre eigene Sprache, um sie zum Beispiel neuen Lebensbedingungen anzupassen und so alltags-tauglich zu halten. Mitunter stößt auch der Kontakt mit Fremden die Veränderung an. Stets folgen die Sprachwandler aber dem unbewussten Muster »Statt des mir vertrauten A will beziehungsweise darf ich ab sofort auch B sagen«. Sofern sich diese Modifikation auf Details bezieht und nur in einem Teil der Sprachgemeinschaft greift, bringt sie einen Dialekt hervor. Wenn sich solche Modifizierungen in einem Teil des Sprachgebiets häufen, kann dort eine Tochtersprache entstehen.

Anders verhält es sich beim Prozess der Kreolisierung, der zu allen Zeiten stattfinden kann, wenn Menschen in politische oder wirtschaftliche Abhängigkeit von Sprechern einer anderen Sprache geraten. Zur Zeit der europäischen Koloniegründungen in Übersee waren die Ursachen besonders dramatisch: Menschen wurden als Sklaven verschleppt oder gerieten unter koloniale Herrschaft. Ihre angestammten Sprachen taugten nicht mehr, um das Überleben zu sichern, denn

Die Bewohner der Kapverden, eines Archipels fast 600 Kilometer vor Afrika, sind großteils Nachkommen von Sklaven. Sie sprechen ein Kreol, das auf Portugiesisch basiert.

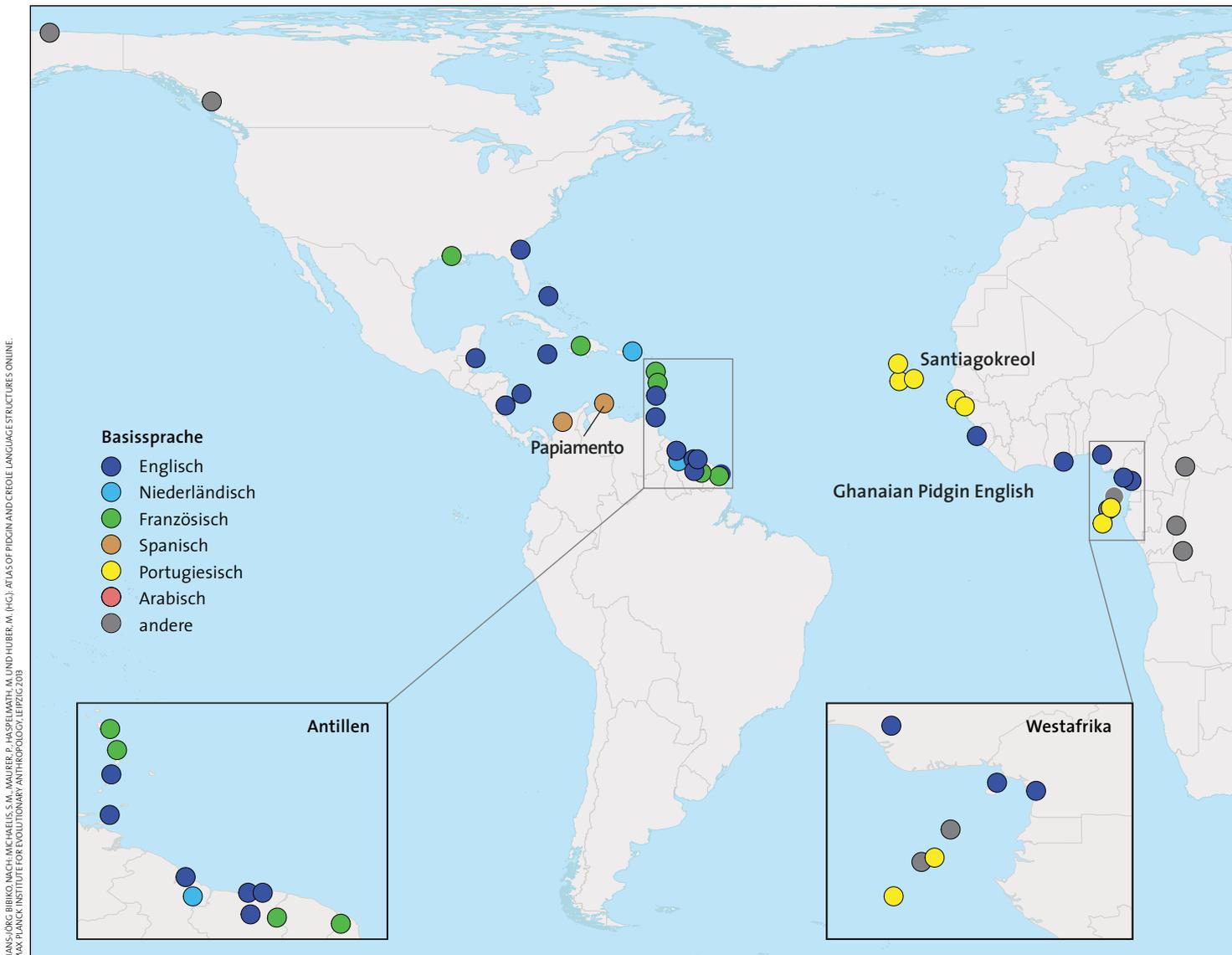
Menschen mit anderer Sprache hatten nun das Sagen, und auch die neuen Schicksalsgenossen sprachen zum Teil andere Sprachen. Die Kreolisierer entwickelten also individuelle Lernversionen der Sprache der Herren, denn es standen ihnen weder Lehrer noch Lehrbücher zur Verfügung. Eine neue Sprache entstand dabei allerdings nur, wenn die Lerner diese Versionen, bevor sie die Zielsprache erreichten, zu einer neuen Gemeinschaftssprache integrierten.

Spracherwerb durch Hypothesenbildung

Die Basissprache, auf die sich die Begriffe Kreolisierung und Sprachwandel beziehen, wird also bei Ersterem nicht erreicht, während Menschen beim klassischen Sprachwandel über sie hinausgehen. Kreolisierer können nicht nach dem Prinzip »statt A will/darf ich ab sofort auch B sagen« vorgehen, weil sie gar nicht über das A der fremden Sprache verfügen, sondern nur vage Hypothesen über deren Beschaffenheit aufstellen können. Niemand erklärt ihnen, wie ein bestimmtes Objekt oder eine ihnen vertraute Handlung in der Sprache

der Mächtigen zu benennen sei. Dennoch suchen sie in deren Äußerungen notgedrungen nach einem Wort, um ihre eigene Bezeichnung für dieses Objekt oder jene Handlung dadurch zu ersetzen. Erweist sich ihre Annahme als falsch, wird sie korrigiert beziehungsweise durch eine bessere ersetzt. Je nachdem, ob der Lernprozess erst relativ spät oder schon sehr früh aufgegeben wird, kommt deshalb das resultierende Kreol seiner Basissprache mehr oder weniger nah.

Solange die resultierende Gemeinschaftssprache noch niemandes Muttersprache ist, spricht man von »Pidgin«. So hat sich im Süden Ghanas ausgehend vom Englisch der Kolonialherren das Ghanaian Pidgin English entwickelt, das heute den in den Städten lebenden verschiedenen Völkern auch als gemeinsame Verkehrssprache dient. »Dort gibt es keine Moskitos« heißt in diesem Pidgin beispielsweise »Dat ples, no moskitos«. Der Übergang zur Verwendung einer solchen Sprache als Muttersprache war und ist, wenn er denn stattfindet, immer fließend: Was die Kinder schon als Erstsprache lernen, war oft für Eltern und Großeltern noch ein Behelf in spe-



zifischen Situationen. Viele Kreolsprachen verweilen auf dieser unbestimmten Schwelle. Dazu gehört beispielsweise das englischbasierte Tok Pisin Neuguineas – es ist trotz seines von »talk pidgin« abgeleiteten Namens für viele seiner Sprecher längst eine vollwertige Muttersprache. Zu einem gegebenen Zeitpunkt können sich verschiedene Personen an verschiedenen Punkten der Entwicklung befinden. Der Prozess mag an jedem beliebigen Punkt stoppen, und das Erreichte kann wieder aufgegeben werden.

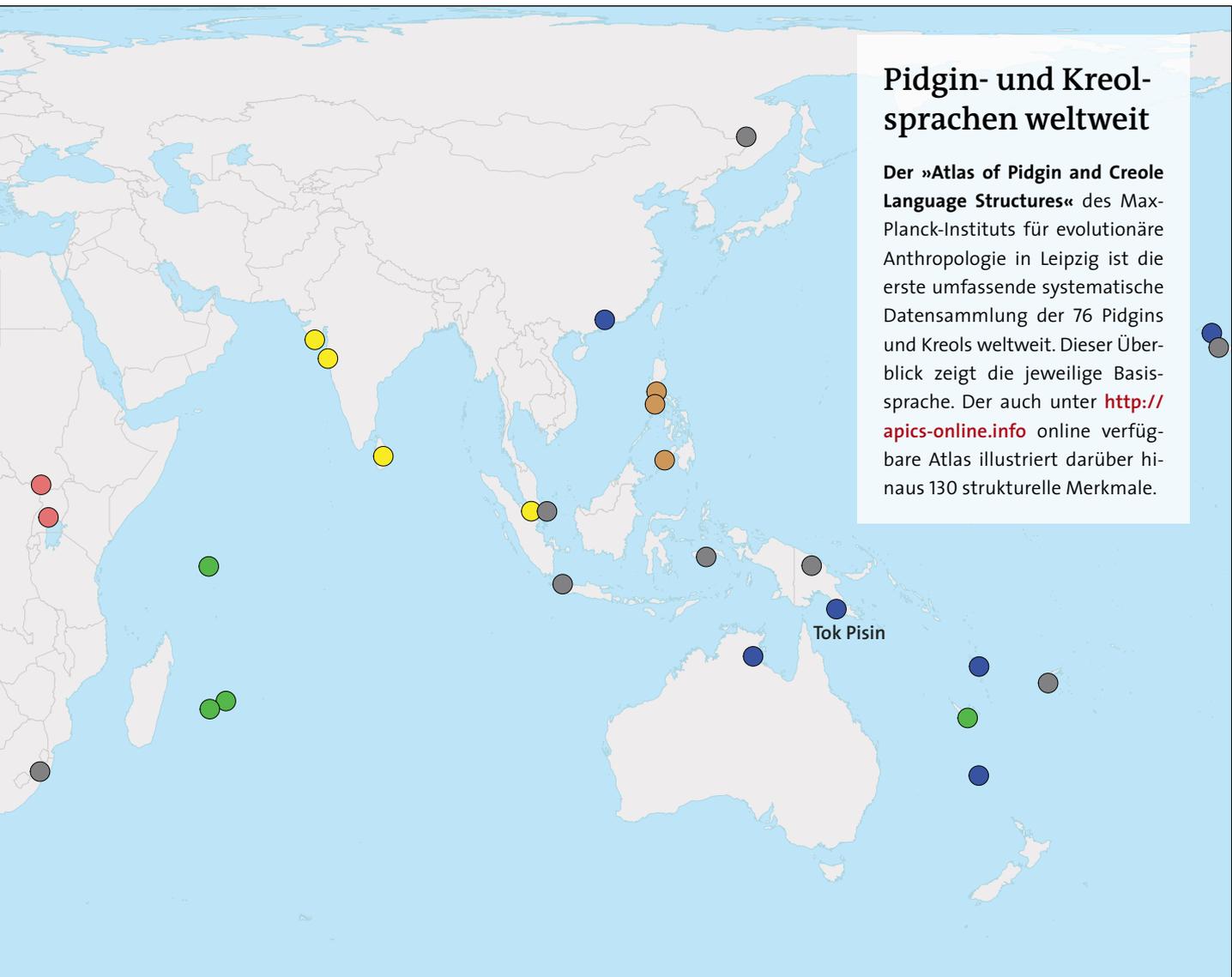
Diese Abläufe müssen auch auf den Kapverden stattgefunden haben. Anfang des 15. Jahrhunderts befuhren portugiesische Seefahrer die westafrikanischen Gewässer, um einen Seeweg nach Indien zu finden. Um 1460 erkundeten sie nach und nach das unbesiedelte kapverdische Archipel und nahmen es von der größten Insel Santiago und seinem kleineren Nachbarn Fogo aus in Besitz; schön sehr früh kamen Niederlassungen am Festland dazu. Die Händler und Kolonisten kauften den afrikanischen Königen massenhaft afrikanische Sklaven ab, sei es für den eigenen Bedarf im Haushalt, beim

Baumwollanbau und auf den Schiffen, sei es, um sie nach Europa oder später in die Neue Welt zu verkaufen. Weil die Siedler ohne Frauen gekommen waren, gab es auf Santiago schon in der zweiten Generation fast nur noch Mischlinge und Afrikaner. Ende des 15. Jahrhunderts hatten sich so die ersten Kreolsprachen in europäischen Überseekolonien ausgebildet. Die der Kapverden, der Region Casamance im Süden des Senegals und in Guinea-Bissau haben bis heute überlebt.

Auf Gedeih und Verderb

In der Anfangszeit wurden meist Sprecher des Wolof, der auch heute noch wichtigsten indigenen Sprache im Senegal, nach Santiago verschleppt. Sie gaben bei der Kreolbildung den Ton an. Spätere Ankömmlinge mit anderem sprachlichen Hintergrund mussten sich weitgehend anpassen.

Für die wissenschaftliche Modellbildung der nun ablaufenden Prozesse schadet es nicht, sich die Situation der Betroffenen zu vergegenwärtigen. Den Vertretern einer ihnen fremden Kultur auf Gedeih und Verderb ausgeliefert, ström-



te bei jedem Versuch einer Verständigung – etwa wenn das Pflanzten eines Baumwollstrauchs vorgemacht wurde – ein Strom von unbekanntem Lauten auf die Sklaven ein. Diesem vermochten sie allenfalls eine ungefähre Bedeutung zuzuordnen, sofern die Gesprächssituation einen mehr oder weniger eindeutigen Kontext abgab. Die am Prozess der Sprachentwicklung beteiligten Kreolisierer versuchten, sich auf alles einen Reim zu machen, und stellten dazu unbewusst Hypothesen über die Konstruktion des Gehörten auf.

Dabei half ihnen zunächst einmal das intuitive, allen Menschen gemeinsame Wissen darüber, wie Sprache funktioniert. Demnach geht es immer darum, zu realen oder vorgestellten Sachverhalten Stellung zu nehmen. Menschen erklären einander, dass etwas in einer bestimmten Weise ist oder gerade nicht so ist, dass es anders sein könnte oder werden soll und dergleichen mehr. Wer immer eine Sprache erlernt, ob Kind oder Erwachsener, sucht daher in dem Gehörten nach Bezeichnungen für die handelnden Subjekte und behandelten Objekte (die »Sachen«, die am »Sachverhalt« beteiligt sind) sowie nach den Angaben, wie es sich mit all dem verhält oder verhalten soll, das heißt nach dem Prädikat des Satzes. Außerdem wissen Lerner intuitiv, dass beide Kategorien näher beschreibbar sind: Ein Busch ist verdorrt oder in Blüte, eine Arbeit verläuft zu langsam oder fehlerhaft. Schließlich gehört zu diesem universalen Wissen auch, dass bedeutungstragende Ausdrücke aus einer meist recht konstanten Abfolge von Sprachlauten bestehen.

Analyse des unbekanntem Lautstroms

Intuitiv bedienen sich die Kreolisierer einer zweiten Art von Wissen: ihrer eigenen Sprache, auf Santiago also insbesondere des Wolof. Wer ohne Lehrer und Lehrbuch eine zweite Sprache erlernt, tendiert nämlich zu der Annahme, dass diese – von dem anderen lautlichen Gewand einmal abgesehen – so funktioniert wie die eigene. Das führt zu den so genannten Interferenzfehlern, also dem Transfer von Strukturen der Erstsprache in die zu erlernende Sprache. Die angestammte Sprache konkretisierte demnach die Erwartungen der Kreolisierer an die fremde Sprache. Sie versuchten, den fremden Lautstrom in Worte zu zerschneiden, die nach Bedeutung, Funktion, Betonungsmuster, Silbenzahl, Silbenstruktur und den enthaltenen Sprachlauten aus ihrer eigenen Sprache stammen könnten.

Keine dieser beiden Arten von Wissen schützte vor anfänglichen Analysefehlern. Diese wurden im Lauf weiterer Kontakte durch Erfahrung und Neubewertung korrigiert – so lange, bis die Kommunikation mit den Herren gelang. Durch gegenseitige Angleichung wurden die Lernerversionen der einzelnen Wolof-Sprecher zu einer Gemeinschaftssprache, die auch Sklaven die Verständigung ermöglichte, die aus anderen Regionen der afrikanischen Küste kamen und kein Wolof beherrschten.

Die Wolof-Sprecher haben sich offensichtlich gefragt, was in der Rede ihrer Herren der ihnen vertrauten Partikel »di«

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



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



www.spektrum.de/sprache

entsprechen mochte. Diese wird im Wolof dann Verben vorausgeschickt, wenn ein Vorgang noch nicht abgeschlossen (imperfekt) ist – weil er noch andauert, erst in der Zukunft oder gewohnheitsmäßig immer wieder stattfindet. Derartige Unterscheidungen von Perfektivität und Imperfektivität kennt man zum Beispiel auch aus den slawischen Sprachen. Die Auszeichnung des Nichtabgeschlossenen erfolgt im Wolof durch die genannte Partikel »di«, deren Fehlen markiert die Abgeschlossenheit. Für die Sklaven vom Festland handelte es sich also um ein wichtiges, bedeutung tragendes grammatisches Element. Dessen Entsprechung glaubten sie offenbar im »tá a« des volkstümlichen Portugiesisch gefunden zu haben, denn das Kreol von Santiago enthält durchaus ein Imperfektivitätspartikel: »ta«. Tatsächlich aber war dessen Quelle Teil der volkstümlichen Konstruktion »Tá a fazer (uma coisa)« (statt Standardportugiesisch »Está a fazer (uma coisa)«, zu Deutsch »Er ist dabei, (etwas) zu tun« – eine im Portugiesischen übliche Art, einen gerade ablaufenden Vorgang zu bezeichnen.

Die Wolof forschten auch nach Entsprechungen zu einer ihnen vertrauten Verbendung, die Vorzeitigkeit anzeigt: »oon« beziehungsweise »woon« bei Verben, die auf einen Vokal enden. Und sie hielten die portugiesische Verbendung »va« für den besten Kandidaten, aus dem sie »ba« machten, weil ihre Sprache kein »v« kannte. Dabei blieb unberücksichtigt, dass die portugiesische Endung »va« nur eingeschränkt gilt: Es ist die Endung des »pretérito imperfeito« derjenigen Verben, deren Infinitiv auf »ar« endet. Sie zeigt nur die einfache Vergangenheit, nie die Vorvergangenheit an und wird nur für die 1. und 3. Person Singular verwendet.

Noch auffälliger ist die Aufspaltung der Bedeutung des portugiesischen »tem« und des spanischen oder italienischen »tiene« – in der fraglichen Zeit lebten auch einige Vertreter dieser beiden europäischen Sprachen auf Santiago. Portugiesisch »tem« und Spanisch »tiene« bedeuten jeweils »er/sie/es hat«. Im Kreol jedoch entsprechen ihre Derivate »ten« und »tene« den Wolof-Verben »am« und »ame«, die zwar tatsächlich »haben« bedeuten, wobei jedoch nur das jeweils längere Verb zeitliche Grenzen für das Haben andeutet. Wer reich ist, wird vermutlich zeitlich unbegrenzt »Besitz haben« – hier verwendet das Wolof »am«, das Kreol »ten«. Hat jemand Geld aktuell bei sich, ist dies ein zeitlich befristeter Zustand, der nach »ame« beziehungsweise »tene« verlangt.

Die Suche nach portugiesischen Entsprechungen zu den vertrauten Strukturen ging sicher oft auch ins Leere oder musste anhand der Erfahrung korrigiert werden. Sie hat aber nicht selten Spuren hinterlassen, wie im folgenden Fall. Das Wolof kennt beim Substantiv nicht die zwei Geschlechter des Portugiesischen, sondern unterschiedliche Klassen: acht im Singular und zwei im Plural, letztere unterscheiden zwischen belebten und unbelebten Objekten. Wie wir einen bestimmten Artikel (der, die, das) vor dem Substantiv verwenden, steht im Wolof hinter diesem ein die Klasse bestimmender Konsonant zusammen mit einem »i« oder »a«, um Nähe beziehungsweise Ferne des betreffenden Objekts zu vermitteln. Mit diesen Komplexen (bi/ba, gi/ga, ...) kann man sich auch wie mit einem Pronomen auf schon bezeichnete Objekte beziehen.

Umgang mit dem Unvereinbaren

In unserem Zusammenhang interessant ist nun vor allem die l-Klasse des Wolof, da man sich mit »li« und »la« auch auf noch nicht klassifizierte Objekte oder auf ganze Sätze bezieht, die als solche keine Klasse aufweisen. Wollte ein Kreolisierer also ein beliebiges portugiesisches Substantiv – sagen wir »prato« für Teller – übernehmen, so steckte er es notwendigerweise in die l-Klasse. Er konnte sich in dieser Zuweisung bestätigt fühlen, weil er auch die Portugiesen von »o prato ali« und »o prato lá« reden hörte, was allerdings beides »der Teller dort« bedeutet. Vom lautlichen Gleichklang verführt blieb der Wolof-Sprecher für den Teller hier bei »prátu li« und für den Teller dort bei »prátu la«. Auf die Dauer bemerkten die Kreolisierer freilich, dass die Substantive der Sprache ihrer Herren keine Klasse aufwiesen. Ab diesem Zeitpunkt sahen sie nach dem Vorbild von portugiesisch »ali« und »lá« auch in Kreolisch »li« und »la« einfache Ortsadverbien. Wer das Wolof außen vor lässt und in Kreolisch »li« und »la« nur Fortsetzungen von portugiesisch »ali« und »lá« sieht, kann nicht erklären, warum kreolisch »li« nicht »dort«, sondern »hier« heißt. In Wirklichkeit haben wir es wohl mit der Spur einer ersten, später verworfenen Gleichsetzung des portugiesischen »ali« mit dem Wolof-Artikel »li« zu tun.

Das Problem der Genera auf der einen und der Klassen auf der anderen Seite löste man übrigens durch Verzicht auf beide. Hier zeigen das kapverdische Kreol und die korrespondierenden Festlandskreols durchaus die grammatikalische Einfachheit, von der Lenz sprach.

Selbst im Wortschatz, wo so vieles in diesem Kreol auf den ersten Blick mit dem Portugiesischen fast identisch scheint, stimmt bei näherem Zusehen nichts genau überein. So verwendeten die Kolonisten das Verb »encantar«, was in etwa »entzücken« bedeutet. Es ergab im Santiagokreol das Verb »nkánta«, bei dem scheinbar nur ein Vokal am Anfang und ein Konsonant am Ende weggefallen ist (die Verschiebung der Betonung auf die vorletzte Silbe ist jünger, maximal 100 Jahre alt). Dass die Sache nicht so einfach liegt, zeigt schon die Analyse in Silben, die die Sprecher selbst vornehmen: Der Portugiese teilt sein »encantar« in »en«, »can« und »tar«, der

Kreole sein »nkánta« in »nká« und »nta«. Zudem kann das portugiesische »encantar« je nach Bedeutung auch reflexiv sein (»encantar-se com«, »sich ergötzen an«), während es im Kreol keine reflexiven Verben gibt. Das portugiesische »alguém encanta-se com uma coisa«, zu Deutsch »jemand ergötzt sich an einer Sache«, übersetzt der Bewohner von Santiago mit »algen ta nkánta n'un kusa«, was wörtlich aber »jemand ergötzt in etwas« bedeutet. Selbst im Wortschatz liefert die Basissprache also nur das phonetische und semantische Rohmaterial.

Kreolisierer verhielten und verhalten sich wie alle Menschen, die mit einer fremden Sprache konfrontiert sind und sich selbst behelfen müssen. Aber in ihrem Fall führten die sozialen Umstände zur Integration von mindestens zwei Sprachen zu einer neuen. Die Europäer sahen in dem Ergebnis nur gebrochene Versionen ihrer eigenen Sprachen (daher auch Bezeichnungen wie »broken English«). Sie übersahen die gewaltige Leistung, die die Kreolisierer erbrachten, angefangen von der ursprünglichen Suche nach Entsprechungen für die Elemente der angestammten Sprachen über die partielle Angleichung dieser hypothetischen Entsprechungen an die realen Strukturen der Basissprache bis hin zur Schaffung von ganz neuen Strukturen spätestens beim Ausbau zu einer vollwertigen Erstsprache. Zum Beispiel gibt es im Kreol von Santiago die Unterscheidung zwischen zwei Arten von »dass«, eines für die Einführung indirekter Rede (im Santiagokreol »kumâ« beziehungsweise »ma«) und eines für alle übrigen Fälle (»ki«), die so weder im Portugiesischen noch im Wolof existiert.

All dies ist letztlich das Werk von Individuen. Man darf aber nicht vergessen, dass die Kreationen der einzelnen Individuen dauernd mit denjenigen aller anderen Kreolisierer abzugleichen waren. Die Kreolisierung erforderte also auch eine enorme soziale Arbeit, die bis heute noch kaum erforscht und modelliert ist. ~

DER AUTOR



Der Kreolist **Jürgen Lang** lehrte bis 2009 Romanische Philologie an der Universität Erlangen-Nürnberg. Die Theorie der Kreolisierung und die Kreolsprache der Kapverdischen Inseln bildeten und bilden einen Schwerpunkt seiner Forschung.

QUELLEN

- Lang, J.:** Les langues des autres dans la créolisation. Gunter Narr, Tübingen 2009
Lenz, R.: El papiamento. La lengua criolla de Curazao. La gramática mas sencilla. Barcells & Co., Santiago de Chile 1928
Michaelis, S. M. et al. (Hg.): Atlas of Pidgin and Creole Language Structures Online. Leipzig 2013
<http://apics-online.info>

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304066

Gesteine, fast so alt wie die Erde?

Nach Ansicht einer Gruppe von Geologen erlauben 4,4 Milliarden Jahre alte Gesteine im Norden Kanadas einen Blick auf die Anfänge der Erde und den Ursprung des Lebens. Andere Forscher bezweifeln jedoch die Datierung und gehen von einem wesentlich geringeren Alter aus.

Von Carl Zimmer

Der Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel wirkt äußerlich nicht wie ein Schlachtfeld. Friedlich und abgeschieden liegt er inmitten einer unzugänglichen Region am Nordostrand der Hudson Bay in Kanada. Gute 30 Kilometer trennen ihn von Inukjuaq, der nächstgelegenen Siedlung. Abseits der Küste geht das offene Gelände in eine wellige Landschaft über, in der manche Hügel von Flechten überzogen, andere von eiszeitlichen Gletschern blank geschliffen sind. Die nackten Felsen wirken malerisch mit ihrem komplizierten Gefüge, das durch Streckung und Faltung geprägt ist. Einige sind grau bis schwarz und von hellen Adern durchzogen, andere blassrosa und mit dunkelroten Granaten gesprenkelt. Normalerweise verschlägt es außer Karibus und Stechmücken kein lebendes Wesen hierher.

Und doch ist diese verschlafene Gegend der Schauplatz einer erbitterten wissenschaftlichen Auseinandersetzung. Fast ein Jahrzehnt lang reisten rivalisierende Geologengruppen nach Inukjuaq, um dort Kanus mit Campingausrüstung und Laborgeräten zu beladen und entlang der Küste der Hudson Bay zu dem Gesteinsgürtel zu paddeln. Ihre Absicht war, das

Alter der Felsen zu ermitteln. Eines dieser Teams unter der Leitung von Stephen J. Mojzsis von der University of Colorado in Boulder datiert sie auf 3,8 Milliarden Jahre. Das ist recht alt, aber nicht rekordverdächtig.

Jonathan O'Neil an der Spitze der konkurrierenden Forschergruppe von der University of Ottawa (Kanada) schreibt den Felsen hingegen ein Alter von 4,4 Milliarden Jahren zu. Damit wären sie die weitaus ältesten Gesteine, die je auf der Erde gefunden wurden. Sie hätten sich bereits rund 150 Millionen Jahre nach der Entstehung unseres Planeten vor 4,568 Milliarden Jahren gebildet und könnten davon erzählen, wie sich die Erdoberfläche in dieser frühen, turbulenten Epoche entwickelte und wie lange es dauerte, bis Leben entstand. All das lag bislang außerhalb der Reichweite jeglicher Forschung.

Während der ersten 500 Millionen Jahre nach der Geburt der Erde erstarrte ihre anfangs glutflüssige Oberfläche zu einer festen Gesteinskruste, die schon bald komplett von Wasser bedeckt war. Aus diesem Urozean erhob sich schließlich das erste trockene Land und bildete frühe Kontinente. Es war eine Zeit, in der massenhaft Kometen und Asteroiden auf der Erde einschlugen. Vermutlich stieß damals auch ein Planet von der Größe des Mars mit ihr zusammen; aus den Trümmern dieser Kollision – als »giant impact« (riesiger Einschlag) bekannt – ging der Mond hervor.

Allerdings existieren nur wenige Hinweise darauf, wann die geschilderten Ereignisse genau stattfanden. So lassen einige Mineralkörner vermuten, dass sich der Urozean vor dem Mond gebildet hat. Die Geologen befinden sich hier in derselben misslichen Lage wie die Biografen altgriechischer Philosophen, die vereinzelt Pergamentfetzen und Erzählungen aus zweiter Hand möglichst viele Informationen zu entlocken versuchen.

In den Nuvvuagittuq-Gesteinen dagegen wird man wie in einem Buch lesen können – sofern O'Neil Recht hat und sie wirklich 4,4 Milliarden Jahre alt sind. Auf einer Fläche von mehreren tausend Morgen warten Minerale darauf, unter-

AUF EINEN BLICK

FENSTER IN DIE FRÜHZEIT UNSERES PLANETEN

1 Bei **Gesteinen** vom Nordostrand der Hudson Bay in Kanada könnte es sich um die **ältesten handeln, die jemals gefunden wurden**. Doch die Wissenschaftler streiten darüber, ob sie vor 3,8 oder 4,4 Milliarden Jahren entstanden. Der frühere Wert würde die Gesteine in die Nähe der **Entstehungszeit der Erde** rücken.

2 Der Ausgang der Debatte hängt davon ab, ob es gelingt, die **Methoden zur Datierung von Atomen** in kleinen Gesteinsproben aus der Frühgeschichte der Erde zu verbessern.

3 Bei einem Alter von 4,4 Milliarden Jahren könnten die Gesteine **handfeste Hinweise** darauf liefern, wie die Erdoberfläche Gestalt angenommen hat, wann die ersten Ozeane entstanden sind und **wie schnell sich das Leben entwickelte**.

Stein des Anstoßes: Hat er sich schon 150 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde gebildet und stellt damit den ältesten bekannten Überrest kontinentaler Kruste dar, oder ist er wesentlich jünger? Das letzte Urteil steht noch aus.



TRAVIS KATHONE

sucht zu werden. Vielleicht halten sie Antworten auf lange gestellte Fragen bereit. Setzte die Plattentektonik schon sehr früh ein, oder dauerte es Hunderte von Jahrillionen, bis die Kontinente mit ihrer Wanderung begannen? Wie sah damals die chemische Zusammensetzung der Ozeane und der Atmosphäre aus? Und wie bald nach der Geburt der Erde entstand das Leben?

Bei einem Alter von 4,4 Milliarden Jahren könnte sich die Nuvvuagittuq-Formation somit als einer der wertvollsten Schätze der Geologie erweisen. Sollte Mojzsis dagegen Recht behalten und die Felsen nur 3,8 Milliarden Jahre zählen, bleiben die ersten Kapitel der Erdgeschichte vorerst – oder vielleicht sogar für immer – zugeschlagen.

Warum alte Gesteine so selten sind

Die meisten Gesteine der Erdkruste sind auf eine von zwei Arten entstanden. Entweder setzten sich feine Partikel auf dem Boden von Ozeanen ab und wurden dort allmählich zu Schichten von Sedimentgestein zusammengepresst, oder glutflüssiges Material stieg aus dem Erdmantel empor, kühlte dabei ab und erstarrte zu magmatischem Gestein.

Nur winzige Teile alter Kruste haben sich bis heute erhalten, der Rest ist verschwunden. Einige Gesteine sind allmählich verwittert und wurden durch Regen und Wind abgetragen. Letztlich landeten sie so zur (erneuten) Sedimentation in den Ozeanen. Viele andere gelangten beim Absinken tektonischer Platten (zurück) in den heißen Mantel, wo sie schmolzen. Dabei wurde ihre Identität ausgelöscht – so wie die eines Eiswürfels, der sich in einem warmen Teich auflöst. Ihre Atome verteilten sich in dem vorhandenen Magma, aus dem sich beim Aufstieg neues, jüngerer Gestein bildete. Auch der Aufprall riesiger Asteroiden auf der frühen Erde wirkte zerstörerisch, indem er große Abschnitte der Kruste zum Schmelzen brachte.

Deshalb sind alte Gesteine ausgesprochen selten, was die Formation von Nuvvuagittuq so wertvoll macht – und so heiß umstritten. Nur an wenigen anderen Stellen rings um den Erdball fanden sich Gesteinsproben, die vor mehr als 3,8 Milliarden Jahren entstanden sind. Die ältesten stammen aus der Tundra in den Nordwestterritorien Kanadas und wurden auf 3,92 Milliarden Jahre datiert.

Weil frühe Gesteine so rar sind, haben sich Geologen nach anderen Zeugnissen aus der ersten halben Jahrillionde unseres Planeten umgesehen. Als solche erwiesen sich bestimmte Minerale: die Zirkone. Es handelt sich um mikroskopisch kleine, robuste Kristalle aus Zirkoniumdioxid, die sich manchmal in abkühlendem Magma bilden und in den daraus entstandenen Gesteinen vorkommen. Bei deren Erosion bleiben sie gewöhnlich erhalten und können mit anderen Verwitterungsprodukten ins Meer gelangen. Dort setzen sie sich auf dem Ozeanboden ab und werden in jüngere Sedimentgesteine eingebettet.

Zu den häufigen Verunreinigungen in Zirkonen gehören auch radioaktive Stoffe wie Uran. Deren Zerfall gleicht einer Uhr, die Geologen zur Altersbestimmung heranziehen können. Die Kristalle enthalten zudem andere Substanzen, die Hinweise auf den Zustand der Erde zu ihrer Bildungszeit liefern. »Das Tolle an Zirkonen ist, dass sie echte Zeitkapseln sind«, erklärt Mojzsis.

