

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

DESERTIFIKATION
Grüner
Schutzwall
gegen Sahara

DEZEMBER 2014

ALGORITHMEN
Computerjagd
auf Plagiate

ENERGIETECHNIK DER ZUKUNFT
Stromkabel als
Akkuersatz

KREBS
Blutdrucksenker gegen
Tumoren



Warum wir schlafen

Nachts räumt das Gehirn das Gedächtnis auf

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





Der elektrische Antrieb mit Benzin im Blut.

Der Audi A3 Sportback e-tron.

Zwei Motoren, keine Kompromisse: Dank serienmäßigem Plug-in-Hybrid-Antrieb bietet der Audi A3 Sportback e-tron 150 kW (204 PS), eine CO₂-Emission ab 35 g/km und eine kombinierte Reichweite von 940 km, davon 50 km rein elektrisch. So ermöglicht er alle Vorzüge zukunftsweisender Mobilität ohne Einschränkungen. Bei Ihrem Audi e-tron Partner ab Herbst 2014. www.audi.de/e-tron

Verändert die Welt. Nicht den Alltag.

e-tron



Kraftstoffverbrauch Audi A3 Sportback e-tron in l/100 km: kombiniert 1,7-1,5;
Stromverbrauch in kWh/100 km: kombiniert 12,4-11,4; CO₂-Emissionen in g/km:
kombiniert 39-35.



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Eine Chance für den Schlaf

Für viele Wissenschaftler ist der Herbst die »heißeste« Zeit des Jahres. Zwischen Mitte September und Weihnachten jagt ein Kongress den anderen, werden Preise verliehen, der Vorlesungsbetrieb läuft an – und geforscht werden will natürlich auch noch. Die allgemeine Hektik erfasst auch mich jedes Jahr wie ein Sog. So reiste ich Mitte Oktober eines Montags nach Berlin, wo ich nachmittags den Eröffnungsvortrag auf einem Kongress über Kommunikation im digitalen Zeitalter hielt. Noch an den letzten Folien arbeitend, hatte ich mir die Nacht davor um die Ohren geschlagen. Am Dienstagmorgen war ich im Hauptstadtstudio des Deutschlandfunks zu Gast, wo ich als Experte für die Sendung »Hintergrund« Rede und Antwort stand zur Frage »Wie viel Werbung braucht die Wissenschaft?«. Abends war ich dann als Jury-Mitglied bei der Verleihung des Georg von Holtzbrinck Preises zugegen, der wichtigsten Auszeichnung für Wissenschaftsjournalisten in Deutschland. Dort hielt ich die Laudatio auf den Preisträger 2014 in der Kategorie Print, Reto Schneider von der »Neuen Zürcher Zeitung«. Der feierliche Abend klang erst nach 23 Uhr aus; morgens um 7 wartete das Taxi, um mich zum Flughafen zu bringen. Und zwischen all den offiziellen Terminen das ganz normale Programm: E-Mails beantworten, Telefonate mit den Kollegen in der Redaktion, Artikel lesen und bearbeiten. Der hektische Herbst – keine Zeit für ausreichend Schlaf. Geht es Ihnen auch so?

Der Zufall wollte es, dass ich genau in diesen Tagen in meinem Berliner Hotelzimmer, ziemlich übermüdet, den Artikel von Giulio Tononi und Chiara Cirelli »Warum wir schlafen« erstmals las (S. 20). Die beiden Psychiatrieprofessoren von der University of Wisconsin-Madison messen dem Schlaf große Bedeutung für die Formung des Gedächtnisses bei. Das Gehirn fährt demnach jede Nacht in eine Art Grundzustand herunter, indem es neue Nervenverbindungen wieder auflöst oder zumindest schwächt. Auf diese Weise würden unwichtige Erinnerungen aussortiert, die wichtigen hingegen bleiben erhalten. Eine leicht andere Auffassung vertritt der deutsche Schlafforscher Jan Born von der Universität Tübingen. Der Neuropsychologe geht davon aus, dass wichtige neuronale Verbindungen im Schlaf sogar gestärkt werden. In seiner eigenen Arbeit erforscht Born unter anderem, wie sich Gerüche auf die Gedächtnisbildung auswirken. Mit großem Interesse habe ich das Interview mit ihm ab S. 28 gelesen – um am Ende zu der Gewissheit zu gelangen, dass mehr noch als Rosenduft meinem Gehirn bei seiner nächtlichen Fleißarbeit hilft, wenn ich ihm genug Zeit dafür gönne. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen guten, ausreichenden Schlaf – im hektischen Herbst und auch sonst!

Herzlich Ihr

Carl Hünzel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Warum schlafen wir? Das möchten **Chiara Cirelli** und **Giulio Tononi** von der University of Wisconsin-Madison herausfinden. Laut ihrer Hypothese muss das Gehirn im Schlaf Nervenzellkontakte aussortieren, um lebenslang lern- und arbeitsfähig zu bleiben (S. 20).



Der Geograf **Stefan Hecht** von der Universität Heidelberg sucht nach unterirdischen Gräbern und Ruinen – mit Hilfe von Elektroden (S. 74).



Als Experten für Bodenbakterien und deren Symbiosen mit Pflanzen berichten die französischen Mikrobiologen **René Bally** und **Robin Duponnois** ab S. 78 über das internationale Projekt, einen pflanzlichen Schutzwall gegen das Vordringen der Sahara in Afrika zu errichten.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Eis auf Merkur • Akku mit eingebautem Feueralarm • Kommunikation über Körperausscheidungen • Pharaonen waren gesünder als gedacht • Neue Details der Tiefsee enthüllt • Zeitverschiebungen machen fett und krank

9 Bild des Monats

Fratzenhafte Sonne

10 Forschung aktuell

Nobelpreis für Chemie

Hochauflösende Mikroskopotechniken hebeln die Gesetze der Optik aus

Nobelpreis für Medizin

Spezifische Hirnzellen helfen beim Orten von Raumpunkten, andere beim Navigieren

Nobelpreis für Physik

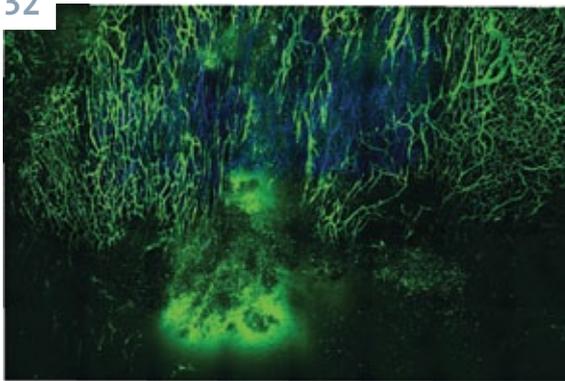
Hartnäckige Halbleiterforscher revolutionieren die Beleuchtungstechnik

SPRINGER'S EINWÜRFE

Selbst Kinder und Affen sind fair

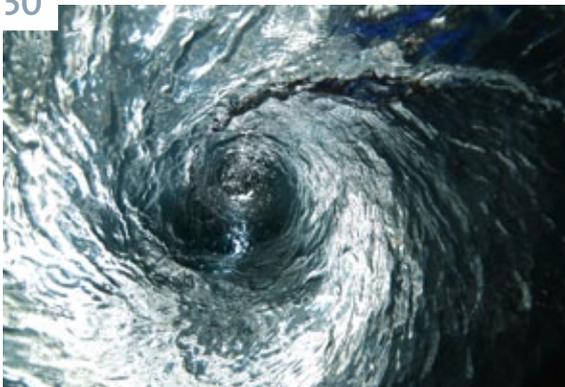
Evolutionäre Wurzeln des Gerechtigkeitssinns

32



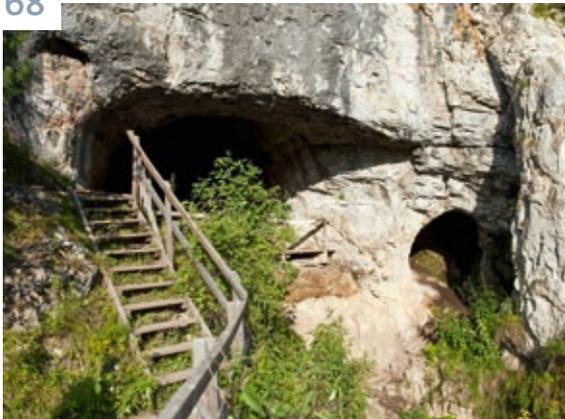
CHAUHAN, V.P. ET AL., NATURE COMMUNICATIONS 4, ART. 2516, 2013, FIG. 6A

50



ISTOCKPHOTO / JIMMY ANDERSON

68



MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 32 Blutdrucksenker gegen Tumoren

Hypertoniemedikamente helfen auch bei Krebs.
Rakesh K. Jain

40 Besseres Leben dank früher Selbstbeherrschung

Ergebnisse einer seit 1972 laufenden Längsschnittstudie.
Terrie E. Moffitt, Avshalom Caspi und Richie Poulton

PHYSIK & ASTRONOMIE

50 Große Physik ganz klein

Kluge Analogien statt gigantischer Experimente.
Sophie Hebden

SCHLICHTING!

56 Spiralen aus Wachs

H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

▶ 60 Computerjagd nach Plagiaten

Automatische Textanalyse deckt Betrugereien auf.
Harold »Skip« Garner

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

64 Gefangenendilemma mit Erpressung

Brian Hayes

SERIE »ARCHÄOMETRIE« TEIL 2

68 Unser rätselhafter neuer Verwandter

Wie Paläogenetiker den Denisovamenschen entdeckten.
Michael Marshall

74 Elektroden statt Spaten

Was der Boden verbirgt, verraten Widerstandsmessungen.
Stefan Hecht



► TITELTHEMA

Schlaf und Gedächtnis

20 Warum wir schlafen

Während der Nachtruhe entfernt oder schwächt das Gehirn bestimmte Nervenzellverbindungen. Das neuronale Ausmisten spart Energie und optimiert das Gedächtnis.

Giulio Tononi und Chiara Cirelli

INTERVIEW

28 Vokabellernen mit Rosenduft

Der Tübinger Psychologe Jan Born untersucht, wie Schlaf das Gedächtnis unterstützt.

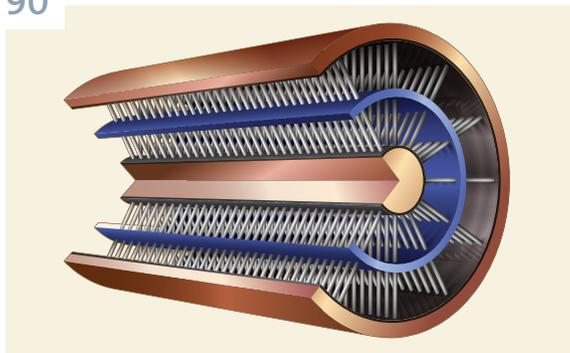
Jochen Paulus

78



AXEL DUCOURNEAU, CNRS PHOTOTHÈQUE, PROJEKT-OHIMI TESSERÉ, SENEGAL

90



GOGOTSI, Y., NATURE 509, S. 568–570, 2014, FIG. 1

ERDE & UMWELT

► 78 Die Große Grüne Mauer

Ein Vegetationsstreifen quer durch ganz Afrika soll die weitere Ausbreitung der Sahara nach Süden verhindern.

René Bally und Robin Duponnois

TECHNIK & COMPUTER

86 Strom aus dem Übergitter

Nanotechnologie und Spinelektronik sollen winzige Temperaturunterschiede nutzbar machen.

Kornelius Nielsch, Sonja Heiderich, Sebastian Zastrow und Christian Back

► 90 Stromkabel als Akkuersatz

Kabel und Drähte können auch Energie speichern – sofern ein Superkondensator sie umhüllt.

Yury Gogotsi

49 Wissenschaft im Rückblick

Vom Panzerturm bei Lüttich zum Felsentempel am Nil

92 Rezensionen

Achim Landwehr: Geburt der Gegenwart • Bernd Sommer, Harald Welzer: Transformationsdesign • Neil Shubin: Das Universum in dir • Robin Haring: Der überforderte Patient u. a.

102 Leserbrief/Impressum

104 Futur III

John Grant: Benjys Geburtstag

106 Vorschau

Titelmotiv: Mirko Ilić

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

PLANETOLOGIE

Eis auf Merkur

Die NASA-Raumsonde »Messenger« hat Eisablagerungen fotografiert, die sich in Kratern der Nordpolregion des Planeten Merkur befinden. Das Eis scheint relativ jung zu sein, berichten die Forscher um die Physikerin Nancy Chabot von der Johns Hopkins University (Maryland, USA).

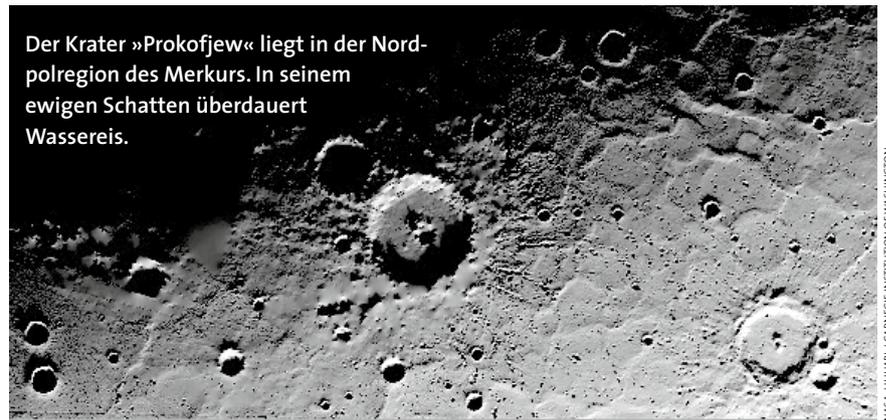
»Messenger« umkreist den Merkur seit 2011. Seit 2012 bildet sie die Oberfläche des Planeten mit einer Weitwinkelkamera ab. Die Polregionen weisen zahlreiche Krater auf, in denen ewiger Schatten herrscht. Dort kann Wassereis überdauern. Es verrät seine Anwesenheit, indem es das schwache Streulicht reflektiert, das von den umgebenden Kraterwällen kommt. Chabot und ihren Kollegen ist es gelungen, aus den Bild-daten der Raumsonde dieses schwache Reflexionssignal herauszufiltern.

Demnach sind die vereisten Flächen nicht glatt, sondern weisen zahlreiche

Einschlagspuren auf. Offenbar überzieht das Eis die darunter liegenden Krater, da es den Aufprall eines Fremdkörpers nicht überstehen würde – es muss also jünger sein als diese. Entweder gelangte das Eis erst vor relativ kurzer Zeit auf den Planeten oder es wird durch einen noch unbekanntem Mechanismus laufend erneuert.

Schon vor rund zwei Jahrzehnten wiesen erdgebundene Radarbeobachtungen auf ungewöhnliche Ablagerungen im Schatten der polnahen Merkurkrater hin. Die Annahme, dass es sich bei ihnen um Wassereis handeln könnte, darf nun als bestätigt gelten.

Geology 10.1130/G35916.1, 2014



Der Krater »Prokofjew« liegt in der Nordpolregion des Merkurs. In seinem ewigen Schatten überdauert Wassereis.

NASA / JPL/UMPI / CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON



Mehr Aktualität!

Auf Spektrum.de berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

TECHNIK

Akku mit eingebautem Feueralarm

Forscher der Stanford University (USA) haben einen Lithiumionenakku entwickelt, der ein Warnsignal von sich gibt, falls er zu überhitzen und in Brand zu geraten droht. Damit sollen die wiederaufladbaren Speicher von Mobiltelefonen, Laptops, Elektroautos und Flugzeugen sicherer werden, ohne an Leistung einzubüßen.

Lithiumionenakkus sind wiederholt durch ihre Neigung aufgefallen, in Brand zu geraten oder gar zu explodieren. Eine Ursache dafür sind so genannte Dendriten, die innerhalb des Akkus an der Anode entstehen. Das geschieht, wenn Lithiumionen bei wiederholtem Auf- und Entladen ungleichmäßig an der Anode abgeschieden werden und langsam wachsende Fortsätze auf der Elektrode bilden. Erreicht ein solcher Dendrit die

Kathode, tritt ein Kurzschluss mit starker Wärmeentwicklung ein.

Um entstehende Dendriten früh zu erkennen, haben der Materialwissenschaftler Yi Cui und seine Kollegen nun Lithiumionenakkus mit einer Zusatzfunktion ausgestattet. Anode und Kathode sind durch Schichten porösen Kunststoffes getrennt, in denen sich die Ionen bewegen. Zwischen diesen Schichten platzierten die Wissenschaftler eine nanometerdünne Kupferlage. Durchdringt ein Lithiumdendrit den Kunststoff, berührt er irgendwann das Kupfer und schließt damit einen Stromkreis, was ein Signal erzeugt. Dieses teilt dem Nutzer mit, dass die Gefahr eines Kurzschlusses besteht, und gibt ihm genügend Zeit, den Akku auszutauschen.