Geologen haben 2001 im australischen Outback sehr alte Exemplare in jüngeren Sedimentgesteinen entdeckt. Einige wurden auf 4,4 Milliarden Jahre datiert, womit sie die ältesten jemals gefundenen Zeugen der Erdgeschichte sind. Die winzig kleinen Kristalle haben bemerkenswerte Informationen geliefert. So lässt sich aus ihrer Struktur schließen, dass ihr Ursprungsgestein etwa sechs bis sieben Kilometer unter der Erdoberfläche erstarrte. Mojzsis und seine Kollegen fanden teils auch chemische Fingerabdrücke von Wasser.

Das sind wertvolle Erkenntnisse. Doch das Originalgestein, zu dem die Zirkone einst gehörten, wäre noch viel aufschlussreicher. Es würde zahlreiche weitere Minerale enthalten, die weitaus mehr über die Erde kurz nach deren Geburt verraten könnten. Das führt uns nach Nuvvuagittuq zurück.

Pures Findexglück

Ende der 1990er Jahre finanzierte die Regierung von Quebec eine große geologische Expedition, um die ersten detaillierten Karten von den nördlichen Arealen der Provinz zu erstellen. In der Region sind alte Kerne kontinentaler Kruste in Schichten jüngerer Gesteins eingebettet. Die Datierungen ergaben größtenteils ein Alter von ungefähr 2,8 Milliarden Jahren. Doch eine der Proben erwies sich als 3,8 Milliarden Jahre alt. Gesammelt hatte sie Pierre Nadeau, damals Doktorand an der Simon Fraser University in British Columbia (Kanada), der rein zufällig zum Grünsteingürtel von Nuvvuagittuq geschickt worden war. »So etwas zu entdecken ist, als würde einem ein

Juwel in den Schoß fallen«, sagte Nadeaus Kollege Ross Stevenson 2002 der BBC nach der Veröffentlichung der Ergebnisse.

Auch andere Geologen machten sich nun auf den beschwerlichen Weg nach Nuvvuagittuq – darunter O'Neil, der an der McGill University promovierte. Ihm fiel die Ähnlichkeit in der chemischen Zusammensetzung zwischen den Nuvvuagittuq-Proben und den ebenfalls 3,8 Milliarden Jahre alten Gesteinen der Isua-Formation in Grönland auf. Vielleicht gehörten sie zu derselben alten Landmasse.

Um diese Frage zu klären, tat sich O'Neil mit Richard W. Carlson zusammen, einem Experten für präzise Datierungen alter Gesteine an der Carnegie Institution in der US-Hauptstadt Washington. Bei der Altersbestimmung messen die Wissenschaftler den Gehalt einer Gesteinsprobe an radioaktiven Isotopen (siehe Kasten S. 72). Das sind Varianten von Atomen, welche die gleiche Zahl von Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen in ihrem Kern enthalten.

Mit dem Ergebnis hatte keiner gerechnet: 4,28 Milliarden Jahre. Also war es das älteste Gestein der Erde



Erbitterte Fehde: Jonathan O'Neil (links) will für eine geologische Formation in der Hudson Bay in Nordkanada ein Rekordalter von 4,4 Milliarden Jahren nachgewiesen haben, während Stephen Mojzsis (rechts) behauptet, sie sei nur 3,8 Milliarden Jahre alt.

Sie befanden sich einst in der Staubwolke, aus der unser Sonnensystem hervorging, und wurden so Bestandteil der sich zusammenballenden Planeten und Meteoriten. Damit gelangten sie auch in die Gesteine, die auf der Erde auskristallisierten. Die Isotope zerfielen dann ganz allmählich mit gleich bleibender Geschwindigkeit: Nach einer bestimmten Zeitspanne, der so genannten Halbwertszeit, war ihre Konzentration jeweils auf die Hälfte gesunken. Durch Messung ihres noch vorhandenen Restgehalts lässt sich daher das Alter eines Gesteins bestimmen.

In einem Labor der Carnegie Institution ermittelten O'Neil und Carlson die Konzentrationen verschiedener radioaktiver Isotope und ihrer Zerfallsprodukte, darunter Samarium-147 und Neodym-143. Dabei machten sie eine seltsame Entdeckung. Das Gestein enthielt auch Neodym-142, das beim Zerfall von Samarium-146 entsteht. Auf der Erde gibt es jedoch längst kein natürliches Samarium-146 mehr, weil seine Halbwertszeit ziemlich kurz ist; neuesten Untersuchungen zufolge beträgt sie nur 68 Millionen Jahre. »Samarium-146 war anfangs auf der Erde vorhanden, weil es bei der Supernova-Explosion ausgestoßen wurde, welche die Bildung des Sonnensystems auslöste«, sagt Carlson. »Doch dann zerfiel es innerhalb von 500 Millionen Jahren vollständig.«

Alt oder am ältesten?

Carlson und seine Mitarbeiter fanden in diversen Nuvvuagittuq-Gesteinen unterschiedliche Mengenverhältnisse zwischen Neodym-142 und anderen Neodym-Isotopen. Solche Differenzen waren nur zu erklären, wenn noch Samarium-146 auf der Erde existierte, als sich die Gesteine bildeten und sie unterschiedlich viel davon aufnahmen. Durch Vergleich der Isotopenverhältnisse schätzten O'Neil, Carlson und ihre Mitarbeiter ab, wann die betreffenden Gesteine entstanden waren. Mit dem Ergebnis hatte keiner von ihnen gerechnet: 4,28 Milliarden Jahre. Demnach handelte es sich um die ältesten Gesteine der Erde. Nach der Veröffentlichung dieser Ent-

deckung im Jahr 2008 analysierte das Team weitere Proben und schätzt das Alter der Nuvvuagittuq-Formation jetzt sogar auf 4,4 Milliarden Jahre.

O'Neil und seine Mitarbeiter gaben ihre Ergebnisse erstmals auf einer Geologentagung in Vancouver bekannt. Mojzsis erinnert sich noch, wie verblüfft er war. »Meine Kinnlade fiel herunter. Ich sah mich um und blickte in lauter staunende Gesichter. Ich dachte: ›Das ist kurios.‹«

Mojzsis hatte allen Grund, perplex zu sein. Er gehörte zu den wenigen Geologen, die zum Nuvvuagittuq-Gürtel gereist waren, um Nadeaus Forschungen weiterzuerfolgen. Er und sein Team fanden einen magmatischen Gesteinsgang, der die Formation durchstoßen hatte, nachdem sie entstanden war. Wie sich zeigte, enthielt er Zirkone. Zurück in Colorado, datierte Mojzsis die Minerale auf 3,75 Milliarden Jahre – ein Ergebnis, das gut zu Nadeaus ursprünglichem Alterswert von 3,8 Milliarden Jahren passte. Und jetzt stand O'Neil vor ihm und der versammelten Geologenschar und erklärte, die Nuvvuagittuq-Gesteine seien eine halbe Milliarde Jahre älter!

Einer der Mitarbeiter von Mojzsis war Bernard Bourdon von der École normale supérieure in Lyon (Frankreich). Dieser bat O'Neil um einige Proben und untersuchte sie erneut. Die Messwerte für Neodym erwiesen sich als korrekt. Dennoch »ergab das alles für mich keinen Sinn«, sagt Mojzsis.

Er kehrte daher mit seinem Team 2011 nach Nuvvuagittuq zurück, um weitere Untersuchungen anzustellen. Sie kartierten das Gelände und die Gesteinsschichten rund um die Stellen, an denen O'Neil die von ihm datierten Proben entnommen hatte. In den angeblich 4,4 Milliarden Jahre alten Gesteinen sahen sie hellgrüne Bänder aus dem Mineral Quarzit. Das bot nach Überzeugung von Mojzsis eine Möglichkeit, zu überprüfen, ob die Gesteine wirklich die ältesten der Erde waren.

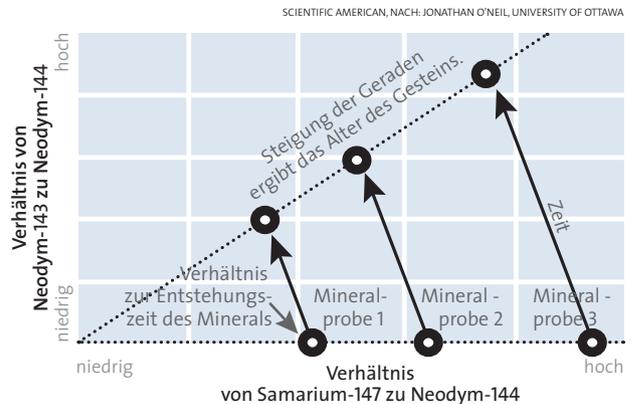
Ähnliche Quarzitbänder gibt es auch in wesentlich jüngeren Formationen. Sie entstehen, wenn sich aus Unterwasservulkanen Gesteinsschmelze über den Meeresboden ergießt.

Wie man ein Gestein datiert

Wenn Magma erstarrt, werden in dem resultierenden Gestein auch radioaktive Elemente eingeschlossen. Von diesen existieren meist mehrere Sorten mit unterschiedlichem Atomgewicht – so genannte Isotope. Über Jahrmillionen hinweg zerfällt jedes radioaktive Isotop mit gleich bleibender, unverwechselbarer Geschwindigkeit in ein anderes. Zum Beispiel entsteht aus Samarium-147 (dem »Mutterisotop«) Neodym-143 (das »Tochterisotop«). Die Anzahl der Mutterisotope nimmt allmählich ab, während die der Tochterisotope steigt. Beide können also wie eine Uhr als Zeitmesser dienen. Allerdings müssen die Anfangskonzentrationen bekannt sein.

Diese Bedingung entfällt, wenn im Gestein noch ein anderes Isotop des Tochterelements vorkommt, das wie Neodym-144 selbst stabil und kein radioaktives Zerfallsprodukt ist. Sein Anteil bleibt daher über die Zeit konstant und dient als Bezugswert. Trägt man nun die Konzentrationen des Mutter- und Tochterisotops im Verhältnis zur Menge des stabilen, nicht radiogenen Vergleichsisotops gegeneinander auf, ergibt sich eine Gerade (rechts). Je steiler diese so genannte Isochrone ansteigt, desto mehr radioaktive Atome sind zerfallen und desto älter ist das Gestein.

Forscher haben verschiedene solcher Paare von Mutter- und Tochterisotopen zur Datierung der Proben vom Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel in Kanada herangezogen. Leider gibt es immer einen gewissen Fehlerbereich. Die Wissenschaftler hoffen jetzt darauf, mit einer komplexeren Datierungsmethode Klarheit zu erlangen. Sie ist noch genauer, weil zwei verschiedene Uhren miteinander kombiniert werden können: die Verhältnisse von Uran-238 zu Blei-206 und von Uran-235 zu Blei-207.



Kommt es danach zu einer längeren Ruhephase, setzen sich terrestrische Sedimente über der Lava ab. Sobald die Vulkane wieder ausbrechen, werden diese Ablagerungen unter einer neuen Schicht von magmatischem Gestein begraben, wo sie sich bei hohen Temperaturen und Drücken mit der Zeit in Quarzit verwandeln.

Falls es sich in Nuvvuagittuq so verhielt, würden die Quarzitbänder aus erodiertem Material von einer älteren Landmasse stammen, das sich während einer dieser vulkanischen Ruhephasen abgesetzt hatte. Und darin enthaltene Zirkone müssten älter sein als das umgebende Vulkangestein, da sie auf eine viel längere Geschichte zurückblicken könnten.

»Wir krochen auf Händen und Knien über unzählige Stellen, wo der Quarzit zu Tage trat«, erzählt Mojzsis. An zwei solchen Ausbissen stießen sie schließlich auf die ersehnten Zirkone. Einer der Fundorte lieferte Tausende der winzigen Minerale. In seinem Labor in Colorado bestimmte Mojzsis dann das Alter der Kristalle – und erhielt einen Wert von 3,8 Milliarden Jahren. Damit konnte das umgebende Gestein unmöglich schon vor 4,4 Milliarden Jahren entstanden sein.

Das Team von Mojzsis erkundete das Alter von Nuvvuagittuq auch mit anderen Methoden. So unternahm es eine Datierung, die auf dem Zerfall von Lutetium zu Hafnium beruht. Wiederum kam ein Alter von 3,8 Milliarden Jahren heraus.

Alle diese Befunde setzte Mojzsis zu einer neuen Geschichte von Nuvvuagittuq zusammen. Demnach stieg vor rund 4,4 Milliarden Jahren geschmolzenes Gestein zur Erdoberfläche auf und erstarrte. Beim Auskristallisieren schloss es etwas kurzlebigen, radioaktives Samarium-146 ein, das auf der frü-

hen Erde noch vorhanden war. Nach dessen Zerfall wurde die alte Kruste zurück in den Mantel gezogen und aufgeschmolzen. Aber ihr Gestein vermischte sich nicht gänzlich mit dem umgebenden Mantelmaterial. In abgegrenzten Bezirken blieb das beim Zerfall von Samarium zuvor gebildete Neodym eingeschlossen. Vor 3,8 Milliarden Jahren gelangte das ehemalige Krustenmaterial durch vulkanische Aktivität schließlich zurück an die Oberfläche. Das daraus gebildete Gestein stammte zum Teil aus den unvermischten, abgegrenzten Bereichen und wies deren 4,4 Milliarden Jahre alte Signatur auf. »Die Schmelze kann eine Erinnerung an ein vorangegangenes Stadium bewahrt haben«, erläutert Mojzsis. So ist es möglich, dass ein vor nur 3,8 Milliarden Jahren entstandenes Gestein ein Alter von 4,4 Milliarden Jahren vortäuscht.

Mojzsis und seine Mitarbeiter stellten diese Ergebnisse auf Geologentagungen vor – manchmal in denselben Sitzungen, in denen O'Neil die gegenteilige Ansicht vertrat, wonach die Gesteine vor 4,4 Milliarden Jahren entstanden und seither einfach in der Erdkruste verblieben seien. Auch er kehrte mit seinem Team nach Nuvvuagittuq zurück und erweiterte seine Sammlung alter Gesteinsproben von 10 auf rund 50. Die neuen Messwerte standen sämtlich in Einklang mit der ursprünglichen Altersschätzung für den Fundort. O'Neil widerspricht auch der Argumentation, mit der Mojzsis und seine Mitarbeiter bewiesen haben wollen, dass Nuvvuagittuq nur 3,8 Milliarden Jahre alt sein könne. »Wir sind völlig unterschiedlicher Meinung über die Geologie der Region«, sagt er.

Das betrifft insbesondere die Quarzitschicht, in der Mojzsis seine Zirkone gefunden hat. Bei so alten Formationen wie

derjenigen von Nuvvuagittuq ist es nicht einfach, festzustellen, aus welcher Art von Gestein sie aufgebaut sind; denn sie wurden über die Jahrmilliarden hinweg stark deformiert. O'Neil hält das Quarzitband gar nicht für Quarzit. Stattdessen behauptet er, es handle sich um einen magmatischen Gesteinsgang, der vor 3,8 Milliarden Jahren in das alte Gestein eingedrungen wäre. Das Alter seiner Zirkone habe demnach mit dem des umgebenden Materials nicht das Geringsste zu tun. An den Gesteinen sei »nichts bizarr oder seltsam«, betont O'Neil. »Sie sind einfach nur wirklich alt.«

Larry Heaman von der University of Alberta in Edmonton (Kanada) bescheinigt ihm und seinen Kollegen gute Arbeit. »Sie sind mit der gebührenden Sorgfalt vorgegangen, und ich halte ihre Argumentation für schlüssig«, meint er. Doch er glaubt auch, dass eine gewisse Unsicherheit bleiben wird, bis es gelingt, einen anderen Weg zur Datierung der Formation zu finden. Möglicherweise enthalten einige Minerale in den untersuchten Gesteinen von Nuvvuagittuq selbst – und nicht nur die darin eingeschlossenen Zirkonkristalle – Uran und Blei. Die Uran-Blei-Datierung ist die verlässlichste Bestimmungsmethode bei sehr alten Gesteinen, da die Wissenschaftler über große Erfahrung mit ihr verfügen. »Fände jemand dort draußen das richtige Material und würde es mit diesem Verfahren datieren, dann wäre die Sache entschieden«, sagt Heaman.

Einblick in die Entstehung des Lebens?

Sollten die Nuvvuagittuq-Gesteine tatsächlich 4,4 Milliarden Jahre alt sein, könnten sie laut O'Neil ein breites Fenster zur Frühgeschichte der Erde aufstoßen. Dann wären sie nämlich kurz nach dem »giant impact« entstanden, der den Mond hervorbrachte. Die australischen Zirkone haben sich ebenfalls um diese Zeit gebildet, allerdings etliche Kilometer tief im Erdmantel. Die Nuvvuagittuq-Gesteine seien dagegen an der Oberfläche entstanden, so O'Neil. »Ihre Geochemie scheint derjenigen eines Ozeanbodens zu entsprechen«, bemerkt er.

Demnach hätte die Erde schon bald nach dem »giant impact« einen Ozean bekommen. Nach Einschätzung von O'Neil bestehe zudem eine bemerkenswerte Ähnlichkeit zwischen der Chemie der Nuvvuagittuq-Gesteine und derjenigen von deutlich jüngeren Meeresböden. Das hieße, dass sich die ältesten Ozeane nicht wesentlich von den heutigen unterscheiden. O'Neil meint sogar in den Gesteinen Anzeichen für Plattentektonik zu erkennen. Schon sehr früh in der Erdgeschichte hätte die Erdkruste dann aus einem Mosaik einzelner Schollen bestanden, die sich gegeneinander bewegten.

Bei einem Alter von 4,4 Milliarden Jahren könnten die Nuvvuagittuq-Gesteine auch neues Licht auf den Ursprung des Lebens werfen. Derzeit verliert sich die Spur der Fossilien vor rund 3,5 Milliarden Jahren. In jüngeren Gesteinen haben sich Bakterien erhalten, älteres Material ist dagegen steril.

Doch Fossilien sind nicht die einzigen Spuren, die Lebewesen hinterlassen. Da Bakterien sich von Kohlenstoff ernähren und dabei das leichtere Isotop C-12 bevorzugen, verändern sie in ihrer Umgebung das Mengenverhältnis zum

schwereren C-13. In Karbonatgesteinen sollte diese Signatur erhalten geblieben sein. Einige Forscher glauben in der 3,8 Milliarden Jahre alten grönländischen Isua-Formation dieses Ungleichgewicht entdeckt zu haben.

Über die 700 Millionen Jahre davor gibt es dagegen bisher keinerlei Informationen. Niemand kann also sagen, ob das Leben schon kurz nach der Entstehung des Planeten oder erst mit einer Verzögerung von mehreren hundert Jahrmillionen auftrat. Auch ist unklar, wo auf dem Globus es sich entwickelte. Nach Ansicht einiger Forscher bildeten sich die ersten Biomoleküle in Wüsten oder Gezeitentümpeln. Andere dagegen halten hydrothermale Schlote in der Tiefsee für den Schauplatz der Urzeugung.

Falls die Nuvvuagittuq-Gesteine vor 4,4 Milliarden Jahren am Ozeanboden entstanden sind, versprechen sie einen Beitrag zur Klärung dieser Fragen. O'Neil hofft auf die Kooperation mit anderen Forschern, um herauszufinden, ob sich die Gesteine in hydrothermalen Schloten gebildet haben könnten. Tiefseevulkane seien der ideale Ort für die Entstehung des Lebens, meint er.

Auch Mojzsis ist versessen auf das Aufspüren frühester Lebensspuren, doch er will nicht in Nuvvuagittuq danach suchen. »Ich werde nicht den Rest meiner Karriere mit diesem Quatsch verschwenden«, sagt er. Im Übrigen kann er der Auseinandersetzung mit O'Neil auch etwas Positives abgewinnen. Vermutlich bringe sie bessere Methoden zur Datierung sehr alter Gesteine hervor, die es künftigen Geologengenerationen erlauben dürften, endlich den Vorhang vor der Bühne der frühen Erde aufzuziehen. Und in diesem Punkt zumindest ist O'Neil mit ihm einer Meinung. »Inseln uralten Gesteins finden sich wahrscheinlich überall«, sagt er. »Man übersieht sie nur allzu leicht.« ~

DER AUTOR



Carl Zimmer ist Kolumnist bei der »New York Times« und Autor von 13 Büchern, darunter »Woher kommen wir? Die Ursprünge des Menschen« (Spektrum Akademischer Verlag 2006). In »Spektrum der Wissenschaft« sind schon mehrere Beiträge von ihm erschienen, zuletzt »Frühwarnsystem für bedrohte Welten« (Heft 11/2012).

QUELLEN

- Cates, N. L. et al.:** Reduced, Reused and Recycled: Detrital Zircons Define a Maximum Age for the Eoarchean (ca. 3750–3780 Ma) Nuvvuagittuq Supracrustal Belt, Québec (Canada). In: Earth and Planetary Science Letters 362, S. 283–293, 2013
- Hazen, R.:** The Story of Earth. Viking, New York 2012
- O'Neil, J. et al.:** Half a Billion Years of Reworking of Hadean Mafic Crust to Produce the Nuvvuagittuq Eoarchean Felsic Crust. In: Earth and Planetary Science Letters 379, S. 13–25, 2013
- Simpson, S.:** Asteroiden als Geburtshelfer für erste Kontinente? In: Spektrum der Wissenschaft 5/2010, S. 72–79
- Valley, J.W.:** Urerde – Sauna oder Gluthölle? In: Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 70–81

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304068

HOCHDRUCKCHEMIE

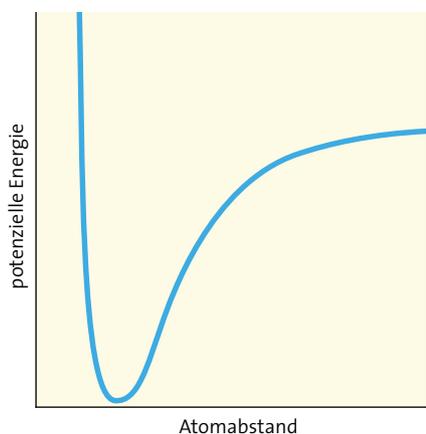
Moleküle in Platznot

Wie verhalten sich Stoffe, wenn man sie immer stärker quetscht?

VON ROALD HOFFMANN

Forscher setzen Materie gern Extrembedingungen aus. Für Chemiker und Physiker sind dabei Drücke, wie sie am Mittelpunkt der Erde oder gar im Zentrum des Riesenplaneten Jupiter herrschen, am interessantesten. Extreme Hitze oder Kälte bergen weit weniger Rätsel. So ist es kein Problem, die äußerst kurze Lebensdauer von Molekülen bei den Temperaturen im Innern der Sonne abzuschätzen. Auch über die stark eingeschränkte Chemie nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt wissen wir recht genau Bescheid. Ebenso haben wir eine gute Vorstellung davon, was unter den Vakuumbedingungen im Weltraum passiert.

Das Verhalten von Materie unter Hochdruck ist dagegen alles andere als offensichtlich, was es spannend macht. Da kommt die gute alte Neugier ins Spiel. Gibt es weitere Gründe? Es ist schlicht unmöglich, den Kern von Erde oder Jupiter direkt zu erforschen. Aber im Labor oder auf dem Computer



Diese Potenzialkurve zeigt schematisch, wie die Energie von zwei nicht aneinander gebundenen Atomen von ihrem Abstand abhängt. Das Minimum entspricht der optimalen gegenseitigen Entfernung, die sie ohne äußeren Zwang einhalten.

könnte es gelingen. Das Verhalten von Materie unter Extrembedingungen vorherzusagen, ist auch ein Test, ob wir wirklich verstehen, was vor sich geht. Deshalb lohnt sich der Blick auf einige bemerkenswerte Vorgänge in der Hochdruckwelt.

Die internationale Druckeinheit ist Pascal (Pa); im Alltag benutzen wir dagegen Bar, was etwa dem Atmosphärendruck der Erde auf Meereshöhe entspricht. 100 000 Pascal ergeben ein Bar. Der Druck in einem Reifen beträgt etwa 2,5 Bar, der unter dem Absatz von Stöckelschuhen annähernd 100 Bar. Im Labor lassen sich Drücke von einigen hundert Gigapascal (GPa) erzeugen und damit im Prinzip auch die Bedingungen am Erdmittelpunkt nachstellen, wo 350 GPa herrschen.

Ein typischer Materiebrocken wird bei diesem Druck auf etwa ein Fünftel seines Volumens zusammengedrückt. Für die äußeren Abmessungen bedeutet dies eine Schrumpfung um den Faktor 0,58. Selbst Obelix hätte keine Chance, einen Stahlwürfel derart zu stauchen.

Um so hohe Drücke zu erzeugen, braucht es den König der Edelsteine und zugleich das härteste bekannte Material: Diamant. Eine typische Hochdruck-»Zelle« besteht aus zwei Diamantstempeln und einer Dichtung in Form eines Donuts, die eine Reaktionskammer von etwa einem Kubikmillimeter umschließen (Bild oben). In diesen Raum lassen sich elektrische Leitungen einführen, entweder zum Heizen oder für verschiedene Messungen. Die Diamanten werden mit einer Kombination aus hydrostatischem und mechanischem Druck – durch schlichtes Anziehen einer Schraube – gegeneinandergepresst, wobei es wegen der hohen Belastung im-



RUSSELL HEWLEY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Um Drücke ähnlich denen im Erdmittelpunkt zu erzeugen, nutzt man Diamanten als Ambosse. Dazwischen befindet sich eine Dichtung in Form eines Donuts. Der Reaktionsraum in Innern beträgt etwa einen Kubikmillimeter.

mer wieder vorkommt, dass einer zerbricht. Da die Edelsteine weit gehend transparent sind, kann man das Geschehen mit spektroskopischen Methoden oder per Röntgenbeugung verfolgen.

Interessanterweise sind die eingesetzten natürlichen Diamanten ihrerseits unter hohem Druck tief in der Erde entstanden. Später wurden sie beim gewaltsamen Austritt von vulkanischem Kimberlit-Gestein durch tief reichende, fast senkrechte Röhren – so genannte Pipes – schlagartig an die Erdoberfläche befördert. Diamanten lassen sich auch synthetisch bei hohem Druck herstellen. Unter Normalbedingungen sind sie thermodynamisch instabil und sollten sich in Graphit umwandeln. Aber die Barriere – die Aktivierungsenergie – für diesen Übergang ist sehr hoch, so dass niemand fürchten muss, seine kostbaren Edelsteine auf diese Weise zu verlieren.

Gibt es noch andere Strukturen, die bei hohem Druck entstehen und dann auch unter Normalbedingungen beständig sind? Bislang kennt man nicht viele. Diverse chemische Reaktionen werden zur Maximierung der Ausbeute unter erhöhtem Druck durchgeführt. Paradebeispiel ist das Haber-Bosch-Verfahren zur Herstellung von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff, das gro-

ße Bedeutung für die Produktion von Kunstdünger hat und mit Drücken von einigen hundert Atmosphären arbeitet. Dagegen hat die echte Hochdruckwissenschaft im GPa-Bereich abgesehen von synthetischen Diamanten noch keine praktisch verwertbaren Materialien hervorgebracht – sehr zum Leidwesen ihrer Vertreter, die gern auch kommerziell eine Daseinsberechtigung hätten.

Schon vor 70 Jahren prophezeiten Forscher, dass so ziemlich jede Substanz bei extremem Druck metallisch würde. Das hat sich in vielen Fällen bewahrheitet. So trifft es für das Edelgas Xenon zu – oder auch für Iod, das unter Normalbedingungen als Festkörper aus zweiatomigen Molekülen vorliegt. Während es allmählich zum Metall wird, lösen sich die Bindungen zwischen den Atompaaaren. In der Hochdruckstruktur sind die Iodatome schließlich in einem quadratischen Gitter angeordnet und alle gleich weit voneinander entfernt. Auch Cäsiumiodid und Bariumtellurid, die beide unter Atmosphärendruck Salze darstellen, lassen sich in den metallischen Zustand überführen. Nicht gelungen ist das bisher dagegen für Kochsalz, also Natriumchlorid.

Als Heiliger Gral der Hochdruckforschung gilt jedoch seit 75 Jahren metallischer Wasserstoff. Es gibt vereinzelt Berichte über seine Herstellung, die aber dubios und wenig glaubhaft erscheinen. Natürlich beteiligen sich auch die Theoretiker an der Gralssuche – mit durchwachsenem Erfolg. Etwas überspitzt könnte man sagen, dass sie immer, wenn der vorhergesagte Druck für die Metallisierung von Wasserstoff experimentell erreicht wurde, ohne dass die Umwandlung stattfand, ihre Schätzung nach oben korrigiert haben. Hinter all den hartnäckigen Bemühungen steckt die begründete Annahme, metallischer Wasserstoff könnte ein Hochtemperatursupraleiter sein – und eine Supraflüssigkeit dazu.

Umgang mit drangvoller Enge

Bei steigendem Druck heißt es für die Atome, enger zusammenzurücken. Als Folge davon verwandeln sich Gase in Flüssigkeiten und Flüssigkeiten in die

meist, aber nicht immer (Wasser!) dichteren Festkörper. Außerdem verlagert sich jegliches chemische Gleichgewicht, an dem Gase beteiligt sind, weg von der Seite der Reaktionsgleichung, auf der dieser Aggregatzustand vorkommt.

Doch was passiert, wenn wir noch etwas fester drücken? Ein molekularer Festkörper enthält weit gehend starre Moleküle, zwischen denen schwache Anziehungskräfte wirken: so genannte Dispersions- oder Van-der-Waals-Kräfte. Eine Standard-Potenzialkurve beschreibt, wie die Energie mit dem Abstand zwischen zwei solchen Molekülen variiert (Diagramm links unten).

Unter Druck kommen sich die Moleküle immer näher. Betrachten wir als Beispiel Silan (SiH_4), das wir in meiner Arbeitsgruppe untersucht haben. Es ist das Silizium-Gegenstück zum Methan (CH_4) und liegt unter Normalbedingungen als Gas vor, das sich bei -112 Grad Celsius verflüssigt und bei -185 Grad fest wird. Im Kristall betragen die Abstände zwischen Wasserstoffatomen benachbarter Moleküle bei Atmosphärendruck etwa $3,2$ Ångström. Das SiH_4 selbst wirkt hier quasi als Analogcomputer und sagt uns, dass dies das Minimum der Potenzialkurve ist – näher wollen sich Wasserstoffatome von verschiedenen Molekülen nicht kommen.

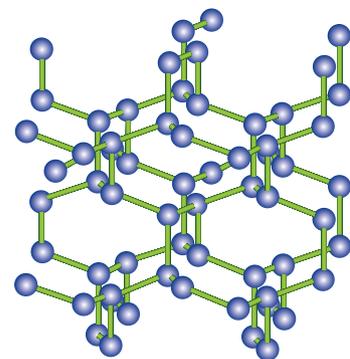
Die zwangsläufige Verdichtung bei steigendem Druck lässt sich auf zwei Arten erreichen: durch Verkürzen der Bindungen zwischen Silizium und Wasserstoff in jedem einzelnen SiH_4 oder durch Verringerung des Abstands zwischen benachbarten Molekülen. Letztlich entscheidet sich alle Materie in solchen Fällen immer für das, was ihr sozusagen am wenigsten weh tut. Bei SiH_4 und den meisten anderen molekularen Festkörpern, die wir untersucht haben, ist das die Verringerung der zwischenmolekularen Abstände, während die Länge der Silizium-Wasserstoff-Bindungen einigermaßen konstant bleibt. Als Erstes wird also der »Van-der-Waals-Raum« herausgepresst.

Und wenn der Druck noch weiter steigt? Den Atomen bleibt keine Wahl, als immer näher zusammenzurücken. An einem bestimmten Punkt besteht

der einzige Ausweg aus der zunehmenden Enge darin, mehr Bindungen einzugehen – chemisch gesprochen, die Koordinationszahl zu erhöhen. Hat ein Atom normalerweise vier Nachbarn, so muss es sich jetzt vielleicht mit sechs arrangieren.

Eine der auffälligsten chemischen Konsequenzen ist bei Kohlendioxid (CO_2) und Stickstoff (N_2) zu beobachten. Beide sind unter Normalbedingungen sehr stabil. Bis zu einem gewissen Grad gilt das auch für die analogen Verbindungen der im Periodensystem unter ihnen stehenden Elemente, nämlich Siliziumdioxid (SiO_2) und Diphosphor (P_2); Letzteres lässt sich unter allen zweiatomigen Molekülen der dritten Periode am schwersten in zwei Einzelatome aufspalten. Aber im Unterschied zu Kohlenstoff und Stickstoff sind Silizium und Phosphor zu voluminös, um über Mehrfachbindungen viel zusätzliche Energie zu gewinnen. Deshalb bilden sie lieber noch mehr von den geradezu verheerenden starken P–P und Si–O-Einzelbindungen und polymerisieren zu jenen größeren Netzwerken, aus denen die vielen Modifikationen von Siliziumoxid – wie Quarz, Tridymit und Cristobalit – sowie die diversen Formen von elementarem Phosphor – weiß, rot und schwarz – bestehen.

Und nun kommt die Überraschung: Bei einem Druck von nur 12 GPa und



STEPHANIE FRESE, NACH ROALD HOFFMANN

Während elementarer Stickstoff unter Normalbedingungen als zweiatomiges Molekül vorliegt, bildet er bei einem Druck von mehr als 110 Gigapascal und einer Temperatur von 2000 Kelvin das gezeigte dreidimensionale polymere Netzwerk, in dem die Atome dichter gepackt sind.

Temperaturen von 1000 Kelvin (K) geht das bei Standardbedingungen gasförmige CO_2 in einen kristallinen Zustand über, in dem das normalerweise gestreckte Molekül gebogen ist, aber noch als solches existiert. Bei mehr als 35 GPa und 1800 K nimmt es schließlich eine Struktur an, die einer der Formen von Quarz ähnelt und vier statt zwei C–O-Bindungen enthält. Auch Stickstoff polymerisiert bei mehr als 110 GPa und 2000 K zu einem dreidimensionalen Netzwerk, wie es ähnlich in gewissen Formen von elementarem Phosphor auftritt (Bild S. 75). All diese seltsamen Strukturumwandlungen sind nichts anderes als die Folge des verzweifelten Strebens der Moleküle, sich zusammenzudrängen und höhere Koordinationszahlen zuzulassen.

Dichtestgepackt ist nicht dicht genug

Seit Urzeiten wissen Obsthändler, wie man Orangen am platzsparendsten anordnet: Man beginnt mit einer wabenartigen Schicht und stapelt solche Lagen versetzt übereinander, so dass die Früchte in der folgenden Schicht jeweils in den Lücken der vorhergehenden liegen (Bild unten). Im Innern des Stapels hat jede Orange dann zwölf nächste Nachbarn. Mit etwas Mathematik findet man heraus, dass der leer gebliebene Raum 29,6 Prozent des Gesamtvolumens dieser Anordnung ausmacht. Obwohl Forscher schon lange von der dichtesten Kugelpackung sprechen, wurde erst vor einem Jahrzehnt bewiesen, dass es sich wirklich darum handelt.

Bei der Stapelung der Orangen gibt es zwei gleichwertige Möglichkeiten. Im einen Fall liegt schon die übernächste

te und im anderen erst die dritte nachfolgende Schicht genau senkrecht – und nicht seitlich versetzt – über der ursprünglichen. Entsprechend unterscheidet man zwischen zwei dichtesten Kugelpackungen: einer hexagonalen (hcp, nach englisch: hexagonal closest packing) und einer kubisch flächenzentrierten (fcc, nach face-centered cubic).

Atome und Moleküle sind unter Normalbedingungen oft auf Platz vergebende Art gepackt. Bis vor einigen Jahren herrschte jedoch die intuitive Ansicht, dass unter genügend Druck alles in der Welt letztlich in eine der beiden dichtesten Kugelpackungen gequetscht würde.

Weit gefehlt! Nach Untersuchungen, die Richard J. Nelmes, Malcom I. McMahon und ihre Kollegen an der University of Edinburgh (Schottland) durchgeführt haben, bildet Barium (Ba) zum Beispiel unter Normaldruck ein raumzentriertes kubisches Gitter (bcc, nach englisch: body-centered cubic), in dem jedes Atom acht nächste Nachbarn hat. Bei 5,5 GPa geht es zwar erwartungsgemäß in die fcc-Form über. Wird aber der Druck noch weiter erhöht, nimmt es eine scheinbar weniger dicht gepackte Struktur an, die in Wahrheit jedoch dichter ist. Sie besteht aus einem »Wirts«- und einem »Gast«-Gitter, deren Abmessungen nicht nur verschiedenen sind, sondern in einem irrationalen Zahlenverhältnis zueinander stehen. Bei mehr als 13 GPa bildet Barium schließlich eine völlig irrwitzige Struktur mit fast 300 Atomen pro Elementarzelle.

Mit diesem Verhalten steht das Element keineswegs allein da. Im letzten Jahrzehnt zeigte sich, dass fast jedes Alkali- und Erdalkalimetall bei steigen-

dem Druck von den dichtestgepackten Strukturen abweicht. Aber wie ist das möglich?

Ganz einfach. Zwar beträgt die Packungseffizienz von Kugeln maximal 70,4 Prozent. Aber wer sagt denn, dass Atome kugelförmig bleiben müssen, wenn man sie stark zusammendrückt? Denken wir an den Extremfall von Würfeln, mit denen sich der Raum zu 100 Prozent füllen lässt. Die Elektronenhülle der Atome muss ja nicht gleich Würfelform annehmen. Aber sie kann in diese Richtung deformiert werden – oder hin zu einem anderen raumfüllenden Polyeder.

So schrieb der britische Naturforscher Stephen Hales (1677–1761) schon 1727 in seinen »Vegetable Statics« über das Aufquellen von Erbsen in einem Gefäß mit Wasser, bei dem die Hülsenfrüchte eine darauf liegende 138 Pfund schwere Bleiplatte empordrückten, und fuhr fort:

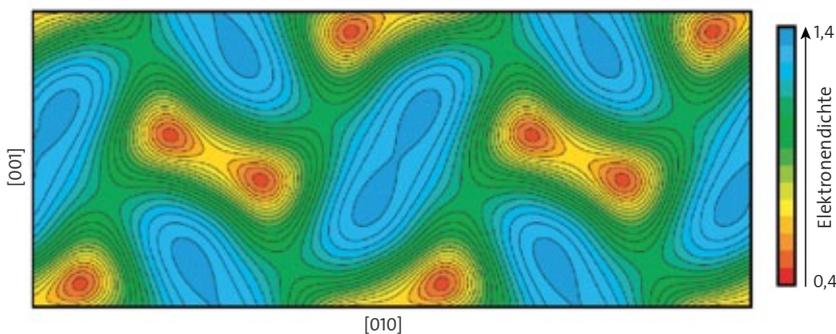
»Ich komprimierte einige Packungen mit frischen Erbsen in demselben Gefäß mit einer Kraft von 1600, 800 und 400 Pfund. Bei diesen Experimenten hoben die Erbsen, obwohl sie sich [ebenfalls] ausdehnten, den Hebel nicht an; denn was sie an Masse gewannen, wurde durch das schwere darauf einwirkende Gewicht in die Zwischenräume der Erbsen gepresst, die sie weit gehend ausfüllten und sich dabei in ziemlich regelmäßige Dodekaeder umwandelten.«

Außerdem gilt nur für Kugeln mit identischem Durchmesser eine maximale Packungsdichte von 70,4 Prozent. Bei unterschiedlicher Größe kann man die kleinen Exemplare in die Löcher zwischen den großen stopfen. Meines Wissens wurde die höchstmögliche Packungsdichte für Kugeln mit zwei oder drei ungleichen Durchmessern bisher nicht ermittelt. Aber ich bin sicher, dass für einige Radienverhältnisse ein deutlich höherer Wert als 70,4 Prozent herauskommt.

Wenn also gleich große Atome eine noch höhere Packungsdichte erreichen können, indem sie verschieden groß werden, dann wählen sie bei genügend hohem Druck wohl diese Option. Aber



Seit eh und je stapeln Obsthändler Orangen nach Art der dichtesten Kugelpackung. Die frei bleibenden Zwischenräume machen dabei 29,6 Prozent des Gesamtvolumens aus.



Einer Computersimulation zufolge nimmt Lithium, das wie die meisten Metalle bei höheren Drücken in der dichtesten Kugelpackung vorliegt, eine andere Struktur an, wenn es noch stärker zusammengedrückt wird. Gezeigt ist die berechnete Dichteverteilung für das äußere Elektron, das als 2s bezeichnet wird. Sie steigt von rot nach blau. Erstaunlicherweise haben sich die Lithiumatome, die in der dichtesten Kugelpackung alle gleich weit von ihren zwölf Nachbarn entfernt sind, zu Paaren zusammengetan. Wo diese sich befinden, ist die 2s-Elektronendichte am geringsten (orangefarbene Flecken), während sie in den Lücken dazwischen die höchsten Werte erreicht (blau).

wie können sie unterschiedliche Durchmesser annehmen? Zum Beispiel, indem sie etwas Elektronendichte von einem Untergitter im Festkörper zu einem anderen verschieben, also durch elektronische Disproportionierung, symbolisch als $[A]_n \rightarrow [A^+]_{n/2}[A^-]_{n/2}$ geschrieben.

Ein dritter Effekt kommt hinzu. Im Jahr 1999 machten meine Kollegen Neil W. Ashcroft und Jeffrey B. Neaton an der Cornell University in Ithaca (New York) eine bemerkenswerte theoretische Vorhersage. Demnach sollte metallisches Lithium (Li), das wie Barium bei Normalbedingungen in der bcc- und unter höherem Druck in der fcc-Form vorliegt, schließlich von der dichtesten Packung abweichen. Die Li-Atome schlössen sich dann zu Paaren zusammen, zwischen denen sich Elektronendichte anhäufen würde (Bild oben). Diese kühne Vorhersage wurde – mit kleinen Änderungen in den Details – nur ein Jahr später bestätigt. Atome und Moleküle gehorchen also ihren eigenen Zwängen, wenn sie enger zusammenrücken müssen, und nicht dem, was sich unser beschränkter Verstand ausdenkt.

Dank der enormen Fortschritte in der Elektronik ist es heute leichter, die Kompression eines Stücks Materie im Computer zu simulieren, als sie im Experiment durchzuführen. Während Diamantstempel von Zeit zu Zeit zer-

brechen, passiert das der Software schließlich nie. Das hat Vorhersagen im Hochdruckbereich zum Tummelplatz für Theoretiker gemacht.

Gleichwohl erhebt sich die Frage, wie zuverlässig solche Simulationen sind. So liefern sie bei molekularen Festkörpern unter Normalbedingungen nicht immer die bekannten Strukturen. Das halten manche für einen Skandal. Mich persönlich stört es hingegen nicht allzu sehr – lässt es doch Raum für Intuition, über die auch ältere Semester wie ich noch verfügen.

Die Schwierigkeiten der Theoretiker rühren daher, dass 230 verschiedene kristallografische Raumgruppen existieren – quasi unendlich ausgedehnte Atomanordnungen, die jeweils durch einen spezifischen Satz von Symmetrien charakterisiert sind. In dieser Vielzahl rein theoretisch die stabilste Struktur für eine bestimmte Substanz zu ermitteln, scheint fast unmöglich. Das geht nur mit chemischer und physikalischer Intuition, die auf Ideen zur Bindung und auf der Verwandtschaft mit bekannten Strukturen beruht, in Kombination mit zufallsgesteuerter Suche im Konfigurationsraum und dem Einsatz von evolutionären Algorithmen.

Ich erwähnte unsere Rechnungen über die Struktur von SiH_4 unter hohem Druck, für die wir die hier genannten Methoden verwendeten. Die Publi-

kation darüber löste eine wahre Flut von theoretischen Untersuchungen aus. Wie sich zeigte, sind die Strukturen, die wir als wahrscheinlichste vorschlugen, nicht die mit der niedrigsten Energie. Andere Forscher fanden bessere. Damit kann ich leben; denn obwohl unsere geometrischen Optimierungen nicht ganz perfekt waren, verhalfen sie uns zu einem Verständnis der allgemeinen Prinzipien, denen Strukturen bei extremer Kompression unterliegen. Einige habe ich hier dargelegt.

Natürlich konnte ich nur einen kleinen Einblick in die vielfältige Hochdruckchemie vermitteln. Unserer Intuition, die sich unter den Bedingungen auf der Erdoberfläche gebildet hat, kommt vieles in dieser extremen Welt merkwürdig vor. Aber man kann zumindest manche Aspekte davon erfassen und ein vollständiges Verständnis getrost der – vermutlich fernen – Zukunft überlassen. ~

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

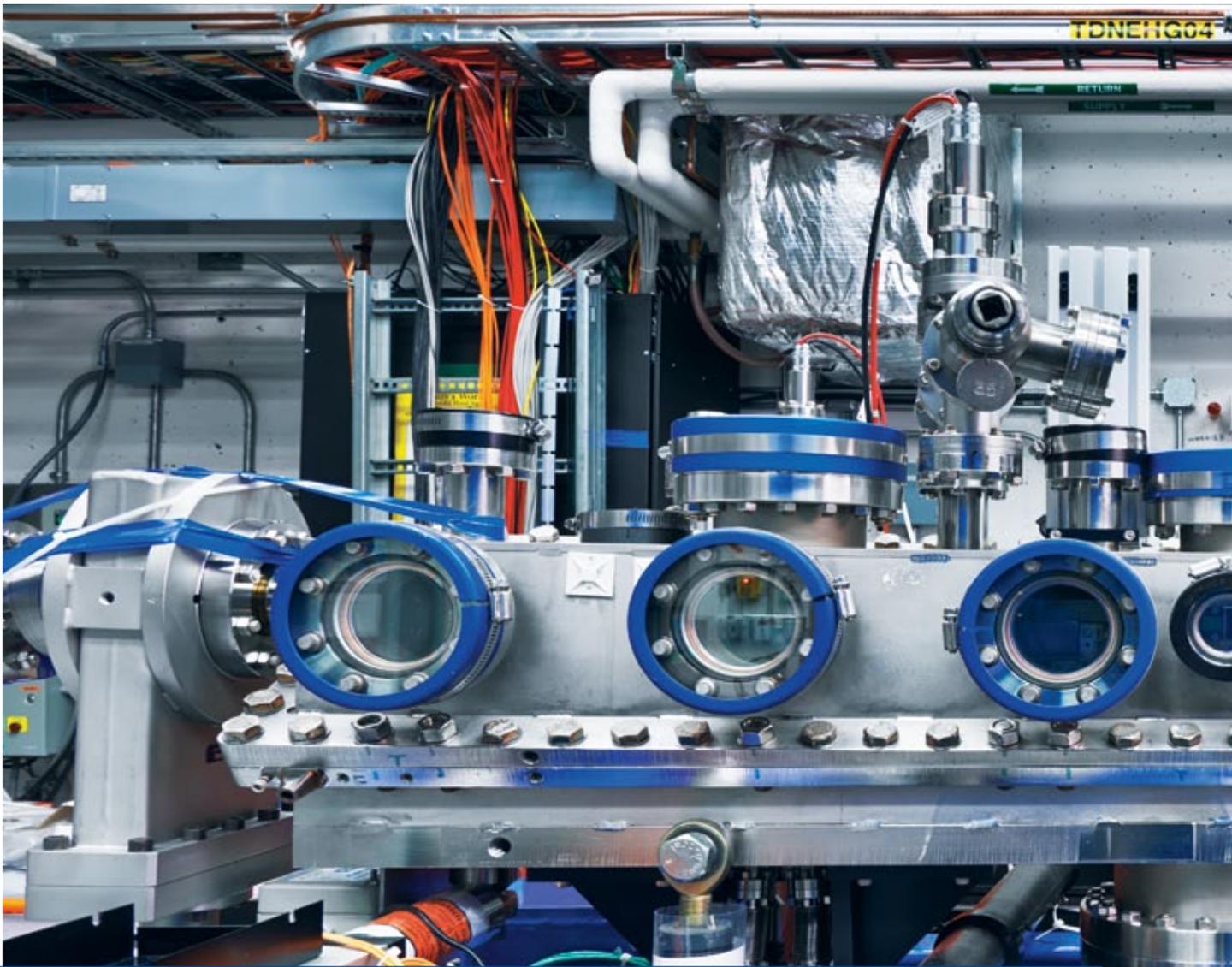
dankt Neil Ashcroft, Wojciech Grochala und Ji Feng Neil für Anregungen und Hilfe sowie Russell Hemley und Richard Nelmes für wertvolle Kommentare.

QUELLEN

- Coxeter, H.S.M.:** Introduction to Geometry. Wiley, New York, 2. Auflage 1989
Grochala, W. et al.: Chemie unter höchsten Drücken: eine Herausforderung für die chemische Intuition. In: Angewandte Chemie 119, S. 3694–3717, 2007
Hemley, R.J.: Effects of High Pressure on Molecules. In: Annual Review of Physical Chemistry 51, S. 763–800, 2000
Hemley, R.J.: A Pressing Matter. In: Physics World 19, S. 26–30, 2006
McMahon, M.I., Nelmes, R.J.: High-Pressure Structural Phase Transformations in Elemental Metals. In: Chemical Society Reviews 35, S. 943–963, 2006

© American Scientist

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1304067

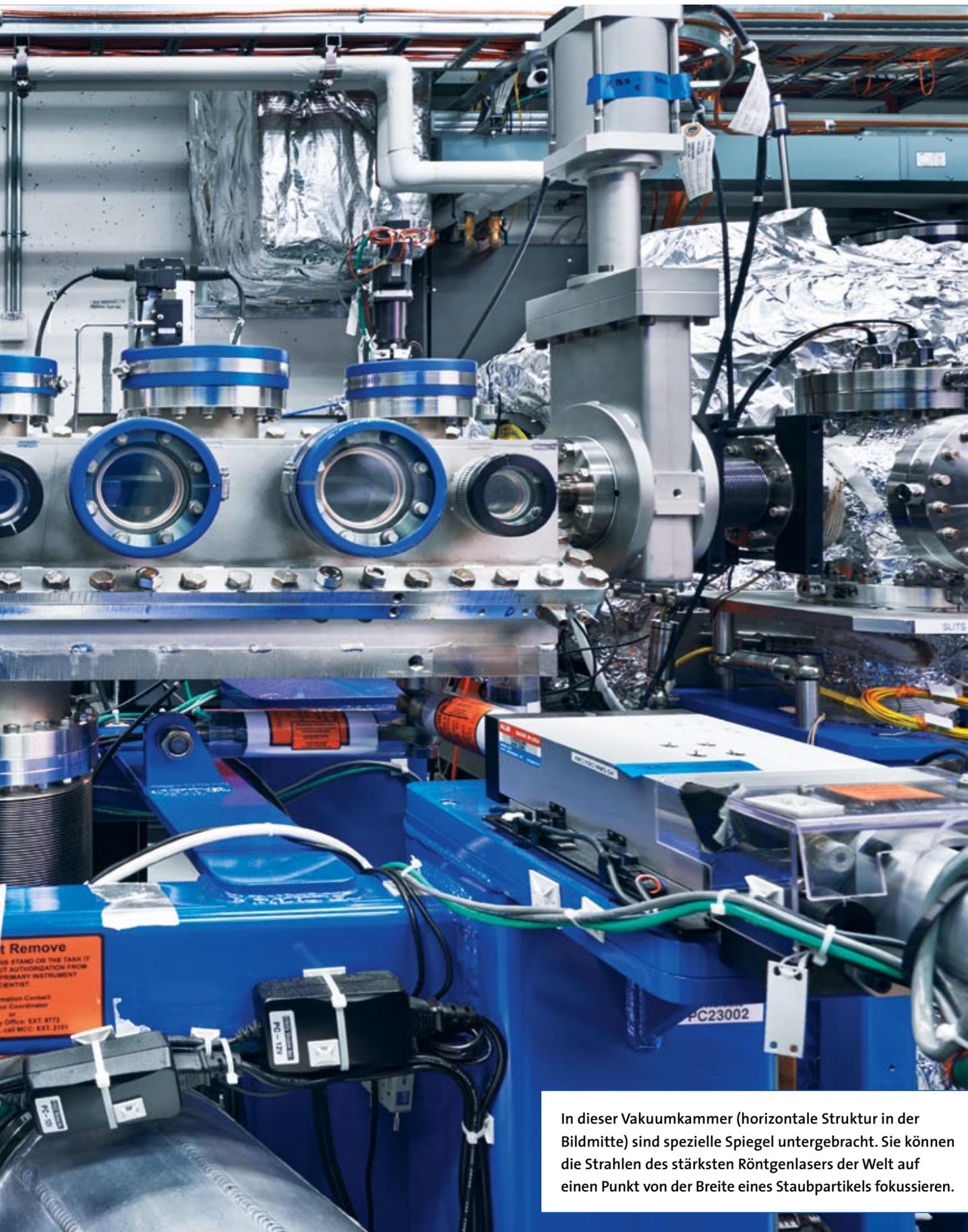


BESCHLEUNIGERPHYSIK

Die ultimative Röntgenmaschine

Was ursprünglich dazu gedacht war, anfliegende Interkontinentalraketen vom Himmel zu holen, hat sich im Verlauf von Jahrzehnten zu einem Röntgenmikroskop mit höchster Leistungsfähigkeit entwickelt. Mit ihm lassen sich bislang unbekannte Materiezustände erzeugen, hohle Atome produzieren und Atome bei ihrer Bewegung in Molekülen »filmen«.

Von Nora Berrah und Philip H. Bucksbaum



In dieser Vakuumkammer (horizontale Struktur in der Bildmitte) sind spezielle Spiegel untergebracht. Sie können die Strahlen des stärksten Röntgenlasers der Welt auf einen Punkt von der Breite eines Staubpartikels fokussieren.

Kein Atom, Molekül oder Staubteilchen hat eine Überlebenschance, wenn es in den Brennpunkt des weltstärksten Röntgenlasers LCLS gerät. In weniger als einer billionstel Sekunde erhitzt sich die bestrahlte Substanz auf mehr als eine Million Grad Celsius – das ist eine Temperatur wie in der Sonnenkorona. Bombardiert mit solch extremer Strahlung verliert zum Beispiel ein Neonatom alle seine zehn Elektronen und zerstiebt explosionsartig.

Erstaunlicherweise schlägt der Laser erst die inneren, dann die äußeren Elektronen eines Atoms heraus. Denn die Elektronen, die den Atomkern vereinfacht gesagt auf zwiebelschalenartigen Bahnen umschwirren, reagieren auf Röntgenstrahlen unterschiedlich. Die Exemplare in den äußeren Schalen sind für energiereiche Photonen fast transparent, so dass die meiste Strahlung auf die innerste Schale trifft – ähnlich wie in der Mikrowelle der Kaffee längst heiß geworden ist, bevor sich auch die Tasse selbst erhitzt.

Das hat ungewöhnliche Folgen: Werden die beiden Elektronen der innersten Schale herauskatapultiert, hinterlassen sie eine Lücke; das Atom ist sozusagen hohl geworden. Innerhalb weniger Femtosekunden (eine Femtosekunde entspricht 10^{-15} Sekunden) nehmen dann andere, äußere Elektronen ihre Plätze ein. Dieser Zyklus aus Lochbildung und Wiederauffüllung wiederholt sich so lange, bis keine Partikel in der Hülle mehr übrig sind. Ein solcher exotischer Materiezustand existiert jedoch nur während weniger Femtosekunden. In Festkörpern zerfällt er in einen ionisierten Zustand, der von Fachleuten als warme dichte Materie (WDM) bezeichnet wird, ein Mittelglied zwischen Plasma und Festkörper. Es tritt normalerweise nur unter extremen Umständen auf: bei Fusionsreaktionen von Atomkernen oder im Inneren großer Planeten.

Der Röntgenlaser LCLS (Linac Coherent Light Source), der diese exotischen Vorgänge sicht- und messbar macht, ist am kalifornischen SLAC National Accelerator Laboratory, kurz SLAC, beheimatet, das von der Stanford University betrieben wird. Er basiert auf dem dortigen Linearbeschleuniger, dem in den 1960er Jahren gebauten SLAC linac. Mit diesem Gerät gelangen zahlreiche Entdeckungen – drei davon mit dem Nobelpreis ausgezeichnet –, welche die USA für Jahrzehnte an der Spitze der Teilchenphysik hielten. Nachdem es unter

großem Aufwand umgebaut worden war, ging es im Oktober 2009 als LCLS wieder in Betrieb.

Dieser hat seither für zahlreiche Forschungsgebiete eine ähnliche Bedeutung erlangt, wie sie der Large Hadron Collider am CERN bei Genf für die Teilchenphysik besitzt. Atom- und Plasmaphysik sowie die Physik der kondensierten Materie profitieren ebenso wie Biologie und Chemie von seiner Fähigkeit, die Bausteine der Materie mit extrem hoher Energie zu zertrümmern und sie in neue Zustände zu überführen – oder auch davon, dass er wie ein riesiges Mikroskop mitten in das Reich der Quanten zoomen kann. Die Röntgenpulse des LCLS können so extrem kurz sein, nämlich nur wenige Femtosekunden lang, dass sie atomare Bewegungen nahezu einfrieren. Dadurch sind Physiker in der Lage, chemische Reaktionen in kleinsten Zeitschritten zu verfolgen. Zugleich sind die Pulse so hell, dass sich sogar zerbrechliche Proteine und andere Biomoleküle abbilden lassen, noch bevor der Aufprall des Lichts sie zerstört.

Wie kann man die Bewegung einzelner Atome in Molekülen verfolgen?

Dem Röntgenlaser gelingen all diese Kunststücke, weil er zwei der wichtigsten Werkzeuge der heutigen Experimentalphysik kombiniert: Licht aus Synchrotronquellen sowie Laser, die ultrakurze Pulse aussenden. Synchrotrone sind ringförmige Beschleuniger, in denen Elektronen beschleunigt werden und dabei Röntgenstrahlen emittieren. Eine von uns (Berrah) hat ihre Laufbahn damit zugebracht, mit Synchrotronstrahlung das Innere von Atomen, Molekülen und Nanosystemen zu inspizieren. Für diesen Zweck ist Röntgenlicht ideal: Seine Wellenlängen sind ähnlich groß wie Atomdurchmesser, so dass Atome im Röntgenlicht einen Schatten werfen. Außerdem lassen sich die Strahlen exakt auf ausgewählte Atomarten einstellen. Auf diese Weise kann man beispielsweise deren genaue Position in einem großen Molekül identifizieren, etwa die Position der Eisenatome im Blutfarbstoff Hämoglobin.

Allerdings erlauben es Röntgenstrahlen aus Synchrotronanlagen nicht, die Bewegung eines Atoms im Inneren eines Moleküls oder Festkörpers zu verfolgen. Weil die Pulse nicht kurz und hell genug sind, liefert das Verfahren lediglich schwache, unscharfe Bilder. Synchrotronlicht kann Moleküle nur dann präzise abbilden, wenn Millionen von ihnen in exakt gleichen Abständen kristallförmig angeordnet sind – nur dann addieren sich die vielen Wechselwirkungen zwischen Röntgenpulsen und Molekülen zu messbaren Ergebnissen.

Eine Alternative sind Laser. Sie liefern wesentlich hellere Strahlen, weil sie so genanntes kohärentes Licht produzieren, bei dem die elektromagnetischen Wellen im Gleichtakt schwingen. So können große Energiemengen auf kleinste Raumgebiete fokussiert werden, außerdem lässt sich das Licht binnen Femtosekunden an- und ausschalten. Einer von uns (Bucksbaum) nutzt ultrakurze optische Laserpulse, um wie mit einem Stroboskop die Bewegung von Atomen und die einzelnen Schritte in chemischen Reaktionen zu verfolgen.

AUF EINEN BLICK

RÖNTGENPULSE: ULTRAKURZ UND ULTRAHELL

1 Röntgenlaser galten lange als Sciencefiction. Erst vor wenigen Jahren hielten sie auch Einzug in den wissenschaftlichen Alltag – allen voran der kalifornische LCLS, der vom weltweit längsten Linearbeschleuniger angetrieben wird.

2 Die extrem hellen und kurzen Röntgenpulse dieser Instrumente erlauben detailliertere Blicke als je zuvor ins Innere der Materie.

3 Wie mit einem Stroboskoplicht frieren die energiereichen Laserpulse die Bewegung von Atomen ein, durchleuchten Proteine und Viren und machen ultrakurze chemische Prozesse »sichtbar«.

Konventionelle Laser arbeiten mit Wellenlängen, die im sichtbaren Bereich oder in seiner Nähe liegen und damit rund 1000-mal zu groß sind, um mit ihnen einzelne Atome auflösen zu können. Ähnlich wie ein Wetterradar zwar Stürme identifiziert, aber nicht einzelne Regentropfen, lassen sich mit einem optischen Laser keine individuellen Atome, sondern nur atomare Kollektivbewegungen verfolgen. Wollen wir, dass Atome einen scharfen Schatten werfen, darf die

Wellenlänge des Lichts höchstens so groß sein wie die Atome selbst. Dafür brauchen wir Röntgenlaser.

In mancher Hinsicht ähneln diese gewöhnlichen Lasern. In vielen davon sitzen Atome, die wie winzige Batterien arbeiten: Sie absorbieren kleine Energieportionen in Form von Photonen, speichern sie und senden sie wieder aus. Normalerweise verläuft diese Emission spontan und ohne äußeres Zutun. Aber Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckte Albert



Auf dem Weg zwischen zwei Experimentierhallen fliegt der Röntgenlaserstrahl in seinem Strahlrohr (rechte Bildhälfte) durch einen 200 Meter langen Tunnel.

Anatomie eines Röntgenlasers

Der Röntgenlaser LCLS wird von einem Linearbeschleuniger angetrieben, einer überdimensionierten Version jener Elektronen-

kanonen, die einst in braunschen Röhren üblich waren. Aus ihm treten die Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit aus. Im Her-

ANTRIEBSLASER

Dieses Instrument erzeugt Pulse aus ultraviolett Licht, die aus einer Kathode Elektronen heraus-schlagen.

BESCHLEUNIGER

Elektrische Felder beschleunigen Elektronen bis auf Energien von zwölf Milliarden Elektronvolt. Der LCLS erstreckt sich über ein Drittel der drei Kilometer langen Strecke des SLAC-Beschleunigers.

BÜNDELKOMPRESSOR 1

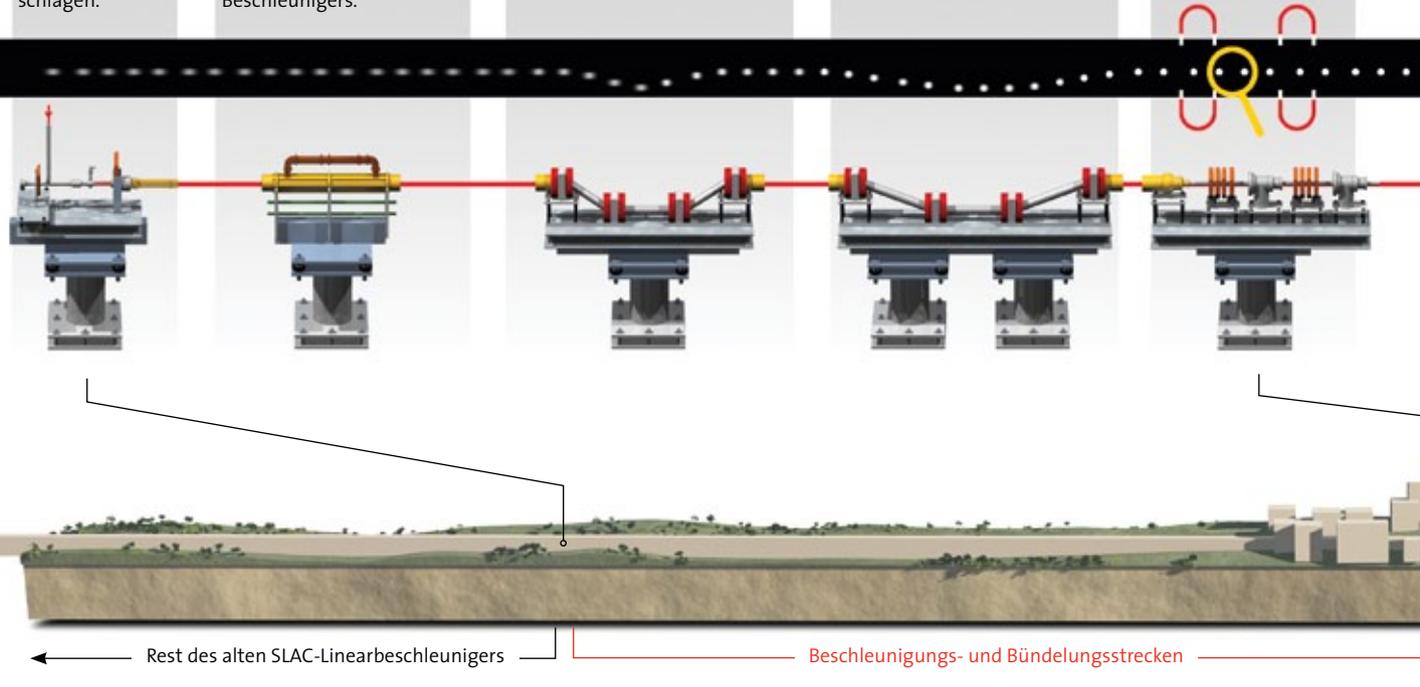
Hier jagen die Elektronenpulse durch eine leichte s-förmige Kurve. Sie sorgt dafür, dass jedes Teilchen etwa dieselbe Energie besitzt.

BÜNDELKOMPRESSOR 2

Nach einer Zwischenbeschleunigung fliegen die Elektronen durch einen zweiten Bündelkompressor. Er ist länger, weil die Teilchen nun größere Energie besitzen und darum auf weiteren Kurven fliegen.

TRANSPORTHALLE

Magnete bündeln die Teilchenpulse weiter. Auf Monitoren können Techniker überprüfen, ob die Strahlen der Idealspur folgen.



DON FOLEY

Einstein einen Mechanismus, wie sie sich künstlich auslösen lässt: die »stimulierte Emission«. Bringt man ein Atom zunächst dazu, eine bestimmte Energiemenge zu absorbieren, und beschießt es dann mit einem Photon mit exakt der gleichen Energie, dann kann das Atom die ursprünglich absorbierte Energie ebenfalls in Form eines Photons wieder abgeben – das auftreffende Lichtteilchen bekommt also einen Zwilling zur Seite, und beide können dann zwei weitere Atome zur Lichtabgabe anregen. So bildet sich in einer exponentiell anwachsenden Kettenreaktion eine Armee von Photonen. Das Ergebnis ist ein Laserstrahl.

Die Energie für den ersten Röntgenlaser lieferte ein unterirdischer Atombombentest

Aber selbst unter idealen Bedingungen klappt das nicht immer. Die Stimulation gelingt sogar nur mit relativ kleiner Wahrscheinlichkeit, eher wird die Energie zuvor durch spontane Emission freigesetzt. Konventionelle Laser umgehen diese Begrenzung. Sie pumpen laufend Energie ins System, um Atome anzuregen, und jagen die Photonen mit Hilfe von Spiegeln, die an beiden Enden des Instruments angebracht

sind, immer wieder durch das Gerät. In einem Helium-Neon-Scanner etwa, wie man ihn von Supermarktkassen kennt, werden die Gasatome kontinuierlich von einem Elektronenstrahl angeregt, und Spiegel reflektieren die Lichtteilchen im Mittel rund 200-mal hin und her, bevor es zur stimulierten Emission kommt.

Bei Röntgenlasern ist jeder dieser Schritte viel schwieriger zu realisieren. Jedes Röntgenphoton besitzt 1000-mal mehr Energie als ein optisches Lichtteilchen; so viel muss ein Atom erst einmal absorbieren. Und selbst wenn das klappt, werden die derart angeregten Atome ihre Energiepackung viel rascher wieder los, als es wünschenswert wäre. Auch Spiegel, die Röntgenlicht reflektieren, stellen eine technologische Herausforderung dar. Mit einigem Aufwand lassen sich diese Probleme aber alle lösen.

Ein Stromsparmodell ist das Ganze indessen nicht: Man braucht erhebliche Energiemengen, um einen Röntgenlaser tatsächlich feuern zu lassen. Die Energie für den ersten Vertreter seiner Art lieferte ein unterirdischer Atombombentest. Das damit gespeiste Instrument war im Rahmen eines Geheimprojekts namens Excalibur entstanden, durchge-

zen der Anlage werden sie dann durch die alternierend gepolten Magnetfelder eines so genannten Undulators auf einen Slalomkurs geschickt, auf dem sie bei jeder Richtungsänderung Röntgenstrahlung aussenden. Da sich die Elektronen fast so schnell bewegen wie die Röntgenphotonen, die sie ausstoßen, beeinflussen sich beide gegenseitig. Die Anlage wurde so konzipiert, dass diese Wechselwirkung zu einem ungewöhnlich reinen und starken Laserstrahl führt.

UNDULATORHALLE

Eine Reihe von Magneten mit wechselnden Polaritäten zwingt die Elektronen auf eine Slalombahn, auf deren äußeren Wendepunkten sie Röntgenstrahlen aussenden.

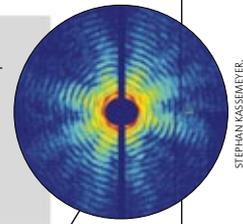
TEILCHENSUMPF

Ein starker Magnet lenkt die Elektronen aus der Vorwärtsrichtung ab. Während sie in einem »Teilchensumpf« gestoppt werden, können die Röntgenstrahlen ungehindert weiterfliegen.