Nature Communications 5:5193, 2014

Anrüchige Nachrichten für Artgenossen

Weißfuß-Wieselmakis (*Lepilemur leucopus*) verständigen sich auf recht ungewöhnliche Weise. Die auf Madagaskar beheimateten, nachtaktiven Lemuren leben in kleinen Familienverbänden, gehen sich aber meist aus dem Weg. Trotzdem kommunizieren sie miteinander – und zwar über ihre Ausscheidungen, wie Iris Dröschner und Peter Kappeler vom Deutschen Primatenzentrum in Göttingen herausgefunden haben.

Alle Tiere einer sozialen Gemeinschaft benutzen dieselben Latrinen im Kerngebiet ihres Territoriums. Offenbar hinterlassen die Wieselmakis dort mit ihrem Urin bestimmte Duftmarken, in denen Nachrichten verschlüsselt sind. So suchen die Männchen die Gemeinschaftstoiletten häufiger auf, sobald fremde Artgenossen in ihr Siedlungsgebiet eindringen – offenbar, um Verteidigungsbereitschaft mitzuteilen.

Die kollektive Latrinennutzung diene anscheinend dazu, die Bindun-



HAJARIANTRA RAMBELARIVONY

Zu nächtlicher Stunde fotografiert: Weißfuß-Wieselmakis hinterlassen sich gegenseitig Nachrichten am gemeinschaftlich benutzten stillen Örtchen.

gen zwischen den Tieren zu pflegen, schreiben die Forscher. Die Duftmarken transportierten zahlreiche Informationen darüber, in welcher Verfassung sich die Tiere befänden. Auf diese Weise schafften es die Weiß-

fuß-Wieselmakis trotz losen Kontakts und schlechter Sichtverhältnisse bei Nacht, das Sozialgefüge innerhalb ihrer Gruppe aufrechtzuerhalten.

Behavioral Ecology & Sociobiology
10.1007/s00265-014-1810-z, 2014

GESCHICHTE

Pharaonen waren wohl gesünder als oft behauptet

Ägyptische Mumien sind beliebte Forschungsobjekte. Mit modernen Diagnoseverfahren finden Mediziner darin allerlei Hinweise auf frühere Krankheiten und Gebrechen. So sollen die Pharaonen und ihre Angehörigen an Arteriosklerose, Knochennekrose oder Malaria gelitten haben. Auch schwere Rheumaerkrankungen wurden den altägyptischen Königen schon bescheinigt.

Die Mumie von Amenophis III.



UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY / G. ELLIOT SMITH, 1912 / PUBLIC DOMAIN

Oft schießen solche Befunde jedoch übers Ziel hinaus, meinen der Ägyptologe Zahi Hawass und der Radiologe Sahar N. Saleem von der Universität Kairo. Sie haben 13 Mumien von Pharaonen untersucht, die zwischen 1492 und 1153 v. Chr. regierten. Darunter waren die sterblichen Überreste von Amenophis III., Ramses II., dessen Sohn Merenptah sowie von Ramses III. Bei allen vier Königen hatten Mediziner anhand von Röntgenbefunden vermutet, dass sie zu Lebzeiten an der chronischen entzündlich-rheumatischen Erkrankung *Spondylitis ankylosans* (Morbus Bechterew) litten.

Dem widersprechen Hawass und Saleem nun, nachdem sie die Mumien

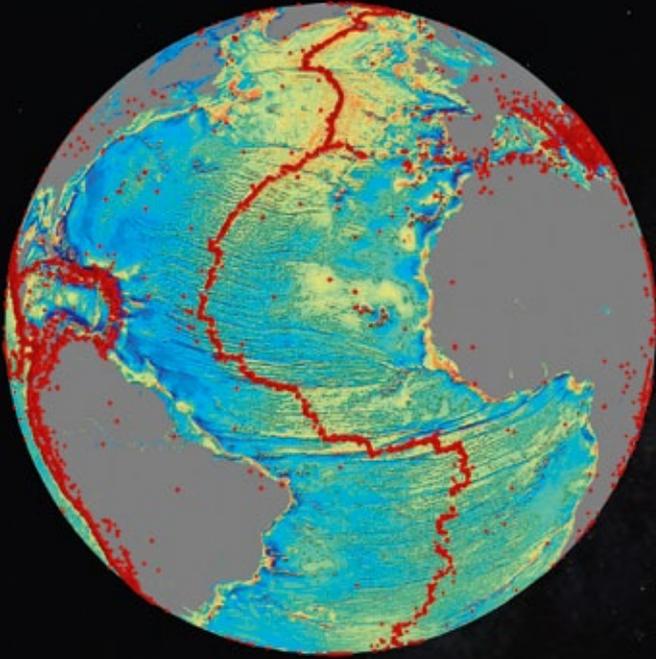
mittels Computertomografie durchleuchtet haben. Es gebe keine Hinweise auf Gelenkdeformationen, die für Morbus Bechterew typisch seien, schreiben sie. Die vier Pharaonen hätten wohl eher an diffuser idiopathischer Skeletthyperostose gelitten, einer verbreiteten Wirbelsäulenerkrankung, die vornehmlich ältere Menschen befällt und zu Rückgratversteifung führen kann, oft aber symptomlos bleibt. Alle vier Könige starben in einem für antike Verhältnisse recht hohen Alter und dürften kaum unter der Krankheit gelitten haben, so Hawass und Saleem.

Arthritis & Rheumatology 10.1002/art.38864, 2014

OZEANOGRAPHIE

Neue Details der Tiefsee enthüllt

Tausende bislang unbekannte, kilometerhohe Berge ragen vom Meeresboden auf. Das ist eines der Ergebnisse, die David Sandwell von der amerikanischen Scripps Institution of Oceanography und seine Kollegen nun vorle-



Die neuen Karten zeigen zahlreiche bislang unbekannte Erhebungen auf dem Grund des Atlantiks. Rote Punkte markieren Orte starker Erdbeben, etwa entlang des Mittelozeanischen Rückens, an dem neuer Meeresboden entsteht.

DAVID SANDWELL, SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY

gen. Die Forscher haben Tiefseekarten mit nie dagewesenem Detailreichtum erstellt.

Hierfür griffen die Wissenschaftler auf hochgenaue Daten zweier Satelliten zurück: des europäischen CryoSat 2 und des amerikanischen Jason 1. Beide sind eigentlich für andere Aufgaben ausgelegt. CryoSat 2 verfügt als wichtigstes Instrument über ein spezielles Radargerät, um kontinentale Eismassen sowie die Meeresoberfläche in der Antarktis abzutasten. Jason 1 ist ebenfalls mit einem Höhenmessradar ausgestattet – allerdings besteht seine Hauptfunktion darin, den Meeresspiegel, die Wellen und Strömungen von tropischen Meeren zu überwachen. Jedoch lassen sich aus den altimetrischen Messdaten beider Satelliten auch Höhenprofile des Meeresbodens erstellen, da sie Schwankungen im irdischen Gravitationsfeld widerspiegeln, welches von der lokalen Dicke der Erdkruste abhängt.

Die mindestens einen Kilometer hohen Unterseeberge seien die »häufigste Oberflächenform der Erde«, kommentiert Sandwell die Ergebnisse seines Teams. Die neuen Tiefseekarten enthüllen aber noch weitere Strukturen, etwa einen aktiven Grabenbruch im Südatlantik sowie eine früher aktive Zone im Golf von Mexiko, in der sich vor Jahrmillionen der Meeresboden spreizte und die angrenzenden Erdplatten auseinanderschob. Heute ist diese Zone unter dicken Sedimentschichten verborgen. Mit Hilfe der Daten können die Wissenschaftler zudem die Tiefe der Ozeane flächendeckend abschätzen. Bislang war diese für weniger als die Hälfte des Meeresbodens aus Lotmessungen bekannt.

Science 346, S. 65–67, 2014

MEDIZIN

Zeitverschiebungen machen fett und krank

Wer regelmäßig Schichtarbeit leistet oder unter Jetlag leidet, erkrankt mit höherer Wahrscheinlichkeit an Fettleibigkeit oder Diabetes. Einer der Gründe dafür scheint im Verdauungstrakt zu liegen: Die Zeitverschiebung bringt auch die innere Uhr der Darmbakterien durcheinander – und damit den menschlichen Stoffwechsel.

Das schließen Eran Elinav vom Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel) und seine Kollegen aus der Analyse von Mäusekotproben. Demnach schwankt die Aktivität

bestimmter Darmmikroben im Tagesrhythmus, eng zusammenhängend mit der inneren Uhr der Nager und ihren Essgewohnheiten.

Als die Forscher den Tagesrhythmus von Mäusen alle drei Tage um acht Stunden verschoben, indem sie das Licht entsprechend später oder früher ein- und ausschalteten, brachte dieser künstliche Jetlag nicht nur die innere Uhr der Tiere, sondern auch die Aktivität ihrer Darmbewohner aus dem Takt. Zudem veränderte sich die Zusammensetzung der Mikrobengemein-

schaft. Nahmen die Nager daraufhin energiereiche Nahrung zu sich, legten sie rascher an Gewicht zu und entwickelten Stoffwechselstörungen, die zu Diabetes führen können.

In einem weiteren Experiment untersuchten die Forscher zwei Menschen, die von den Vereinigten Staaten nach Israel geflogen waren und unter Jetlag litten. In ihrem Verdauungsapparat traten vermehrt Bakterienstämme auf, die mit Adipositas und Diabetes in Verbindung gebracht werden.

Cell 159, S. 514–529, 2014

FRATZENHAFTE SONNE

Das Solar Dynamics Observatory der US-Raumfahrtagentur NASA blickt aus der Erdumlaufbahn auf unsere Sonne. Diese war im Oktober 2014 ziemlich aktiv; die NASA-Forscher verzeichneten mehrere Sonneneruptionen der höchsten Klasse »X«. Dabei durchstoßen geladene Teilchen die Oberfläche. Auf dieser Aufnahme vom 8. Oktober leuchten die Plasmaströme intensiv im extrem ultravioletten Wellenlängenbereich. Sie folgen der gebogenen Form von Magnetfeldern in der Sonnenatmosphäre. In die größten dieser Schleifen würde die Erde mehr als ein Dutzend Mal hineinpassen.

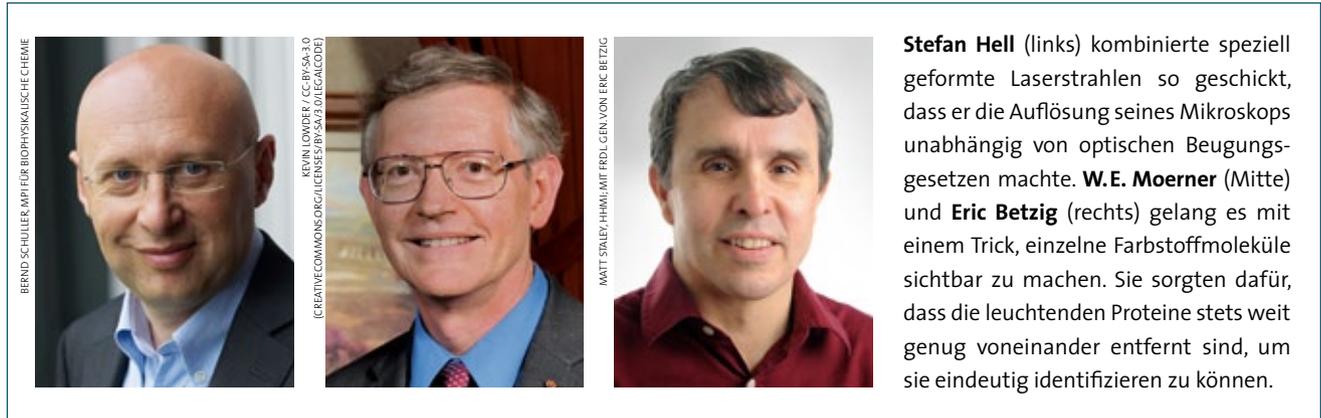


CHEMIENOBELPREIS

Moleküle im Lichtmikroskop

Den Nobelpreis für Chemie 2014 teilen sich drei Forscher, die mit ausgeklügelten Fluoreszenzmikroskopen Auflösungen erzielten, welche lange unerreichbar schienen: der Deutsche Stefan Hell sowie die US-Amerikaner W.E. Moerner und Eric Betzig.

VON LARS FISCHER



Stefan Hell (links) kombinierte speziell geformte Laserstrahlen so geschickt, dass er die Auflösung seines Mikroskops unabhängig von optischen Beugungsgesetzen machte. **W.E. Moerner** (Mitte) und **Eric Betzig** (rechts) gelang es mit einem Trick, einzelne Farbstoffmoleküle sichtbar zu machen. Sie sorgten dafür, dass die leuchtenden Proteine stets weit genug voneinander entfernt sind, um sie eindeutig identifizieren zu können.

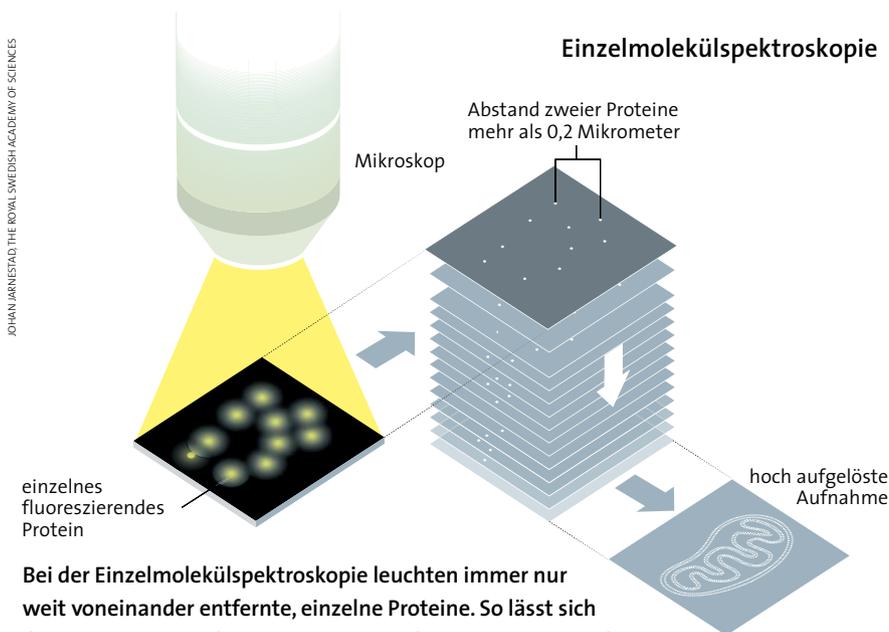
Auch physikalische Gesetze sind manchmal weniger absolut, als sie scheinen. Als der deutsche Physiker Stefan Hell sich zu Beginn der 1990er Jahre vornahm, die so genannte Beugungsgrenze zu überwinden, sahen die meisten Fachkollegen in dieser 1873 von Ernst Abbe formulierten Gesetzmäßig-

keit eine unbezwingbare Hürde. Lichtmikroskope könnten niemals Strukturen mit weniger als etwa 200 Nanometer Durchmesser auflösen. Das war, wie Hell zeigte, ein Irrtum. Für den Nachweis, dass Details weit unterhalb dieser Grenze darstellbar sind, erhält der Biophysiker vom Max-Planck-Institut für

biophysikalische Chemie in Göttingen und dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg dieses Jahr zusammen mit den US-Amerikanern Eric Betzig vom Howard Hughes Medical Institute und W.E. Moerner von der Stanford University den Nobelpreis für Chemie. Die Bilder, die ihre Methoden erzeugen, zeigen die Welt an der Grenze zwischen Chemie und Biologie.

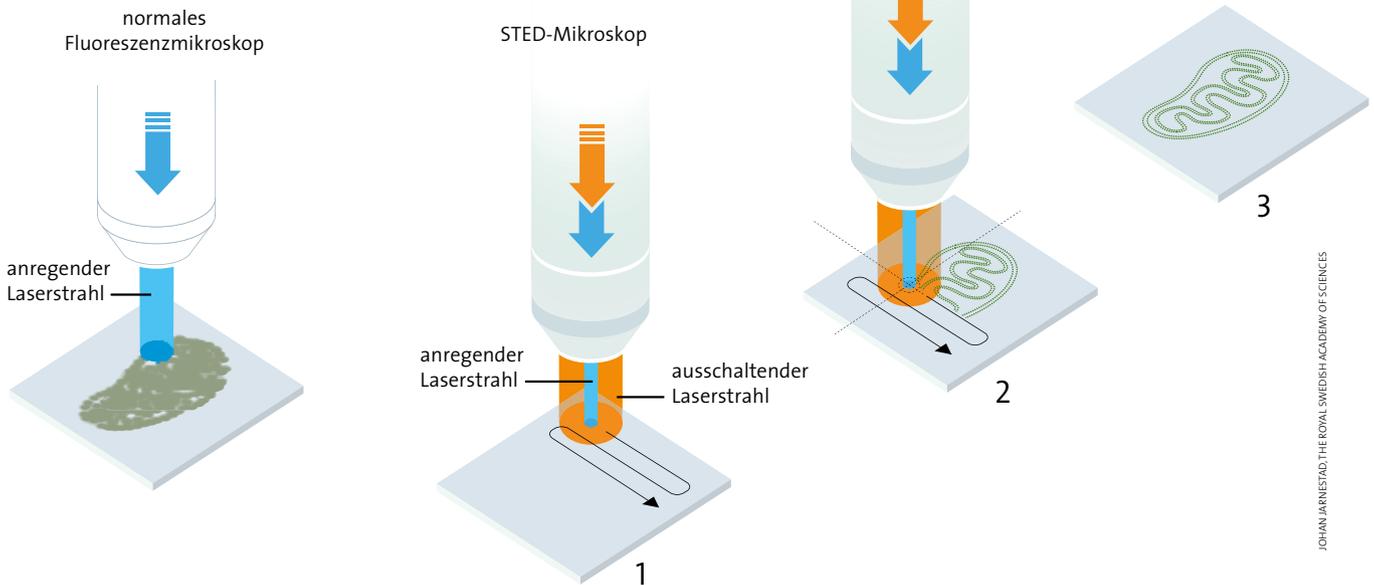
Die so genannte Beugungsgrenze ist eine grundlegende Eigenschaft der Optik. Zwei Punkte, die weniger als eine halbe Lichtwellenlänge voneinander entfernt sind, zeigen sich als einzelner, verschmierter Punkt. Ebenso ist es auch nicht möglich, den Strahl auf einen Durchmesser von weniger als der halben Wellenlänge zu fokussieren. Bei sichtbarem Licht sind das rund 200 Nanometer – etwa die Größe einer Zellorganelle. Unterhalb dessen sind normale Lichtmikroskope blind.

Gerade Biologen stellt das vor ein Problem. Um zu verstehen, wie eine Zelle funktioniert, müssen sie einzelne Moleküle im Blick behalten, die 10- oder 100-mal kleiner sind als diese magische Grenze. Zwar geht das beispielsweise mit dem Elektronenmikroskop;



Bei der Einzelmolekülspektroskopie leuchten immer nur weit voneinander entfernte, einzelne Proteine. So lässt sich ihre Position genau bestimmen – sie sind stets im Zentrum der Lichtflecke im Mikroskop. Sehr viele Aufnahmen, bei denen jeweils andere Moleküle aufscheinen, ergeben dann ein detailliertes Gesamtbild.

STED-Mikroskopie



JOHAN IARNESTAD, THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

andere Techniken wie die Röntgenbeugung zeigen sogar einzelne Atome. Doch diese Verfahren benötigen extreme Bedingungen wie Hochvakuum und energiereiche Strahlen, die jedes Leben mit Sicherheit töten. Das Lichtmikroskop dagegen zeigt die biologischen Vorgänge live und im Prinzip unbegrenzt lange. Aber eben nicht in hoher Auflösung.

Verräterische Farbstoffe

Mit Hilfe von fluoreszenzmarkierten Antikörpern verfolgen Forscher in Lichtmikroskopen Biomoleküle und entschlüsseln ihre Funktion. Das Prinzip ist einfach: Bestimmte Farbstoffe lassen sich mit einem Laser anregen, worauf ihre Elektronen in einen energiereicheren Zustand gelangen. Anschließend fallen diese wieder zurück und geben ein Photon ab – die Moleküle leuchten.

Biochemiker heften solche Farbstoffe an Antikörper. In eine Zelle gebracht, binden diese sich an bestimmte Zielmoleküle und verraten so ihren Aufenthaltsort. Man sieht dann zum Beispiel, dass bestimmte Proteine nahe der Zellmembran liegen. Doch Details unter-

Die Details einer Zelle verwischen unter einem normalen Lichtmikroskop (links), das der Beugungsgrenze unterliegt. Der spezielle Laser eines STED-Mikroskops (rechts) bringt dagegen nur Strukturen im Strahlzentrum zum Leuchten (1), während er schrittweise über die Probe fährt (2), und ermöglicht so hoch aufgelöste Bilder (3).

halb der Beugungsgrenze blieben weiterhin verborgen.

Diese Fluoreszenztechnik lieferte Hell jedoch das Werkzeug, die Gesetze der Optik zu überlisten. Mit einem quantenmechanischen Trick sorgte er dafür, dass nur Moleküle an einem bestimmten Punkt mit wenigen Nanometern Durchmesser Licht abgeben können. Der Anregungslaser, in dessen Strahl die markierten Proteine zu leuchten beginnen, kann zwar nicht schärfer fokussiert werden, als die Beugungsgrenze erlaubt. Doch Hell erkannte, dass unter bestimmten Bedingungen Proteine nur genau im Strahlzentrum Licht abgeben.

Dafür verantwortlich ist die so genannte stimulierte Emissionslöschung (STED, stimulated emission depletion), die den Prozess der Fluoreszenz unterbindet. Normalerweise hebt das Laserlicht Elektronen in einen angeregten Zustand. Anschließend fallen sie in den Grundzustand zurück und senden Pho-

tonen aus. Doch ein zweiter Laser mit niedrigerer Energie zwingt die angeregten Elektronen auf einen anderen Weg, so dass ihr Licht eine andere Farbe hat und herausgefiltert werden kann.

Bei der STED-Mikroskopie erreichte Hell das mit einem zweiten Laser, der in den Außenbereichen des Lichtflecks des Anregungslasers einen eigenen, ringförmigen leuchtenden Bereich erzeugt. Dort leert das zusätzliche Licht die angeregten Zustände der markierten Moleküle gewissermaßen aus. Nur im Inneren des Rings, im Zentrum des Anregungslasers, können noch Moleküle fluoreszieren (siehe Grafik oben).

Dieser STED-Strahl fährt nun die Probe ab – und ermöglicht so eine Auflösung weit jenseits der physikalischen Grenzen des Lichtmikroskops. Zwei Punkte innerhalb der klassischen Beugungsgrenze erscheinen als getrennt, weil je einer von ihnen durch den zweiten Laser am Leuchten gehindert wird.

Wo Hell den Bereich einschränkte, aus dem er Signale empfing, gingen W.E. Moerner und Eric Betzig einen anderen Weg: Sie stellten sicher, dass sie nur das Licht einzelner Moleküle maßen. Sobald man weiß, dass ein Lichtfleck von exakt einem Punkt ausgeht, kann man diesen extrem genau lokalisieren. Das setzt allerdings voraus, dass die leuchtenden Moleküle auch wirklich weiter als die halbe Lichtwellenlänge voneinander entfernt sind.

Doch in Zellen liegen die interessanten Biomoleküle viel dichter gepackt. Sie jemals einzeln zu erwischen, schien ausgeschlossen, bis W.E. Moerner in

den 1990er Jahren das seltsame Leuchtverhalten eines besonderen Moleküls untersuchte.

Es handelte sich um eine Variante des »green fluorescent protein«, deren Entdecker 2008 den Nobelpreis erhielten. Dieses Protein und seine Abkömmlinge fluoreszieren. Moerner fand nun einen Weg, die Fluoreszenz aus- und wieder anzuschalten. Mit Licht einer Wellenlänge von 488 Nanometern bestrahlt, leuchtet das Molekül. Aber nicht lange, dann erlischt es und lässt sich auch durch weitere Anregung mit diesem Licht nicht wiedererwecken. Wie Moerner feststellte, dreht ein Lichtpuls ande-

rer Farbe – mit 405 Nanometern – sozusagen die Uhr des Moleküls zurück, so dass es bei Anregung wieder aufscheint.

Damit ebnete Moerner den Weg zu Betzigs späterer Entwicklung. Dessen zentrale Erkenntnis: Lässt man nacheinander jeweils nur einen Bruchteil der Moleküle fluoreszieren, sind die leuchtenden Proteine schon aus statistischen Gründen weit voneinander entfernt und damit präzise lokalisierbar. Das von Moerner gefundene Protein bot ihm die Möglichkeit, das theoretische Prinzip in die Praxis zu überführen.

Bei der Einzelmolekülspektroskopie (siehe Illustration auf S. 10) bestrahlt

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN

Das Neuronen-Navi in unseren Köpfen

Den Preis erhalten in diesem Jahr drei Neurowissenschaftler, die Hirnzellen entdeckten, mit deren Hilfe sich Säugetiere – und auch der Mensch – räumlich orientieren.

VON JAN OSTERKAMP



John O'Keefe (links) entdeckte im Hippocampus Neurone, die als »Ortszellen« den Aufenthalt an einem bestimmten Ort zu erkennen geben. Das Ehepaar **May-Britt** und **Edvard Moser** fand im nahe gelegenen entorhinalen Kortex »Gitter-« oder »Rasterzellen«, deren Aktivitätsmuster aussehen, als würden sie den Raum in Waben einteilen. Im Zusammenspiel untereinander wie auch mit den Ortszellen unterstützen sie das räumliche Zurechtfinden.

Hirnforscher haben Respekt vor ihrem Forschungsgegenstand: Das Gehirn sei womöglich zu komplex, als dass es sich selbst einmal verstehen könne. Einfache, einleuchtende Theorien über die Funktionsweise von Hirnprozessen haben es deswegen schwer, und oft entpuppen sie sich auch als falsch. Nicht so jedoch die Erkenntnisse, für die der diesjährige Nobelpreis für Physiologie oder Medizin verliehen wird. Die drei Preisträger entdeckten

»Ortszellen« und »Raster-« oder »Gitterzellen«. Diese Neurone sind essenzielle Komponenten des Hirnsystems, mit dessen Hilfe wir unsere Position im Raum bestimmen und navigieren.

Der 1939 geborene britisch-amerikanische Neurowissenschaftler John O'Keefe vom University College London hatte in den späten 1960er Jahren den Mut, neue Techniken auf ebenso neue Art auszuprobieren: Er griff auf eine damals noch selten verwendete

Methode zurück, bei lebenden Tieren die Aktivität einzelner Hirnneurone mit implantierten Elektroden zu überwachen. Allerdings prüfte er nicht wie andere Wissenschaftler das Verhalten von Nervenzellen auf einfache Reize hin, um so zunächst eine Liste der Reaktionen zu gewinnen. Stattdessen ließ er Ratten in einem kleinen Irrgarten tun, was sie wollten: meist einfach herumlaufen. Währenddessen beobachtete er einzelne Zellen im Hippocampus, eine

zuerst ein Anregungslaser die Probe, bis alle fluoreszierenden Moleküle erschöpft und dunkel sind. Die nun im Auszustand befindlichen Markersubstanzen erhalten anschließend einen Anschaltimpuls – allerdings nur mit sehr geringer Intensität. Das schwache Licht enthält schlicht nicht genug Photonen, um mehr als einen kleinen Bruchteil der Fluoreszenzmoleküle wieder zu aktivieren. Diese leuchten dann für eine Weile. Die einzelnen Punkte sind im Mikroskop weiter voneinander entfernt als die Beugungsgrenze – entsprechend weiß man bis auf wenige Nanometer genau, wo die Moleküle sind.

Ein einzelnes Bild enthüllt so noch keine Details der biologischen Struktur; dazu leuchten zu wenige Punkte. Doch wiederholt man den Prozess sehr viele Male, setzt sich im Lauf der Zeit aus den einzelnen Aufnahmen ein Gesamtbild fast aller fluoreszenzmarkierten Moleküle zusammen. Dieses ist weit höher aufgelöst, als es die Beugungsgrenze erlaubt.

Die Einzelheiten, die mit den Verfahren der drei Nobelpreisträger sichtbar werden, stammen aus jenem zuvor unzugänglichen Bereich, in dem Biologie zu Chemie wird – auf der Ebene des einzelnen Moleküls, aber eingebettet in

jene Strukturen, in denen es seine Funktion erfüllt. Seit Jahren vermuten Forscher, dass die räumliche Anordnung verschiedener Proteine für viele komplexe biologische Reaktionsketten von entscheidender Bedeutung ist. Das gilt für die Funktion von Synapsen im Gehirn ebenso wie für die Fotosynthese oder das Ablesen des Erbguts mit Hilfe ganzer Proteinkomplexe. Die hoch aufgelöste Fluoreszenzmikroskopie erlaubt nun einen direkten Blick in diese Maschinerie des Lebens.

Lars Fischer ist Chemiker und Redakteur bei »Spektrum.de«.

für Lernen und Gedächtnis wichtige Region der Großhirnrinde tief im Schläfenlappen.

O'Keefe stieß dabei auf Hirnzellen, die ganz anders funktionierten als alle anderen bis dahin bekannten Neurone. Wie er zunehmend verblüfft feststellte, repräsentierte jede dieser Zellen offenbar – und zwar immer als einzige – eine bestimmte Position des Tiers im Labyrinth: Sie feuerte immer nur dann, wenn sich die Ratte gerade an diesem Ort befand. Etwas später wurden jene Neurone deswegen »Ortszellen« (place cells) getauft. Anscheinend vermittelten sie dem Tier ein Gefühl für seinen derzeitigen Aufenthaltsort.

Hirnzellen für das Ortsgefühl

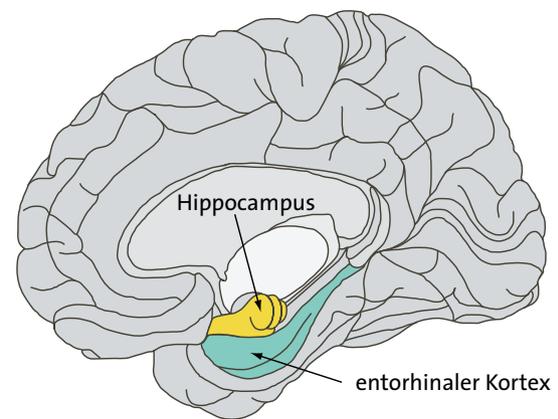
Wie universell dieser Mechanismus zumindest bei Säugetieren ist, wurde in den folgenden Jahren deutlich: Durch die Arbeiten von O'Keefe inspiriert, fanden Forschergruppen nicht nur bei verschiedenen Nagetieren, sondern auch bei anderen Arten solche Ortszellen. Fledermäusen, Affen und sogar uns Menschen – allen melden sie, wo man sich gerade befindet.

Eine Kernfrage blieb allerdings offen. Die Ortszellen taugen nicht als Routenspeicher oder Navigationssystem, somit nicht zur gezielten Fortbewegung und Verhaltensorientierung im Raum. Sie melden es nur, wenn ein

Zielpunkt erreicht ist. Wie aber erstellt das Gehirn aus den punktuellen Kenntnissen eine dreidimensionale Landkarte? Wie verknüpft es einzelne Orte zu Wegen? Oder wie bestimmt es eine Abkürzung von A nach B?

Das System hierfür entdeckten erst drei Jahrzehnte nach O'Keefes ersten Experimenten die norwegischen Neurowissenschaftler May-Britt und Edvard Moser, geboren 1963 und 1962, die heute an der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens in Trondheim tätig sind. Ihre neuroanatomische Expertise erwarben sie seit den 1990er Jahren unter anderem im Labor von O'Keefe. Damit untersuchten sie den anatomisch schwer zugänglichen entorhinalen Kortex. Dieses Hirngebiet interagiert intensiv mit dem Ortszellenareal des Hippocampus und liegt dicht darunter. Im Jahr 2005 stießen die Mosers dort schließlich auf Neurone, die oft ebenfalls beim Herumlaufen ansprechen: die Raster- oder Gitterzellen (grid cells).