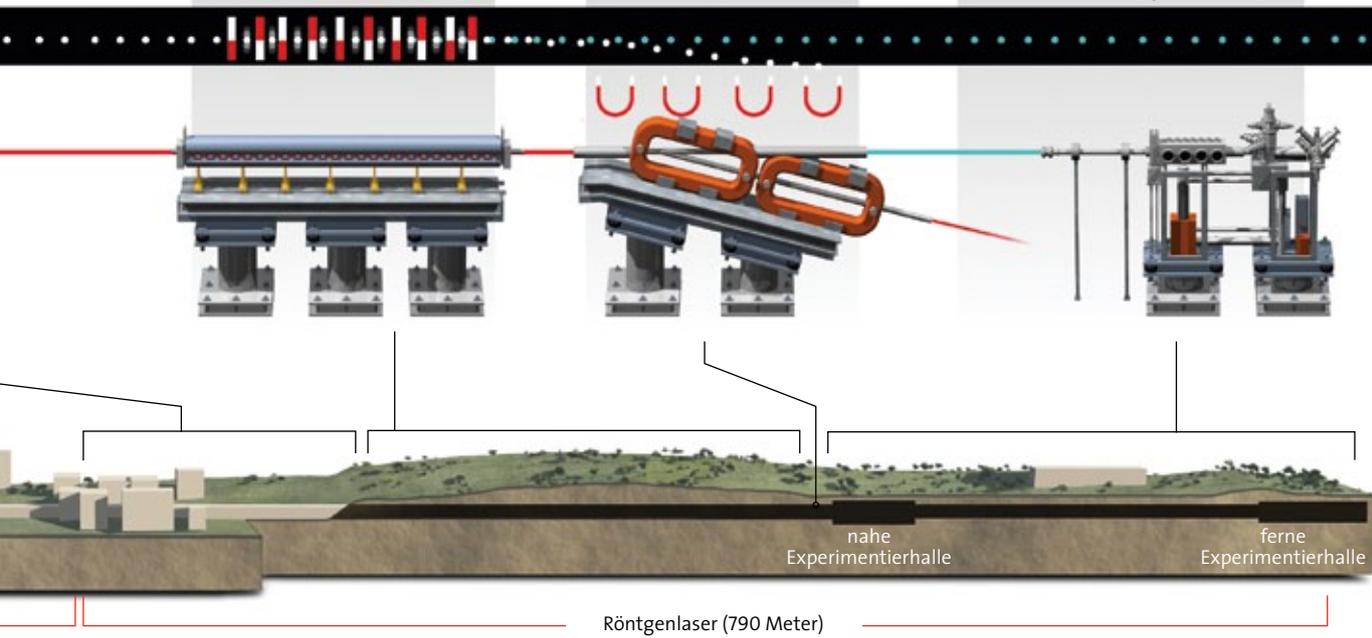
EXPERIMENTIERSTATIONEN

In zwei Experimentierhallen positionieren Forscher Materialproben im Strahlengang. Im Röntgenlicht können deren Eigenschaften entschlüsselt werden.

Bakteriophage unter dem Röntgenmikroskop



STEPHAN KASSEMEYER,
MPI FÜR MEDIZINISCHE FORSCHUNG



DON FOLEY

führt vom Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) bei San Francisco. Obwohl das Projekt noch immer der Geheimhaltung unterliegt, sind doch etliche Informationen an die Öffentlichkeit gelangt. In den 1980er Jahren war es Teil der – als »Star Wars« verspotteten – Strategischen Verteidigungsinitiative (SDI) des US-Präsidenten Ronald Reagan, bei der ballistische Raketen und Satelliten mit Röntgenlasern abgeschossen werden sollten.

In derselben Dekade konstruierte das LLNL auch den ersten Röntgenlaser, der in ein Labor passte und nicht auf nukleare Energie angewiesen war. Als Ersatz dienten leistungsstarke optische Laser, die zur Untersuchung der Eigenschaften von Atomwaffen entworfen worden waren. Diese Instrumente waren allerdings so speziell, dass der routinemäßige Einsatz von Röntgenlasern in der Forschung damals noch abwegig erschien.

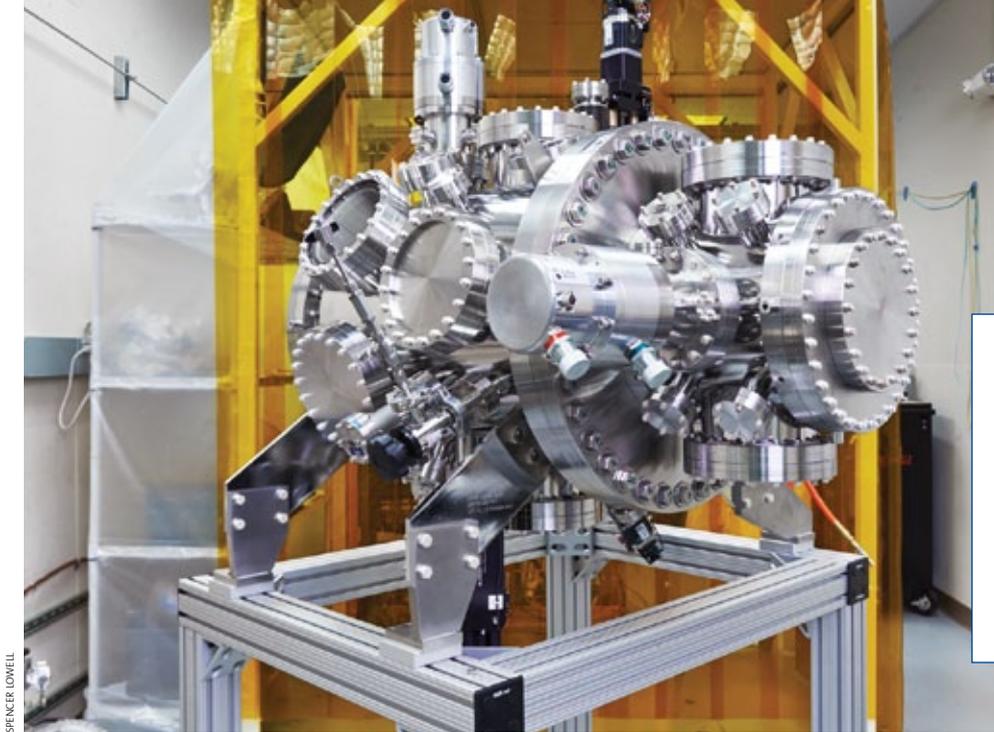
Doch mittlerweile sind die Geräte reif für den zivilen Einsatz. Ihren endgültigen Durchbruch verdanken sie dem SLAC linac. Diese Rennstrecke für Bündel von Elektronen, denen bei Höchsttempo nur noch ein Zentimeter pro Sekunde bis zur Lichtgeschwindigkeit fehlt, ist drei Kilometer lang und

reicht von der bergigen Umgebung der Stanford University bis mitten auf ihren Campus. Als die jahrzehntealte Anlage ihre besten Tage hinter sich hatte und die Teilchenphysiker beschlossen hatten, am leistungsfähigeren Large Hadron Collider bei Genf weiterzuarbeiten, entschieden die Stanford University und das US-Energieministerium, dem das SLAC untersteht, einen Teil der veralteten Anlage in eine Anlage neuen Typs umzuwandeln.

Elektronenslalom lässt Röntgenphotonen entstehen

Das Herzstück des Umbaus zum Röntgenlaser war ein Undulator, wie er auch in Synchrotronbeschleunigern für die Produktion von Röntgenstrahlung zum Einsatz kommt. In Undulatoren erzeugt eine Reihe von Magneten je abwechselnd gepolte Magnetfelder. Fliegen Elektronen durch sie hindurch, bewegen sie sich auf einer engen Slalombahn. An deren Wendepunkten erfahren sie eine Beschleunigung, so dass sie Röntgenstrahlen aussenden.

In dem mit 130 Metern ungewöhnlich langen Undulator des SLAC linac bewegen sich die beschleunigten Elektronen in dieselbe Richtung wie die Röntgenphotonen, die sie emit-



SPENCER LOWELL

Nachdem die Röntgenstrahlen die Untersuchungsobjekte, zum Beispiel Proteine oder Zellen, passiert haben, gelangen sie im Inneren von Vakuumkammern (Bildmitte) auf Detektoren, die hoch aufgelöste Aufnahmen der Objekte liefern.

tieren. Darüber hinaus sind sie fast gleich schnell unterwegs. So kommt es zu einem subatomaren Wettrennen: Elektronen und Lichtpartikel können einander nicht aus dem Weg gehen und geraten immer wieder aneinander. Stimmt man die Energie der Elektronen genau auf die magnetischen Eigenschaften des Undulators ab, ordnen sich die geladenen Partikel so an, dass das von ihnen ausgesandte Licht sich zu einem intensiven, laserartigen Blitz überlagert. Dessen Photonen gelangen schließlich auf geradem Weg zu den Experimentierstationen, während die Elektronen am Ende der Beschleunigungsstrecke zur Seite hin abgelenkt werden.

Ein solches System, in dem Elektronen beschleunigt und beim Flug durch eine Magnetanordnung dazu gebracht werden, einen Teil ihrer Bewegungsenergie in Photonen zu verwandeln, nennen Fachleute einen Freie-Elektronen-Laser. Im Brennpunkt erreicht die Spitzenleuchtkraft des LCLS 10^{18} Watt pro Quadratzentimeter – damit könnte man Stahl schneiden –, womit sie die einer Synchrotron-Lichtquelle um mehr als das Milliardenfache übertrifft. Seine elektromagnetischen Felder sind bis zu 1000-mal stärker als die Kräfte, die Atome in Molekülen aneinanderbinden.

Der Andrang der Forscher auf Messzeit ist groß; weniger als ein Viertel der Anträge können berücksichtigt werden. Haben sie Erfolg, reisen große Teams von Studenten, Postdocs und erfahrenen Wissenschaftlern an, um gemeinsam mit der ständig anwesenden Basismannschaft in intensiven Arbeitsmarathons ihre Experimente durchzuführen: zwölf Stunden täglich, fünf Tage die Woche.

Uns selbst interessieren zwei der breit gefächerten Forschungsthemen besonders: Wie verhält sich Materie unter extremen Bedingungen? Und was lässt sich aus den ultraschnellen Aufnahmen von Molekülen lernen? Beide Fragen sind eng mit fundamentalen Problemen der Atom-, Molekül- und optischen Physik verknüpft. Ein Beispiel ist Materie, die für Röntgenlicht transparent wird. Wenn der LCLS hohle Atome in Molekülen und Festkörpern erzeugt, also Elektronen

aus den inneren Schalen der Atomhülle schlägt, dann rücken Elektronen aus äußeren Schalen nach innen und ersetzen sie. Dieser Vorgang, Physiker sprechen von »Auger-Relaxation«, dauert aber einige Femtosekunden lang. Feuert man also einen besonders kurzen Röntgenblitz, der nur eine einzige Femtosekunde dauert, auf ein System, dann hat das eine überraschende Konsequenz. Die hohlen Atome werden für weitere Röntgenblitze vorübergehend durchsichtig – denn die innere Schale, mit der sie üblicherweise wechselwirken, ist leer, weil es die äußeren Hüllenelektronen in dieser Zeitspanne nicht schaffen, sich in die frei gewordenen inneren Schalenplätze zu stürzen. Diesen Effekt konnten wir am LCLS nicht nur bei Atomen, sondern auch bei Molekülen und größeren Materieproben nachweisen.

Ein anderes Beispiel betrifft extrem heiße Materie. Laut gängigen Modellen erreichen die Zentren von riesigen Gasplaneten wie dem Jupiter Temperaturen von bis zu 20000 Kelvin, das ist mehr als dreimal so viel, wie auf der Oberfläche der Sonne herrschen. Planetologen vermuten, dass die wichtigsten Bestandteile solcher Gasriesen, nämlich Wasserstoff und Helium, bei hohen Dichten gewissermaßen zusammenbacken und sich in eine exotische Art fester Materie verwandeln. Viel Genaueres ist über diese Zustandsformen nicht bekannt. Nicht einmal die Festigkeit solcher Materieformen lässt sich leicht messen oder aus allgemeinen Prinzipien ableiten. Bis heute muss sich die Forschung bei diesem Thema im Wesentlichen mit theoretischen Modellen zufriedengeben, die experimentell kaum überprüfbar sind.

Extremzustände wie beim Einschlag von Meteoriten auf Gesteinsplaneten

Einige der ersten Experimente am LCLS zielten daher darauf, solche planetaren Extremzustände zu simulieren. Dazu feuerten wir eine Reihe von Röntgenstrahlungspulsen auf größere Moleküle mit vielen Atomen ab. So konnten wir zum ersten Mal beobachten, dass sie mehrere Photonen gleichzeitig ab-

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Wie beeinflussen Bakterien unser Wohlbefinden?
Welche Aufgaben erfüllen sie in unserem Körper?
Wie verändert sich unser Mikrobiom?

Do 09.10.2014 / 19.00 / HANNOVER HUNDERT BILLIONEN MITBEWOHNER: WIE MIKROORGANISMEN UNSERE GESUNDHEIT BEEINFLUSSEN

MIT **Prof. Dr. Dirk Haller** Mikrobiologe und Ernährungswissenschaftler, Technische Universität München, **Prof. Dr. Harald Renz** Immunologe, Universität Marburg, **Prof. Dr. Mathias Hornef** Mikrobiologe und Immunologe, Medizinische Hochschule Hannover, **Dr. Kerstin Berer** Neurobiologin, Max Planck Institut für Neurobiologie
MODERIERT VON **Dr. Daniel Lingenhöhl** Redaktionsleiter spektrum.de

VERANSTALTUNGSORT Tagungszentrum Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG <https://veranstaltungen.volkswagenstiftung.de/>

MEHR INFOS www.volkswagenstiftung.de/veranstaltungen

Eine Veranstaltung im Rahmen der Herrenhäuser Konferenz „Beyond the Intestinal Microbiome – From Signatures to Therapy“ von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

sorbierten; der Energieübertrag war entsprechend groß, so dass den Atomen selbst sehr stark gebundene Elektronen entrissen wurden. Außerdem gelang es uns, aus einzelnen Atomen, Molekülen oder Festkörpern jeweils mehrere Elektronen zugleich herauszuschlagen.

Auch die molekularen Bindungen von Wasser, Methan und Ammoniak zertrümmerten wir mit Hilfe von Röntgenstrahlen. So konnten wir die so genannte Zustandsgleichung für diese Teilchen zu ermitteln, also die mathematische Beziehung zwischen Dichte, Temperatur und Druck – und zwar für Bedingungen, wie sie in den Zentren von Riesenplaneten herrschen. Diese Ergebnisse lassen sich darüber hinaus auch auf die Kollisionszonen zwischen Gesteinsplaneten und auf sie treffende Meteoriten anwenden.

Unser zweiter Ansatz besteht darin, den Röntgenlaser als Hochgeschwindigkeitskamera einzusetzen, die Moleküle bei physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen filmt. Noch immer wissen Forscher enttäuschend wenig über die Struktur von Biomolekülen, etwa von Membranproteinen oder großen makromolekularen Komplexen. Typischerweise untersucht man solche Objekte kristallografisch. Dazu züchtet man aus den Untersuchungsobjekten einen Kristall bis zu einer Größe und Perfektion, die ausreicht, um Röntgenstrahlen aus einem Synchrotron zu beugen. Aus dem Muster des Beugungsbilds lässt sich dann die Struktur eines Einzelmoleküls rekonstruieren. Allzu leicht zerstören die energiereichen Wellen aber das Molekül, das eigentlich untersucht werden soll. Diesen Effekt kann man zwar abmildern, indem man große Kristalle züchtet. Doch viele der Moleküle, etwa Membranproteine, lassen sich nur schwer kristallisieren. Hinzu kommt, dass die Synchrotrontechnik zu langsam ist; chemische Phänomene, die typischerweise im Femtosekundenbereich ablaufen, kann sie nicht erfassen.

Auf den ersten Blick könnte der LCLS daher als gänzlich ungeeignet für solche Untersuchungen erscheinen. Schließlich ist seine Strahlung milliardenfach stärker als die von Synchrotronquellen. Fragile Stoffe wie Proteine oder auch nichtkristalline Materie überstehen einen Röntgenstrahlungspuls nicht: Sie explodieren bei seinem Aufprall und verwandeln sich in heißes Plasmagas. Paradoxiertweise ist diese Zerstörungskraft aber genau das, was wir brauchen. Da die Pulse so kurz und hell sind, lassen sich scharfe Bilder schießen, noch bevor sie einige Femtosekunden später das Molekül zerreißen. »Diffraction before destruction«, also »Beugung vor Zerstörung«, nennen die Fachleute das Verfahren.

Sein Einsatz zahlt sich bereits aus. Forscher haben die Femtosekunden-Kristallografie eingesetzt, um Beugungsmuster von Nanokristallen, Proteinen und Viren zu gewinnen. Der Kampf gegen die oft tödliche Schlafkrankheit profitiert ebenfalls davon. Eine der wichtigsten Waffen der parasitären Einzeller, die die Erkrankung auslösen, ist ein bestimmtes Enzym. Nun, da die Wissenschaftler seine Struktur kennen, können sie gezielt nach Abwehrmaßnahmen suchen.

Der durch den LCLS ausgelöste Technologieschub hat auch Forschungslabors in Europa und Asien motiviert, eige-

ne Freie-Elektronen-Laser zu planen und zu bauen. Als größter seiner Art soll 2016 der European XFEL in Hamburg seinen Betrieb aufnehmen und noch härteres Röntgenlicht bis zu einer Wellenlänge von 0,05 milliardstel Metern erzeugen (siehe »Nanowelt im Röntgenlicht«, SdW 8/2011, S. 86). Die neue Generation solcher Maschinen arbeitet stabiler und bietet mehr Einflussmöglichkeiten auf die Röntgenstrahlen, insbesondere lassen sich mit ihnen noch kürzere Röntgenstrahlungspulse erzeugen. Pulse von nur mehr einer zehntel Femtosekunde Dauer – entsprechend 100 Attosekunden oder dem Zehnmillionstel einer milliardstel Sekunde – können dann nicht mehr nur die Bewegung von Atomen, sondern auch die von Elektronen im Inneren von Atomen und Molekülen erfassen. Bald sollte es sogar möglich werden, deren Bewegung direkt zu steuern. Damit gerät ein weiterer Traum der Forscher in Reichweite: Filme zu drehen, die zeigen, wie chemische Verbindungen aufbrechen und neue entstehen. ~

DIE AUTOREN



Nora Berrah leitet die Abteilung für Physik der University of Connecticut und verantwortet die Entwicklung von Instrumenten für den Röntgenlaser LCLS. Bei ihrer Forschung konzentriert sie sich auf die Wechselwirkung von Photonen

mit Atomen, Molekülen und Nanosystemen. 2014 erhielt sie den Davison-Germer-Preis für atomare und Oberflächenphysik. **Philip H. Bucksbaum** ist Marguerite-Blake-Wilbur-Proffessor für Naturwissenschaften an der kalifornischen Stanford University sowie Professor am SLAC. Er leitet das PULSE-Institut, an dem sich Forscher der Arbeit mit ultraschnellen Lasern und dem LCLS widmen.

QUELLEN

- Berrah, N. et al.:** Double Core-Hole Spectroscopy for Chemical Analysis with an Intense X-Ray Femtosecond Laser. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 108, S. 16912–16915, 2011
- Chapman, H. N. et al.:** Femtosecond X-Ray Protein Nanocrystallography. In: Nature 470, S. 73–77, 2011
- Redecke, L. et al.:** Natively Inhibited Trypanosoma Brucei Cathepsin B Structure Determined by Using an X-Ray Laser. In: Science 339, S. 227–230, 2013
- Seibert, M. M. et al.:** Single Mimivirus Particles Intercepted and Imaged with an X-Ray Laser. In: Nature 470, S. 78–81, 2011
- Vinko, S. M. et al.:** Creation and Diagnosis of a Solid-Density Plasma with an X-Ray Free-Electron Laser. In: Nature 482, S. 59–63, 2012
- Young, L. et al.:** Femtosecond Electronic Response of Atoms to Ultra-Intense X-Rays. In: Nature 466, S. 56–61, 2010

LITERATURTIPPS

- Altarelli, M. et al.:** Brillante Röntgenblitze. In: SdW 3/1999, S. 62–69
- Hopkins, J.-M., Sibbett, W.:** Ultrakurze Laserblitze. In: SdW 11/2000, S. 66–73
- Die beiden »Spektrum«-Artikel zeichnen den Weg zu den ersten Röntgenlasern nach.*

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1304069

1914

Bestätigung für Einstein

»In letzter Zeit hat Evershed festgestellt, daß die Spektrallinien des Sonnenlichtes nach dem roten Ende des Spektrums hin gegenüber den irdischen Vergleichslinien ver-

schoben sind. Ein Einfluß eines auf der Sonne herrschenden Druckes kann nicht die Ursache sein, da durch Druck die einzelnen Linien verschieden stark verschoben werden. Die Messungen lassen aber erkennen, daß die Verschiebung der Linien, der Größenordnung und Richtung nach, ungefähr gleich ist, wie die Einsteinsche Theorie des Einflusses der Schwerkraft verlangt.« Prometheus 1302, S. 32, 1914

Sicherheit beim Luftangriff

»Für die mit Maschinengewehren ausgerüsteten Luftschiffe bildet das Mündungsfeuer eine Gefahrenquelle, da es möglicherweise Explosionen herbeiführen kann. Die Lösung soll einem Florentiner Chemiker namens Guido Fei gelungen sein. Er soll kürzlich ein neues Pulver vorgeführt haben, das ganz ohne Flamme brennt, bei der Detonation nicht aufblitzt und auch keinen Rauch entwickelt. Die ballistischen Eigenschaften werden als gut bezeichnet, auch soll es das Rohmaterial nicht so angreifen wie die modernen Nitratpulver. Man wird jedoch gut tun, nähere Mitteilungen abzuwarten, da uns Italien noch kürzlich in den Ulivischen F-Strahlen eine ähnliche Erfindung anpries, während sich die ganze Geschichte hernach als Schwindel herausstellte.« Technische Monatshefte 10/1914, S. 312

Licht im Kanal



Leuchtboje im Panamakanal.

»Die Aufgabe, Schiffe auch bei Nacht oder Nebel sicher durch den Kanal zu befördern, wurde gelöst. Es wird das seit dem Jahre 1908 erprobte System A. G. A. (American Gas Accumulator Company) angewendet, welches sich dadurch auszeichnet, daß die Lichter 4 bis 7 Monate lang selbsttätig brennen. Fig. 1 zeigt eine dieser Leuchtbo-

jen, von denen etwa 50 Stück den Kanal an beiden Seiten einfassen und seine wichtigste Beleuchtung bilden. Ein zylindrischer Stahlkörper, der ein pyramidenförmiges Gestell mit einer Lampe trägt, bildet seinen Hauptbestandteil. Der Mittelteil der Boje, der einen Durchmesser von 2½ m hat, besitzt vier Öffnungen zur Aufnahme der

Azetylenakkumulatoren, von denen das Gas durch eine Röhre in die Laterne geleitet wird. Da das Gas unter einem Druck von mehr als zwei Atmosphären sich in Kohlenstoff und freien Wasserstoff spaltet und dabei in der Regel heftige Explosionen erfolgen, mußte mit besonderer Vorsicht vorgegangen werden.« Die Umschau 42/1914, S. 848–850

Ballon zur Venus

»Das Vorhandensein von Wasserdampf auf der Venus war umstritten, weil die spektroskopischen Beobachtungen durch den Einfluß der Erdatmosphäre erschwert werden. Durch einen Ballonaufstieg über New-Mexiko haben J.S. Strong und Mitarbeiter von der Johns-Hopkins-Universität jetzt sogar ein quantitatives Ergebnis erzielt. Die unbemannte, über 1 t schwere Gondel diente als Observatorium. In 29 km Höhe, wo sich nur noch 0,03 % des Wasserdampfs der Erdatmosphäre

über der Apparatur befanden, tastete ein Photomultiplier das Spektrum der Venus und eines Vergleichsobjektes ab.

Die Auswertung der Aufzeichnungen erforderte 3 Wochen. Sie ergab, daß oberhalb der Wolkendecke in der Venusatmosphäre Wasserdampf entsprechend einer Wasserschicht von 0,098 mm vorhanden ist.« Naturwissenschaftliche Rundschau 10/1964, S. 406

Am Puls des Zahns

»Wird ein Zahn belastet, so weicht er in Richtung der einwirkenden Kraft aus, bis die Bewegung durch die Wurzelhautfasern abgefangen wird. Nach der Entlastung kehrt der Zahn wieder in seine Ausgangslage zurück. Zeichnet man diese Bewegung elektronisch auf, so erhält man typische Kurven. So kehrt der Zahn nach der Entlastung

anfänglich sehr schnell und dann langsam, in Absätzen, in seine Ausgangslage zurück. Dieses Zurückpumpen erfolgt synchron mit dem Herzschlag (genauer: der Herzsysteme) und entspricht der Wiederherstellung des normalen hydrostatischen Druckes innerhalb des Wurzelhautraumes. Auch der unbelastete Zahn befindet sich nicht in Ruhe. Ruhepulskurven zei-

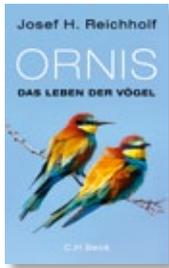
gen das Bild eines arteriellen Volumenpulses. Die Amplitudenmittelwerte gesunder

Oberkieferzähne liegen in einem Bereich von 0,4 bis 0,6 µm.« Die Umschau 20/1964, S. 636

Olympiade im Koffer

»Für die Olympischen Spiele will die japanische Industrie ein erstes Koffergerät zum Empfang von Farbfernsehen herausbringen. Der Apparat soll nur acht Kilo wiegen, über einen 23-cm-Bildschirm verfügen und für rund 1800 Franken verkauft werden. Nach Aufnahme der Serienproduktion hofft man, den Preis auf etwa 1200 Franken senken zu können.« Neuheiten und Erfindungen 343, S. 184, 1964

1964



Josef H. Reichholf

Ornis

Das Leben der Vögel

C.H.Beck, München 2014

272 S., € 19,95

ORNITHOLOGIE

Überlebenskünstler in den Lüften

Warum Vögel virtuose Meister der Anpassung sind



Scleiereulen nisten oft in Kirchtürmen, ohne dass ihr Gehör vom Glockenlärm geschädigt wird.

Scleiereulen haben ein derart empfindliches Gehör, dass sie sogar in stockdunkler Nacht auf Mäusejagd gehen können. Merkwürdigerweise hält aber nichts sie davon ab, ausgerechnet in Kirchtürmen zu nisten und sich dort dem dröhnenden Lärm der Glocken auszusetzen. Anscheinend leidet ihr Hörsinn darunter nicht im Geringsten. Warum, ist unbekannt.

Der Wanderfalke gilt als schnellster Vogel der Welt. Nach neuesten Messungen erreicht er im Sturzflug 350 Kilometer pro Stunde. Dass er in diesem mörderischen Tempo sein Ziel mit größter Präzision ansteuern kann, ohne mit gefährlichen Hindernissen zu kollidieren, verblüfft Fachleute immer wieder.

Die südafrikanische Kap-Beutelmeise baut von allen Vögeln das wohl raffi-

nierteste Nest. Der beutelförmige Unterschlupf verfügt über eine gut getarnte, verschließbare Zugangsröhre – und darunter einen vorgetäuschten Eingang. Diese »Scheintür« dient dazu, Baumschlangen in die Irre zu führen. Andere Vogelarten hingegen stückeln ihre Nester ziemlich »schlampig« zusammen oder bauen sie gleich am Boden. Warum sie das tun, weiß man nicht genau, denn Bodennester werden öfter von umherstreunenden Raubtieren heimgesucht. Vermutlich wird dieser Nachteil dadurch ausgeglichen, dass Bodenraubtiere die noch gefährlicheren Raubvögel auf Abstand halten.

Vögel sind die größten Überlebenskünstler im Tierreich, davon ist der Zoologe und Evolutionsbiologe Josef H. Reichholf überzeugt. Nicht nur hätten

sie es geschafft, sich aus eigener Kraft und ohne technische Hilfsmittel über alle Kontinente zu verbreiten. Nicht nur kämen sie mit extremen Temperaturen sowie Temperaturschwankungen zu recht. Sie hätten sich auch in einem solchen Maß von ihrer Umwelt unabhängig gemacht, dass man Begriffe wie »ökologisches Gleichgewicht«, »invasive Art« oder »ökologische Nische« auf sie kaum anwenden könne.

In Reichhofs Augen ist es vor allem die einzigartige »Herz-Lungen-Luftsack-Maschine«, die die Vögel zu ihren virtuellen Anpassungsleistungen befähigt. Sie ermöglichen einen enormen Energieumsatz, eine sehr hohe Herzschlagrate und eine Körpertemperatur, die jene der Säuger weit übersteige. Allein deswegen, erklärt der Autor, könnten Vögel sich derart schnell und ausdauernd in der Luft, auf dem Boden und im Wasser fortbewegen. Und vielleicht könne deshalb auch ihr Gehirn in Rekordgeschwindigkeit arbeiten – und so ein halbsprecherisches und dennoch weit gehend unfallfreies Fliegen erlauben.

Dass Krähen, Raben und Papageien regelrechte Geistesakrobaten sind, hat sich mittlerweile herumgesprochen. Der Autor betont jedoch, Nesthocker seien generell ziemlich intelligent und lernbegierig. Und die intelligentesten von ihnen seien die Singvögel, die zudem über hocheffizient gebaute Beine und Füße verfügen.

Das typischste Merkmal der Vögel, die Feder, gehört zweifellos zu den bedeutendsten evolutionären »Erfindungen«. Doch wie ist sie während der Stammesgeschichte entstanden? Reichholf vermutet, Federn seien ursprünglich eine Art Abfalldeponie gewesen, indem sie dazu dienten, überschüssige Eiweiße mitsamt ihren schwefelhaltigen Bestandteilen sowie giftige Farbstoffe aufzunehmen. Zudem nimmt der Autor an, dass bei jeder Vogelart der Stoffwechsel der Männchen im Wesentlichen mit dem der Weibchen übereinstimmt. Die gleiche Menge an Ressourcen, die Weibchen in die Erzeugung der Eier, das Bebrüten des Geleges und die Versorgung der Jungen investierten, müssten die Männchen für die Bildung

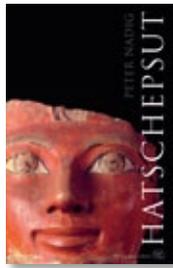
eines Prachtgefieders, für Balzrituale oder Gesänge aufwenden.

Reichholf beschäftigt sich außerdem mit dem Brutparasitismus des Kuckucks und erläutert dabei, warum Vögel überhaupt Eier legen. Er zeigt, dass Großstädte für die Federtiere immer attraktiver werden, und erklärt, weshalb gegenwärtig jede zehnte Vogelart vom Aussterben bedroht ist.

Anatomie, Stoffwechsel und Energiehaushalt der Vögel nehmen in dem Buch viel Raum ein. Auf der Grundlage dieser Abschnitte erörtert der Autor zahlreiche Phänomene aus der Welt der Federtiere. Was dabei herauskommt, ist immer wieder verblüffend. »Ornis« überzeugt als aufschlussreiches und originelles Buch über die Vögel und ihre vielfältigen Beziehungen zur Umwelt, zumal es ganz ohne Fachjargon auskommt.

Frank Ufen

Der Rezensent ist promovierter Soziologe und freier Wissenschaftsjournalist in Marne.



Peter Nadig

Hatschepsut

Philipp von Zabern, Darmstadt 2014

208 S., € 29,95

GESCHICHTE

Frau Pharao

Böse Schwiegermutter oder staatstragende Regentin? Ein neues Buch beleuchtet Leben und Wirken der ägyptischen Pharaonin Hatschepsut.

Im alten Ägypten war Herrschen Männersache. Seit Menschengedenken geboten Pharaonen als »Herren der beiden Länder« (Ober- und Unterägypten) über das Reich am Nil. Stets ging das Königtum auf den Sohn oder einen engen Vertrauten über – also von einem Mann auf einen anderen. Nicht so

jedoch im Jahr 1479 v. Chr., als mit Hatschepsut (»Die erste der vornehmen Frauen«) eine Dame den Horus-Thron bestieg. Eine Art Betriebsunfall, der die Nachwelt bis heute zu allerlei Spekulationen anregt.

Peter Nadig, Privatdozent für Alte Geschichte an der Freien Universität

ANZEIGE



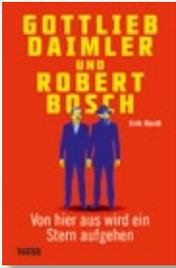
2°CAMPUS

www.2-Grad-Campus.de

KLIMARETTER GESUCHT!

Forschen ist deine Leidenschaft? Klimaschutz liegt dir am Herzen? Dann mach' mit bei der WWF-Schülerakademie 2°Campus!

Lerne Gleichgesinnte kennen, sei Teil toller Aktionen und aktueller Forschung. Bringe dich und deine einzigartigen Ideen ein! Nur gemeinsam können wir eine klimafreundliche Zukunft gestalten. **Bewirb dich jetzt bis zum 02. Dezember 2014 für den 2°Campus 2015!** Alle Infos findest du hier: www.2-grad-campus.de



Erik Raidt

Gottlieb Daimler und Robert Bosch – Von hier aus wird ein Stern aufgehen

Theiss, Darmstadt 2014. 280 S., € 24,95

Die Entstehung des Automobils ist eng mit den Namen Gottlieb Daimler (1834–1900) und Robert Bosch (1861–1942) verknüpft. Der eine entwickelte zusammen mit anderen Erfindern Motoren und Automobile; der andere machte sie durch seine Magnetzündler sicher und verhalf ihnen so zum Durchbruch. Sprachlich eloquent zeichnet der Autor entlang des Lebenswegs beider Ingenieure die Frühzeit der modernen Mobilität nach, obgleich nicht alle Metaphern gelungen sind. Zum Schmunzeln regt etwa die Formulierung an »die Erfolgsgeschichte aus Cannstatt ist nicht die einer Garagenfirma«. Wie auch, wenn das Automobil noch gar nicht erfunden war? Raidt wechselt munter von einem Protagonisten zum anderen, was das Verständnis, von wem gerade die Rede ist, manchmal erschwert. Zahlreiche Anekdoten helfen aber, sich in die Lebensumstände der beiden Technikpioniere einzudenken. Dabei wird klar: So einträchtig Händchen gehalten wie auf dem Buchdeckel haben sie nie.