Anders als eine Ortszelle ist eine Rasterzelle allerdings nie für nur einen, sondern zugleich für mehrere Orte im Raum zuständig. Das heißt, wenn das Versuchstier im Käfig herumläuft, feuert sie an mehreren Stellen, aber immer an denselben. Auf den ersten Blick erschienen diese Orte wahllos im Raum verteilt. Weitere Analysen des Moser-Teams offenbarten jedoch für die Akti-

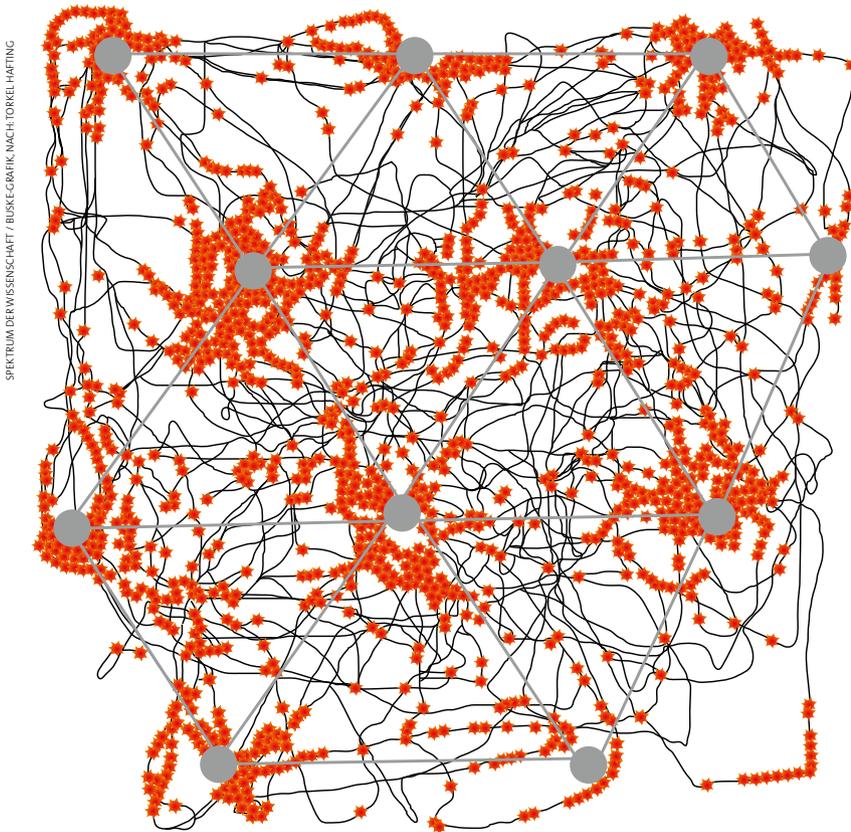


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Spezifische Zellen im Hippocampus und im entorhinalen Kortex arbeiten für die räumliche Orientierung eng zusammen.

vitätspunkte der Rasterzellen ein auffallend regelmäßiges geometrisches Muster, das kein Zufall sein konnte: Die Stellen, an denen sie feuern, ordnen sich in einer Weise hexagonal an, die an Bienenwaben erinnern (siehe Bild S. 14). Verschiedene Rasterzellen sind für unterschiedliche Wabenmuster zuständig, wobei die Wabengröße variiert. So entsteht im entorhinalen Kortex ein Koordinatennetz, quasi eine mentale Landkarte.

Für Navigationsprozesse von Tier und Mensch ist ein derartiges inneres Koordinatensystem unabdingbar. Dieses System erlaubt zum Beispiel einer in ihrem Käfig herumlaufenden Ratte,



Gezeigt ist die Aktivität einer Rasterzelle im Rattengehirn, während das Tier herumläuft. Den Weg der Ratte im Gehege zeigt die dünne schwarze Linie. Jeder rote Punkt steht für ein Signal des Neurons, wenn die Ratte diesen Raumpunkt erreicht. Die Aktivität der Nervenzelle steigt stark an, sobald sich das Tier einem »Rasterpunkt« nähert (graue Punkte). Die Rasterpunkte ordnen sich zu einem regelmäßigen Gitter an.

anhand der Aktivitätspunkte ihre Geschwindigkeit zu messen und so ein Gefühl für die eigene Bewegung im Raum zu gewinnen. Dabei resultiert die erfasste Laufgeschwindigkeit aus der Wabengröße und der für das »Durchqueren der Wabe« benötigten Zeit.

Außerdem ist das System dynamisch: Wie sich zeigte, vermag es zu lernen. Sitzt das Tier etwa in einem fremden Käfig, den es eifrig erkundet und beschnuppert, stellt sich das Wabenmuster der Rasterzellen auf die frisch gesammelten Umwelterfahrungen ein. Dann bilden sich im entorhinalen Kortex neue, passende Umgebungskarten.

Wenn Ratte, Mensch oder Fledermaus mit ihren inneren Karten navigieren, nutzen sie zudem Informationen von weiteren Spezialneuronen, die Daten in das Orientierungssystem des entorhinalen Kortex einspeisen. Unter anderem zählen dazu die ebenfalls seit über 30 Jahren bekannten »Kompasszellen«. Sie werden jeweils nur aktiv, wenn der Kopf in eine bestimmte Himmelsrichtung weist.

Drei Jahre nach der Beschreibung der Rasterzellen entdeckte das Moser-

PHYSIKNOBELPREIS

Es werde – blaues Licht!

Die Erfinder der blauen Leuchtdiode, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura, erhalten den Nobelpreis für Physik 2014. Energieeffiziente, langlebige weiße LEDs wären ohne diese Entwicklung der 1990er Jahre nicht möglich gewesen.

VON THOMAS BÜHRKE

NAGOYA UNIVERSITY



NAGOYA UNIVERSITY



RANDY LAMB, UCSB



Isamu Akasaki (links) und sein damaliger Student **Hiroshi Amano** (Mitte) entwickelten an der japanischen Universität Nagoya Methoden, um Halbleiter zu züchten, und erzeugten mit den von ihnen entwickelten Strukturen erstmals blaues Licht – eine Aufgabe, an der andere Forscher zwei Jahrzehnte lang scheiterten. Gleichzeitig war auch **Shuji Nakamura** (rechts) in den Laboren einer japanischen Firma erfolgreich.

Team dann auch noch die merkwürdigen »Grenzellen«. Diese informieren darüber, dass man sich einem großen Hindernis nähert. Und noch weitere Sorten von Navigationshilfsneuronen mit speziellen Aufgaben spielen bei der räumlichen Orientierung mit.

Module für den Informationsaustausch

Der eigentliche Clou des inneren Navigationssystems ist das geordnete und dynamische Zusammenspiel verschiedenartiger spezialisierter Neurone und Neuronengruppen. Diesen Zusammenhang arbeiteten die Forscher um das Ehepaar Moser in den Jahren nach der Entdeckung der Rasterzellen heraus. Dabei laufen Prozesse ab, die weit über die neuronalen Reiz-Reaktions-Vorgänge hinausgehen, wie man sie in der Anfangsphase der Hirnforschung hauptsächlich untersuchte.

So zeigte sich etwa kürzlich, dass Rasterzellgruppen Module bilden, die untereinander Informationen austauschen – und zwar Zellgruppen, die Karten mit unterschiedlichem Maßstab und voneinander abweichender Wa-

benausrichtung bilden. So sind in den oberen Schichten des entorhinalen Kortex kleinmaschigere Rasterzellwaben repräsentiert und etwas tiefer größere, weiter gespannte Waben.

Immer klarer wird den Hirnforschern auch, dass die Rastermodule ihrerseits aufgearbeitete Informationen weiterleiten – vor allem an den Hippocampus, wo O'Keefe die Ortszellen entdeckt hat. Heute glauben Neurowissenschaftler, dass die Aktivität der Ortszellen gerade nicht am Anfang einer Reiz-Reaktions-Kette steht wie zunächst vermutet.

Das würde bedeuten, dass diese Zellen also nicht gleich als erste feuern, wenn sich das Tier an dem bestimmten Ort befindet. Vielmehr scheinen die Ortszellen eher besonders deutliche, auf Grund von Erfahrung eingefügte Wegmarken auf der im Gehirn gezeichneten dreidimensionalen Karte darzustellen. Die Karte selbst entsteht dagegen offenbar vor allem anhand der Verarbeitungsprozesse im entorhinalen Kortex.

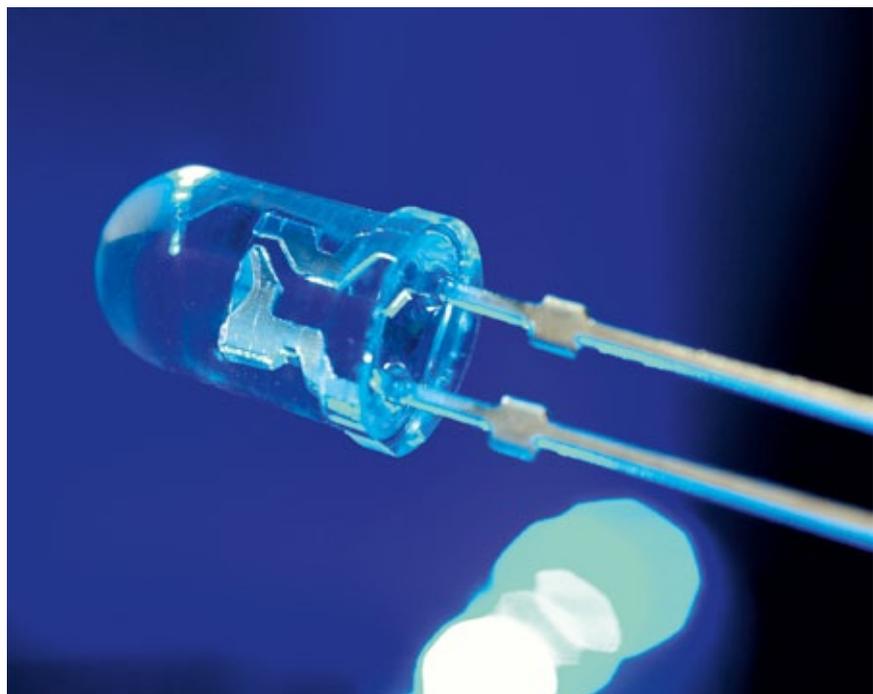
Das Nobelkomitee nennt die Entdeckungen von O'Keefe, Moser und Moser

besonders deshalb bahnbrechend, weil sie als Modell für die vernetzte Funktionsweise anderer abstrakter Hirnprozesse herhalten können. Zum Beispiel für unser Gedächtnis: Denkbar wäre etwa, spekuliert die Jury, dass eines Tages Zeit kodierende Ortszellenanaloge gefunden werden, die beim Hervorholen episodischer Erinnerungen aktiv sind.

Schlaf- und Gedächtnisforscher vermuten seit den 1990er Jahren, dass sich mit Hilfe von Ortszellen die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten während der Nachtruhe erforschen lässt. Experimente hatten nahegelegt, dass schlafende Ratten im Hippocampus Ortszellenaktivitäten in einer Reihenfolge abspulen, die eine zuvor erlernte Route durch ein Labyrinth abbildet. Gedächtnisbildung, Zeitwahrnehmung oder Navigation – gut möglich, dass diese auf den ersten Blick sehr verschiedenen Prozesse auf ganz ähnlich schematisierbaren neuronalen Prozessen beruhen.

Jan Osterkamp ist promovierter Biologe und Redakteur bei »Spektrum.de«

Nach dem Willen seines Stifters zeichnet der Nobelpreis vor allem Entwicklungen zum Nutzen der Menschheit aus. Dieser Nutzen liegt manchmal in grundlegenden theoretischen Erkenntnissen, die sich noch nicht im Alltag niedergeschlagen haben, wie 2013 bei der Auszeichnung des Higgs-Mechanismus. 2014 verleiht das Nobelkomitee den prestigeträchtigen Preis dagegen für eine Erfindung, die bereits das Leben eines großen Teils der Menschen verändert hat. Die drei Laureaten Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura entwickelten in den 1990er Jahren Leuchtdioden (kurz: LEDs), die blaues Licht aussenden. Kombiniert mit den bereits gebräuchlichen roten und grünen LEDs ermöglichten sie erstmals, weißes Licht zu erzeugen. Diese Lichtquellen haben eine sehr hohe Lichtausbeute, sparen also eine wertvolle und an vielen Orten der Welt



Bereits in den 1960er Jahren gab es die ersten roten und grünen Leuchtdioden. Doch erst mit der Entwicklung blauer LEDs um 1990 war das ganze Farbspektrum verfügbar.

Selbst Kinder und Affen sind fair

Die evolutionären Wurzeln des Gerechtigkeitssinns.

Seit es Menschen gibt, streiten Philosophen, Juristen und Politiker darüber, was gerecht ist. Aber erst seit einem Jahrzehnt wird experimentell erforscht, ob ein natürliches Gerechtigkeitsempfinden auch bei unseren tierischen Verwandten vorkommt, der Sinn für Fairness also evolutionäre Wurzeln hat.

2003 belohnten der niederländische Verhaltensforscher Frans B.M. de Waal, der das Primatenforschungszentrum der Emory University in Atlanta leitet, und die Psychologin Sarah F. Brosnan von der Georgia State University in Atlanta in einer Versuchsreihe Kapuzineraffen für die Lösung einer Aufgabe – allerdings mit Absicht höchst unterschiedlich. Während die einen Tiere mit schmackhaften Weintrauben verwöhnt wurden, sollten die anderen mit schnöden Gurkenscheiben vorliebnehmen. Das löste bei den benachteiligten Äffchen helle Empörung aus; sie weigerten sich, die Aufgabe auszuführen, und verschmähten die Gurkenstücke (*Nature* 425, S. 297–299, 2003).

Seither ist diese Streikbereitschaft auch bei Menschenaffen, Hunden und Vögeln nachgewiesen worden. Doch wozu soll der Protest gut sein? Der Streikende schneidet sich damit ja ins eigene Fleisch – bekommt er doch gar nichts statt wenigstens etwas. Ein anderes Bild ergibt sich freilich, wenn man das soziale Umfeld des Einzelnen in einer kooperierenden Population berücksichtigt. Wer sich immer nur wehrlos benachteiligen lässt, geht schließlich unter. Wer hingegen unfaire Angebote zurückweist, erhöht seine Chancen, in Zukunft besser behandelt zu werden. Das gilt umso mehr, je ausgeprägter die Kooperationsneigung in einer Gruppe ist.

Kürzlich haben sich Brosnan und de Waal gefragt, ob eine höhere Form des Gerechtigkeitssinns, die bei uns Menschen für Konfliktvermeidung und friedliches Zusammenwirken sorgt, auch bei Tieren auftritt und somit ebenfalls eine evolutionäre Vorgeschichte hat. Diese »Ungerechtigkeitsaversion zweiter Ordnung« bewirkt, dass es erst gar nicht zu Benachteiligungen, Protesten und Streiks kommt, und zwar so: Wer beim ungleichen Teilen besser dasteht und sieht, dass der andere zu kurz kommt, erkennt das als unfair und sorgt von sich aus für Kompensation, um einem drohenden Konflikt vorzubeugen (*Science* vom 17. 10. 2014, online unter [10.1126/science.1251776](https://doi.org/10.1126/science.1251776)).

Bis vor Kurzem schien es, als käme dieses selbstlose Gerechtigkeitsempfinden nur bei erwachsenen Menschen vor. Doch nun konnte ein Team um de Waal zeigen, dass auch kleine Menschenkinder und selbst Schimpansen fähig sind, auf einen Vorteil zu verzichten und gerecht zu teilen, sofern sie dadurch ein ansonsten unzugängliches Ziel erreichen.

Das funktioniert bei Kindern und Menschenaffen allerdings nur, wenn sie die Belohnung für faires Verhalten unmittelbar vor Augen haben. Gewohnheitsmäßige, prinzipielle Fairness setzt hingegen eine reife Frustrationstoleranz, Selbstkontrolle und Verzichtsbereitschaft voraus, zu der Kinder und Tiere lediglich ausnahmsweise in speziellen Versuchssituationen fähig sind.

Immerhin belegen die neuen Befunde, dass sich in der Natur evolutionäre Vorformen des menschlichen Gerechtigkeitssinns aufspüren lassen – als befolgten auch unsere tierischen Verwandten gelegentlich die goldene Regel: Behandle andere so, wie du von ihnen behandelt werden willst. Umgekehrt erscheint es im Licht solcher Resultate als ein besonders beschämender Rückfall in primitives Verhalten, wenn Menschen sich persönliche Vorteile auf Kosten anderer erschleichen. Ihnen könnte man nun vorhalten: Nehmt euch ein Beispiel an Schimpansen und kleinen Kindern!



Michael Springer

nur eingeschränkt verfügbare Ressource: Strom.

Leuchtdioden erzeugen Licht auf völlig andere Weise als die hergebrachten Glühlampen oder Fluoreszenzlampen. Sie bestehen aus mehreren Lagen unterschiedlicher Halbleiter. Eine Schicht enthält einen Überschuss an negativ geladenen Elektronen und bildet einen so genannten n-Halbleiter. Der gegenüberliegenden »p-Schicht« fehlen dagegen Ladungsträger. Diese Elektronenverarmung kann man sich als Löcher im Atomgitter vorstellen, das den Kristall formt – als »Defektelektronen«, die sich als positive Ladungsträger durch das Material bewegen.

Zwischen beiden Schichten bildet sich ein so genannter p-n-Übergang. Die Ladungsträger folgen hier dem Konzentrationsgefälle und wandern in das jeweils andere Material. So entsteht eine ladungsneutrale Zone. Legt man nun eine elektrische Spannung an die Diode an, treibt diese die Elektronen und Löcher zurück in die neutrale Übergangszone. Treffen sie dort aufeinander, vereinigen sie sich und setzen Energie frei – bei Leuchtdioden in Form von Licht (siehe Grafik S. 18).

Die Tücken der Kristallzucht

Die Energie stammt hierbei vom Elektron. Es fällt aus einem energiereichen Zustand des so genannten Leitungsbands, in dem es sich leicht durch den Halbleiter bewegen kann, in dessen »Valenzband«, in dem es stärker an die Atome des Kristallgitters gebunden ist. Die Farbe des Lichts hängt vom Energieunterschied zwischen den beiden Bändern ab – und der ist je nach verwendetem Halbleitermaterial anders.

Dieses Phänomen entdeckte schon 1907 der Brite Henry Round an einem Siliziumkarbidkristall. Doch erst in den 1950er Jahren nahm die systematische Forschung an Halbleiterstrukturen Fahrt auf. Insbesondere die Materialkombination Galliumarsenid (GaAs) erwies sich als gut geeignet, um Licht zu erzeugen. In den 1960er Jahren gab es die ersten GaAs-Leuchtdioden, die noch unsichtbares Infrarotlicht emittierten. Rasch folgten immer kürzere



BMW i3 und i8 +++ Die Zukunft der Elektromobilität
+++ Nachhaltig innovativ +++ Mit Carbonkarosserien
+++ Für weniger Emissionen +++ Und mehr Fahrfreude
+++ Durch größere Gewichtsreduzierung +++ Die
BMW Group +++ Der erste Automobilhersteller +++
Der Carbon in Großserie produziert

Mehr erfahren unter:

[BMWGROUP.COM/WHATSNEXT](https://www.bmwgroup.com/whatsnext)

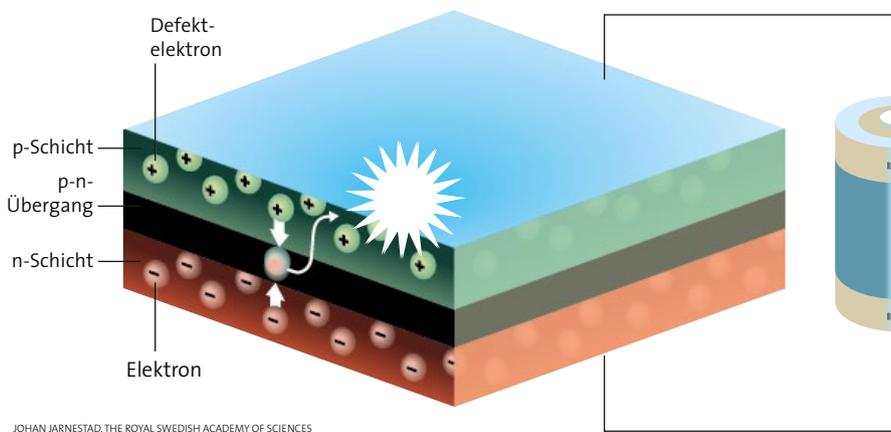
WARUM WIR BEI UNSEREN AUTOS AUF LEICHTBAU SETZEN? WEIL ES IMMER WENIGER BRINGT.

KONTINUIERLICH WENIGER EMISSIONEN DURCH INNOVATIVE MATERIALIEN.
FÜR UNS DER NÄCHSTE SCHRITT.

**BMW
GROUP**



Rolls-Royce
Motor Cars Limited



JOHAN JARNESTAD, THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Zwischen elektronenarmer p- und elektronenreicher n-Schicht zweier Halbleiterstrukturen bildet sich im Gleichgewichtszustand eine ladungsneutrale »aktive Zone«. Liegt dann eine Spannung an, zwingt sie die Ladungsträger zurück in diesen Übergangsbereich. Dort geben sie einen bestimmten Energiebetrag ab, der vom Halbleitermaterial abhängt. Bei Leuchtdioden wird diese Energie in Form von Licht frei.

Wellenlängen, zunächst rote, dann gelbgrüne LEDs. Doch die Erzeugung des energiereicheren blauen Lichts wollte mehrere Jahrzehnte einfach nicht gelingen.

Akasaki und Amano arbeiteten in den 1980er Jahren an der Universität von Nagoya. Sie konzentrierten sich auf den Halbleiter Galliumnitrid, der viel versprechende Eigenschaften besaß. Es kam zu einem Wettlauf mit anderen Wissenschaftlern, doch niemandem gelang es, hinreichend gute Kristalle aus dem Material herzustellen. In Fachkreisen galt das bald als unmöglich.

In jener Phase gingen die japanischen Forscher mit einer unkonventionellen Idee an das Problem heran: Sie verwendeten Saphir als Substrat und dampften Galliumnitrid auf diese Unterlage auf. Physiker nennen das Verfahren Epitaxie. »Eigentlich konnte das nach damaliger Lehrmeinung gar nicht funktionieren«, sagt Detlef Klimm vom Leibniz-Institut für Kristallzüchtung in Berlin. Saphir und Galliumnitrid unterscheiden sich sehr stark in ihrem Aufbau, so dass Experten meinten, auf dem Saphir könne keine Galliumnitridschicht wachsen. »Sie probierten es aber einfach aus und kamen in kurzer Zeit zu erstaunlich guten Ergebnissen«, resümiert Klimm.

1986 stellten Akasaki und Amano die ersten Galliumnitridkristalle epitaktisch in ausreichender Qualität her, zu Beginn der 1990er Jahre produzierten sie dann die ersten blauen Leuchtdio-

den. Nakamura, der bei einer kleinen Firma namens Nichia Chemicals angestellt war, ging einen technisch etwas anderen Weg, auf dem er etwa gleichzeitig zum Ziel gelangte. In den Folgejahren ging es dann vor allem darum, die Effizienz zu erhöhen und geschickt

In Sachen Lichtausbeute und Lebensdauer sind Leuchtdioden heute unübertroffen

angeordneten Halbleiterschichten immer mehr Licht zu entlocken.

Blaue Laserdioden ebneten vor allem den Weg für weißes Licht. Das erreicht man zum Beispiel, indem man die drei Farben Rot, Grün und Blau kombiniert. Warme und kalte Weißtöne entstehen heutzutage jedoch überwiegend auf andere Weise: Das Licht einer blauen LED fällt dabei auf ein Konvertermaterial, das davon angeregt gelbes Licht aussendet. Die Überlagerung beider Farben nehmen wir als Weiß wahr. Leuchtdioden dienen heute nicht nur beispielsweise als Hintergrundbeleuchtung in Flachbildschirmen. Sie ersetzen in unserem Alltag zunehmend klassische Leuchtmittel, ob in Straßenlaternen oder als Lampen in unseren Wohnungen.

Und die Forschung geht weiter: »Wir arbeiten an der Effizienz und an einfacheren Fertigungstechniken«, sagt Christoph Kölper von Osram Opto Semiconductors. In Sachen Lichtausbeute sowie Lebensdauer und damit

Wartungsfreiheit sind die Halbleiter heute unübertroffen. Auch die Autoindustrie setzt auf LEDs. »Wir sehen eine dramatische Zunahme beim Einsatz in Frontscheinwerfern«, so Kölper. Hier forschen die Ingenieure unter anderem an intelligenten Systemen, um

selektiv bestimmte Bereiche der Straße, wie Schilder und Passanten, auszuleuchten. »Da wir es hier nicht mit nur einem Halogenstrahler zu tun haben, sondern mit vielen kleinen Birnchen, können wir diese einzeln ansteuern«, führt Kölper aus.

Die Techniken der Kristallzüchter werden ebenfalls immer ausgefeilter.

»Heute züchten wir Galliumnitridkristalle beispielsweise auch rein und schaffen damit das, was die Wissenschaftler damals nicht hinbekommen haben«, sagt Detlef Klimm.

So hat die Entwicklung der drei Nobelpreisträger unser Alltagsleben tatsächlich bereits tief greifend verändert und wird es wohl auch weiterhin tun. Nakamura ist übrigens durch seine Erfindung ein reicher Mann geworden. Im Jahr 2005 erstritt er vor Gericht gegen seinen damaligen Arbeitgeber Nichia Chemicals einen Vergleich von umgerechnet mehreren Millionen Euro – um an der geschätzten Milliarde beteiligt zu werden, die das Unternehmen seither mit seiner Erfindung eingenommen hatte.

Thomas Bürke ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Schwetzingen.

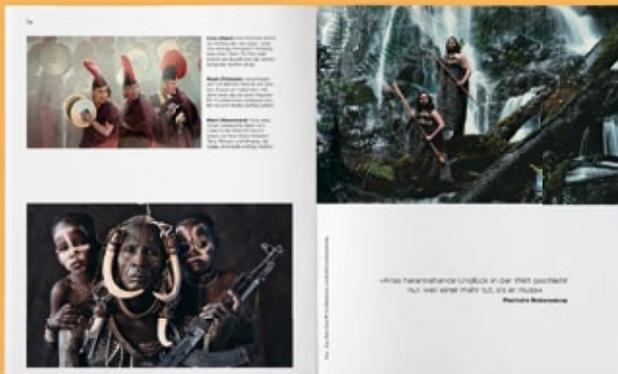
Sie möchten mehr wissen?



Brauchen wir noch Alphetiere?



Die Chancen in jeder Lebensphase



Von fremden Kulturen lernen



Was schaffen wir bis 2030 auf der Welt?



10 Jahre ZEIT WISSEN – das Jubiläumsheft mit Blick nach vorn. Lesen Sie Neues und Spannendes aus Wissenschaft, Technik, Gesellschaft und Umwelt: faszinierend, lebendig und lebensnah! **Jetzt überall im Handel.**

Warum wir schlafen

Während der Nachtruhe entfernt oder schwächt das Gehirn bestimmte Kontakte zwischen Nervenzellen. Dieses neuronale Ausmisten ist sinnvoll: Es spart Energie – und sorgt für ein gut arbeitendes Gedächtnis.

Von Giulio Tononi und Chiara Cirelli

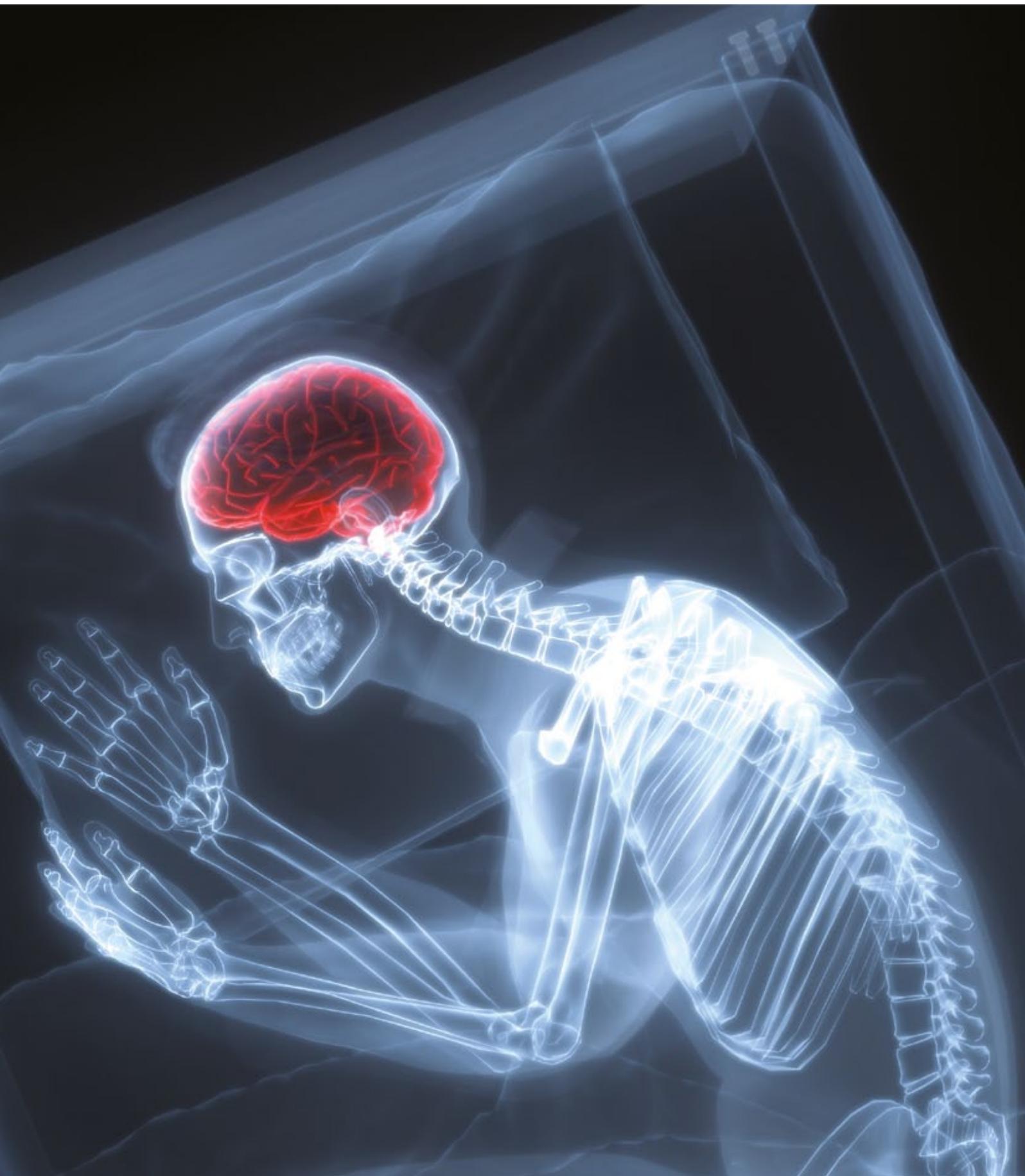
Schlafen ist schon etwas Seltsames – blind, stumm, wie gelähmt liegen wir im Bett. Das Gehirn ist jedoch sehr aktiv: Seine Nervenzellen feuern fast so häufig wie im Wachzustand. Wozu dient diese rastlose Aktivität in einer Phase, in der wir uns doch angeblich ausruhen? Und warum entkoppelt sich dabei das Bewusstsein von der Umwelt, während das Gehirn sozusagen Selbstgespräche führt?

Auf jeden Fall scheint der Schlaf äußerst wichtig zu sein – schließlich findet er sich nach heutigem Wissen wohl bei allen Tieren in irgendeiner Form. Und dies, obwohl sie im Zustand bewusstloser Reaktionsunfähigkeit dem Angriff eines Feindes leichter zum Opfer fallen können. Vögel schlafen, Leguane schlafen, Kakerlaken schlafen – und sogar Fruchtfliegen, wie wir und andere Forscher bereits Anfangs des neuen Jahrtausends nachwiesen.

Um Schlaf auch unter erschwerten Bedingungen zu ermöglichen, entstanden im Lauf der Evolution einige erstaunliche Anpassungen. So bleibt bei Delfinen und anderen Meeressäugern, die zum Atmen immer wieder an die Wasseroberfläche kommen müssen, abwechselnd jeweils eine ihrer beiden Hirnhälften wach.

Wissenschaftler fragen sich seit Langem, weshalb Schlaf für die unterschiedlichsten Kreaturen so wichtig ist. Schon etwa Anfang der 1990er Jahre, als wir beide gemeinsam an der Scuola Superiore Sant'Anna im italienischen Pisa arbeiteten, kam uns hierzu ein Gedanke: Möglicherweise versetzt die Hirnaktivität beim Schlafen all die Milliarden von Verbindungen zwischen einzelnen Nervenzellen, die sich wegen der vielfältigen Ereignisse und Eindrücke eines Tages verändert haben, wieder in eine Art Grundzustand zurück. Dieser Hypothese zufolge ermöglicht Schlafen einem Individuum, sein Leben lang neue Gedächtnisinhalte zu formen, ohne

Im Schlaf arbeitet unser Gehirn auf Hochtouren – während sich die übrige Körperaktivität auf ein Minimum reduziert.



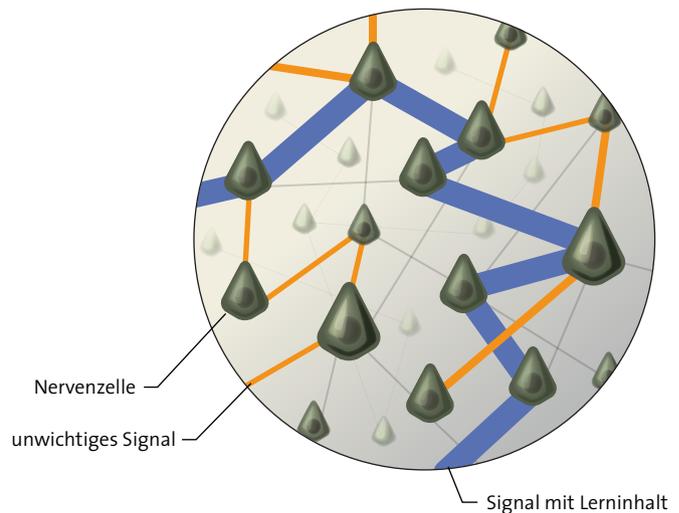
MIRKO ILIC

Schlaf und Gedächtnis

Wenn wir wach sind, entstehen dauerhafte Erinnerungen, indem gemeinsam feuernde Nervenzellen ihre Kontaktstellen, die so genannten Synapsen, verstärken. Bisher nahmen Forscher an, dass die Reaktivierung neuronaler Schaltkreise während des Schlafens die Synapsen weiter festigt. Offenbar ist jedoch das Gegenteil der Fall (rechte Seite): Spontane Aktivität der Nervenzellen im Schlaf scheint Synapsen zu schwächen und auf eine Art Grundzustand zurückzuführen. Das spart Energie und reduziert die Belastung der Neurone. Die Wiederherstellung dieses Grundzustands – die synaptische Homöostase – könnte der eigentliche Zweck des Schlafes sein.