GERHARD SAMULAT



Georg Glaeser, Hannes F. Paulus

Die Evolution des Auges – Ein Fotoshooting

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2014. 214 S., € 24,99

Gute Sachbildbände zeichnen sich durch professionell gemachte Fotos und aufschlussreiche Infografiken aus. Das wunderschön gestaltete Buch des Tierfotografen und Mathematikers Georg Glaeser und des Evolutionsbiologen Hannes Paulus bietet beides. In der kurzen Einleitung nähern sich die Autoren der Evolutionstheorie aus dem Blickwinkel ihrer jeweiligen Profession. Sodann machen sie die Evolution am konkreten Beispiel des Auges anschaulich. Sie erläutern die physikalischen und biologischen Hintergründe des Sehens anhand von ansprechenden Bildern und hervorragend aufbereiteten Begleittexten. In einem Streifzug quer durchs Tierreich schildern sie, wie das Auge im Zuge der biologischen Evolution mehrfach unabhängig voneinander entstand. Heraus kommt ein gelungener Überblick über dieses hochinteressante Thema – und ein echter Hingucker für Laien wie für Experten.

ARNE BAUDACH



Werner Rupprecht

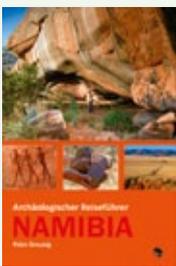
Einführung in die Theorie der kognitiven Kommunikation

Wie Sprache, Information, Energie, Internet, Gehirn und Geist zusammenhängen

Springer Vieweg, Wiesbaden 2014. 491 S., € 79,99

Ist der wahrnehmende, denkende und reagierende Mensch maschinell und logisch beschreibbar? Oder muss doch ein immaterieller Geist existieren? Diese Frage bewegt den emeritierten Professor für Nachrichtentechnik Werner Rupprecht. Sein Buch beleuchtet menschliche Kommunikation aus Sicht der Technik, Ingenieurwissenschaft und Informationsverarbeitung. Rupprecht erläutert Signaltheorie, Information, Entropie und unscharfe Logik ebenso wie menschliche Sensorik, Funktionsweise von Neuronen und die Entstehung und Bedeutung von Sprache. Einige wichtige Bereiche, etwa Emotionen, lässt er allerdings aus. Zudem muss der Leser sich durch knochenharte Lektüre arbeiten, nicht zuletzt wegen der verschachtelten Schreibweise. Auch wünscht man sich stellenweise mehr thematische Ausgewogenheit, Präzision und eine klarere Abgrenzung von eigenen Thesen und Fachwissen.

STEFFI BECKHAUS



Peter Breunig

Archäologischer Reiseführer Namibia

Africa Magna, Frankfurt am Main 2014. 327 S., € 27,80

Wer eine Reise nach Namibia plant, sollte neben den Nationalparks auch einen Abstecher zu den frühen Stätten der Menschheitsgeschichte anvisieren. Breunig, der Archäologie Afrikas an der Universität Frankfurt lehrt, beschreibt lebendig und mit Fotos reich illustriert die lohnenden Ziele, zumeist steinzeitliche Felsmalereien und -gravuren. Dazu liefert er den Werdegang ihrer wissenschaftlichen Untersuchung. Dem »Reiseteil« vorangestellt ist eine Einführung in die Vorgeschichte Afrikas und speziell Namibias – eingehend und sowohl für Neulinge als auch Bewanderte ergiebig. Ausführlich erklärt Breunig die verschiedenen Steingeräte, die als »Leitfossilien« der Kulturepochen dienen. Was ist ein Geröllgerät, was ein Faustkeil und was ein Chopper? Ein Glossar fasst die wichtigsten Begriffe noch einmal kurz zusammen. Insgesamt ein lesenswertes, spannendes Buch.

KLAUS-DIETER LINSMEIER

Berlin, nähert sich der Herrscherin streng anhand historischer Fakten. Er analysiert Inschriften, sichtet und interpretiert das archäologische Material und studiert die einschlägige Fachliteratur. So entsteht ein differenziertes und lesenswertes Buch über eine außergewöhnliche Frau, deren Regentschaft zu einer der segensreichsten im pharaonischen Ägypten gehörte.

Wann Hatschepsut geboren wurde, ist nicht bekannt. Man weiß lediglich, dass sie von 1479 bis 1458 v. Chr. auf dem Thron saß und vermutlich einen natürlichen Tod starb. Sie war die legitime Tochter von Thutmosis I., dem Begründer der 18. Dynastie. Nach dessen

eines männlichen Herrschers – Bart und Lendenschurz – darstellen ließ. Das wäre nicht möglich gewesen, hätte sie keine Unterstützung am Hof genossen. Vermutlich war es ihr gelungen, die wichtigsten Ämter mit Vertrauten zu besetzen. Mindestens von einem ist das aktenkundig. Senenmut, ein Mann bescheidener Herkunft, aber offenbar das Wohlwollen der Pharaonin genießend, brachte es bis zum mächtigen Minister. Er war es auch, der den Bau des spektakulären Totentempels im Talkessel von Deir el-Bahari leitete. Der noch heute gut erhaltene Bau mit seinen Terrassen, Säulenhallen und der breiten, ansteigenden Rampe gilt als ei-

Ein Pharaon mit Bart und Lendenschurz, aber mit weiblicher Figur und weiblichen Titeln? Darauf konnten sich die Archäologen lange keinen Reim machen

Tod heiratete sie – entsprechend den damaligen Sitten zur Reinerhaltung des Bluts – ihren Halbbruder Thutmosis II., der allerdings auch schon bald das Zeitliche segnete. Da sie keinen gemeinsamen Sohn mit ihm hatte, rückte der noch unmündige Sprössling einer Nebenfrau zum Thronfolger auf: Thutmosis III.

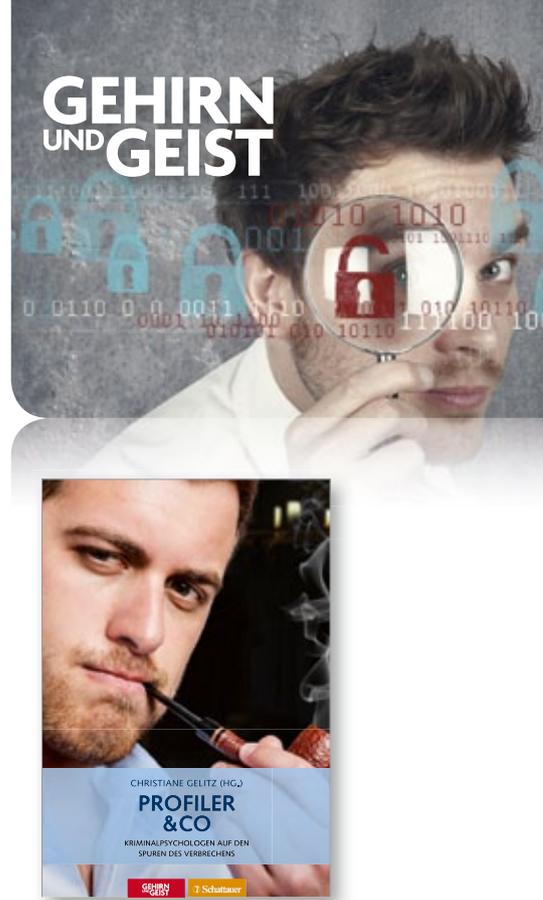
Sofort erkannte Hatschepsut die einmalige Chance, die sich ihr bot, und nutzte sie geschickt aus. An Stelle ihres jungen Stiefsohns übernahm sie die Regierungsgeschäfte. Klug wie sie war, drängte sie Thutmosis III. aber nicht komplett zur Seite, sondern wies ihm einen Platz als Mitregenten zu. Sich selbst verlieh sie die vollständige Königstitulatur und trat von nun an als Pharaon auf. Mittels einer frei erfundenen Geburts- und Krönungslegende – sie inszenierte sich als vom obersten Reichsgott Amun »erwählt« – legitimierte sie ihren Anspruch.

Hatschepsut gab ihrem Stiefsohn ehrenvolle Ämter und schickte ihn auf Kriegsschauplätze ins Ausland, wo sie ihn fern vom königlichen Hof wusste. Sie identifizierte sich so sehr mit der Rolle der Herrscherin, dass sie sich verkleidete und sogar mit den Insignien

nes der eigenwilligsten und bedeutendsten Zeugnisse ägyptischer Architektur. Hatschepsut ließ den Tempel mit hunderten Statuen ihrer selbst schmücken – kein Pharaon der 18. Dynastie hat sich derart in Szene gesetzt.

Die Herrscherin inszenierte sich als Sohn des Sonnengottes Re, der mit den Göttern sprach, den Nil fruchtbar über die Ufer treten ließ und als alleiniger Garant für die Maat, die göttliche Weltordnung, Ägypten vor dem Chaos bewahrte. Hatschepsut kümmerte sich in besonderer Weise um die Verhältnisse im Landesinnern und pflegte gute Beziehungen zu den Nachbarstaaten. Sie setzte neue Impulse in Kunst und Kultur, ließ Tempel errichten und vernachlässigte Gebäude restaurieren. Thutmosis III. beschäftigte sie mit Feldzügen nach Nubien und Syrien; lediglich an einer militärischen Unternehmung, die nach Kusch am mittleren Nil führte, nahm sie selbst teil.

Einem anderen Projekt hingegen galt ihr ganzer Stolz, und sie schlachtete es propagandistisch entsprechend aus: die Expedition ins geheimnisvolle Weihrauchland Punt an der Küste des heutigen Somalia. Dieses Unternehmen ließ sie aufwändig per Wort und



Christiane Gelitz (Hrsg.)

Profiler & Co

Kriminalpsychologen auf den Spuren des Verbrechens

Ein Ehemann, der seine Frau erwürgt. Eine Krankenschwester, die ihre Patienten ermordet. Kriegsverbrecher, die Lust am Töten haben.

Im Dienste der Wahrheit arbeiten Polizei und Gerichte mit Psychologen und Hirnforschern zusammen. Wissenschaftler und Journalisten schildern, welche Methoden den Strafverfolgern beim Ermitteln helfen – Profiling, Computerprogramme, Verhörtechniken, Aussageanalyse, Lügendetektoren.

Fundiert und eindrücklich ergründen die Autoren Motive und Hintergründe von Verbrechen, erstellen psychologische Täterprofile und analysieren die Ursachen von Gewalt.

Auch die Bedeutung psychologischer und neurobiologischer Befunde für die Rechtsprechung wird beleuchtet. Wissenschaftler und Journalisten erzählen dazu wahre Geschichten aus der kriminologischen Forschung und Praxis.

2013. 172 Seiten, 16 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)
ISBN 978-3-7945-2962-9

Jetzt bestellen!

Internet: www.schattauer.de/shop
E-Mail: order@schattauer-shop.de



Irrtum und Preisänderungen vorbehalten. Abb.: © Fotolia.de

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:
www.spektrum.de/rezensionen

Bild im Tempel von Deir el-Bahari dokumentieren. Von der ungemein prestigeträchtigen Reise kehrten Schiffe voller exotischer Pflanzen und Tiere, Gold, Elfenbein und Ebenholz nach Ägypten zurück. Ganz besonders konnte Hatschepsut auf Weihrauch und Myrrhe verweisen – kostbare Mitbring-

sel, deren Harze für die Parfümherstellung und die Einbalsamierung der Toten unentbehrlich waren. »Niemals ist etwas Gleiches irgendeinem König seit Ewigkeit gebracht worden«, heißt es auf einer Tempelwand in Deir el-Bahari.

Bis heute wissen wir nicht, woran Hatschepsut starb. Sicher ist nur, dass ihr Stiefsohn Thutmosis III. versuchte, sich für die 20 Jahre zu rächen, in denen sie statt seiner auf dem Thron gesessen hatte. Er wollte das Andenken an sie auslöschen und ließ nach ihrem Tod ihre Statuen entfernen und ihre Namen und Reliefs aus Denkmälern herausmeißeln. Fast hätte er sein Ziel erreicht. Erst in der Neuzeit entrisen Ägyptologen die bemerkenswerte Frau dem Vergessen. Zunächst konnten sie sich keinen Reim auf den seltsamen Pharaon mit Bart machen, der mit weiblicher Figur und weiblichen Titeln dargestellt wurde. Dann inter-

pretierten sie die Frau als böse Stiefmutter, die ihren Sohn an der legitimen Nachfolge gehindert hatte. Erst die Frauenbewegung des 20. Jahrhunderts korrigierte diese männliche Perspektive und identifizierte Hatschepsut als Herrscherin, der es gelungen war, mehr als 20 Jahre lang erfolgreich die Staatsgeschäfte in einer ansonsten rein männlich dominierten Gesellschaft zu führen.

Im Licht der neueren Forschung ist dem Autor ein fundiertes, sachliches, dabei aber anregendes und fesselndes Buch gelungen. Auch ägyptologisch eher wenig bewanderte Leser bekommen hier eine recht verständliche Einführung in die Welt des alten Ägyptens geboten.

Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.



Michael Hampe
Die Lehren der Philosophie
Eine Kritik
Suhrkamp, Berlin 2014
455 S., € 24,95

LIEBE ZUR WEISHEIT

Erzählen statt behaupten

Die Philosophie solle nicht autoritär von der Kanzel herab predigen, sondern zu ihren sokratischen Wurzeln zurückkehren und Lebensorientierung bieten, fordert Michael Hampe.

»Man kann Philosophie nicht lernen wie Physik«, steht in großen Lettern auf Michael Hampes neuem Buch. Der Satz ist Programm: Hampe, Philosophieprofessor an der ETH Zürich, geht mit seinem Fach hart ins Gericht. In der Philosophie gehe es immer häufiger darum, Behauptungen aufzustellen und diese auf Teufel komm raus zu

verteidigen. Dies führe zu einem »mental Kapitalismus«, bei dem die Wissenschaftler um Aufmerksamkeit und Drittmittel buhlen, während die Studierenden ihre Bildung als »Investition in die Zukunft« sehen, um sich »fit zu machen« für den Arbeitsmarkt. Gelehrt werde vor allem, anderen Menschen die eigene Doktrin überzustülpen.

Aber wie will man etwas felsenfest behaupten und in der Lehre durchpeitschen, wenn stets Sokrates' »Ich weiß, dass ich nichts weiß« über allen vermeintlichen Wahrheiten schwebt? Anknüpfend an Sokrates (469–399 v.Chr.), Ludwig Wittgenstein (1889–1951) und John Dewey (1859–1952) erinnert Hampe daran, dass die Philosophie keine endgültigen Resultate liefern kann. Vielmehr solle sie vermeintlich sichere Wahrheiten als unsicher entlarven und Menschen dazu befähigen, »auf ihre eigenen Lebenserfahrungen zu antworten«. Die Philosophie soll also Orientierungshilfe geben bei existenziellen Krisen oder moralischen Problemen. Am konkreten Beispiel des Fleischkonsums etwa zeigt Hampe, dass es keine definitive Wahrheit, sondern viele verschiedene Sichtweisen zum Vegetarismus gibt, unter denen der Fragende dann die aus seiner Sicht beste finden muss. In dieser Fähigkeit, eigene Antworten zu finden, sieht Hampe eine elementare Voraussetzung für ein glückliches Leben.

Der Autor möchte das nichtdoktrinaire Philosophieren wiederbeleben. Al-

lerdings weiß er auch, dass er behauptet, es lasse sich nichts behaupten. Und will mit diesem Paradox leben, was manchen Leser etwas ratlos zurücklassen könnte.

»Menschen haben keine Probleme, mit Widersprüchen zu leben, solange sie keine Theorien konstruieren«

Hampe plädiert jedoch dafür, Meinungspatts und die Nichtverstehbarkeit der Welt einfach einmal hinzunehmen. Denn auf die berühmte kantsche Frage »Was ist der Mensch?« gebe es schlicht nicht die eine wahre Antwort, sondern eine Vielzahl möglicher (kultureller, historischer, naturwissenschaftlicher) Erzählungen. Wer etwa nur mit dem Informationsgehalt der DNA antworte, reduziere damit sofort das Spektrum der menschlichen Lebenswelt. Denn ein Gedicht, eine Autobiografie oder ein Kochrezept enthiel-

ten ebenso viel Wahrheit wie eine Genomanalyse.

Laut Hampe zeigt die moderne Sprachphilosophie, dass es unsinnig ist, den sokratischen Dialog einem doktri-

nären Monolog zu opfern, der den Studierenden aufgepfropft wird. Etwas zu kurz kommt in seinem Buch die soziale Rolle der Macht. Umso überzeugender zeigt der Autor, mit was für Fallstricken die Philosophie aufwartet und welchen geringen Einfluss sie auf den Alltag hat, denn: »Menschen haben keine Probleme, mit Widersprüchen zu leben, solange sie keine Theorien konstruieren.«

Während sich die Philosophen vermehrt mit Theorien brüsteten, um sich – erfolglos – mit den Naturwissenschaftlern zu messen, gehe es in der

Literatur weniger theorielastig zu, schreibt Hampe. Folgerichtig findet er bei den Dichtern ideale Anknüpfungspunkte zum Philosophieren. Erzählen statt behaupten – so könnte man seine Botschaft auf den Punkt bringen.

Wer mit den Debatten der Philosophen nur wenig vertraut ist, kann das Buch größtenteils zwar verstehen, muss sich aber stellenweise auf anstrengende Lektüre einstellen, die man nur schwer nebenbei bewältigen kann. Hampe bietet in seinem Werk nichts wirklich Neues und will es wohl auch nicht, dafür aber hat er es mit viel Elan und Verve geschrieben. Detailliert und konkret und sich dennoch nicht in Einzelheiten verbeißend, ermöglicht das Buch einen souveränen Blick über den berühmten Tellerrand.

Patrick Spät

Der Rezensent arbeitet als freier Buchautor und Journalist in Berlin.

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

Preis: € 139,- pro Person;
Sonderpreis für Abonnenten € 129,-

Weitere Informationen und Anmeldemöglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen.





Christian Kreiß
Geplanter Verschleiß
 Europa, Berlin 2014
 238 S., € 18,99

ÖKONOMIE

Gewollter Murks

Christian Kreiß analysiert das Vorgehen der Industrie und resümiert: Durch geplanten Produktverschleiß wird uns das Geld aus der Tasche gezogen.

Kaum ist die Garantiezeit der Kamera abgelaufen, lässt sie sich nicht mehr anschalten: defekt. Brummt der Rasierapparat beim Neukauf noch wie am Schnürchen, macht sein Akku nach ziemlich genau zwei Jahren schlapp; ersetzbar ist er nicht, da fest verbaut. Das gleiche Spiel beim Ventilator – just wenn die Garantieansprüche erlöschen, frisst sich der Motor fest, Diagnose »wirtschaftlicher Totalschaden«. Fälle wie diese treten so oft auf, dass man den Eindruck gewinnen kann, da steckt ein System dahinter.

Tatsächlich ist das nicht von der Hand zu weisen. Wissenschaftler nen-

Auch völlig intakte Produkte können verschlissen sein – indem sie nämlich als veraltet empfunden werden

nen dieses Phänomen »geplante Obsoleszenz«: Ein vorgesehene Versagen von Produkten, das uns Verbraucher dazu drängt, immer wieder neue zu kaufen. Dieser Strategie geht der Volkswirt und Professor für Wirtschaftspolitik Christian Kreiß in seinem Buch »Geplanter Verschleiß« auf den Grund.

Jeder Hersteller wird den Vorwurf gezielter Produktverschlechterung von sich weisen und mancher mag diesen Verdacht als Spinnerei von Verschwörungstheoretikern belächeln, wie auch Kreiß anmerkt. Dennoch ist der Autor fest davon überzeugt, dass geplante Obsoleszenz täglich stattfindet, und untermuert seine gründlich recherchierten

Ausführungen mit der enormen Anzahl von 427 Fußnoten, die seine Darstellungen sehr plausibel machen. Darin erklärt er sauber die Begrifflichkeiten, führt den Leser an zum Teil klassische Forschungsarbeiten heran, gibt hilfreiche Empfehlungen zum weiteren Literaturstudium und führt zahlreiche kritische Presseartikel ins Feld. Sein Buch basiert auf einem Gutachten, das er 2013 für die Bundestagsfraktion der Grünen zusammen mit dem Betriebswirt Stefan Schridde erstellt hatte.

In vier Kapiteln beleuchtet der Autor »Erscheinungsformen«, »Ausmaß und Auswirkungen« sowie »Ursachen« der

geplanten Obsoleszenz und bietet sodann »Abhilfen« an. Schnell wird deutlich: Neu ist das Phänomen nicht. Bereits in 1930er Jahren flog das so genannte Phoebus-Glühlampenkartell auf. Alle großen Hersteller hatten damals die lukrative Absprache getroffen, die Brenndauer ihrer Birnen von 2500 Stunden auf 1000 Stunden zu reduzieren. Mit nachhaltigem Erfolg: Noch Jahrzehnte später wurde auf Glühlampenverpackungen die 1000-stündige Brenndauer als Referenz angegeben.

Geplante Obsoleszenz beschränkt sich jedoch nicht auf gewollte Produktdefekte. Wie Kreiß detailliert ausführt, fallen darunter ebenso funktioneller

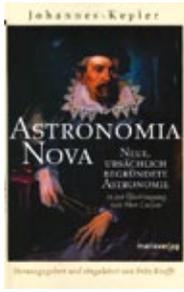
und psychologischer Verschleiß: Das Veralten von Produkten, indem diese zunehmend als obsolet und unmodern empfunden werden. Damit reißt der Autor ein enorm großes Thema an. Eingehend betrachtet er die Rolle der Werbung, hinterfragt das Walten der Medien, beklagt sich über intransparente Märkte und nimmt Befunde von Wirtschaftswissenschaftlern unter die Lupe. Dabei bleibt er durchweg verständlich und in seiner Argumentation nachvollziehbar, auch wenn er sich stellenweise vom eigentlichen Thema des Buchs löst und auch andere Formen des Verbraucherbetrugs darstellt.

In einem eigenständigen Kapitel stellt der Verfasser Berechnungen dazu an, was der geplante Verschleiß kostet. Für Laien sind die Zahlen schwer zu prüfen. Stimmen sie aber auch nur ungefähr, werden den deutschen Verbrauchern durch die perfiden Methoden der Konzerne jährlich mehr als 100 Milliarden Euro aus der Tasche gezogen. Ein durchschnittlicher Arbeitnehmer könnte demnach pro Jahr 14 zusätzliche Tage bezahlten Urlaub nehmen, gäbe es die absichtliche Produktermüdung nicht.

Grund genug für Kreiß, im letzten Kapitel mögliche Abhilfen vorzustellen. Hier ufert das sonst sehr sachliche Buch in seinen politischen Forderungen aus. Kreiß umreißt eine Gesellschaft, die nicht auf Wirtschaftswachstum und Rendite schaut, Werbung per Gesetz einschränkt, auf einer Kennzeichnung von Geräten mit »geplanter Lebensdauer« besteht und Medien so stark staatlicherseits unterstützt, dass sie weitgehend auf Werbeeinnahmen verzichten können. Der Autor zeichnet das Bild einer entschleunigten Welt, in der Produkte nicht weggeworfen, sondern repariert werden. Einer Gesellschaft, die – zu diesen pathetischen Schlussworten versteigt sich Kreiß unnötigerweise – auf dem Weg zu mehr Freiheit, Gleichheit und Brüderlichkeit sei.

Tim Haarmann

Der Rezensent ist Meeresgeologe und arbeitet in Bonn bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft.



Johannes Kepler: Astronomia Nova

☞ (6-5544-9) statt 25.-

nur 14.99

Die "Neue, ursprünglich begründete Astronomie" markiert den Beginn der modernen Astronomie. Kepler (1571-1630) beschreibt darin minutiös seinen langen Weg zum Paradigma Wechsel vom "orbis" zum "orbit", von den riesigen materiellen, sich um das Weltzentrum drehenden Sphären als Trägern der Planeten der älteren und zeitgenössischen Astronomie zu durch natürliche Kräfte erzeugten und den im Zuge dessen abgeleiteten ersten Planetengesetzen folgenden Bahnen und Bewegungen der Planeten. Der Band enthält Keplers "Astronomia Nova" von 1609 in der deutschen Übersetzung von Max Caspar sowie eine ausführliche Einleitung von Fritz Krafft zu Leben und Werk sowie den Gründen, weshalb es 80 Jahre dauerte, bis die Keplerschen Gesetze anerkannt wurden. (SA) 640 Seiten, Format 15 x 22 cm, geb.

PSCHYREMBEL Klinisches Wörterbuch

266. Auflage 2015 ☞ (9-4324-1)

49.95

Das Klinische Wörterbuch ist das Standard-Nachschlagewerk für aktuelles gesichertes medizinisches Fachwissen. Auch in der 266. Auflage dient der Pschyrembel mit seinen umfassenden und fundierten Informationen als erste Anlaufstelle bei medizinischen Fragen! Die neue Auflage bietet: Über 700 neue Fachbegriffe - Mehr als 3000 aktualisierte Stichwörter, u.a. umfassende Aktualisierung der Fachgebiete Anästhesiologie, Intensivmedizin, Notfallmedizin, Schmerztherapie, Katastrophenmedizin, Zahnmedizin u.v.a. Über 400 neue Abbildungen und Tabellen - Berücksichtigung aktueller Leitlinien, Arzneimittel-Zulassungen sowie klinisch relevanter Statistiken und gesetzlicher Neuerungen. 2.384 Seiten, 2.500 Abbildungen, Format 15 x 23 cm, gebunden. (De Gruyter)



Lesch/Gassner: Urknall, Weltall und das Leben

☞ (9-4322-7) statt 29.95

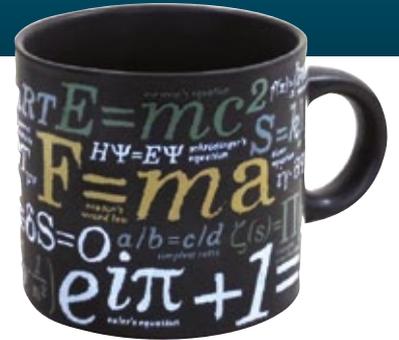
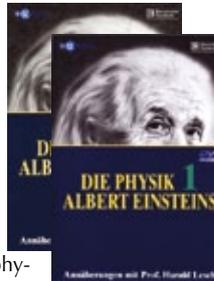
nur 12.90

Das Universum verstehen? Vielleicht ist das zu hoch gegriffen - aber eines können Harald Lesch und Josef M. Gaßner versprechen: Sie erklären die Geheimnisse des Kosmos so verständlich wie nur möglich, ziehen dabei alle Register bis an die Grenzen ihrer eigenen Vorstellungskraft. Nachdem sämtliche notwendigen Begriffe erklärt wurden, beginnt die Expedition an den Rand der Erkenntnis. Wie konnte Alles aus dem Nichts entstehen? Was war vor dem Urknall? Warum gibt es Sterne und Galaxien? Wie ist das Leben entstanden? Diese und viele andere Fragen werden erklärt. (R) 352 Seiten, zahlr. Farbabildungen, Format 15 x 22 cm, geb.

Die Physik Albert Einsteins

2 DVD ☞ (9-4321-8) 34.95

Albert Einstein - Genie, Institution, Weltenbürger und Begründer eines neuen physikalischen Weltbildes. Seine Formel $e = mc^2$ ist die berühmteste Formel der Welt - was sie aber genau bedeutet, erschließt sich nur den wenigsten. Der Physiker Harald Lesch erklärt in acht Folgen die Physik Albert Einsteins - vom Photoeffekt über Schwarze Löcher, Gravitationslinien bis hin zur Bedeutung, die Einsteins Erkenntnisse für unser heutiges Leben haben. 120 Min. Sprache: D



Kaffebecher Formeln

☞ (9-4321-2) 14.90

$E=mc^2$. Die Formel der Relativitätstheorie. Diese und 19 weitere historische Formeln finden Sie auf diesem Kaffebecher, inkl. Namen des Entdeckers.



Roll-E 14 in 1 Solar-Roboter

☞ (9-3864-0)

29.80

Dieser Roboterbausatz ist ein echter Verwandlungskünstler: 14 völlig unterschiedliche Modelle lassen sich damit bauen - alle angetrieben mit Solarenergie. Die Modelle sind in 2 Stufen unterteilt, die verschiedene Schwierigkeitsgrade darstellen - je Stufe gibt es 7 Modelle. Über 200 Bauteile garantieren langanhaltende Bastellust - und Kinder ab 10 Jahren lernen spielerisch den Umgang mit Solarenergie.



Theodore Gray: Die Elemente Bausteine unserer Welt

Wandkalender 2015 ☞ (9-4320-5)

24.99

Der Kalender zum erfolgreichen Buch: Er zeigt eine spannende Auswahl von zwölf Elementen, die Gray in eindrucksvollen Fotografien festgehalten hat. Die ergänzenden Texte nennen die wichtigsten wissenschaftlichen Fakten über deren Entstehung, aber auch zahlreiche Details und Geschichten sowie deren Bedeutung in der Historie der Menschheit. Außerdem findet sich zu jedem Element eine ausführliche Tabelle mit den wesentlichen Angaben zum atomaren Gewicht, zur Dichte sowie zum Schmelz- und Siedepunkt. 14 Blatt, Farbabildungen, Format 45 x 34 cm, Spiralbindung.



Kerzenauto mit Teelicht-Antrieb

☞ (9-4321-1) 39.90

Die Wärme eines Teelichtes reicht aus, um das Kerzenauto fahren zu lassen. Die Kerze heizt ein Thermo-Element auf der einen Seite, Wasser kühlt auf der anderen Seite. Durch den Temperatur-Unterschied wird elektrische Spannung erzeugt, die den Automotor antreibt. Länge: ca. 17 cm. Ab 14 Jahren.



Stück	☞ Bestellnummer/Titel

KEINE GNADE FÜR STREBER

VON WILLIAM MEIKLE

Es war Dienstagfrüh, so gegen zehn Uhr, als sie Johnny Green aus Klasse 3a verwandelten. Er war der Letzte. Sie glaubten, ich hätte nichts bemerkt, und das war gut so. Wer nimmt schon einen Lehrer ernst? Aber ich war den seltsamen Vorgängen nun schon eine Weile auf der Spur.

Alles hatte ganz normal angefangen, bloß der übliche Trott, ein Tag wie der andere im Klassenzimmer – bis die 3a im letzten Monat in Biologie auf den Geschmack gekommen war. Jack Doyle fragte mich nach dem Klonen, und das führte zu einer Diskussion über Ethik und genetisch veränderte Lebensmittel. Was dann folgte, war schon seltsam, denn ausnahmsweise beteiligten sich viele Schüler daran – nicht wie sonst üblich bloß Jack Doyle und Mary Brown.

Mary machte ein besonders neugieriges Gesicht.

»Herr Lehrer«, sagte sie. »Können Sie uns die Parthenogenese erklären?«

»Aber sicher«, sagte ich. »Parthenogenese oder Jungfernzeugung ist eine Form von asexueller Fortpflanzung durch Weibchen, wobei die Entwicklung der Embryos oder Keime ohne männliche Befruchtung vor sich geht. Bei einfachen Pflanzen ist das ganz üblich, und auch bei einigen Schlangen und Amphibien kommt es vor.«

Mary gab sich damit aber noch nicht zufrieden.

»Herr Lehrer, ist es wahr, dass die durch Parthenogenese erzeugten Nachkommen fast immer weiblich sind?«

Ich nickte.

Sie schnippte noch einmal.

Und da geschah es.

Mary Brown flimmerte. Ich sah ein knorriges grünes Ding. Statt einer Hand schwenkte es einen Spross über einem gedrungenen Stamm – einen Spross mit fünf dünnen Zweigen, jeder mit einer harten Dornenspitze.

»Ich möchte lernen«, sagte sie.

»Wir möchten alle lernen«, ergänzte Jack Doyle.

»Unterrichten Sie uns. Unterrichten Sie uns jetzt.«

Mühsam beherrschte ich mich bis zum Ende der Stunde, aber sobald ich die Toilette erreichte, war mir nach Schreien zu Mute. Ich wusch mir das Gesicht mit kaltem Wasser und starrte lange mein Spiegelbild an. Ich sah nicht verrückt aus, aber die Wirklichkeit schien sich langsam zu verflüchtigen.

Am nächsten Tag hatte ich wieder die 3a.

Diesmal wusste ich, wonach ich suchte. Es hatte drei weitere Schüler erwischt, und sie saßen nun auf der linken Seite des Klassenzimmers, neben Jack Doyle und Mary Brown.

Ich begann mit dem Unterricht – über Artentstehung, aber das genügte ihnen nicht. Kaum hatte ich angefan-

gen, schossen schon mehrere Hände hoch.

»Erklären Sie uns, was Mutation ist«, sagten sie im Chor.

»Wie hat der Punktualismus die sprunghafte Evolution der Intelligenz vorangetrieben?«, fragten sie.

Ich hatte keine Ahnung, worauf sie hinauswollten, aber sie lernten schnell.

Während ich meinen Unterricht abhielt, erfuhr ich selbst mehr und mehr. Wenn ich sie aus dem Augenwinkel betrachtete und dabei meine Augen ein wenig unscharf einstellte, konnte ich sie nämlich sehen – nicht ganz klar, aber doch deutlich genug. Sie waren noch immer dieselbe knorrige, grüne, pflanzenähnliche Masse. Doch während sie mir zuhörten, sprossen kleine Triebe und wehten in der Luft. Auf den fleischigen Stämmen schwellen winzige Knötchen und pulsierten. Manche schienen fast zu platzen.

Die anderen Kinder – die Menschenkinder – wussten, dass etwas nicht stimmte. Immer wieder blickten sie abwechselnd zu mir und zu der kleinen Gruppe ihrer scheinbaren Mitschüler.

Ich reagierte aber nicht auf ihre Furcht – ich durfte nicht. Sonst hätte ich damit sofort zugegeben, dass ich wusste, welche Verwandlung in meiner Klasse vor sich ging.

Also hielt ich meinen Unterricht, und sie stellten weiter ihre Fragen.

»Was versteht man unter morphischer Resonanz?«

Da war ich mit meiner Weisheit am Ende. Ich wusste zwar vage, worum es ging, aber nicht mehr, was davon zu halten sei. Zum Glück ging die Stunde bald zu Ende und die Klingel schrillte.

Ich spürte ihre Unzufriedenheit, aber mir ging es nicht anders. In jener Nacht las ich darüber, um mich vorzubereiten. Außerdem schmiedete ich einen Plan.

Als die nächste Biologiestunde für die 3a kam, war nur noch Johnny Green übrig. Er betrat das Klassenzimmer wie ein geprügelter Hund und schlich zu einem Platz weit vorne.

Die anderen waren so selbstsicher, dass sie sich ihn direkt vor meiner Nase schnappten. Während ich vortrug, was ich über morphogenetische Felder gelesen hatte und warum das keine anerkannte Theorie sei, beobachtete ich aus dem Augenwinkel, wie Ranken durch den Raum krochen.