WACHZUSTAND

Nervenzellen feuern gleichermaßen als Antwort auf wichtige (als Erinnerung speicherwürdige; blau) wie unwichtige Reize (orange) aus der Umgebung, was die Synapsen in den aktivierten neuronalen Netzen stärkt.



dass sich die Kapazität des Gehirns erschöpft oder ältere Erinnerungen verloren gehen.

So ließe sich auch erklären, weshalb die Wahrnehmung der Umwelt während des Schlafes abgeschaltet bleibt. Das unterbricht demnach die bewusste Erfahrung des Hier und Jetzt, damit das Gehirn neue und alte Gedächtnisinhalte zusammenführen kann. Für diesen Prozess bietet der Schlaf einen geschützten Raum.

Unter Forscherkollegen, die den Schlaf und seine Bedeutung für Lernen und Gedächtnis untersuchen, ist unsere Hypothese umstritten. Denn laut konventioneller Sichtweise verstärkt die Hirnaktivität während des Schlafes jene neu-

ronalen Verbindungen, die an der Bildung neuer Gedächtnisinhalte mitwirken. Wir dagegen vermuten, dass Schlaf zum Wiederherstellen eines neuronalen Ausgangszustands die Kontaktstellen zwischen den feuern den Nervenzellen schwächt. Die Ergebnisse jahrelanger Forschungen an den verschiedensten Organismen, von Fliegen bis zum Menschen, stützen unsere Ansicht.

Ein kurzes Nickerchen fördert die Merkfähigkeit

Die Überlegung, Schlaf sei grundsätzlich für das Gedächtnis wichtig, kam erstmals vor etwa 100 Jahren auf. Zahlreiche Experimente zeigten seitdem, dass neue Inhalte nach einer durchgeschlafenen Nacht oder auch nur einem kurzen Nickerchen besser haften, als wenn die Versuchsperson die gleiche Zeit wach bleibt. Dies gilt sowohl für »explizite« Informationen wie Vokabeln und Orte als auch für das »prozedurale« Gedächtnis, das Fertigkeiten wie das Spielen eines Musikinstruments zu Grunde liegt.

Ausgehend von dieser Erkenntnis suchten Forscher nach Anzeichen dafür, dass das Gehirn neu erworbene Gedächtnisinhalte nachts rekapituliert. Seit den 1990er Jahren führten sie eine Reihe von Studien zunächst bei Nagetieren und später bei menschlichen Probanden durch, laut denen tatsächlich manche neuronale Aktivitätsmuster während des Schlafes solchen ähneln, die zuvor im Wachzustand auftraten. Wenn zum Beispiel eine Ratte lernt, sich in einem Labyrinth

AUF EINEN BLICK

RASTLOSE RUHE

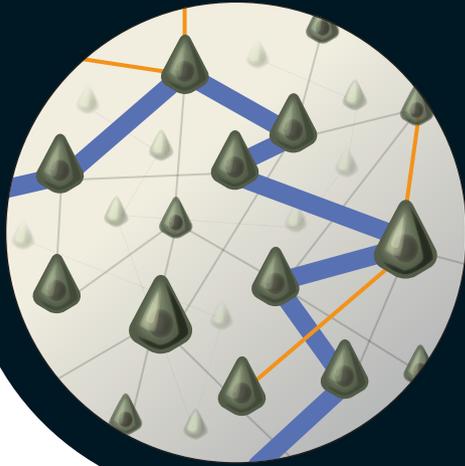
1 Schlaf tritt offenbar bei allen Tieren auf. Daher dürfte er eine lebenswichtige Funktion erfüllen.

2 Laut den Studien der Autoren und anderer Forscher schwächt Schlaf die Kontakte zwischen den Nervenzellen, die **Synapsen**. Dies überrascht zunächst, da Synapsen in Wachphasen gestärkt werden – was **Lernen** und **Gedächtnis** fördert.

3 Doch das Phänomen erweist sich als sinnvoll: Die **Schwächung** der Synapsen im Schlaf verhindert, dass die Hirnzellen mit tagsüber angesammelten Einflüssen überflutet werden und zu viel **Energie** verbrauchen.

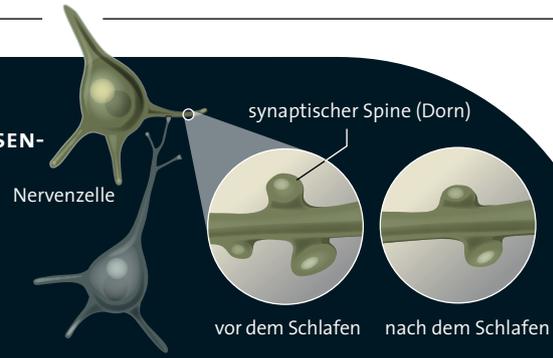
SCHLAFZUSTAND

Spontanes Feuern löst oder schwächt (dünne Linien) neuronale Verknüpfungsstellen. Dabei werden vor allem unwichtige Synapsen abgebaut, so dass wesentliche Gedächtnisinhalte bestehen bleiben.



BELEGE FÜR DIE SYNAPSENSCHWÄCHUNG

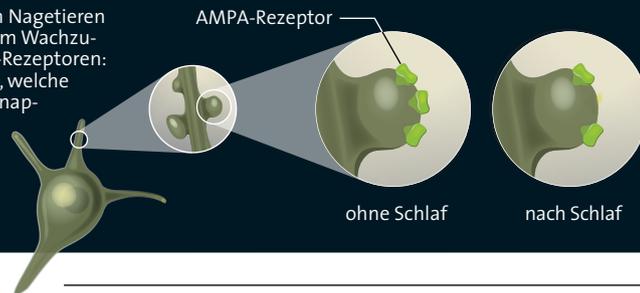
Die Anzahl der synaptischen Spines – Zellstrukturen, an denen Signale ankommen – nimmt bei Fliegen und Mäusen im Lauf des Tages zu, und geht während des Schlafs zurück.



Sowohl bei Ratten als auch bei Menschen antworten elektrisch oder magnetisch stimulierte Nervenzellen stärker, wenn das Individuum unter Schlafmangel leidet, als wenn es ausreichend geschlafen hat.



Bei erwachsenen Nagetieren vermehren sich im Wachzustand die AMPA-Rezeptoren: Proteinmoleküle, welche die Stärke der Synapsen erhöhen. Ihre Anzahl nimmt während des Schlafs wieder ab.



zurechtzufinden, feuern bestimmte Nervenzellen im Hippocampus – einer für das Gedächtnis wichtigen Hirnregion – in charakteristischen Abfolgen. Schläft das Tier danach ein, wiederholen sich solche Sequenzen häufiger, als es zufällig zu erwarten wäre.

Daher vermuteten viele Forscher, dass dieses wiederholte nächtliche »Abspielen« neue Gedächtnisinhalte festigt, indem es gerade solche Nervenzellkontakte (fachlich: Synapsen) verstärkt, die bereits während der vorangegangenen Wachphase aktiver waren. In der Tat war von wachen Tieren her bereits bekannt: Nach wiederholtem Feuern miteinander verbundener Neurone leiten die daran beteiligten Synapsen Signale bereitwilliger weiter. Laut einer verbreiteten Annahme speichert dies Gedächtnisinhalte besser in den neuronalen Verschaltungen ab. Die meisten Forscher halten diese »synaptische Potenzierung« für den entscheidenden Mechanismus von Lernen und Gedächtnisbildung.

Aber dafür, dass Synapsen auch beim Schlafen durch Aktivität stärker werden, fehlen bisher jegliche Belege. Unserer Vermutung zufolge würde sowohl wiederholtes Abspielen als auch anscheinend zufälliges Feuern während des Schlafs die Verbindungen zwischen den Neuronen eher schwächen als kräftigen.

Viele Gründe sprechen für die Annahme, dass Synapsen nicht immer nur gestärkt werden dürfen, damit das Gehirn überhaupt richtig funktionieren kann. So verbrauchen star-

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema »Schlaf – unser Körper im Ruhemodus« finden Sie unter www.spektrum.de/thema/schlaf/1295691



ke Synapsen mehr Energie, und über diese verfügt das Gehirn nicht unbegrenzt. Es benötigt fast 20 Prozent der gesamten Energie des menschlichen Körpers – auf das Gewicht bezogen mehr als jedes andere Organ. Mindestens zwei Drittel des Bedarfs im Gehirn entfallen dabei auf die Synapsen. Für deren Aufbau und Erhalt müssen die Neurone zudem laufend verschiedenste Zellkomponenten bereitstellen: von Mitochondrien für die Energieproduktion über synaptische Vesikel (Membranbläschen, die Signalmoleküle transportieren) bis zu speziellen Proteinen und Lipiden, die für die Kommunikation an den Synapsen notwendig sind.

Diese hohe Belastung dürfte für das Gehirn auf Dauer nicht tragbar sein. Es kann nicht ein Leben lang Tag und Nacht Synapsen produzieren, verstärken und aktiv halten,

ohne auch entlastet zu werden. Zweifellos basiert Lernen entscheidend auf dem Prinzip der synaptischen Potenzierung, doch unsere Ansicht nach geschieht dies nicht im Schlaf. Synapsen während der Ruhephasen zu schwächen oder gar abzubauen, würde dagegen Energieverbrauch und Belastung der Zellen reduzieren. Wir sprechen hier vom Erhalt synaptischer Homöostase. Unseren Ansatz zur Erklärung der Funktion des Schlafs dabei bezeichnen wir als »Hypothese der synaptischen Homöostase« (englisch: synaptic homeostasis hypothesis, kurz SHY).

Neuronaler Neustart

In Grunde erklärt die SHY die unverzichtbare und universelle Rolle des Schlafs für alle Organismen, die ihn kennen: Das Gehirn gelangt zurück in einen Ausgangszustand, von dem aus es während der folgenden Wachphase wieder Neues lernen und sich an die aktuellen Erfordernisse anpassen kann. Das Risiko, das wir eingehen, wenn wir uns über Stunden von der Umwelt entkoppeln, wäre demnach der Preis für diese neuronale Rekalibrierung. Allgemeiner gesprochen liefert Schlaf die Voraussetzung für die viel gerühmte Plastizität des Gehirns – seine Fähigkeit zur Veränderung als Reaktion auf neue Erfahrungen.

Aber wie erklärt unsere Hypothese den positiven Effekt von Schlaf auf Lernen und Gedächtnis? Wie ermöglichen geschwächte Synapsen es, Fertigkeiten und Fakten besser abzuspeichern?

Im Lauf eines Tages hinterlässt alles, was wir erleben, eine neuronale Spur im Gehirn. Davon machen die bedeutsamen Ereignisse – etwa eine neue Bekanntschaft oder das Erlernen eines Musikstücks auf der Gitarre – nur einen vernachlässigbaren Teil aus. Für ein leistungsfähiges Gedächtnis muss das Gehirn daher das »Rauschen« der irrelevanten Informationen von den »Signalen« der wichtigen unterscheiden.

Unserer Auffassung nach geschieht das wie folgt: Spontanes Feuern von Neuronen im Schlaf aktiviert unzählige Schaltkreise in unterschiedlichsten Kombinationen, die sowohl neue Gedächtnisspuren wie auch alte Netzwerke längst bekannter Assoziationen umfassen. Träume wären demnach als Nebeneffekt der ungeordneten neuronalen Aktivität anzusehen. Mit dieser versucht das Gehirn herauszufinden, welche neuen Gedächtnisspuren gut zu Inhalten passen, die sich bereits zuvor als bedeutsam erwiesen haben. Synapsen, die sich nicht recht in dieses vorhandene Gerüst einfügen lassen, schwächt es dann. Mehrere Forscherteams, darunter unseres, untersuchen die Mechanismen, mit denen das Gehirn selektiv solche Kontaktstellen schwächt, die bedeutungslose Inhalte kodieren, und jene erhält, die wichtigen Informationen entsprechen.

Während dieses Durchspielens imaginärer Szenarien ist es nun aber durchaus sinnvoll, wenn wir unsere Umwelt nicht wahrnehmen und handlungsunfähig sind – also schlafen. Fehlleistungen aller Art wären sonst vorprogrammiert. Im Wachzustand würden zudem wohl die Ereignisse des jeweiligen Tages dominieren, so dass die aktuellsten Eindrücke

Vorrang hätten und nicht die wirklich wichtigen. Die Abkoppelung des Gehirns im Schlaf befreit es vorübergehend von der Diktatur der aktuellen Realität und schafft ideale Umstände, Gedächtnisinhalte zu integrieren und zu festigen.

Unsere Vermutung, dass das Gehirn neuronale Aktivitäten im Schlaf eher dazu nutzt, Synapsen zu schwächen als zu stärken, stützt sich unter anderem auch auf Untersuchungen mittels Elektroenzephalografie, einer Standardmethode der Schlafforschung. Ein Elektroenzephalogramm (EEG) entsteht, indem die elektrische Aktivität in der Großhirnrinde mit Hilfe von Elektroden an der Kopfhaut aufgezeichnet wird. Schon vor Jahrzehnten zeigten solche Hirnstrommessungen, dass sich beim Schlaf zwei Grundtypen abwechseln, die verschiedene EEG-Muster erzeugen. Im REM-Schlaf (REM steht für englisch »rapid eye movement«), bei dem sich die Augen unter geschlossenen Lidern rasch hin- und herbewegen, enthält das EEG schnelle regelmäßige Schwankungen, die jenen im Wachzustand ähneln. Während Non-REM-Phasen hingegen dominieren so genannte langsame Wellen mit etwa einem Ausschlag pro Sekunde.

Anfang des Jahrhunderts entdeckte Mircea Steriade (1924–2006) von der Laval University im kanadischen Quebec: Die langsamen Non-REM-Wellen treten dann auf, wenn Gruppen von Neuronen eine »On-Periode« lang gemeinsam feuern und dann für den Bruchteil einer Sekunde (»Off-Periode«) verstummen, bevor sie erneut synchron aktiv werden. Seitdem beobachteten andere Forscher bei Vögeln und Säugern, dass diese langsamen Wellen nach einer langen Wachphase besonders vehement ausschlagen und mit zunehmender Schlafdauer allmählich abflachen.

Unserer Überlegung nach sollten starke Synapsen die Aktivität der Neurone mehr synchronisieren und damit ausgeprägtere langsame Wellen hervorrufen. Schwache Synapsen hingegen produzieren flachere EEG-Ausschläge. Und tatsächlich: Laut Computersimulationen und Experimenten mit Menschen und Tieren zeigen die hohen und steilen langsamen Wellen zu Beginn des Nachtschlafs an, dass sich die Synapsen in der vorherigen Wachphase verstärkt haben, während niedrigere langsame Wellen in den Morgenstunden auf ihre Schwächung im Verlauf des Schlafs hindeuten.

Verschiedene Tierexperimente ergaben sogar direkte Hinweise darauf, dass das Gehirn Neuronenverbindungen während des Schlafs schwächt und möglicherweise ganz kappt. So



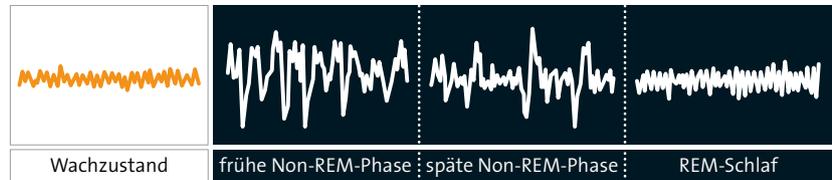
Auf unserer Internetseite finden Sie ein Video mit einem rund 20-minütigen englischsprachigen Vortrag des Autors Giulio Tononi, in dem er detailliert auf die im Artikel beschriebenen Inhalte seiner Forschung zu den Funktionen des Schlafs eingeht.

www.spektrum.de/artikel/1309282

Schlafen in Wellen

Ableitungen der elektrischen Aktivität des Gehirns

zeigen im Gehirn eines Schlafenden spezifische Veränderungen – je nachdem ob er gerade eine REM-Schlafphase mit schnellen Augenbewegungen (REM = rapid eye movement) oder eine Non-REM-Phase durchläuft (siehe Grafik). Die langsameren Wellen des Non-REM-Schlafs flachen im Lauf der Nacht ab – was nahelegt, dass die beteiligten Synapsen schwächer werden. Das könnte laut der Autoren des Artikels geschehen, weil bestimmte chemische Signalstoffe, die zur Stärkung der Synapsen benötigt werden, dann in viel geringerer Konzentration vorliegen.



beobachteten wir bei Taufliegen, wie Anzahl und Größe der Synapsen tagsüber allmählich zunehmen – insbesondere wenn sich die Tiere in einer stimulierenden Umgebung aufhalten – und Schlaf das wieder rückgängig macht. Und wenn Taufliegen abends mehr »synaptische Spines« auf den signalaufnehmenden Fortsätzen der Gehirnneuronen aufweisen, weil sie den Tag mit Artgenossen verbracht haben, geht die Zahl dieser dornenförmigen Ausstülpungen bis zum nächsten Morgen auf das Ausgangsniveau zurück. Das geschieht jedoch nur, wenn die Fliegen dazwischen schlafen können.

Direktes Messen der Synapsenstärke

Ein ähnliches Phänomen beobachteten wir in der Hirnrinde von jungen Mäusen: Die Anzahl der synaptischen Spines nahm im Wachzustand tendenziell zu und ging während des Schlafs zurück. Bei erwachsenen Nagetieren ändert sich dagegen nicht die Anzahl der Spines, sondern die Menge der dort vorkommenden AMPA-Rezeptoren – das sind Moleküle auf der Zelle, die über die Stärke einer Synapse entscheiden. Nach einer Wachphase finden sich mehr davon pro Kontaktstelle als nach dem Schlafen. Mit anderen Worten: In letzterem Fall sind die Synapsen geschwächt.

Die Stärke von Synapsen lässt sich direkt messen, und zwar indem man Nervenfasern in der Hirnrinde über Elektroden stimuliert. Neurone reagieren auf solche Reize mit einer elektrischen Entladung, die bei starken Synapsen deutlicher ausfällt als bei schwachen. Wir wiesen nach, dass derart gereizte Zellen bei Ratten stärker feuern, wenn die Tiere zuvor einige Stunden wach waren, als wenn sie gerade geschlafen haben.

Marcello Massimini von der Universität Mailand und Reto Huber, der zur Zeit an der Universität Zürich arbeitet, unternahm ähnliche Experimente bei menschlichen Probanden. Statt einer ins Gehirn eingeführten Elektrode verwendeten sie aber die transkranielle Magnetstimulation, bei der von außen her ein kurzer magnetischer Impuls die Neurone der Hirnrinde stimuliert. Deren Reaktionen zeichneten die Forscher per hochauflösendem EEG auf. Ihre Ergebnisse waren eindeutig: Je länger ein Proband vor dem Experiment wach war, desto ausgeprägter fielen die so hervorgerufenen EEG-Wellen aus. Erst nachdem die Versuchspersonen eine

Nacht geschlafen hatten, kehrte die Amplitude der Ausschläge auf das Ausgangsniveau zurück.

Aus all diesen Experimenten ziehen wir folgenden Schluss: Die spontane Aktivität der Hirnrinde beim Schlafen schwächt tatsächlich die synaptischen Verbindungen in den neuronalen Netzen – indem sie ihre Fähigkeit zur Auslösung elektrischer Impulse reduziert oder indem sie sie ganz beseitigt. Diese so genannte Negativselektion sichert den Bestand jener Schaltkreise, die entweder im Wachzustand stark und durchgängig aktiv sind – etwa wenn ein Gitarrist beim Erlernen eines neuen Stücks immer wieder den gleichen Abschnitt übt – oder sich in bereits vorhandene Erinnerungen gut einfügen, wie ein neues Wort in einer vertrauten Sprache. Unterdrückt werden hingegen die Synapsen in Verknüpfungen, die nur wenig aktiviert wurden (beispielsweise durch ein paar beiläufig gespielte Gitarrentöne) oder zu bestehenden Gedächtnisinhalten schlecht passen (ein neues Wort in einer fremden Sprache).

Auf diese Weise hinterlassen unbedeutende Ereignisse keine bleibenden Spuren in unseren neuronalen Netzwerken, während wichtige Gedächtnisinhalte erhalten bleiben. Zudem entsteht Raum für die nächste Runde synaptischer Verstärkung am folgenden Tag. Tatsächlich lernt der Mensch nach einer gut durchschlafenen Nacht neue Inhalte besser als am Ende einer langen Wachphase – Schüler und Studenten, aufgepasst!

Den genauen Mechanismus der selektiven Synapsenschwächung kennen wir zwar noch nicht, aber wir haben indirekte Hinweise darauf, wie sie zu Stande kommt: Vermutlich spielen die oben erwähnten langsamen Wellen des Non-REM-Schlafs hier eine Rolle. Dafür sprechen Laborexperimente an Hirngewebe von Ratten. Bei ihnen leiteten Nervenzellen Signale weniger effektiv weiter, wenn sie auf eine Art und Weise gereizt wurden, die den synchronisierten langsamen On-Off-Zyklen des Non-REM-Schlafs ähnelte.

Außerdem kommt es während des Non-REM-Schlafs zu chemischen Veränderungen im Gehirn, die ebenfalls Synapsen schwächen könnten. Im Wachzustand umspült die Nervenzellen eine konzentrierte Lösung von Signalmolekülen. Diese so genannten Neuromodulatoren wie Acetylcholin, Noradrenalin, Dopamin, Serotonin, Histamin und Hypocre-



tin verstärken Synapsen, wenn diese feuern. Beim Schlafen, insbesondere während des Non-REM-Schlafs, verringert sich die Konzentration solcher Moleküle massiv. Das könnte dazu führen, dass Nervenzellkontakte schwächer statt stärker werden, wenn sie Signale übertragen. Auch der so genannte BDNF (Brain-Derived Neurotrophic Factor) spielt möglicherweise eine Rolle; er fördert Synapsen und hilft beim Bilden neuer Gedächtnisinhalte. Seine Konzentration in Nervenzellen ist im Wachzustand wesentlich höher als im Schlaf.

Wenn Hirnteile schlafen und der Körper wach bleibt

Insgesamt gibt es bei vielen Tierarten klare Belege dafür, dass die durchschnittliche Stärke der Synapsen während der Wachphasen steigt und während des Schlafs sinkt – genau wie es die SHY-Hypothese besagt. Um diese weiter zu testen, kann man zudem ihre möglichen Konsequenzen näher untersuchen.

Wenn unsere Hypothese zutrifft, müssten nämlich jene Teile des Gehirns am dringendsten schlafen, die sich tagsüber am stärksten verändern. Schlafbedarf zeigt sich wiederum an einer vergrößerten Amplitude und Dauer der langsamen Non-REM-Wellen. Um diese Vermutung zu prüfen, brachten wir einigen Probanden kurz vor dem Schlafen eine neue Fertigkeit bei: auf dem Computerbildschirm mit einem mausgesteuerten Cursor einen Zielpunkt zu treffen, während die Bewegungsrichtung des Cursors systematisch verändert wurde. Für das Erlernen solcher Aufgaben ist der rechte Scheitellappen der Hirnrinde zuständig. Tatsächlich fielen zu Beginn des darauffolgenden Schlafs die langsamen Wellen in diesem Bereich des Gehirns größer aus als in der Nacht vor dem Training. Die Hirnregion musste sich offenbar beim Erlernen der neuen Aufgabe ziemlich anstrengen.

Viele Experimente, die wir und andere später durchführten, bestätigen, dass Lernen – und ganz allgemein die Aktivierung von Synapsen in neuronalen Netzen – den Regenerationsbedarf des Gehirns lokal erhöht. Vor allem scheinen örtlich begrenzte Gruppen von Nervenzellen nach intensivem Gebrauch »einzuschlafen«, während der Rest des Gehirns (und der übrige Körper) wach bleibt. Bei länger als ge-

wöhnlich wach gehaltenen Ratten offenbart ein Teil der Neurone in ihrer Hirnrinde kurze Phasen der Funkstille, die den Off-Perioden im Non-REM Schlaf gleichen. Währenddessen läuft das betreffende Tier aber mit offenen Augen herum und verhält sich wie eine wache Ratte.

Laut unseren jüngsten Untersuchungen zu diesem »lokalen Schlaf« treten solche lokalisierten Off-Perioden auch bei Menschen nach Schlafentzug auf und nehmen nach intensivem Lernen zu. Offenbar führen verlängerte Wachphasen oder die Überlastung bestimmter neuronaler Schaltkreise dazu, dass kleinere Hirnareale unbemerkt kurze Nickerchen einlegen. Womöglich sind so manche Irrtümer, dumme Fehler, gereizte Reaktionen und Verstimmungen das Ergebnis lokalen Schlafs bei Menschen, die sich selbst für hellwach und völlig unter eigener Kontrolle halten.

Gemäß der SHY ist ausreichender Schlaf in der Kindheit und Jugend besonders wichtig. Schließlich handelt es sich um Zeiten intensiven Lernens. Wie viele Studien gezeigt haben, gehen damit umfangreiche Veränderungen der synaptischen Verbindungen einher. In der Jugend entstehen, erstarken und verschwinden Synapsen mit einer atemberaubenden Geschwindigkeit, wie sie bei Erwachsenen nicht mehr auftritt. Die Negativselektion im Schlaf würde auch hier eine entscheidende Rolle spielen, indem sie den Energiebedarf dieser intensiven Umbauprozesse reduziert und nützliche neuronale Verschaltungen aufrechterhält.

Was geschieht also, wenn der Schlaf in kritischen Phasen der Entwicklung gestört oder verkürzt wird? Könnte ein Schlafdefizit die optimale Ausbildung von Nervenzellnetzen stören? Falls ja, dürften nicht nur vorübergehende Vergesslichkeit oder einzelne Irrtümer die Folge sein, sondern dauerhafte Veränderungen der neuronalen Verschaltungen im Gehirn. Ob das der Fall ist, wollen wir nun versuchen, herauszufinden. ~

DIE AUTOREN



Giulio Tononi und **Chiara Cirelli** sind Professoren für Psychiatrie an der University of Wisconsin-Madison. Ihre Untersuchungen zur Funktion des Schlafs sind Teil eines größeren Forschungsprojekts zum menschlichen Bewusstsein.

QUELLEN

- Bushey, D., Tononi, G., Cirelli, C.:** Sleep and Synaptic Homeostasis: Structural Evidence in *Drosophila*. In: *Science* 332, S. 1576–1581, 2011
- Cirelli, C., Tononi, G.:** Sleep and the Price of Plasticity: From Synaptic and Cellular Homeostasis to Memory Consolidation and Integration. In: *Neuron* 81, S. 12–34, 2014
- Diekelmann, S., Born, J.:** The Memory Function of Sleep. In: *Nature Reviews Neuroscience* 11, S. 114–126, 2010
- Vyazovskiy, V. et al.:** Local Sleep in Awake Rats. In: *Nature* 472, S. 443–447, 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1309282

FASZINIEREND
Unser Kosmos –
Die Reise geht weiter

MUTIG
Ultimate Survival Alaska



INSPIRIEREND
Brain Games

10 JAHRE

NATIONAL GEOGRAPHIC CHANNEL

Faszinierende Einblicke, inspirierende Geschichten und aufregende Abenteuer!
National Geographic Channel entführt dich an Orte, an die kein anderer kommt.
Und zeigt dir die Dinge, wie du sie bisher nicht gesehen hast!

Empfangbar u.a. bei Sky, Kabel Deutschland, Unitymedia, Kabel BW, KabelKiosk, Vodafone und der Deutschen Telekom

 NATIONAL
GEOGRAPHIC
CHANNEL
natgeotv.com

TITELTHEMA: GEDÄCHTNIS

Vokabellernen mit Rosenduft

Der Tübinger Psychologieprofessor **Jan Born** untersucht, wie Schlaf dem Gedächtnis auf die Sprünge hilft: Manche Nervenverbindungen werden seiner Überzeugung nach im Schlaf gestärkt. Das verbessert und ordnet wichtige Erinnerungen.



WOLFRAM SCHEIBLE, UNIVERSITÄT TÜBINGEN;
MIT FRDL. GEN. DES ARCHIVS DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Herr Professor Born, Ihre amerikanischen Kollegen Giulio Tononi und Chiara Cirelli meinen, das Gehirn veranlasse nachts lediglich eine Art Hausputz, um unwichtige Erinnerungen vom Tag wieder loszuwerden. Ist das wirklich alles, was da geschieht?

PROF. JAN BORN: Wenn tatsächlich nur Verbindungen zwischen den Nervenzellen geschwächt würden, dann würden wir im Schlaf hauptsächlich Dinge vergessen, die wir in der vorausgegangenen Wachphase aufgenommen haben. Das passiert aber nicht. Es gibt praktisch keine Belege dafür, dass im Schlaf so etwas wie Vergessen angestoßen wird, auch nicht von Unwichtigem. Ganz im Gegenteil: Viele Experimente zeigen, dass Schlaf Gedächtnisinhalte verstärkt und das Vergessen verringert.

Tononi liefert also eine Erklärung für etwas, das es gar nicht gibt?

BORN: Wenn man sich ansieht, was Versuchspersonen nach dem Schlaf behalten und was sie vergessen haben, kann man es durchaus so ausdrücken, auch wenn es etwas harsch klingt. Deshalb sind Zweifel zumindest an der ursprünglichen Form dieser Vorstellung angebracht. Es muss so sein, dass einige synaptische Verbindungen zwischen Nervenzellen von dieser nächtlichen Schwächung ausgespart bleiben, was Tononi aber mittlerweile auch in seine Theorie integriert hat. Dadurch erscheinen einige Gedächtnisinhalte nach dem Schlaf verstärkt. Und zwar einfach deshalb, weil alles drumherum geschwächt worden ist.

»Gedächtnisinhalte erscheinen nach dem Schlaf verstärkt – weil andere geschwächt wurden«

Die nächtliche Schwächung von Nervenverbindungen gibt es also?

BORN: Ja. Wir haben unsererseits diesen Aspekt inzwischen in unsere Theorie eingearbeitet, weil es einfach sehr viele Belege dafür gibt, dass auf globaler Ebene eine Schwächung der Synapsen im Schlaf stattfindet.

Aber wozu dient das, wenn die Nacht gar nicht zum Vergessen da ist?

BORN: Das Gehirn speichert Informationen erst einmal sehr großzügig. Wenn es mit neuen Ereignissen konfrontiert wird, werden neuronale Netzwerke im Überschuss erregt und entsprechend viele neue Nervenverbindungen angelegt. Der nächtliche Abbau von Synapsen sorgt möglicherweise dafür, dass die

gespeicherten Gedächtnisinformationen auf einen kleinen Bereich beschränkt und damit viel effizienter festgehalten werden.

Warum ist das in den Untersuchungen zum Synapsenabbau nicht schon lange aufgefallen?

BORN: Diese Studien waren immer nur ganz global. Sie hatten zum Beispiel die gesamte Großhirnrinde oder zumindest große Teile davon im Blick. Sie waren nicht auf das gerichtet, was sich in der bestimmten Hirnregion abspielt, die für eine gerade gelernte Aufgabe tatsächlich zuständig ist.

Und da werden Nervenverbindungen gestärkt, wie Sie es im Unterschied zu Tononi postulieren?

BORN: Eine neue Arbeit von Guang Yang, die im Sommer 2014 im Fachmagazin »Science« erschienen ist (*Science* 34, S.

Jan Born ist Neurowissenschaftler und hat einen Lehrstuhl für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie an der Universität Tübingen inne. Dort erforscht er die Mechanismen von Lernen und Gedächtnis sowie die neuronalen Veränderungen des Gehirns im Schlaf. Born ist Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Im Jahr 2010 erhielt er den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

1173–1178), zeigt das besonders schön. Dabei mussten Mäuse lernen, auf einer rotierenden Walze zu laufen, um nicht herunterzufallen. Durch ein kleines Loch im Schädel konnten die Forscher verfolgen, wie sich im Bewegungszentrum ihres Gehirns neue Nervenverbindungen bildeten – und zwar auch noch im Schlaf nach diesem Training. Das ließ sich beobachten, weil die Mäuse gentechnisch so verändert waren, dass ein bestimmtes Eiweiß in den Synapsen fluoreszierte.

Gibt es noch mehr Belege dafür, dass das Gehirn im Schlaf Erinnerungen verstärkt?

BORN: In einem klassischen Experiment mussten Ratten einen Weg durch ein Labyrinth lernen. Während sie anschließend schliefen, feuerten Gehirnzellen im Hippocampus in einem ganz ähnlichen Muster wie vorher beim Üben. Man erkennt tatsächlich die Wege im Labyrinth, die die Ratten zuvor in der Lernaufgabe gelaufen sind. Sie werden in einer traumlosen Tiefschlafphase, dem Deltaschlaf, neu abgespielt, nur dann sehr viel schneller.