Der junge Johnny sah nicht, was auf ihn zukam. Eine Pustel an einer der grünen Sprossen platzte, und Johnnys Gesicht überzog sich mit einer dünnen Sporenschicht.

Er atmete ein, hustete einmal – und flimmerte.

Sie hatten ihn.

»Erzählen Sie uns von erzwungener Mutation«, baten sie.

»Berichten Sie über genetische Manipulation«, verlangten sie.

»Wir brauchen Variation«, sagten sie einmütig.

Ich brachte ihnen ein neues Wort bei, Ich belehrte sie über Chemomutin, ein chemisches Reagens, mit dem man gezielte genetische Veränderungen herbeiführen könne.

»Variation«, sagten sie. »Unterrichten Sie uns.«

Ich zeigte ihnen ein Gefäß mit einer dickflüssigen Substanz.

»Forscher wissen seit einiger Zeit, wie man Variation in Populationen einbaut«, behauptete ich. »Am besten lässt sich das mit einem Experiment demonstrieren. Ich finde, es ist Zeit, dass wir praktische Arbeit leisten.«

Ranken wogten aufgeregt.

Ich belehrte sie, wie wichtig das Zusammenspiel von Hypothese, Experiment und Datensammeln sei.

Ich brachte ihnen bei, wie man Chemomutin herstellt.

Ich erklärte ihnen, wie das Reagens in jeder Spezies, die es anwendet, natürliche, spontane und vorteilhafte Variation herbeiführt.

Dann tranken sie es.

Zwei Fakten hatte ich ihnen verschwiegen.

Erstens: Sogar Lehrer können lügen.

Zweitens: Biologielehrer wissen, wie man Herbizide herstellt. 🌱

DER AUTOR

William Meikle ist ein schottischer Schriftsteller, der jetzt in Kanada lebt. Er hat 20 Sciencefiction-Romane und mehr als 300 Kurzgeschichten in 13 Ländern veröffentlicht.

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.

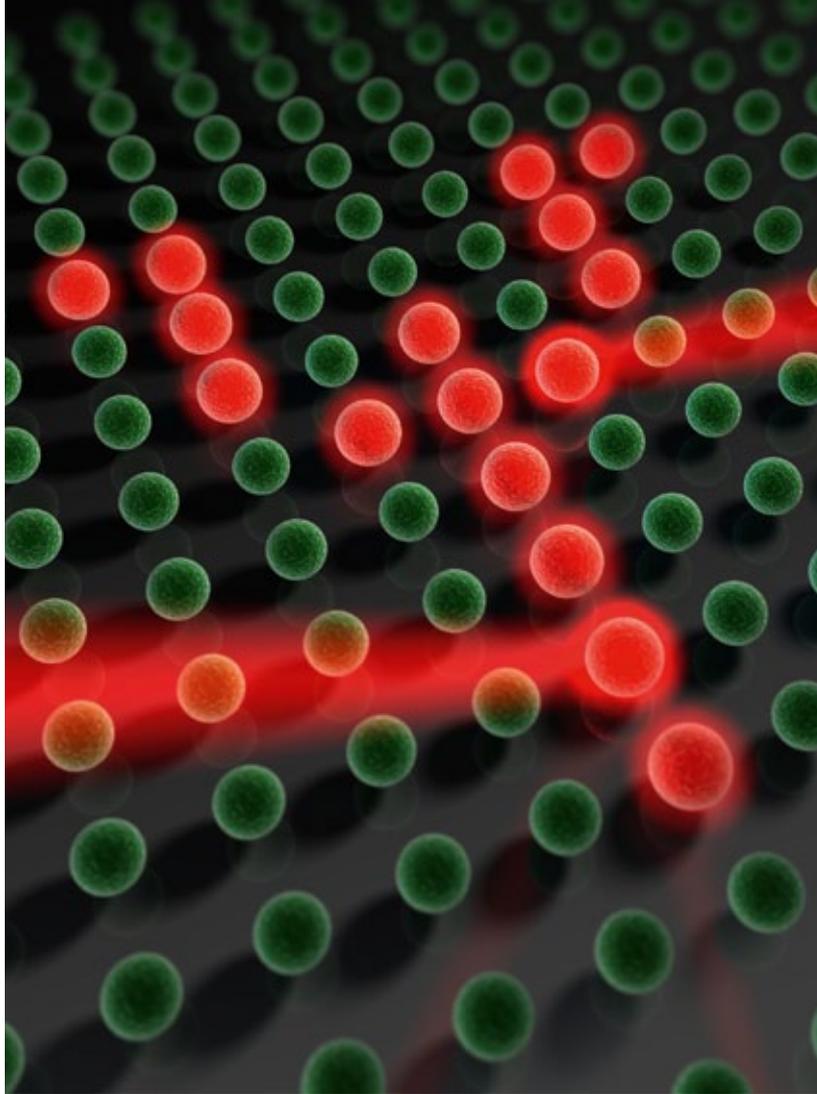
© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 509, S. 656, 29. Mai 2014

Quantensimulatoren

Quantenmechanische Systeme sind extrem komplex und mit Computern nicht berechenbar. Wissenschaftler simulieren daher verschiedene Quantenprozesse mit trickreichen Versuchsanordnungen. So ergründen sie sogar Eigenschaften von Materialien, die es noch gar nicht gibt.



IMMANUEL BLOCH/MPQ

Supercomputer für die Molekularbiologie

Ein Antibiotikum blockiert Ribosomen im Inneren einer Bakterienzelle; ein Medikament greift die Hülle des Aidsvirus an; ein Verbund von Enzymen zerlegt Holz zu Treibstoff. An solchen Prozessen sind so viele Atome beteiligt, dass erst die neuesten Hochleistungsrechner sie simulieren können.

Lernen durch Vergessen

Während wir schlafen, festigt das Gehirn neue Gedächtnisinhalte. Dabei scheinen sich die Nervenzellkontakte jedoch nicht zu verstärken, sondern im Gegenteil abzuschwächen. Diese Umbauprozesse verhindern, dass die Hirnzellen mit tagsüber angesammelten Eindrücken überflutet werden und zu viel Energie verbrauchen.



BADISCHES LANDESMUSEUM (UNIVERSITÄT FÜR ERD- UND UMWELTWISSENSCHAFTEN) VON INA REICHE UND KATHARINA MÜLLER

Archäologie im Labor

Wenn Archäologen vergangene Kulturen erforschen, nehmen sie oft Naturwissenschaftler mit ins Boot. So entwickeln zum Beispiel Physiker und Chemiker spektroskopische Verfahren und Analysemethoden, um die Bemalung assyrischer Elfenbeinschnitzereien zu rekonstruieren oder die Handelswege von Eisenerz zu ermitteln.



NOVA

Tauchroboter erforschen Tiefsee

Moderne automatisierte Unterwasserfahrzeuge erreichen für Menschen unzugängliche Regionen in den Ozeanen und liefern wertvolle Informationen über Wetterparameter, Ökosysteme sowie den Klimawandel.

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.de/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!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter 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.de

GDCh

nano

EIN MAGAZIN DER
GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER



CHANCEN

EINE TECHNOLOGIE
IN DEN STARTLÖCHERN

RISIKEN

GIBT ES EINE KEHRSEITE
DER MEDAILLE?

ZUKUNFT

WENN SCIENCE-FICTION
ZUR REALITÄT WIRD



*»DIE GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER
UND IHRE MITGLIEDER UNTERSTÜTZEN
UND FÖRDERN EINE NACHHALTIGE UND DAUERHAFT
ENTWICKLUNG IN GESELLSCHAFT, WIRTSCHAFT
UND UMWELT. SIE HANDELN STETS AUCH IM BEWUSST-
SEIN IHRER VERANTWORTUNG GEGENÜBER
KÜNFTIGEN GENERATIONEN.«*

Die Wurzeln der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) reichen zurück bis ins Jahr 1867. Damals wurde in Berlin die Deutsche Chemische Gesellschaft gegründet, die nach dem Zweiten Weltkrieg zusammen mit dem 1887 gegründeten Verein Deutscher Chemiker zur heutigen GDCh verschmolz.

Mit mehr als 31 000 Mitgliedern aus Wissenschaft, Wirtschaft und freien Berufen gehört die GDCh zu den größten chemiewissenschaftlichen Gesellschaften der Welt. Sie gliedert sich in 27 Fach-

gruppen, Sektionen sowie weitere Arbeitskreise und Arbeitsgemeinschaften, die spezielle Fachgebiete vertreten. Die rund 9000 Studenten, Doktoranden und Berufsanfänger sind im »JungChemiker-Forum« organisiert.

Die gemeinnützige GDCh hat zum Ziel, die Chemie in Lehre, Forschung und Anwendung zu fördern. Darüber hinaus will sie Verständnis und Wissen von der Chemie sowie von chemischen Zusammenhängen in der Öffentlichkeit vertiefen.

Neben den »Nachrichten aus der Chemie« gibt die GDCh zahlreiche Fachzeitschriften heraus – darunter mit der deutschen und internationalen Edition der »Angewandten Chemie« eine der weltweit renommiertesten überhaupt.

Der »Karl-Ziegler-Preis« und der »Otto-Hahn-Preis« – Letzteren verleiht die GDCh gemeinsam mit der Stadt Frankfurt am Main und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft – zählen zu den höchstdotierten Auszeichnungen für Naturwissenschaftler in Deutschland.

WWW.GDCH.DE

LIEBE LESERINNEN,
LIEBE LESER,

»There's Plenty of Room at the Bottom« – »Unten ist eine Menge Platz«: So überschrieb der Nobelpreisträger Richard Feynman eine Rede vor Mitgliedern der American Physical Society. Was er dann sagte, klang wie Science-Fiction. Denn er sprach von mikroskopisch kleinen Motoren und davon, dass es eines Tages möglich sein würde, einzelne Atome sichtbar zu machen.

Das war im Dezember 1959. Heute können Wissenschaftler mit dem Rasterkraftmikroskop nicht nur einzelne Atome sehen, sondern auch bewegen. Wenn Feynmans Nachfahren jetzt von der Zukunft der »Nanotechnologie« sprechen, geht es um gänzlich neuartige Quantencomputer oder um »Nanofahren«, die sich durch die Blutbahn bewegen und gezielt Krebszellen angreifen.

Damit solche Visionen einmal Wirklichkeit werden, sind vor allem wir Chemiker gefordert. Denn wir sind es, die nach geeigneten Substanzen suchen – und neue erfinden –, die in submikroskopischer Winzigkeit genau die gesuchten Eigenschaften haben. Wir stellen die Materialien her, die als Grundbausteine der neuen Technologie ungeheure Potenziale bergen: für den Umweltschutz, für die Energieversorgung oder im Kampf gegen Krebs.

Doch kein Licht ohne Schatten. Heute schon finden sich Nanopartikel nämlich längst auch in alltäglichen Dingen wie Sonnenmilch, Schuhsprays und Ketchupflaschen. Ob und welche Gefahren sie für Umwelt und Gesundheit darstellen, ist indes noch weitgehend unbekannt. Der technische Fortschritt ist so rasant, dass Risikoforscher mit ihren Bewertungen schlichtweg abgehängt werden.

Auch die Bevölkerung ist nur unzureichend informiert: In einer Studie des Bundesinstituts für Risikobewertung von 2013 gaben zwar gut 67 Prozent der Befragten an, gegenüber der Nanotechnologie ein gutes oder sehr gutes Gefühl zu haben, fast die Hälfte der Befragten räumte aber auch ein, nichts oder nur wenig über die Nanotechnologie zu wissen.

Für die GDCh sind diese Zahlen Herausforderung und Verpflichtung zugleich. Denn als Schlüsseltechnologie wird »nano« in Zukunft für einen Großteil unserer Mitglieder weiter an Bedeutung gewinnen – im eigenen beruflichen Leben und als wirtschaftliche Basis von Unternehmen.

Langfristig wird sie jedoch nur dann erfolgreich sein können, wenn ihre Nebenwirkungen bekannt und schädliche Folgen bestmöglich erforscht sind. Und wenn die breite Öffentlichkeit informiert ist. Mit diesem Magazin wollen wir einen Schritt in diese Richtung tun.

ICH WÜNSCHE IHNEN EINE
ANREGENDE LEKTÜRE!



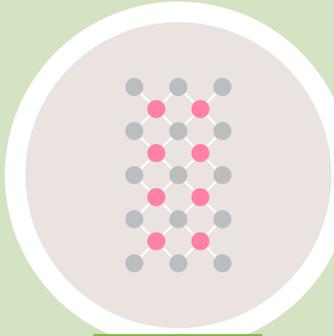
DR. THOMAS GEELHAAR
PRÄSIDENT
GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER

UMSCHLAGBILD

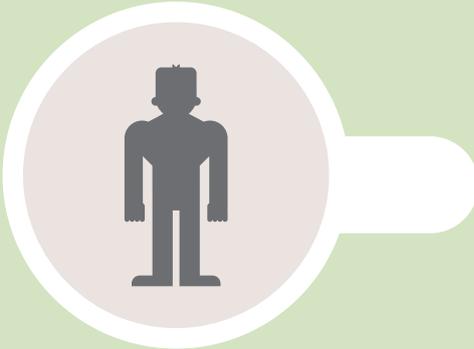
Sogenannte Einschlussverbindung: Im Kristallgitter eines Metalloxids sind Lithiumionen eingeschlossen, während sich die Elektronen im gesamten Partikel verteilen. Solche nano- bis mikrometergroßen Partikel sollen in Batterien und Akkus zum Einsatz kommen.

Mit freundlicher Genehmigung:
Pressefoto BASF SE

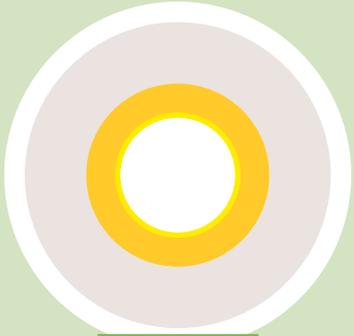
ZEHN HOCH MINUS NEUN



10⁻⁹ METER
NANOPARTIKEL



1 NANOMETER = 1 MILLIONSTEL MILLIMETER



10⁹ METER
SONNE

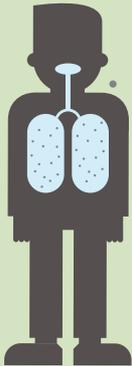
Ein Nanopartikel verhält sich in der Größe zum Menschen in etwa wie der Mensch zur Sonne.



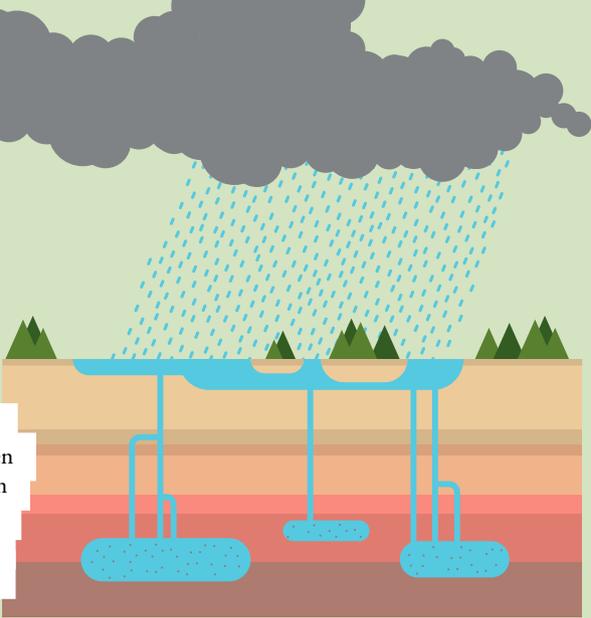
»NANO« KOMMT
AUS DEM
GRIECHISCHEN UND
HEISST »ZWERG«.



Nanofine Rußpartikel und Stäube entstehen in der Natur, vor allem aber durch Industrieanlagen, Automobile und Privathaushalte.

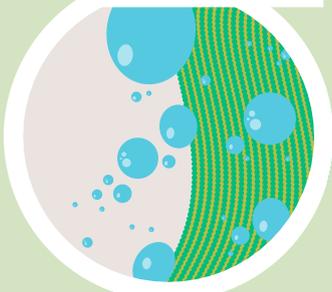


GEFAHREN DURCH NANO?
Geraten Feinstäube beim Einatmen in die Lunge, kann es langfristig zu schweren Schäden kommen. Nanopartikel können sogar in die Blutbahn übergehen. Über die Auswirkungen von Nanopartikeln in Böden und Gewässern ist bis heute indes nur wenig bekannt.



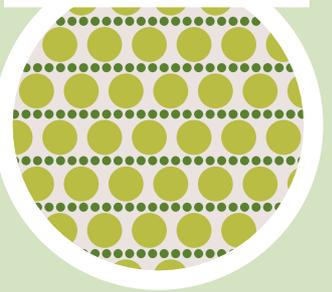
LOTUSEFFEKT

lässt Wasser abperlen.



QUARZPARTIKEL

schützen Lack vor Kratzern.



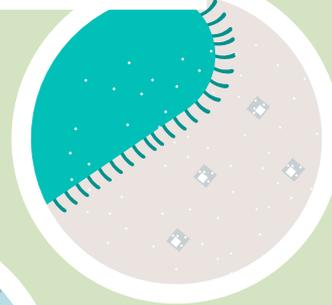
NANOKRISTALLE

sparen Energie beim Aushärten von Beton.



NANOSILBER

wirkt antibakteriell.



TITANDIOXID

absorbiert gefährliche UV-Strahlung.



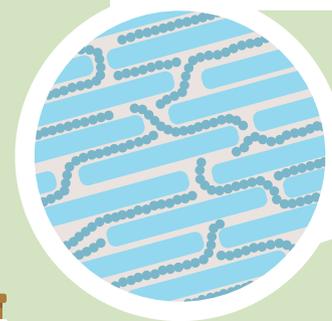
NANOSILIKATE

lassen Ketchup besser fließen.



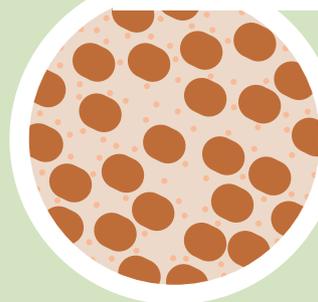
NANOBESCHICHTUNGEN

machen Plastik gasdicht.



SILIZIUMDIOXID

lässt Kaffeepulver rieseln.



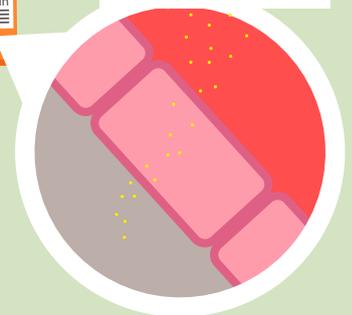
NANOFÄHREN

sollen Arzneien gezielt zu kranken Zellen bringen.



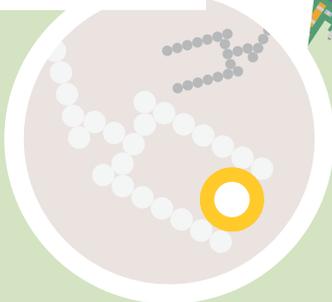
NANOGOLD

soll Krebsmedikamente durch die Blut-Hirnschranke schleusen.



RASTERKRAFTMIKROSKOPE

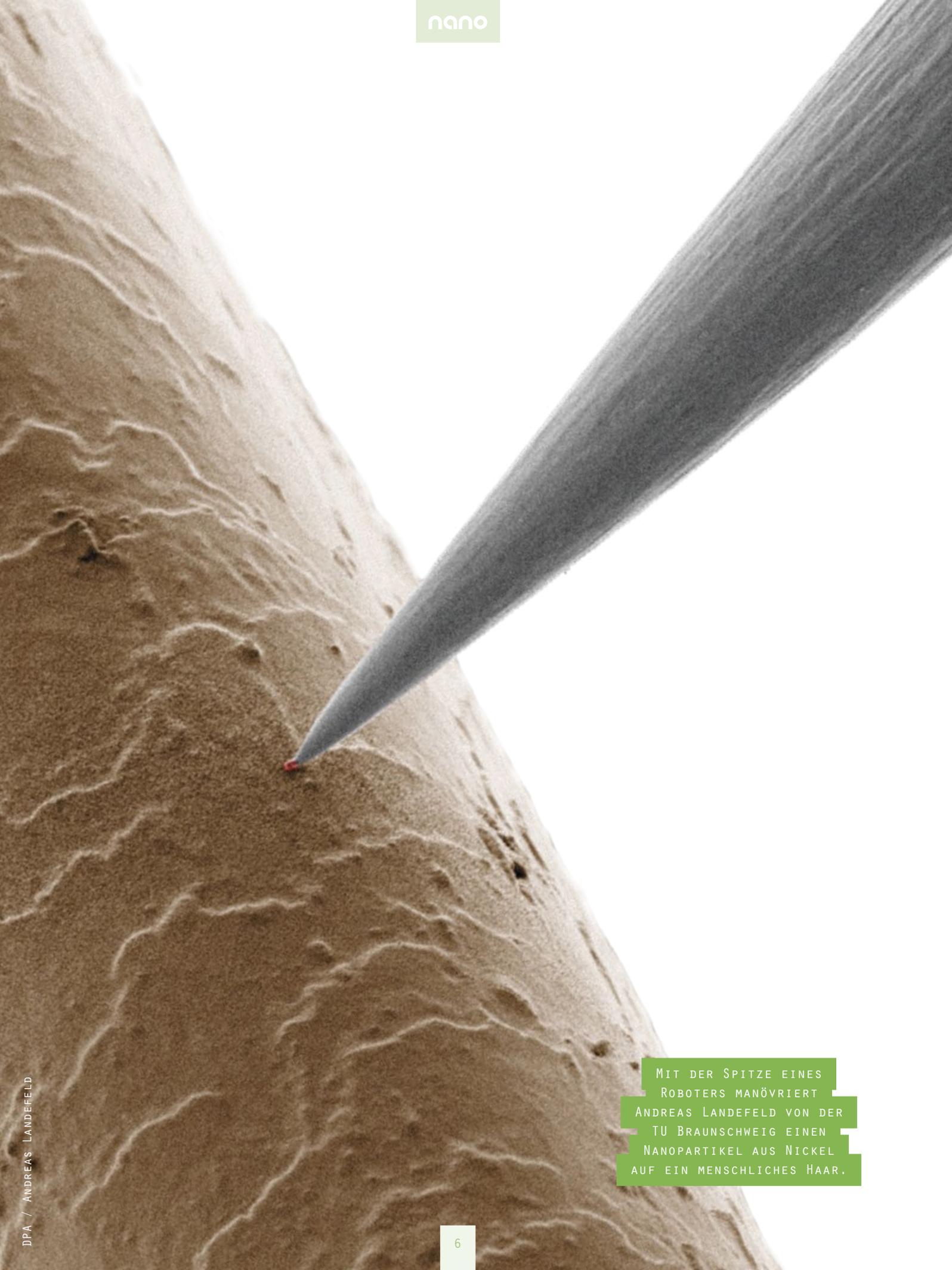
bewegen einzelne Atome.



INSULINGEFÜLLTE NANOKUGELN

könnten das Ende der Spritzerei bei Diabetes bedeuten.





MIT DER SPITZE EINES
ROBOTERS MANÖVRIERT
ANDREAS LANDEFELD VON DER
TU BRAUNSCHWEIG EINEN
NANOPARTIKEL AUS NICKEL
AUF EIN MENSCHLICHES HAAR.

REVOLUTION IM WINZIGEN

NANOMATERIALIEN SIND LÄNGST TEIL UNSERES ALLTAGS:
MAN FINDET SIE IN DEOS, T-SHIRTS UND
TENNISCHLÄGERN. DIE GANZ GROSSEN HOFFNUNGEN
HABEN DIE NANOTECHNOLOGIEN BISHER NICHT ERFÜLLT.
DAS IST ABER WOHL NUR EINE FRAGE DER ZEIT.

Was haben eine Gartenschere, ein Telefon und eine Bierflasche gemeinsam? Natürlich nichts – außer dass diese Gegenstände von ähnlicher Größe sind. Doch würde deshalb jemand auf die Idee kommen, diese und alle anderen etwa gleich großen künstlichen Objekte unter der Überschrift »Zentimetertechnologie« zusammenzufassen?

Der Begriff »Nanotechnologie« steht sogar für noch viel mehr. Er umfasst nicht nur Dinge, die so winzig klein sind, dass sie lediglich unter dem Elektronenmikroskop sichtbar werden, sondern auch eine Vielzahl von Technologien und Materialeigenschaften. Dazu gehören jahrzehntealte und längst industrialisierte Methoden zur Herstellung von nanometergroßen Partikeln ebenso wie die noch im Forschungsstadium befindlichen Computerchips aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die kleiner und leistungsfähiger sein sollen, als herkömmliche Siliziumchips es je sein können.

In vielen Dingen unseres alltäglichen Lebens haben diese Materialien längst Einzug gehalten – in der Sonnencreme mit ihren vor UV-Strahlen schützenden Titandioxid-Partikeln etwa oder in den von innen beschichteten Ketchupflaschen, die das ewige Klopfen auf den Flaschenboden unnötig machen. Das mag nützlich sein, revolutionär sind solche Anwendungen nicht. Um einen Blick in die Zukunft der Nanotechnologien zu werfen, bedarf es daher eines Blicks hinter die Kulissen der Hightech-Labors von Industrie und Forschung. Hier entwickeln Wissenschaftler beispielsweise winzige Käfige aus gefaltetem Erbgutmaterial, die sich schon in rund einem Jahrzehnt mit dem Blut durch den Körper bewegen sollen, um Leukämiezellen zu erkennen – und zu bekämpfen. Andernorts ist es heute bereits möglich, mit Hilfe von Mikroskopen einzelne Atome sichtbar zu machen und diese von einem Ort zum anderen zu bewegen.

Das Einzige, was diese sonst völlig verschiedenen Produkte und Techniken gemein haben, ist die winzige »Nanoskala«, die von einem Nanometer bis 100 Nanometer reicht. Ein Nanometer: Das ist der milliardste Teil eines Meters. Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von ungefähr 50 000 Nanometern, ein Blutkörperchen misst etwa 10 000. Die Größe von Viren liegt zwischen 20 und 100 Nanometern und somit in der Größenordnung der kleinsten Schaltelemente von Mikroprozessoren.

WENN GOLD UNEDEL WIRD
Nun hat der Mensch seine Technologien ja seit jeher stets verkleinert und verfeinert – von grobschlächtigen Mahlwerken über filigrane Uhrwerke bis zu Computerchips mit ihren unsichtbar kleinen Leiterbahnen und Transistoren. Doch in den Nanotechnologien sehen Experten mehr als nur eine Fortsetzung der Miniaturisierung. Denn in den Dimensionen,

von denen hier die Rede ist, geht es nicht nur um die räumliche Verkleinerung. Nein, in dieser submikroskopischen Welt verändern sich auch die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Materialien. Jenes vor UV-Strahlung schützende Titandioxid etwa ist in Sonnencremes nur einsetzbar, wenn die Partikel kleiner sind als 50 Nanometer. Denn dann werden sie durchsichtig und bilden keinen weißen Film auf der Haut.

Ein anderes, besonders eindrückliches Beispiel für diesen Effekt ist Gold. Das Edelmetall gilt eigentlich als chemisch träge: Es reagiert beispielsweise nicht mit Sauerstoff und bleibt somit rostfrei, weshalb man es für Schmuck oder Zahnkronen verwendet. Liegt das Edelmetall jedoch in Form von Nanopartikeln vor, verhält es sich vollkommen gegensätzlich:

Es bindet Sauerstoff- und Wasserstoffmoleküle nicht nur an sich, sondern fördert auch deren Verbindung zu Wasserstoffperoxid. Solche Kuppelmaterialien – Chemiker nennen sie Katalysatoren – sind längst vielfach im Einsatz. Für die Zukunft sehen Fachleute wie Björn Mathes von der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie (Dechema) gerade in diesem Bereich enorme Potenziale: »Mit Hilfe von Nanogold werden wir in der Lage sein, wichtige chemische Zwischenprodukte, beispielsweise für die Herstellung von Kunststoffen, aus nachwachsenden Rohstoffen zu erzeugen.« Angesichts schwindender Erdölressourcen ist das eine verheißungsvolle Botschaft.

Nicht nur Partikel, auch komplexe Strukturen aus Nanomaterialien zeigen

Fähigkeiten, die im makroskopischen Maßstab undenkbar sind. Herkömmliche Materialien wie Halbleiter oder Kunststoffe werden durch periodisch angeordnete nanoskalige Hohlräume zu sogenannten photonischen Kristallen. Diese lenken Licht auf ähnliche Weise wie Halbleiterbauelemente elektrischen Strom. Damit sind »optische Computer« denkbar, die dank der lichtschnellen Weiterleitung von Signalen ungleich schneller rechnen als heutige Computer.

In den Solarzellen der Zukunft werden Stapel aus nanoskaligen Schichten verschiedener Halbleiter zudem das gesamte Wellenlängenspektrum des Sonnenlichts einfangen können. Heutige Zellen nutzen nur einen Teil davon, weshalb ihre Effizienz begrenzt ist. Mit Hilfe der neuen Materialien könnte der Wirkungsgrad auf über 60 Prozent steigen. Zum Vergleich: Moderne Anlagen erreichen kaum 25 Prozent! Wann es so weit ist, vermag jedoch niemand zu sagen – zu hoch sind noch die Hürden der technischen Umsetzung.

GEFANGENE ELEKTRONEN

Die Gründe für die teils gänzlich unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften nanometergroßer Stoffe sind vielfältig. Zu den wichtigsten gehört der Umstand, dass Elektronen neben ihrem Teilchencharakter auch die Eigenschaften einer Welle haben. Werden Elektronen in einen Raum eingesperrt,



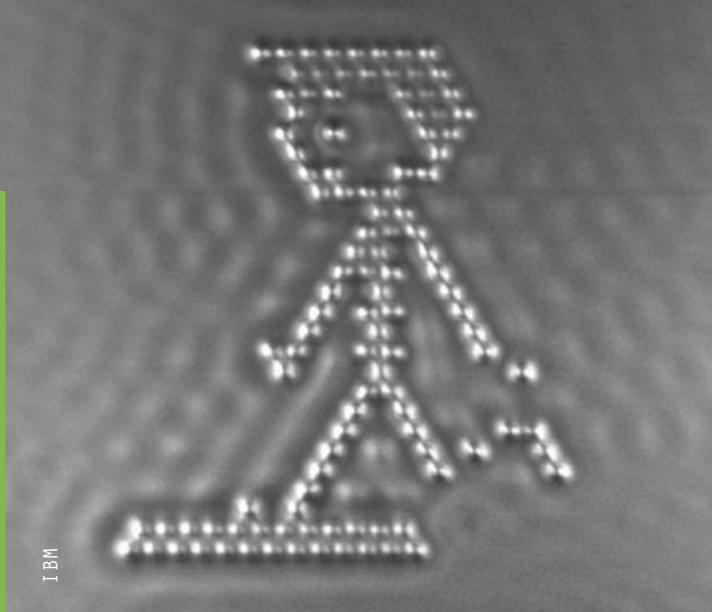
VORBILD NATUR

Auch die Nanowelt ist voller Leben – Beispiele dafür gibt es genug: Geckos können dank nanofeiner Härchen an den Füßen kopfüber die Decke entlanglaufen. Das farbige Schillern von Schmetterlingen beruht auf der Reflexion und Interferenz in den nanoskalig strukturierten Flügelschuppen. Die filigranen Gehäuse der einzelligen Kieselalgen (Bild) dienen Chemikern als Vorbild für künstliche Nanofahren, die eines Tages durch die Blutbahn schwimmen und Medikamente gezielt in erkrankte Regionen schleusen sollen.

»A BOY AND HIS ATOM«

Mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops lassen sich atomare Oberflächen sichtbar machen – und gezielt manipulieren. Forscher des IBM Almaden Research Center haben auf diese Weise einzelne Kohlenmonoxidmoleküle auf einer Kupferplatte hin und her bewegt und von jedem Arrangement ein Foto gemacht. Am Ende entstand daraus der Film »A Boy And His Atom«:

www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml



dessen Größe ihrer Wellenlänge entspricht, ergeht es ihnen ähnlich wie der Saite eines Streichinstruments. Diese kann je nach Länge nur in ganz bestimmter Frequenz schwingen. Da die Wellenlänge von Elektronen im Nanometerbereich liegt, können sie je nach Dicke oder Durchmesser eines Partikels dann auch nur noch einige festgelegte Energiewerte annehmen. Sie ähneln darin Atomen, deren Elektronen ja auch nur definierte Energieniveaus besetzen, die sich von Element zu Element unterscheiden. Unterschiedliche Energien bringen unterschiedliche Eigenschaften mit sich. So variiert beispielsweise die Farbe verschieden großer Nanopartikel.

Dank dieses sogenannten Quanten-Confinements lassen sich »Quantendots« herstellen. Sie entstehen durch die Ummantelung eines Halbleiters mit einem anderen – das Ganze ähnelt einer Kirsche mit Fruchtfleisch und Kern. Die Elektronen des inneren Halbleiters werden durch den äußeren »eingesperrt«. Weil in Quantendots verschiedenen Durchmessers die Elektronen unterschiedliche Energien annehmen, absorbieren und emittieren sie charakteristische Farben. Solche Quantendots können die einzelnen Pixel neuartiger Bildschirme sein. Wegen ihrer Winzigkeit taugen sie für extrem dünne und biegsame Farbdisplays, die keine Hintergrundbeleuchtung benötigen. Das ist keine Zukunftsmusik:

Ein Tablet von Amazon nutzt bereits Quantendots für sein Display.

Ein weiterer Grund für die Andersartigkeit von Stoffen auf der Nanoskala ist die riesige Oberfläche, die beim Zerteilen eines Materials in immer kleinere Partikel entsteht. Ein Beispiel mag dies veranschaulichen: Spaltet man einen Würfel von einem Zentimeter Kantenlänge in nanometergroße Würfelchen, dann ergeben sich alles in allem eine Trilliarde, also 10^{21} Teilchen. Während die Oberfläche des Ausgangswürfels der einer Briefmarke entspricht, sind die Oberflächen der Nanoteilchen zusammen so groß wie ein Fußballfeld.

VIELES IST ZUKUNFTSMUSIK

Technisch interessant ist dies vor allem dann, wenn die Wirkung des Nanomaterials von dessen Oberfläche ausgeht. Denn dann reichen schon äußerst geringe Mengen des Stoffs, um einen Effekt zu erzielen. Nanopartikel aus Silber zum Beispiel geben Silberionen ab, die Bakterien töten, welche Körperschweiß in schlechten Geruch verwandeln. Wenige Milligramm Nanosilber reichen aus, damit ein Paar Socken nicht so schnell stinkt.

Ähnliches gilt für Siliziumdioxid – reinen Quarz also. In Lacken bilden SiO_2 -Partikel zusammen mit Kunststoffmolekülen ein lockeres Netzwerk, das, so Michael Berkei von der Firma

BYK-Chemie, »nicht zerkratzt, sondern nach einer Belastung zurückfedert«. Um diese Wirkung zu erzielen, müsse man dem Lack lediglich ein bis zwei Gewichtsprozent der Siliziumdioxid-Nanopartikel zusetzen.

In Dimensionen von millionstel Millimetern lassen sich also auf Grund der verschiedenen Eigenschaften Materialien und Werkstoffe mit unzähligen neuen Funktionen designen. Deshalb steht »nano« gleichsam als Synonym für Innovationen.

Vieles davon ist allerdings noch Zukunftsmusik. Denn auch wenn die Nanotechnologien bis 2013 in Deutschland 70 000 Arbeitsplätze in über 1000 Firmen gebracht haben: »Killer-Applikationen«, die den Alltag grundlegend umwälzen – so wie das Auto oder das Telefon –, sind daraus noch nicht hervorgegangen. In die Praxis schafften es nur die eher unspektakulären Innovationen, die bereits bestehenden Produkten einen zusätzlichen Nutzen geben und ihren Mehrwert erhöhen. Jene kratzfesten Autolacke gehören dazu, aber auch selbstreinigende Textilfasern, gasdichte Flaschen, antibakteriell beschichtete Kühlschränke oder mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen verstärkte Surfbretter und Tennisschläger. Häufig deutet nur ein kleiner Hinweis auf die Verwendung von Nanomaterialien hin, die der Verbraucher kaum wahrnimmt. Auch das sei, so der Stuttgarter Risikoforscher Ortwin Renn,

ein Grund dafür, dass die Öffentlichkeit der Technologie eher indifferent oder positiv gegenübersteht (siehe S. 16). Probleme mit der Akzeptanz, wie im Fall von Gentechnik oder Atomenergie, gibt es im Fall von »nano« kaum.

Hinter den Türen der Forschungslabors geht es indes um weit mehr als die Trivialitäten des Alltags. Dort wachsen Ideen heran, die wirklich revolutionär sind. Besonders vielversprechend sind dabei Entwicklungen in den beiden gesellschaftlich relevanten Feldern Gesundheit und Umwelt.

Beispiel Chemotherapie: Seit Jahrzehnten suchen Mediziner nach einer Art »magic bullet« – einem Wirkstoff, der im Körper gezielt nur die kranken Zellen trifft, während er den gesunden nicht schadet. Eine herkömmliche Krebstherapie könnte man in ihrer Wirkung mit einer Schrotflinte vergleichen, denn nur ein Teil der über die Blutbahn verabreichten Medikamente erreicht den eigentlichen Tumor, während der Rest gesundes Gewebe schädigt. Schwere Nebenwirkungen und ungewisse Erfolgsaussichten sind die Folge.

Mit intelligenten Substanzen im Nanomaßstab wollen Wissenschaftler eines Tages den Kampf gegen den Krebs gewinnen – und zwar mit Nanopartikeln definierter Größe. Weil in Tumoren die Poren in Blutgefäßwänden im Vergleich zu denen im gesunden Gewebe häufig vergrößert sind, gelangen die entsprechend dimensionierten Partikel nur in die erkrankten Bereiche und beliefern nur sie mit der eigentlichen Arznei. Für diesen gezielten Wirkstofftransport wollen Mediziner Nanopartikel aus Kunststoff oder aus Proteinen verwenden.

Neben diesem passiven entwickeln Forscher auch ein aktives »drug targeting« – damit wollen sie den gezielten Wirkstofftransport noch effizienter machen. Dabei nutzen sie den Umstand, dass erkrankte Zellen an ihrer Oberfläche ganz bestimmte Rezeptormoleküle tragen. Verfügen die Nanopartikel über die passenden Gegenmoleküle, können sie an jene Rezeptoren andocken und sich wie

mit passenden Schlüsseln Zugang zu den Zellen verschaffen. Im Inneren entlassen sie ihre Wirkstoffe und vernichten die Zellen – trojanische Pferde im Nanomaßstab.

Auf die gleiche Weise ließen sich im menschlichen Körper auch biologisch überaus effektive Barrieren überwinden. So gelang es dem Mediziner Jörg Kreuter von der Universität Frankfurt, den Wirkstoff Doxorubicin durch die Blut-Hirnschranke zu schleusen, und weckte damit neue Hoffnung im Kampf gegen einen bislang unheilbaren Hirntumor.

KREBS BEKÄMPFEN – BEVOR ER ENTSTEHT

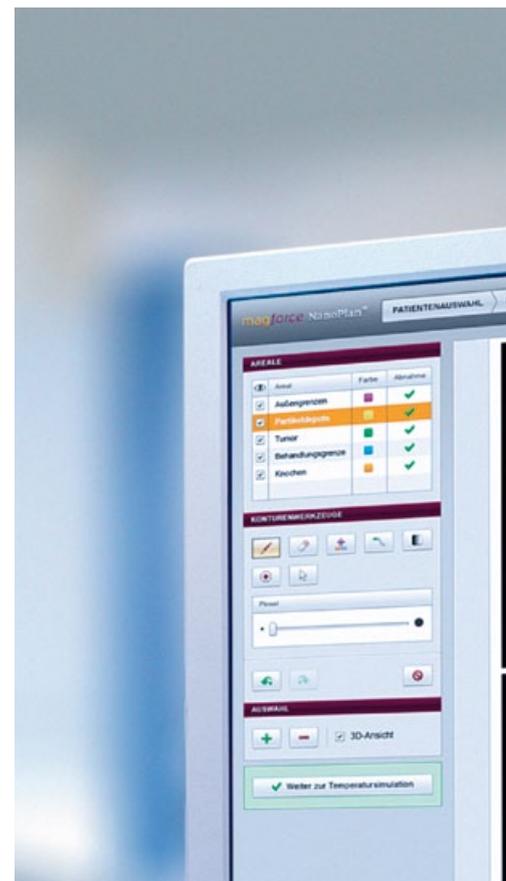
Auch für die Therapie anderer neurologischer Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson oder multiple Sklerose könnten diese Erkenntnisse große Fortschritte bedeuten – zumal sich die Früherkennung solcher Krankheiten dank nanotechnologischer Methoden verbessern wird. Bereits in einem frühen Stadium setzt der Körper nämlich oft ganz bestimmte Moleküle frei, sogenannte Biomarker. Sensoren aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind schon heute empfindlich genug, um einzelne von ihnen nachzuweisen. Eine Kombination vieler solcher Nanoröhrchen, integriert auf einem Biochip, macht es möglich, in einem Tropfen Blut nach einer ganzen Reihe dieser Biomarker zu fahnden – so hätte man ein komplettes Analyselabor auf winzigem Raum.

Die Beispiele zeigen, dass es berechtigte Hoffnungen gibt, aus dem »Reparaturbetrieb Medizin« eine vorsorgende Heilkunst zu machen. Viele der heute schwer belastenden Diagnosen wie Krebs oder Alzheimer verlieren eines Tages vielleicht ihren Schrecken, wenn die Erkrankungen frühzeitig erkannt und mit effizienten und nebenwirkungsarmen Medikamenten behandelt werden können.

Obwohl diese Entwicklungen noch am Anfang stehen, zeigt sich schon heute ein bedeutender Trend. So gab es Anfang 2013 bereits rund 250 nanomedizinische Produkte, von denen 100 zugelassen

waren und der Rest sich in der klinischen Testung befand. Das heißt jedoch nicht, dass die Nanomedizin von heute auf morgen die Kliniken und Praxen erobert: »Die Entwicklung entsprechender Arzneimittel ist teuer und mit einem erheblichen Entwicklungs- und Produktionsaufwand verbunden«, relativiert ein Sprecher des Bundesinstituts für Arzneimittel und Medizinprodukte. Hinzu kommen langwierige Zulassungsverfahren, so dass es wohl noch Jahre, vielleicht auch Jahrzehnte dauern wird, bis aus den Hoffnungen der Forscher reale Arzneimittel werden. Dass es diesen revolutionären Wandel in der Medizin eines Tages geben wird, daran zweifelt indes kaum jemand.

Eine ähnlich vielversprechende Zukunft dürften Nanotechnologien beim Schutz der Umwelt haben. So stellt das Ludwigshafener Chemieunternehmen BASF spezielle Nanopartikel her, die Beton schneller aushärten lassen. Das bei der Herstellung von Betonfertigteilen kostspielige Erwärmen könnte so entfallen. »Europaweit eingesetzt, ließen sich allein mit dieser Technik jährlich bis zu 2,7 Millionen Tonnen Kohlendioxid



einsparen«, sagt Martin Möller vom Freiburger Öko-Institut. Zum Vergleich: Der CO₂-Ausstoß der Stadt Stuttgart beträgt derzeit rund 3,3 Millionen Tonnen pro Jahr.

Schon bald könnten Nanotechnologien auch den regenerativen Energien zum Durchbruch verhelfen. Neben den bereits erwähnten Solarzellen dürften insbesondere die Windkraftanlagen der Zukunft deutlich effizienter werden. Denn nanokleine Kohlenstoffröhrchen verleihen den mächtigen Rotorblättern mehr Stabilität – in Zukunft werden sie deshalb größer und dennoch leichter sein

(je größer die Rotoren sind, umso höher ist auch die erzeugte Energie pro Anlage – also deren Effizienz).

Und damit sich der so erzeugte Strom noch besser speichern lässt, arbeiten Wissenschaftler an neuartigen Batterien, die dank Nanomaterialien über mehr Kapazität, eine längere Lebensdauer und komfortablere Ladeigenschaften verfügen. Die grundlegende Schwäche heutiger Elektroautos stünde der nachhaltigen Entwicklung der Elektromobilität nicht mehr im Weg.

Da die preiswerteste Energie aber immer noch die ist, die gar nicht erst

verbraucht wird, ist die Effizienzsteigerung der vielleicht größte Beitrag der Nanotechnologien. So schätzten Forscher um Jochen Lambauer von der Universität Stuttgart, dass der deutsche Energieverbrauch bis 2030 allein durch Nanotechnologien um bis zu 6,7 Prozent oder rund 170 Terawattstunden sinken könnte. Auf diese Weise könnte hierzulande somit mehr als die gesamte Strommenge eingespart werden, die im Jahr 2007 von sämtlichen Atomkraftwerken erzeugt wurde (140,5 Terawattstunden).

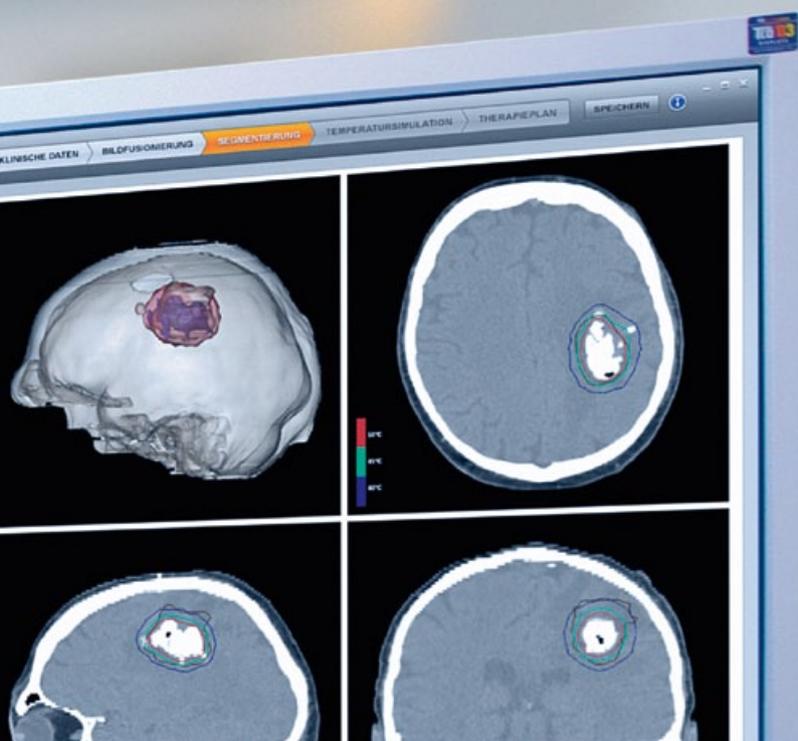
Ähnlich große Hoffnung setzen Forscher in das Potenzial der Nanotechnologien, wenn es darum geht, giftige Substanzen durch weniger schädliche oder gar unproblematische zu ersetzen. Oder wenn sich der Ausstoß von Schadstoffen verringern und ihr Abbau verbessern lässt. Ein typisches Beispiel ist das antibakteriell wirksame Nanosilber, das für Wasserlebewesen viel weniger gefährlich ist als Triclosan, welches als Bakterienhemmer in vielen Kosmetika und Funktionstextilien zu finden ist. Die Silberpartikel dürften schon bald auch die bedenklichen Biozide in Holzschutzmitteln oder Farben ersetzen.

Zur Reinigung von Abwässern oder Aufbereitung von Trinkwasser – weltweit haben rund 800 Millionen Menschen keinen Zugang zu sauberem Wasser – sollen künftig vermehrt Filter mit nanoskaligen Poren eingesetzt werden. Da sie Viren und Bakterien zurückhalten, versprechen sie insbesondere in den armen und entlegenen Gegenden der Welt eine effiziente und praktikable Wasseraufbereitung. Organische Schadstoffe im Grundwasser sollen sich mit Hilfe von nanofinem Eisen in unschädliche Stoffe verwandeln lassen.

»Die Zukunft ist Nano«, so überschrieb der Chemiekonzern Bayer 2007 eine Pressemeldung. Seither haben sich unzählige nanotechnologisch optimierte Produkte im Alltag etabliert – manche mit großem, viele mit eher zweifelhaftem Nutzen. Die wirklich große Zukunft steht der Technologie aber noch bevor. 

HEISSES EISEN GEGEN KREBS

Bei dem an der Berliner Charité entwickelten NanoTherm-Verfahren werden magnetische Nanopartikel direkt in einen Tumor injiziert und anschließend in einem magnetischen Wechselfeld erwärmt. Die Eisenoxid-Partikel sind nur 15 millionstel Millimeter groß und mit einer Aminosilanschicht umgeben – so lassen sie sich leicht im Wasser verteilen: In einem Milliliter schweben bis zu 17 Billionen davon. Durch die Erwärmung der Partikel auf bis zu 80 Grad Celsius kann der Tumor entweder direkt zerstört oder derart geschädigt werden, dass ihm in der anschließenden Bestrahlung oder Chemotherapie der Garaus gemacht wird.



TICKT DA EINE ZEITBOMBE?

DASS NANOPARTIKEL AUF GRUND IHRER BESONDEREN EIGENSCHAFTEN NICHT NUR NÜTZLICH, SONDERN AUCH SCHÄDLICH SEIN KÖNNEN, LIEGT AUF DER HAND. ABER DIE TECHNOLOGISCHEN ENTWICKLUNGEN SCHREITEN SO RASCH VORAN, DASS EINE BEWERTUNG DES RISIKOS FÜR MENSCH UND NATUR KAUM MÖGLICH IST.

Jeder Jeck ist anders«, sagen die Rheinländer. Und das beschreibt treffend auch die Vielzahl von Substanzen, die die Grundlage der Nanotechnologie bilden. Die Frage: »Sind diese Nanomaterialien gefährlich?« lässt sich somit genauso wenig pauschal beantworten wie die Fragen: »Sind Chemikalien gefährlich?« oder »Sind Getränke ungesund?« Zwei Liter Mineralwasser am Tag haben eine andere Wirkung als die gleiche Menge Limonade.

Im alltäglichen Leben kommen wir derzeit mit rund 100 000 künstlich hergestellten Stoffen in Berührung. Besonders besorgniserregend, weil gesundheits- oder umweltgefährdend, sind davon einige hundert. Um die Risiken chemischer Produkte abzuschätzen, schreibt der Gesetzgeber vor ihrem Einsatz in der Regel umfassende Tests und Unbedenklichkeitsnachweise vor. Für Nanomaterialien gibt es solche Regelwerke bisher jedoch nicht.

Risikoforscher wie Ortwin Renn von der Universität Stuttgart kritisieren das (siehe S. 16). Denn was die Partikel technologisch interessant macht – die infolge ihrer Winzigkeit besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften –, könnte sie auch zur Gefahr werden lassen. Die Nanomedaille hat somit, davon sollten wir unbedingt ausgehen, eine Kehrseite.

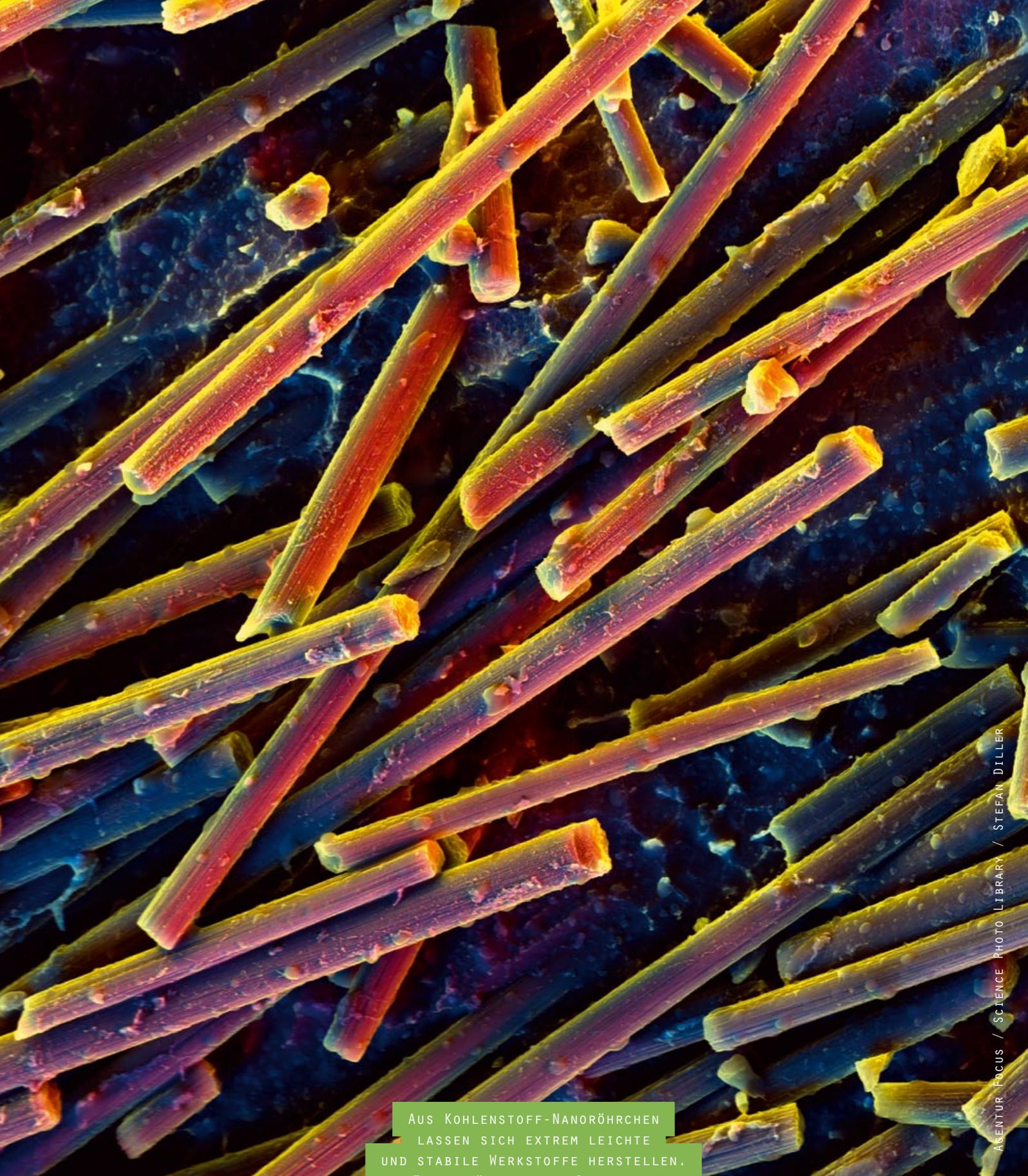
KEINE »SMOKING GUN«

Wie berechtigt diese Sorge ist, demonstrierte im Jahr 2005 als Erster Guenther Oberdoerster vom University of Rochester Medical Center. Sein Team hatte Ratten und Mäusen Partikel aus Titandioxid in die Luftröhren injiziert: Einige der Tiere bekamen 20 Nanometer, die anderen 250 Nanometer große Teilchen. In allen Fällen kam es in der Folge zu Entzündungen der Lunge. Bei den feineren Titandioxid-Partikeln waren die Schäden indes viel schwerwiegender – obwohl sie

in einer geringeren Dosis verabreicht worden waren. Grund dafür: Das feinere Material hat eine viel größere und somit reaktivere Oberfläche als das gröbere.

Alarmierende Ergebnisse kamen im Jahr 2008 auch von Ken Donaldson von der University of Edinburgh. Er hatte Kohlenstoff-Nanoröhrchen in die Bauchhöhle von Mäusen injiziert, wo daraufhin Entzündungen und knötchenartige Narben, so genannte Granulome, entstanden. Beide Symptome gelten als Vorstufen von Lungenkrebs.

Schließlich fanden jüngst Forscher um Ralf Schulz vom Institut für Umweltwissenschaften Landau an der Universität Koblenz-Landau heraus, dass sich Wasserflöhe, die Titandioxid-Nanopartikeln ausgesetzt wurden, nicht mehr häuteten und schlechter bewegten. Außerdem beobachtete das Team, dass die nachfolgende Generation der kleinen Krebse nicht etwa Resistenzen ausbildete, sondern sogar noch empfindlicher auf die



AUS KOHLENSTOFF-NANORÖHRCHEN
LASSEN SICH EXTREM LEICHTE
UND STABILE WERKSTOFFE HERSTELLEN.
ZUDÉM DÜRFTEN SIE GRUNDLAGE
ZUKÜNFTIGER SUPERCOMPUTER
SEIN. DOCH BERGEN SIE WOMÖGLICH
AUCH GEFAHREN FÜR UMWELT
UND GESUNDHEIT.

GUTES SILBER, SCHLECHTES SILBER

FOTOLIA / MARKUS BORWANN



Das Edelmetall wird insbesondere wegen seiner bioziden Wirkung geschätzt.

In Krankenhäusern schützen entsprechend beschichtete Schläuche vor gefährlichen Keimen. Zweifelhaft ist jedoch der Nutzen von Nanosilber im Alltag. Denn Mikroorganismen sind nicht per se schlecht und für die natürlichen Gleichgewichte sogar unabdingbar. Der breite Einsatz von silberbeschichteter Bekleidung kann beispielsweise die Bildung resistenter Keime fördern – vor allem, wenn die Partikel in die Umwelt gelangen. So fanden Forscher von der Swedish Chemicals Agency KEMI heraus, dass das Nanosilber aus Funktionswäsche nach dreimaligem Waschen etwa zur Hälfte, nach zehn Waschgängen fast vollkommen verschwunden war.

Nanopartikel reagiert als ihre Eltern. Woran das liegt, wissen die Forscher bisher nicht. Als Bestandteil von Sonnencremes ist nanofines Titandioxid bereits in Badeseen nachweisbar – die für den Menschen als weitgehend unbedenklich geltende Zutat kann in solchen Gewässern somit durchaus Schaden anrichten.

Bislang sind solche Auswirkungen die Ausnahme. Zu diesem Schluss kommen jedenfalls Frank von der Kammer von der Universität Wien und Harald Krug von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt in St. Gallen. Die beiden haben die bisher veröffentlichten Publikationen zur Nanotoxikologie ausgewertet – insgesamt mehrere tausend Artikel. »Smoking guns« haben wir dabei nicht gefunden«, sagt der Umweltchemiker von der Kammer, der sich mit den ökologischen Auswirkungen von Nanomaterialien befasste.

»Smoking guns«, damit meint er Stoffe, die nur auf Grund ihrer geringen Größe besonders toxisch werden. Krug, der sich mit den Gefahren für die Gesundheit beschäftigt, bestätigt seinen Kollegen. Bis auf wenige Ausnahmen konnte auch er kein Nanomaterial identifizieren, das »nur annähernd so gefährlich ist wie Cadmium oder Asbest«.

Als Entwarnung wollen diese Ergebnisse aber weder von der Kammer noch

Krug missverstanden wissen. Denn noch klaffen in der Erforschung derart große Lücken, dass sich eine seriöse Abschätzung des Risikos verbietet. Vor allem die längerfristigen Folgen für Mensch und Umwelt durch Nanomaterialien sind derzeit weitgehend unerforscht. Die meisten der Studien drehen sich stattdessen immer wieder um die gleichen Themen. Dass Silber-Nanopartikel giftige Silberionen abgeben, sei besorgniserregend, aber schon lange bekannt – das tun auch größere Silberpartikel. Ebenso sei es wenig überraschend, so von der Kammer, dass Cadmium enthaltende Quantendots das giftige Schwermetall abgeben können. Oder dass Titandioxid-Nanopartikel unter Sonneneinstrahlung die Bildung freier Radikale katalysieren, die ihrerseits entzündlich wirken. »Deshalb werden Nanopartikel in Sonnencremes heutzutage mit einer Schutzschicht versehen.«

VON DER LUNGE INS BLUT

Das Gros der Studien genüge zudem nicht den grundlegenden Standards toxikologischer Forschung, kritisiert Krug. Meist verwendeten die Wissenschaftler beispielsweise nur einzelne, meist sehr hohe Dosierungen – anstatt zu untersuchen, wie die Wirkung sich mit unterschiedlichen Dosen verändert. Da in

der Natur oder im Körper meist wesentlich niedrigere Dosen zu erwarten seien, taugten die Ergebnisse nicht für eine seriöse Risikoabschätzung.

Immerhin zeige die Fachliteratur aber, wo die Nanotoxikologen genauer hinschauen müssen. Die zentrale Frage sei, so Harald Krug in seiner jüngsten Publikation, ob künstlich hergestellte Nanomaterialien biologische Barrieren wie die Haut, die Blut-Luft-, die Darm-Blut- oder die Blut-Hirn-Schranke überwinden können. Während gesunde Haut Nanopartikel in bisherigen Tests nicht passieren ließ, gebe es »starke Hinweise«, dass eingeatmete Nanomaterialien durchaus über die Lunge ins Blut und damit in die Organe gelangen. Allerdings schaffe es in der Regel nur ein »sehr kleiner« Teil der eingeatmeten Dosis ins Blut. Der Großteil werde durch natürliche Reinigungsprozesse aus der Lunge entfernt und ausgeschieden.

Möglich ist auch die Aufnahme über die Darmwand. Über diese biologische Barriere schaffen es unterschiedliche Nanomaterialien unterschiedlich gut – nach Angaben des Max Rubner-Instituts in Karlsruhe sind es zwischen fast null und knapp 40 Prozent der verabreichten Dosis. »In der Regel sind es jedoch nur einige Promille«, wie Wolfgang Kreyling während seiner Arbeit am Helmholtz

Zentrum München herausgefunden hat. Partikel mit mehr als einem Mikrometer Durchmesser hingegen finde man im Blut gar nicht, sagt der Biophysiker und bestätigt damit, dass Nanomaterialien im Körper beweglicher sind als größere Partikel.

Wenngleich die bisherigen Studien auf eine nur geringe Aufnahme der Teilchen schließen lassen, sieht Harald Krug darin keinen Grund zur Entwarnung. Denn über die Langzeitfolgen sagen diese Zahlen nichts. Der Toxikologe fürchtet daher, dass sich solche Substanzen im Lauf eines Lebens in den Organen anreichern und diese womöglich langfristig schädigen. Hier sieht er dringenden Anlass für weitere Forschungen.

Auch hinsichtlich der Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt gibt es Grund zur Sorge. Denn eine Ausbreitung in Atmosphäre, Gewässern und Böden ist denkbar – und in einigen Fällen sogar nachgewiesen. Die meisten Nanopartikel, so Frank von der Kammer, werden zwar auf Grund ihrer Oberflächeneigenschaften und hohen Reaktivität im Boden rasch gebunden. Er fordert aber, vor allem bei neuen Stoffen frühzeitig über deren Wirkungen auf Ökosysteme zu forschen.

Die rasante Entwicklung der Nanotechnologien ist dabei für die Toxikologen

und Umweltforscher eine riesige Herausforderung. Über die langfristigen Folgen für Umwelt und Gesundheit durch cadmiumhaltige Quantendots etwa ist bis heute kaum etwas bekannt.

Für Harald Krug ist dieses Beispiel auch Anlass für Kritik an den Strukturen der eigenen Disziplin. So beklagt er, dass in Deutschland in der Vergangenheit viele Lehrstühle aufgelöst wurden. Es gebe einen riesigen Nachholbedarf, wobei die Entwicklung von theoretischen Modellen zur Wirkungsweise von Nanomaterialien verschiedenster Art besonders dringlich sei. Mit ihrer Hilfe könnten Vorhersagen über Giftigkeit oder Mobilität bestimmter Nanoteilchen auf der Basis ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften gemacht werden.

Nachholbedarf gibt es auch in den analytischen Möglichkeiten. Zum einen liegt das an der häufig geringen Konzentration künstlicher Nanopartikel in der Umwelt, zum anderen lassen sich künstlich hergestellte Nanopartikel nur schwer von natürlich vorkommenden unterscheiden, was die Risikobewertung weiter erschwert. Auch in Produkten sind Nanomaterialien schwierig zu identifizieren. Denn dort verbergen sie sich inmitten vieler anderer Komponenten,

etwa zwischen den übrigen Zutaten einer Sonnencreme.

Selbst wenn es gelingt, die Konzentration künstlicher Nanomaterialien zu bestimmen, ist dieser Wert von zweifelhaftem Nutzen. Denn die Gefährlichkeit der Nanomaterialien steht ja nicht, wie bei anderen Giften, in unmittelbarem Zusammenhang mit der Dosis. Vielmehr ist letztlich eine Vielzahl chemischer und physikalischer Eigenschaften für die positive, aber auch die negative Wirkung von Nanomaterialien entscheidend.

DIE KOSTEN-NUTZEN-FRAGE

Dass die Kritik aus den Reihen der Wissenschaft nicht gänzlich folgenlos bleibt, zeigt das Projekt »NanoDefine« der Europäischen Union. Zehn Millionen Euro stellt sie bereit, um neue Analysetechniken und Standardverfahren zu entwickeln. Doch angesichts der zukünftigen Bedeutung dieser Schlüsseltechnologie erscheint diese Summe nur als Tropfen auf dem heißen Stein. Damit ist der Wettlauf mit den Fortschritten industrieller Forschung nicht zu gewinnen.

Dabei könnte jeder jetzt investierte Euro in sichere Nanotechnologien auch deren Zukunft sichern. Fragt man die deutsche Bevölkerung heute nach ihrer Einschätzung des Risikos der Nanotechnologien, dann erhält man überwiegend positive und in weitaus geringerem Maß negative Antworten. »Gleichwohl ist ein beträchtlicher Teil der Bevölkerung diesbezüglich noch unentschieden«, heißt es 2013 im Abschlussbericht des NanoView-Projekts des Bundesinstituts für Risikobewertung.

Wachsame Wirtschaftsvertreter, die Nanoprodukte mit geringem Nutzwert einsetzen und somit vom guten Image der Technologie profitieren, könnten dies durchaus als Warnung verstehen. Sollte sich eines Tages nämlich wirklich zeigen, dass die Silberpartikel aus unseren Socken oder die Nanoteilchen aus der Ketchupflasche uns oder der Umwelt schaden, dann ist das Vertrauen der Verbraucher rasch verspielt – und die eigene Zukunft womöglich auch. ☺

NANO AUF DEM TISCH

Nanopartikel lassen Salz und Tütensuppen rieseln oder werden als Aufheller in Arzneien und Zahnpasta eingesetzt. Bald könnten essbare Beschichtungen aus Titandioxid den Grauschleier von Schokolade verhindern oder Obst haltbarer machen. Werben lässt sich mit diesen Eigenschaften jedoch nicht. Denn wie das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) 2013 im Rahmen des NanoView-Projekts herausfand, ist die große Mehrheit der Befragten gegen Nanoteilchen in Lebensmitteln. Wenn es allein um die Ansehnlichkeit von Lebensmitteln geht, sind sogar 84 Prozent dagegen. Kein Wunder also, dass sich Nahrungsmittelhersteller vehement – und bisher erfolgreich – gegen eine entsprechende europaweite Kennzeichnungspflicht wehren.

»SO BLEIBT DIE ENTSCHEIDUNG BEIM KONSUMENTEN ...«

DER STUTTGARTER RISIKOFORSCHER ORTWIN RENN
FORDERT EINE SCHÄRFERE ÜBERWACHUNG, WENN ES UM
NANOPARTIKEL IN NAHRUNGSMITTELN ODER
KOSMETIKA GEHT. DOCH DAS IST AUF GRUND DER
VIELFÄLTIGEN EIGENSCHAFTEN DIESER TEILCHEN
NICHT SO EINFACH.

Die Herstellung und der Einsatz nanome- tergroßer Partikel gehören zu den Schlüs- seltechnologien des 21. Jahrhunderts. Wie steht die Öffentlichkeit dieser Entwick- lung gegenüber?

Die Stimmung in der Bevölkerung zur Nano-
technologie ist überwiegend positiv oder in-
different. Der Grund dafür ist einfach: Einer-
seits werden Anwendungen im Alltag noch
kaum wahrgenommen, andererseits gab es bis
heute keine spektakulären Vorkommnisse, die
ein schlechtes Licht auf die Nanotechnik hät-
ten werfen können. Und so überwiegt wohl
die Faszination für diese Technologie.

Könnte diese Stimmung kippen?

Ängste werden sicher geweckt, wenn es um
den eigenen Körper oder Eingriffe in die Na-
tur geht. Die Gentechnik etwa – gleichfalls
eine Schlüsseltechnologie – stößt aus diesem
Grund in weiten Teilen der Bevölkerung auf
Ablehnung. Das größte Akzeptanzproblem
von Nanopartikeln liegt im Bereich Gesund-
heit – beispielsweise wenn die Gefahr be-
steht, die feinen Teilchen einzuatmen. Auch
in Lebensmitteln oder Kosmetika wollen die
meisten Menschen diese Substanzen lieber
nicht sehen. In solchen Fällen sind die Ver-

braucher natürlich sensibel und verlangen
eine vom Vorsorgeprinzip getragene Regula-
tionspolitik.

Wie lässt sich denn das gesundheitliche Risiko überhaupt bewerten?

Hier liegt in der Tat unser größtes Prob-
lem: der Nachweis einer toxikologischen
Wirkung. Tatsächlich besteht bei Nano-
partikeln zum einen die Gefahr, dass sie al-
lein auf Grund ihrer geringen Größe po-
tenziell die schützende Blut-Hirn-Schranke
überwinden oder die Membranen von Zellen
durchdringen können. Zum anderen aber
gibt es – anders etwa als bei gelösten Stoffen
im Blut – bei Nanopartikeln eben keinen
unmittelbaren Zusammenhang zwischen
der Höhe der Dosis und der Intensität der
Wirkung.

Dann sind standardanalytische Verfahren, wie sie beispielsweise in der Lebensmittel- kontrolle üblich sind, ungeeignet?

Genau, denn bei Nanopartikeln spielt die
Konzentration eine untergeordnete Rolle.
Entscheidend sind ihre Wechselwirkungen
mit biologischen Systemen, die sich etwa aus
der Reaktivität der extrem großen Oberflä-

chen ergeben. Inzwischen gibt es zwar erste
Regelwerke, mit denen sich diese reaktiven
Eigenschaften von Nanopartikeln beweren
lassen, doch fehlt es bis heute an einer
systematischen und anerkannten Methodik,
die sich daraus ergebenden gesundheitlichen
Risiken abzuschätzen.

Welche Konsequenzen müssen daraus ge- zogen werden?

Es ist wichtig zu wissen, dass es gerade nicht
nur auf die Größe, sondern vor allem auch
auf die tatsächliche Wirkung der Partikel an-
kommt. Wenn Grenzwerte einzig auf der Grö-
ße basieren, könnten insbesondere Hersteller
im Lebensmittelbereich einfach etwas größere
Partikel einsetzen – beispielsweise solche,
deren Durchmesser mehr als 100 Nanometer
beträgt. Zwar hätten diese ebenfalls die ge-
wünschten Eigenschaften, wären aber formal
keine Nanopartikel mehr. Nur blieben dann
auch die Risiken weitgehend unverändert.
Daher wäre es sinnvoll, die Eigenschaften
und Wirkungsweisen solcher Materialien zum
Maßstab der Bewertung und damit auch der
Regulierung zu machen. Das Problem liegt
also weniger in der Diagnostik als im Fehlen
klarer Definitionen.



ZUR PERSON

Ortwin Renn ist Soziologe, Volkswirt und Risikoexperte. Er hat den Lehrstuhl für Technik- und Umweltsoziologie an der Universität Stuttgart inne und ist Mitglied des acatech-Präsidiums. Darüber hinaus leitet Renn das gemeinnützige Forschungsinstitut »Dialogik« und ist als Politikberater tätig – unter anderem für den Präsidenten der Europäischen Kommission. Kürzlich erschien von ihm: »Das Risikoparadox. Warum wir uns vor dem Falschen fürchten« (siehe S. 23).

Unterdessen geht der Einsatz neuer Materialien weiter.

Ja, zumal Nanopartikel mittlerweile in unzähligen Produkten vorkommen. Zum Beispiel in Ketchup: Solange es nicht verboten ist, mit Hilfe von Nanoteilchen dessen Fließeigenschaften zu optimieren, so lange gibt es dieses Produkt auch zu kaufen. Obwohl die Welt sicher ohne eine derart veränderte Tomatensoße leben könnte und dieses Risiko damit leicht vermeidbar wäre. Aber so bleibt die Entscheidung beim Konsumenten – und das bedeutet, dass wir zumindest eine vollständige Transparenz über die Zusammensetzung von Produkten fordern müssen.

Anderes Beispiel: Jahrelang waren Imprägniersprays für Schuhe auf dem Markt, vor denen Lungenärzte heute warnen. Gibt es gerade im Bereich der Konsumgüter nicht eine fatale Trial-and-Error-Kultur?

Auch dieses Beispiel illustriert das Problem der Nutzen-Risiko-Abwägung bei Innovationen, die einerseits von geringem Nutzen und andererseits weit verbreitet sind. Die Hersteller vertreten den Standpunkt, dass der gesellschaftliche Nutzen eines Produkts kein Maßstab dafür sein dürfe, was in diesem Produkt enthalten ist. Staatlichen Paternalismus lehnen sie ab. Wir Risikoforscher fordern indes klare Richtlinien für die Bewertung von Risiken, die auch zu einem Verbot entsprechender Produkte führen können. Wir denken, dass bei dieser Entscheidung auch der Nutzen für die Gesellschaft eine Rolle spielen sollte.

Nun gibt es in einer freien Wirtschaft naturgemäß auch Märkte für unnötige Anwendungen von Nanoteilchen. Wie könnte im Gegenzug die Risikoforschung gestärkt werden?

Indem zum einen die öffentlich finanzierten Universitäten und Forschungsinstitute weiterhin genügend Ressourcen bereitstellen. Und zum anderen, indem Hersteller und Anwender zu systematischen Überwachungen verpflichtet werden, so dass sie eventuelle Nebenwirkungen frühzeitig erkennen – und im schlechtesten Fall eben auf den Einsatz von Nanopartikeln verzichten.

Das hört sich nach freiwilliger Selbstkontrolle durch die Industrie an.

Ja, aber nur zum Teil. Wir halten es weiterhin für sinnvoll, bei einer gewissen Unsicherheit über mögliche Folgen das staatliche Vorsorgeprinzip anzuwenden und die Hersteller zu zwingen, ein Produkt erst dann zu vermarkten, wenn unabhängige Forscher signifikante Auswirkungen ausschließen. Natürlich bliebe selbst dann ein Restrisiko – etwa, dass auch unterhalb des Signifikanzniveaus unliebsame Effekte auftreten können oder noch unbekannte Wirkungen zu Tage treten. Gerade deshalb fordern wir die systematische Überwachung.

Diese Überwachung müsste auf politischer Ebene durchgesetzt werden. Hier gilt es jedoch, zwischen Experten, Industrie und Gesellschaft zu vermitteln. Wie kann das gehen?

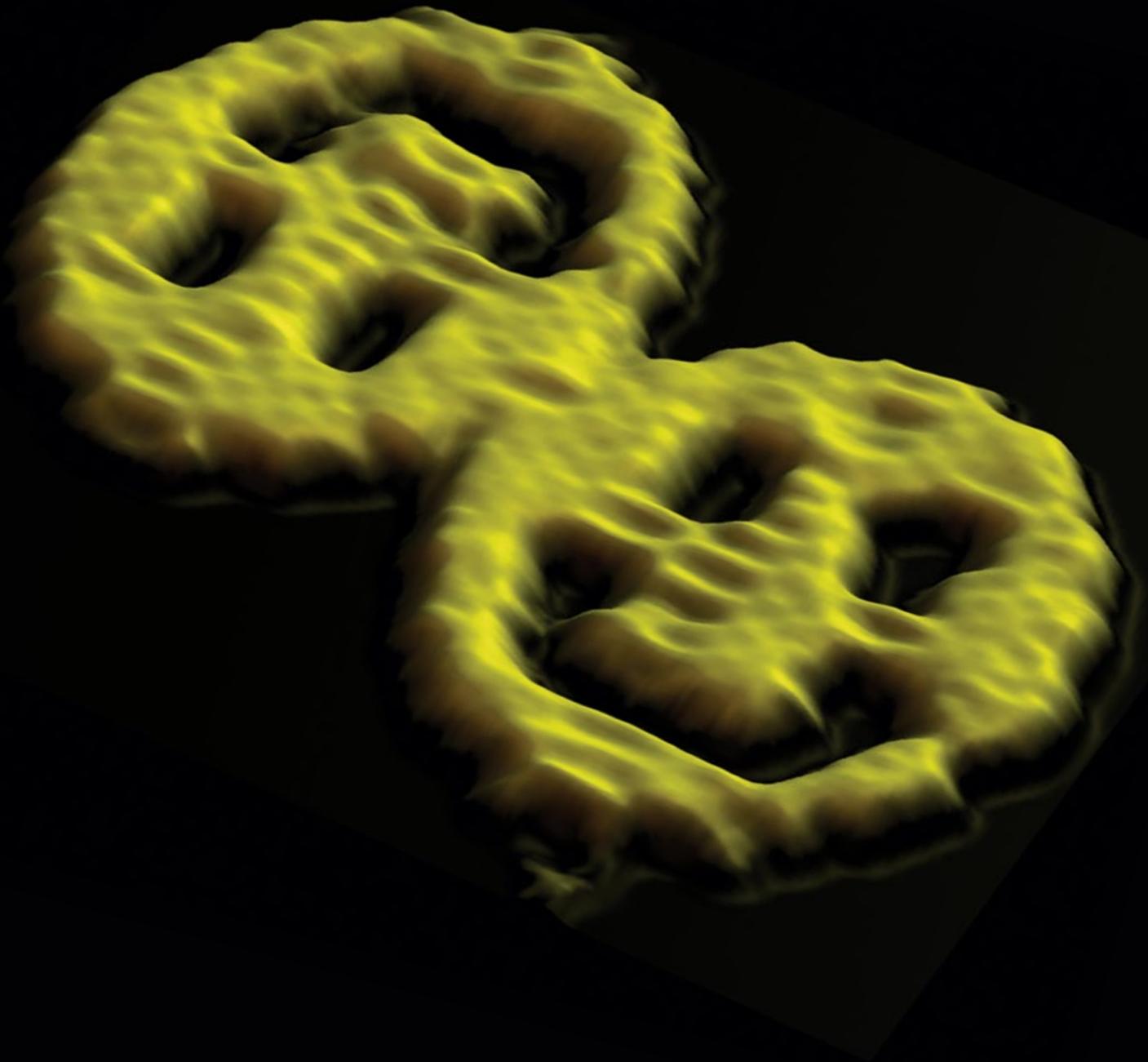
Wenn politische Entscheidungen allein auf Expertenurteilen basieren, entsprechen sie selten den Anforderungen an eine nicht nur sachlich gerechtfertigte, sondern gleichzeitig auch sozial verträgliche Lösung – das hat die Vergangenheit immer wieder gezeigt. Deshalb erwarten wir von unseren demokratisch legitimierten Vertretern, dass sie neben den rein fachlichen Argumenten auch gesellschaftliche Wertvorstellungen und Präferenzen beachten.

Politiker sind indes meist wissenschaftliche Laien. Müssen sie sich bei ihren Entscheidungen denn nicht allein auf die Expertise der Fachleute verlassen können?

Nein, Wissenschaftler sind ja moralisch keineswegs bessere Menschen. Die Fachleute haben eine Bringschuld, wenn es um die Charakterisierung von Risiken geht. Ob diese aber akzeptabel sind und ob das Verhältnis von Risiko und Nutzen positiv zu bewerten ist, darf nicht von Forschern und auch nicht von Unternehmern bestimmt werden. Das muss entweder kollektiv vom Gesetzgeber oder – im Einzelfall – von den Verbrauchern selbst beurteilt werden. In beiden Fällen, also bei der staatlichen Regulierung und der persönlichen Gefahrenvorsorge, ist die Transparenz über Nutzen und Risiko Grundvoraussetzung für eine vernünftige Entscheidung.

Und welche Verantwortung sehen Sie bei den Unternehmen?

Der gute Ruf der Nanotechnologie ist ja für sie ein hohes Gut. Er sichert ihnen den Verkauf ihrer Produkte. Schon aus diesem Eigeninteresse sollten bei ihnen die Transparenz über die Zusammensetzung sowie die akribische Überwachung der Risiken während der Produktion erste Priorität haben. Und sie sollten den Mut haben, sich zu fragen, ob der Nutzen eines Nanomaterialien enthaltenden Produkts das Risiko wirklich rechtfertigt – auch wenn dies bedeutet, auf kurzfristige Marktgewinne zu verzichten. ☺



DNA-KOMPLEXE LASSEN SICH IN
BEINAHE BELIEBIGE FORMEN
FALTEN – ZUM BEISPIEL IN
100 NANOMETER GROSSE SMILEYS.

KEINE SCIENCE-FICTION!

WENN ES UM DIE NANOTECHNOLOGIE DER ZUKUNFT GEHT,
IST DIE NATUR DAS GROSSE VORBILD. SCHON JETZT KÖNNEN
FORSCHER IM LABOR BEDINGUNGEN SCHAFFEN, UNTER
DENEN SICH ATOME UND MOLEKÜLE SELBSTSTÄNDIG
ZU NEUEN STRUKTUREN ZUSAMMENFINDEN.

Während Nanomaterialien heute vor allem die Eigenschaften bereits bekannter Produkte verbessern, werden sie in Zukunft die Grenzen heutiger Techniken sprengen und bisher Unmögliches möglich machen. Nehmen wir das Beispiel der Kohlenstoffröhrchen: Der Werkstoff ist 50-mal so zugfest wie Stahl und doch nur ein Sechstel so schwer. Zu größerem Einsatz kommt er bisher aber nur in Surfbrettern oder Tennisschlägern – und das ist wie Perlen vor die Säue zu werfen. Das Problem: Als Zuschlag in Kunststoffen liegen die Röhrchen wirt durcheinander (Bild S. 13) – man bräuchte eine Art »Nanokamm«, mit dem sie sich gleichmäßig ausrichten lassen, so dass ihre Festigkeit gezielt genutzt und ihr riesiges Potenzial vollständig ausgeschöpft werden kann. Ob und wann es einen solchen Kamm geben wird, vermag bislang aber niemand zu sagen.

Es zeigt sich also: Die Herstellung neuartiger Nanomaterialien ist das eine. Sie maßzuschneidern eine ganz andere.

Anschauliches Beispiel dafür, wie die einzelnen Steine eines Nanobaukastens zu etwas funktionellem Neuen zusammengesetzt werden könnten, zeigten Wissenschaftler um Huisheng Peng von der Fudan University in Shanghai. Sie überzogen feine Stahldrähte mit Nanopartikeln aus Titandioxid, auf dem sie ihrerseits das Halbleitermaterial Calciumtitanat abschieden. Auf Grund der riesigen Oberfläche der Partikel entstanden auf diese Weise effiziente Solarzellen, die sich in Stoffen verarbeiten lassen, preiswert herzustellen sind und kleinere elektronische Geräte versorgen können.

Solche und andere funktionelle Materialien sind laut dem »nano.DE-Report 2013« der Bundesregierung bei der zukünftigen Entwicklung der Nanotechnologie von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Hier gilt es beispielsweise, antibakterielle Wirkstoffe dauerhaft in Lacke, Farben oder auf andere Oberflächen einzubringen, so dass sie weder ausgewaschen werden noch ausdampfen. Auch Beschichtungen mit schaltbaren

Eigenschaften räumt der Bericht großes künftiges Marktpotenzial ein. Darunter fallen etwa Klebstoffe, die sich bei Anlegen eines Magnetfelds lösen. Oder »Geckskin«, eine Entwicklung von Forschern um Al Crosby von der University of Massachusetts. Dabei handelt es sich um Haftstreifen nach dem Vorbild des Geckofußes. So wie das Reptil einzig dank Adhäsion kopfüber an der Decke laufen kann, vermag ein kreditkartengroßes Stück »Geckskin« gut 130 Kilogramm Gewicht zu tragen (Bild S. 20).

Überhaupt wird die Natur immer mehr zum Vorbild – insbesondere wenn es darum geht, auf atomarer und molekularer Ebene Neues zu erschaffen. »Zu den ganz großen Themen der kommenden 20 Jahre«, sagt der Nanotechnologieexperte Uwe Hartmann von der Universität des Saarlandes, »gehört sicher die gezielte Nutzung molekularer Prozesse der Selbstorganisation.« Gemeint ist die selbstständige Anordnung von Molekülen und Atomen zu ganz bestimmten Strukturen. Auf diese Weise entstehen

etwa die Organellen und Strukturen in den Zellen, und so falten sich auch die Proteine in genau die dreidimensionale Form, die sie für ihre Funktion, beispielsweise als Enzym, benötigen. Auch die helixförmige DNA findet auf diese Weise ihre Form. Dass diese sich in erstaunlichem Maß künstlich manipulieren lässt, zeigte Paul Rothemund vom California Institute of Technology in Pasadena: Stimmen im Reagenzglas die Zutaten und Rahmenbedingungen, dann faltet sich die DNA in beinahe jede zwei- oder dreidimensionale Form – von selbst, ohne weiteres äußeres Zutun. Anfang 2010 zeigte er im Wissenschaftsmagazin »Nature« Bilder von DNA-Komplexen, die sich in 100 Nanometer große Smileys gefaltet hatten (Bild S. 18). »Das ist wie Kuchenbacken – ohne dass man sich um die Mengen der einzelnen Zutaten kümmern muss«, schwärmt Rothemund, der den Begriff »DNA-Origami« prägte.

Was die Zukunft der künstlichen DNA-Faltung bringen wird, lässt sich kaum absehen. Denkbar sind künstliche Ribosomen, die gezielt bestimmte Enzyme erzeugen. Solche DNA-Strukturen könnten auch die Grundlage nanoelektrischer Stromkreise sein. Kurt Gothelf von der Universität Aarhus in Dänemark stellte 2009 in »Nature« ein 42 mal 36 mal 36 Nanometer großes Behältnis vor, das sich aus DNA gefaltet hatte und mit Hilfe eines DNA-Schlüssels öffnen und schließen ließ.

Vielleicht erlauben solche Container einmal den gezielten Arzneitransport im Körper. So wie auch die Dendrimere (von griechisch: dendron = Baum), chemische Verbindungen, deren Moleküle stufenweise wachsen und sich baumartig verzweigen. Im dichten Geäst der maßgeschneiderten Dendrimere entstehen Hohlräume unterschiedlicher Form und Größe, in denen beispielsweise modifizierte Antikörper enthalten sein können, die in ultraviolettem Licht fluoreszieren. Treffen die Dendrimere im Körper auf Krebszellen mit den passenden Antigenen, werden diese durch die leuchtenden Antikörper sichtbar.



Mit Hilfe der Selbstorganisation können aus nano- auch makroskalige Dinge werden. So gelang es Forschern um Monika Fritz von der Universität Bremen bereits, Perlmutter synthetisch herzustellen. Dieses Material ist dank seiner komplexen inneren Struktur von großer Härte und zugleich überaus zäh – zwei Eigenschaften, die sich in künstlichen Materialien nur schwer vereinen lassen. In der Muschelschale sind sie einer nanoskaligen Sandwichstruktur zu verdanken, in der sich Schichten aus Calciumcarbonat und einem organischen Mix aus Chitin und Proteinen abwechseln. Die Bremer Forscher sehen ihr künstliches Perlmutter in ungiftigen Beschichtungen von Schiffsrümpfen, verträglichen Zahnprothesen oder kugelsicheren Westen.

Auch die Biochemiker um Thomas Scheibel von der Universität Bayreuth arbeiten an der Synthese eines Naturstoffs mit einzigartigen Eigenschaften: der Spinnenseide. Die hauchdünnen Fäden sind reißfester als Stahl und zugleich dehnbar wie Gummi. Diese gleichfalls unmöglich erscheinende Kombination liegt im nanostrukturellen Aufbau faden- und quaderförmiger Proteine

begründet. Die aus biotechnologisch erzeugten Proteinen bestehenden Fasern der Bayreuther Forscher tragen den markigen Namen »Biosteel« und übertreffen ihre natürlichen Pendanten in ihren mechanischen Eigenschaften sogar. Eines Tages könnten sie beispielsweise zu biologisch abbaubaren Fischernetzen verarbeitet werden. Auch unzählige medizinische Anwendungen sind denkbar.

»CARBON VALLEY«

Wenn von den ganz großen Versprechen der Nanotechnologie die Rede ist, fällt neben »Selbstorganisation« meist auch der Begriff »Nanocomputer« – hyperschnelle Rechner, deren Herz nicht mehr aus herkömmlichen Siliziumchips besteht. Da die permanente Miniaturisierung der Computertechnologie und die damit verbundene Leistungssteigerung mit derzeitiger Technik allenfalls weitere 10 bis 15 Jahre gewährleistet sind, arbeiten Wissenschaftler in aller Welt mit Hochdruck an nanoelektronischen Entwicklungen – insbesondere auf der Basis von Kohlenstoff: Aus »Silicon Valley« könnte »Carbon Valley« werden.

In besagten Nanoröhrchen etwa bewegen sich Elektronen rund 100-mal schneller als in herkömmlichen Bauteilen auf Siliziumbasis. In den Labors hantiert man gerade erst mit einzelnen Bausteinen der neuen Technologie. So berichteten Forscher um Andreas Heinrich vom kalifornischen IBM Almaden Research Center Anfang 2012 in »Science«, wie sie ein Speicherbit herstellten – aus nur zwölf Eisenatomen. Zum Vergleich: Auf heutigen Festplatten belegt ein Bit ungefähr eine Million Atome. Ein Team um Max Shulaker von der Stanford University ging noch einen Schritt weiter und stellte im Herbst 2013 in »Nature« einen Computer aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen vor. Wenngleich er nur aus gerade einmal 178 Transistoren besteht und kaum mehr als ein paar Zahlen sortieren kann (auf heutigen Siliziumchips befinden sich einige Milliarden Transistoren), überschrieb Franz Kreupl

von der Technischen Universität München seinen Kommentar zu Shulakers Arbeit optimistisch mit »The carbon-nanotube computer has arrived«. Und resümiert: »Wenn wir Shulakers Nanoröhrencomputer weiterentwickeln, werden wir schon bald auf einem tippen.« Wer weiß, vielleicht gerade rechtzeitig, wenn die siliziumbasierte Computertechnologie in 20 Jahren am Ende ihrer Miniaturisierung angekommen ist.

Eine vielversprechende Alternative zu den Nanoröhren ist Graphen. Das nur eine Atomlagen dicke, extrem leichte und zugleich zähste aller bekannten Materialien leitet Strom und Wärme bestens – und verfügt zudem über einzigartige elektronische Eigenschaften. Noch ist Graphen extrem schwierig herzustellen und entsprechend teuer: Ein briefmarkengroßes Stück kostet einige zehntausend Euro. Diesen Wunderstoff alltagstauglich zu machen, ist daher Ziel vieler Forscher – unter anderem der Arbeitsgruppe um den Chemiker Klaus Müllen vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Sie können bereits Graphenschichten herstellen, an deren Rändern jedes Atom genau am richtigen Platz sitzt. Für den Einsatz in Computerchips ist diese Präzision notwendig, umsetzbar ist sie bisher allerdings nur mit großem Aufwand und in kleinem Umfang. Auch jene IBM-Forscher brauchten Tage, um mit dem Rastersondenmikroskop aus zwölf Eisenatomen ein einziges Bit zusammenzubauen. Für einen Computerhersteller ist das natürlich ein absurdes Unterfangen.

Doch wer weiß, ob sich das nicht bald schon ändert. Im April 2014 stellte ein Team um Jonathan Coleman vom Trinity College Dublin in Irland im Fachblatt »Nature Materials« eine Methode vor, mit der sich Graphen vielleicht in großem Stil herstellen lässt – und zwar mit eindrucksvoll simplen Mitteln: Die Forscher hatten ein paar Esslöffel Graphit in einen halben Liter Wasser gemischt, einige Spritzer

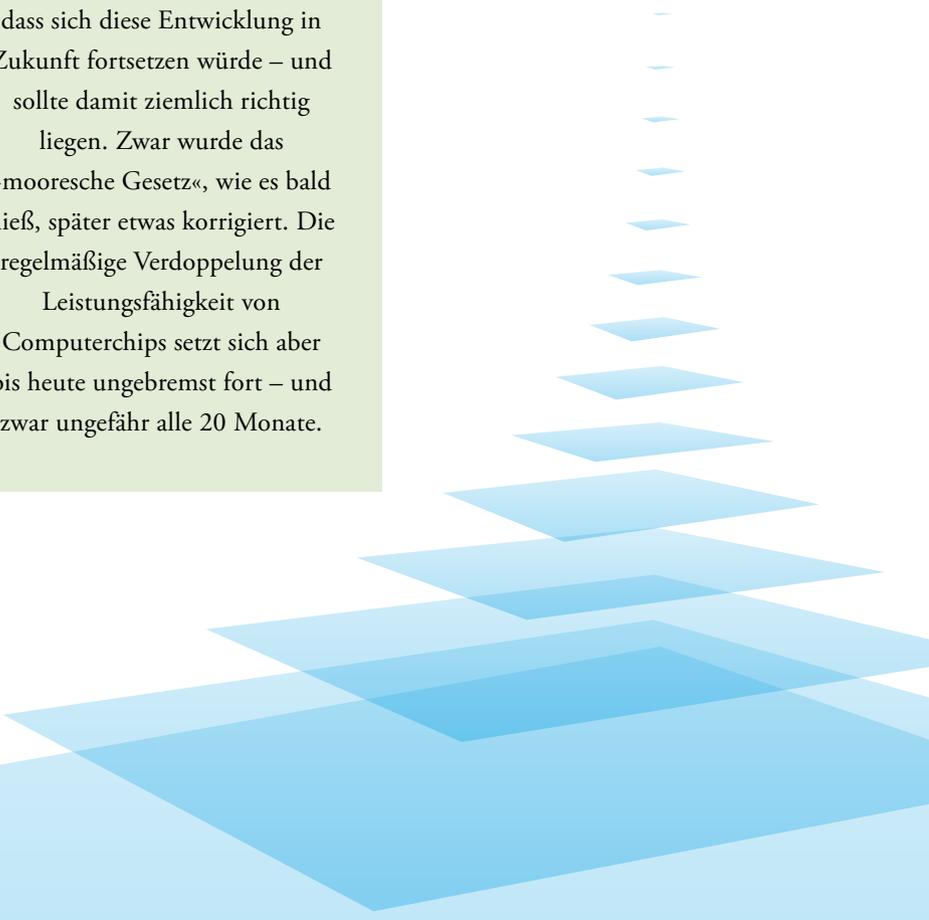
Spülmittel hinzugegeben und das Ganze für eine halbe Stunde in einer normalen Küchenmaschine ordentlich durchgemixt. Am Ende fanden sie »eine große Zahl mikrometergroßer Graphenflocken«, die wohl nicht von höchster atomarer Präzision waren, aber belegen, dass auch Nanotechnologie nicht immer Hightech sein muss.

Vielleicht werden es eines Tages ohnehin ganz andere schaffen, hochwertiges Graphen in größeren Mengen

IMMER SCHNELLER!

Vor 50 Jahren entdeckte der amerikanische Chemiker und spätere Mitbegründer des Halbleiterkonzerns Intel, Gordon Moore, dass sich die Anzahl der elektronischen Bauteile einer integrierten Schaltung in der Vergangenheit in jedem Jahr verdoppelt hatte. Er prognostizierte daraufhin, dass sich diese Entwicklung in Zukunft fortsetzen würde – und sollte damit ziemlich richtig liegen. Zwar wurde das »mooresche Gesetz«, wie es bald hieß, später etwas korrigiert. Die regelmäßige Verdoppelung der Leistungsfähigkeit von Computerchips setzt sich aber bis heute ungebremst fort – und zwar ungefähr alle 20 Monate.

herzustellen. Dann nämlich, wenn es Biochemikern gelingt, die DNA von Bakterien entsprechend zu programmieren. Nanobauteile würden dann in Reaktoren der chemischen Industrie »heranwachsen«.

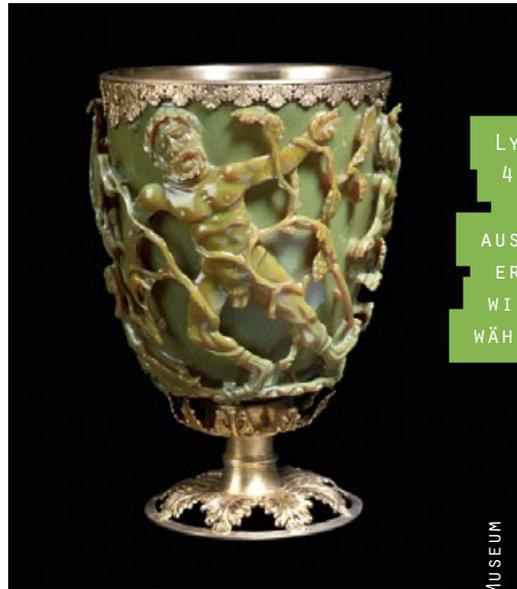
»There's Plenty of Room at the Bottom« – »Unten ist eine Menge Platz«, so hatte der Physiker und spätere Nobelpreisträger Richard Feynman Ende 1959 einen Vortrag überschrieben, in dem er über die Miniaturisierung der Technologien sprach und Mikroskope vorhersah, mit denen man Atome sehen und manipulieren kann. Damals klangen seine Ausführungen so visionär, dass sein Vortrag rasch in Vergessenheit geriet. Erst Anfang der 1990er Jahre entdeckte man die Aussagen Feynmans ein weiteres Mal – nämlich, als sein vorhergesagtes Mikroskop zur Manipulation von Atomen Wirklichkeit geworden war. Heute gilt Feynman als einer der Begründer der Nanotechnologie und dient als Beispiel dafür, dass sich selbst die kühnsten Prophezeiungen bewahrheiten können – und das gilt angesichts des immer schnelleren Fortschritts heute sicher mehr als je zuvor. 

ANTIKE NANOTECHNOLOGIE

Bis heute streiten die Gelehrten, wie die spätrömischen Glashandwerker solche kostbaren Objekte herstellten. Die sogenannten Netzbecher bestehen nämlich aus einem Gefäß, das von einer filigranen Glashülle umgeben ist – verbunden über feine Stege. Die Hülle ist kunstvoll bearbeitet und zeigt in diesem Beispiel Szenen aus dem Leben des Thrakerkönigs Lykurgos.

Gewiss ist, dass beide Teile nicht einzeln hergestellt und anschließend zusammengefügt wurden. Die »Diatretgläser« (diatreton, griechisch: durchbrochen, durchbohrt) bestehen vielmehr aus einem Stück und wurden nach Ansicht vieler Forscher in mühevoller Kleinstarbeit aus einem massiven Glasblock geschliffen. Einer anderen Theorie zufolge stellten die Handwerker zunächst perforierte Zwischenbecher aus Gips her, die sie dann von innen und außen mit flüssigem Glas belegten. Dank der Löcher in der Form entstanden die Verbindungsstege zwischen Gefäß und Hülle; der Gips ließ sich vor der weiteren Feinbearbeitung herauskratzen.

Der hier gezeigte Lykurgosbecher aus dem 4. Jahrhundert n. Chr. fasziniert aber auch aus ganz anderem Grund – nämlich durch sein beeindruckendes Farbenspiel: Wird er von vorne beleuchtet, erscheint er in sattem Jadegrün, gegen das Licht funkelt er hingegen in feurigem Rubinrot. Weil niemand wusste, wie Kunsthandwerker vor 1600 Jahren diesen Effekt künstlich erzielen konnten, spekulierten manche, dass der Becher gar nicht aus Glas, sondern aus einem natürlichen, opalisierenden Mineral gefertigt wurde.



DAS GLAS DES
LYKURGOSBECHERS AUS DEM
4. JAHRHUNDERT N. CHR.
ENTHÄLT NANOPARTIKEL
AUS GOLD UND SILBER. WENN
ER VON VORNE BELEUCHTET
WIRD, ERSCHEINT ER GRÜN,
WÄHREND ER GEGEN DAS LICHT
ROT LEUCHTET.

Doch der Lykurgosbecher besteht in der Tat aus Glas – das ist spätestens seit 1950 sicher. Erst 40 Jahre später konnten Wissenschaftler auch das Farbenrätsel lösen. Im Glas entdeckten sie winzige, nur rund 70 millionstel Millimeter große Nanopartikel aus einer Silber-Gold-Legierung. Weil sowohl die Größe als auch das genaue Verhältnis der Edelmetalle – sieben Teile Silber, drei Teile Gold – für das besondere Leuchten des Bechers von entscheidender Bedeutung sind, gehen Fachleute davon aus, dass jener römische Kunsthandwerker den eindrucksvollen Farbwechsel nicht zufällig erzeugte – sondern nach vielen Experimenten genau wusste, was er tat. Er wäre auch heute noch ein ganz Großer seiner Zunft.

THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM



LINKS

DANA2.0 – DATEN UND WISSEN ZU NANOMATERIALIEN

WWW.NANOPARTIKEL.INFO

NANOTRUCK – TREFFPUNKT NANOWELTEN

WWW.NANOTRUCK.DE

NANOREISEN – ABENTEUER HINTERM KOMMA

WWW.NANOREISEN.DE

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU
UND REAKTORSICHERHEIT – NANOTECHNOLOGIE

[WWW.BMUB.BUND.DE/THEMEN/GESUNDHEIT-CHEMIKALIEN/
NANOTECHNOLOGIE/](http://WWW.BMUB.BUND.DE/THEMEN/GESUNDHEIT-CHEMIKALIEN/NANOTECHNOLOGIE/)

UMWELTBUNDESAMT – NANOTECHNIK

[WWW.UMWELTBUNDESAMT.DE/THEMEN/CHEMIKALIEN/
NANOTECHNIK](http://WWW.UMWELTBUNDESAMT.DE/THEMEN/CHEMIKALIEN/NANOTECHNIK)

BUNDESINSTITUT FÜR RISIKOFORSCHUNG – BEWERTUNG
VON NANOMATERIALIEN

[WWW.BFR.BUND.DE/DE/GESUNDHEITLICHE_BEWERTUNG_
VON_NANOMATERIALIEN-30413.HTML](http://WWW.BFR.BUND.DE/DE/GESUNDHEITLICHE_BEWERTUNG_VON_NANOMATERIALIEN-30413.HTML)

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG –
NANO.DE-REPORT 2013

WWW.BMBF.DE/PUB/NANO.DE-REPORT_2013_BF.PDF

NANOMAGAZIN

WWW.NANOMAGAZIN.NET

BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND –
DATENBANK FÜR NANOPRODUKTE

WWW.BUND.NET/NANODATENBANK

DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG –
NANO-PORTAL

NANO.DGUV.DE

SWISS NANO CUBE – PLATTFORM FÜR WISSEN UND
BILDUNG ZU NANOTECHNOLOGIEN

WWW.SWISSNANOCUBE.CH

DEUTSCHER VERBAND NANOTECHNOLOGIE

WWW.DV-NANO.DE

BÜCHER

JOACHIM
SCHUMMER

NANO-
TECHNOLOGIE

2009
Suhrkamp
171 Seiten
€ 10,00



CHRISTIAN
J. MEIER

NANO

2014
Primus
224 Seiten
€ 24,95



ORTWIN
RENN

DAS
RISIKO-
PARADOX

2014
Fischer
608 Seiten
€ 14,99





GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER
VARRENTAPPSTR. 40-42, 60486 FRANKFURT/MAIN
EINE PUBLIKATION VON: SPEKTRUM CP
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH
SLEVOGTSTR. 3-5, 69126 HEIDELBERG
WWW.SPEKTRUM-CP.COM
LEITUNG: DR. JOACHIM SCHÜRING
TEXTE: DR. CHRISTIAN J. MEIER (S.6-18)