Aber helfen solche nächtlichen Rekapitulationen tatsächlich dem Gedächtnis?

BORN: Das haben wir in einem Experiment mit Menschen zeigen können. Sie mussten abends am Computer bei einer Art Memoryspiel die Positionen von Kartenpaaren lernen. Währenddessen rochen sie den Duft von Rosen. So wurde der Duft mit den Lerninhalten assoziiert. Wir haben anschließend im Kernspintomografen gesehen, dass Rosenduft die entsprechenden Neurone im Hippocampus quasi reaktiviert, wenn man die Probanden dem Geruch während des Deltaschlafs aussetzt. Später haben wir dann die Erinnerung an diese Kartenpaare getestet, zum Beispiel gefragt: Wo war das rote Auto? Auf diese Weise konnten wir zeigen, dass der

Rosenduft im Deltaschlaf das Gedächtnis für die Position der Kartenpaare deutlich verstärkt hat.

In Zukunft verbreite ich also Rosenduft im Zimmer, wenn ich Französischvokabeln lerne, und dann wieder nachts im Schlafzimmer, damit ich mehr behalte?

BORN: Ja, im Prinzip funktioniert das. Es gibt mittlerweile einige Untersuchungen, die zeigen, dass man mit solch einer Geruchsmanipulation auch im häuslichen Gebrauch durchaus ein bisschen das Gedächtnis verbessern kann. Die Frage ist, ob das auf Dauer funktioniert, da man sich an Düfte sehr stark gewöhnt. Man riecht sie dann nicht mehr. Dadurch könnte der Effekt verschwinden. Aber für eine Nacht ist das durchaus mal anwendbar.

Vielleicht klappt es ja auch, wenn ich Aufnahmen von gesprochenen Vokabeln abspiele, während ich schlafe?

BORN: Schweizer Forscher haben Versuchspersonen abends niederländische Vokabeln lernen lassen und sie einigen davon anschließend leise im Schlaf vorgespielt. Diesen Teilnehmern fielen die Übersetzungen nach dem Wecken tatsächlich häufiger ein als anderen, die die Vokabeln nicht mehr gehört hatten oder nur, während sie wach waren.

Wie groß ist der Gewinn denn?

BORN: In dem Experiment waren es etwa zehn Prozent. Aber man schläft ja nicht nur eine Nacht, sondern jede. Und dann kumulieren solche Effekte natürlich. Insofern lernen wir im Schlaf sehr viel mehr, als es bei solchen Versuchen der Fall zu sein scheint.

Gibt es auch Nebenwirkungen?

BORN: Wir verzerren damit den spontan stattfindenden Gedächtnisprozess. Sonst hätten wir vielleicht im Schlaf etwas ganz anderes konsolidiert. Nicht das, was wir für die Klassenarbeit am nächsten Tag pauken müssen, sondern beispielsweise soziales Lernen. Vielleicht hätten wir etwas gelernt, das hilft, bei den Mitschülern besonders gut angesehen zu sein.

Am schönsten wäre es ja, wenn ich die Vokabeln gar nicht mehr tagsüber büffeln müsste, sondern ausschließlich durch Anhören im Schlaf lernen könnte.



BORN: Man kommt nicht darum herum, sich hinzusetzen und zu lernen – zu enkodieren, wie wir sagen. Und das muss im Wachzustand mit Konzentration geschehen.

Etwas ausschließlich im Schlaf zu lernen, funktioniert also nicht?

BORN: Nur sehr mäßig. In einem Experiment haben die Versuchspersonen beispielsweise gelernt, bestimmte Töne mit Gerüchen zu assoziieren – einige mit solchen nach verrottenem Fisch und Aas, andere wiederum mit angenehmen Düften. Am Morgen danach haben die Versuchspersonen tiefer eingeatmet, wenn die mit guten Düften verbundenen Töne erklangen. Im Prinzip kann man also im Schlaf lernen, aber was man da an Information speichert, ist doch sehr gering.

Lernen im Schlaf bleibt also ein Traum?

BORN: Eine Ausnahme ist das frühkindliche Gehirn, jedenfalls auf den ersten Blick. Babys scheinen im Schlaf tatsäch-

lich lernen zu können. Nun besagt die traditionelle Sichtweise auf Säuglinge zwar, dass sie sehr viel schlafen und wenig wach sind ...

Aber ...

BORN: ... aber wenn man sich die Hirnstromkurven ansieht, dann kann man eigentlich nicht wirklich von Schlaf- und Wachzuständen reden, wie wir sie von Erwachsenen oder älteren Kindern kennen. Insofern sind die durchaus konsistenten Befunde, dass Babys im Schlaf zum Beispiel Phoneme lernen, mit Vorsicht zu genießen. Das ist meines Erachtens kein klassischer Schlafzustand, in dem sich das Kind befindet.

Und was können Eltern aus dieser Erkenntnis für sich mitnehmen?

BORN: Auch wenn Babys tagsüber die Augen geschlossen haben und sich nicht viel bewegen, darf und sollte man durchaus weiterreden – natürlich leise. Das Baby kann das, was es hört, wahrscheinlich auch in diesem scheinbaren Schlaf verarbeiten.

Macht das Gehirn im Schlaf noch mehr, als Gelerntes zu festigen?

BORN: Es filtert aus dem vielen Gelernten das Wichtigste heraus und fasst es sinnvoll zusammen. So können wir im Schlaf sogar neue Einsichten gewinnen.

Wie kann das aussehen?

BORN: Wir haben Versuchspersonen tagsüber Zahlenrätsel lösen lassen. Sie bekamen Zahlenreihen und mussten aus ihnen anhand von zwei Regeln in sieben Schritten jeweils eine Lösungszahl ermitteln. Was wir ihnen nicht verraten haben: Das Resultat des zweiten Schritts entsprach immer bereits der endgültigen Lösung. Wenn die Teilnehmer acht Stunden schlafen durften, war diese geheime Regel doppelt so vielen klar wie ohne Schlaf. Und das ist natürlich eine tolle Leistung des Schlafs. Was sich da abspielt, ist nicht einfach nur Gedächtnisbildung. Es ist eine Reorganisation des Aufgenommenen, eine Strukturierung, die da im Schlaf passiert und die sehr viel nützlicher für das tägliche Leben ist als eine reine Abspeicherung von irgendwelchen Inhalten.

Klappt das auch bei anderen Aufgaben?

BORN: Ja. Wir haben etwa die so genannte Buttonbox eingesetzt, um die Leistungen von rund elfjährigen Kindern und ihren Eltern zu vergleichen. Die Box hat mehrere Knöpfe, und immer, wenn einer von ihnen aufleuchtet, muss er möglichst schnell gedrückt werden.

Und hinter der Reihenfolge, in der die Knöpfe leuchten, steckt wieder eine geheime Regel?

BORN: Richtig. Aber wenn wir die Testpersonen gleich nach der Lernphase fragten, ob sie eine bestimmte Reihenfolge erkannt haben, zuckten die Kinder genau wie die Erwachsenen die Schultern. Ließ man sie jedoch schlafen und fragte sie erst dann, war vielen die Regel klar geworden. Schon die Erwachsenen profitierten dabei deutlich vom Schlaf, aber die Kinder waren nun alle praktisch perfekt: Sie konnten danach die gesamte Sequenz abrufen. ~

Das Interview führte der Psychologe und Wissenschaftsjournalist **Jochen Paulus**.



Jan Born vor dem 2012 eingeweihten Forschungsgebäude für Integrative Neurowissenschaften der Universität Tübingen, in dem sich das von ihm geleitete Schlaflabor befindet.

Einbahnhof

Einblick

Einblick

Durchblick

Das Entscheidende im

FOCUS



BRIAN STAUFFER

ONKOLOGIE

Blutdrucksenker gegen Tumoren

Krebswucherungen besitzen oft eine ungewöhnlich dichte und feste Zwischenzellsubstanz. Sie schnürt die Blutgefäße ab und hindert Arzneistoffe daran, in den Tumor einzudringen. Abhilfe versprechen überraschenderweise Medikamente, die eigentlich zur Blutdruckregulation entwickelt wurden.

Von Rakesh K. Jain

Seit den 1970er Jahren beschäftige ich mich aus einer recht ungewöhnlichen Perspektive mit der Bekämpfung von Krebserkrankungen. Ursprünglich als Ingenieur ausgebildet, betrachte ich Tumoren als physikalisches anzugehendes Problem. Ich untersuche, wie ihr Wachstumstempo und ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber medikamentösen Therapien mit ihrem inneren Aufbau zusammenhängen.

Anfang der 1990er Jahre fanden meine Mitarbeiter und ich, damals noch an der Carnegie Mellon University, heraus: Die Blutgefäße, die einen Tumor versorgen, weisen oft eine abnorme Struktur auf – und dies ist der Grund dafür, warum Arzneistoffe häufig nur sehr schlecht in den Tumor eindringen. Die Adern dort sind unverhältnismäßig stark verschlungen und haben durchlässige Wände. Während das Blut in die kompakte Tumormasse eintritt, staut es sich in den Gefäßen, worauf Blutflüssigkeit (mit darin gelösten Stoffen) durch die Aderwände dringt und sich außerhalb im Zwischenzellraum sammelt. Je mehr Flüssigkeit in die Tumormasse einsickert, umso mehr steigt dort der Druck, der seinerseits das Fluid aus der Geschwulst heraus- und ins umgebende Gewebe hineinpresst. Später konnten wir zeigen: Verändert man die Tumorblutgefäße so, dass sie weniger porös sind, sinkt der Druck im Zwischenzellraum des Tumors und dringen Arzneistoffe effektiver ins Innere der Geschwulst vor – was den Erfolg medikamentöser Therapien verbessert, die sich gegen Krebszellen richten.

Unlängst fanden wir heraus, dass der Flüssigkeitsdruck nicht die einzige physikalische Kraft ist, die hier wirkt. Tumoren

sind Haufen aus bös- und gutartigen Zellen sowie Blut- und Lymphgefäßen, die allesamt in ein fasriges Material eingebettet sind, die so genannte extrazelluläre Matrix. Sowohl die Zellen als auch die Matrix können die durchlaufenden Blut- und Lymphgefäße abquetschen. Das führt dazu, dass Teile des Tumors kaum durchblutet werden – weshalb Arzneistoffe über die Blutbahn nur sehr schlecht dorthin vordringen können. Zudem ist die extrazelluläre Matrix in Tumoren außergewöhnlich dicht und steif, was die Verteilung von Wirkstoffen innerhalb der Geschwulst zusätzlich behindert.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen suchten mein Team und ich nach Wegen, die extrazelluläre Matrix in Tumoren abzubauen. Wir haben einen Ansatz gefunden, von dem wir uns viel versprechen, da er auf einer gebräuchlichen Klasse von Arzneimitteln beruht: Blutdrucksenkern. Aktuelle klinische Studien testen nun diese Art der Behandlung an Patienten mit einer bestimmten Art des Pankreaskrebses – eine Erkrankung mit extrem matrixreichen und schwer zu behandelnden Tumoren.

Wir können nicht versprechen, dass Wirkstoffe, die sich gegen die extrazelluläre Matrix richten, einen Durchbruch in der Krebsmedizin bedeuten. Tumoren entziehen sich ihrer Bekämpfung auf vielerlei Arten, eine tückischer als die andere. Falls die Mittel aber wie von uns erhofft wirken, könnten sie sich als mächtiges neues klinisches Werkzeug erweisen.

Die Kompression von Blut- und Lymphgefäßen in Tumoren kann eine ganze Reihe negativer Konsequenzen haben. So leiten Lymphgefäße normalerweise überschüssige Flüssigkeit aus Körpergewebe ab. Werden sie in einer Geschwulst abgequetscht, können sie diese Funktion nur noch eingeschränkt wahrnehmen und der Druck im Tumor steigt – zumal die porösen Blutadern dort permanent lecken. Der erhöhte Innendruck sorgt dafür, dass die ohnehin schon schlechte Durchblutung des Gewebes weiter verringert wird.

Um die Krebsmedizin zu verbessern, wollen Wissenschaftler nicht nur die genetischen Grundlagen von Tumorerkrankungen aufklären, sondern auch die in Tumoren wirkenden physikalischen Kräfte verstehen.

In den Tumor dringen somit kaum noch Sauerstoff, Immunzellen sowie medizinische Wirkstoffe (im Fall einer Therapie) vor.

Man könnte meinen, eine Sauerstoffunterversorgung (Hypoxie) des entarteten Gewebes sei hilfreich, da sie das Krebswachstum beeinträchtigt. Tatsächlich wirkt sich aber gerade der Sauerstoffmangel besonders tückisch aus. Er veranlasst sowohl normale als auch entartete Zellen dazu, Proteine auszuschütten, welche die Aktivität von krebsbekämpfenden Immunzellen unterdrücken. Eines davon, der vaskuläre endotheliale Wachstumsfaktor (VEGF), macht Aderwände durchlässiger, was die Durchblutung von Tumoren noch weiter verschlechtert und ihren Innendruck erhöht. Und das ist noch nicht alles. Den Mangel an Sauerstoff überstehen in erster Linie besonders bösartige Zellen mit starker Tendenz zur Metastasenbildung. Zudem fördert die Hypoxie das Auswandern der Krebszellen in andere Körpergewebe – beispielsweise, indem sie sie dazu veranlasst, Proteine herzustellen, mit denen sie sich aus dem Zellverband lösen können. Schließlich untergräbt der Sauerstoffmangel häufig die Wirkung von Antikrebsmedikamenten.

Die extrazelluläre Matrix im Tumor verursacht ihrerseits Probleme, die weder mit Sauerstoffmangel noch mit schlechterem Arzneistofftransport zu tun haben. Meine Kollegen und ich haben entdeckt, dass mechanischer Druck einige Krebszellen umprogrammiert und zu »Anführern« werden lässt, die benachbarte Gewebe infiltrieren und andere Zellen dazu veranlassen, ihnen zu folgen. Auch wirken Sauerstoffmangel und Kompressionsdruck in einer Art Teufelskreis zusammen, indem sie die Aktivität matrixbildender Zellen wie Fibroblasten erhöhen sowie bestimmte Krebszellen dazu veranlassen, Bestandteile der Matrix abzusondern – selbst wenn diese Zellen normalerweise gar nicht an deren Bildung mitwirken.

Wie verhängnisvoll sich eine Hypoxie im entarteten Gewebe auswirkt, war uns bereits bewusst, bevor wir mit unseren Forschungen über die extrazelluläre Matrix begannen.

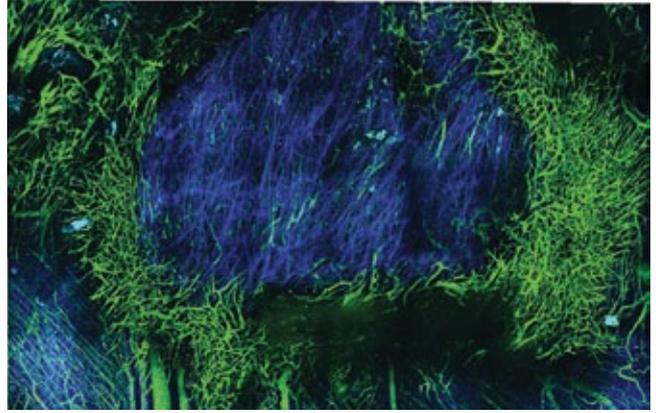
AUF EINEN BLICK

KAMPF GEGEN GEWEBEFASERN

1 In Krebstumoren wirken oft **starke Kompressionskräfte**, verursacht von den Tumorzellen und vom faserreichen Zwischengewebe, der extrazellulären Matrix. Diese Kräfte quetschen Blut- und Lymphgefäße ab. Das sorgt für **Sauerstoffmangel** und verhindert, dass Arzneistoffe in den Tumor vordringen. Beide Effekte treiben das Fortschreiten der Erkrankung voran.

2 Versuchsergebnissen zufolge fördern **bestimmte blutdrucksenkende Arzneimittel** den Abbau der extrazellulären Matrix. Als Folge davon verbessert sich die Durchblutung des Tumors, wirken medikamentöse Krebstherapien besser und steigt die Überlebenszeit der Patienten.

3 Erste klinische Studien mit diesem Verfahren laufen. Darüber hinaus versuchen Wissenschaftler einen **Wirkstoff** zu finden, der die extrazelluläre Matrix effizient abbaut, ohne den Blutdruck zu stark abzusenken.



Wenn eine krebserkrankte Maus mit einem Wirkstoff behandelt wird, der den Abbau des Zwischengewebes fördert, dünnt die extrazelluläre Matrix (blau) des Tumors aus, und die Durchblutung

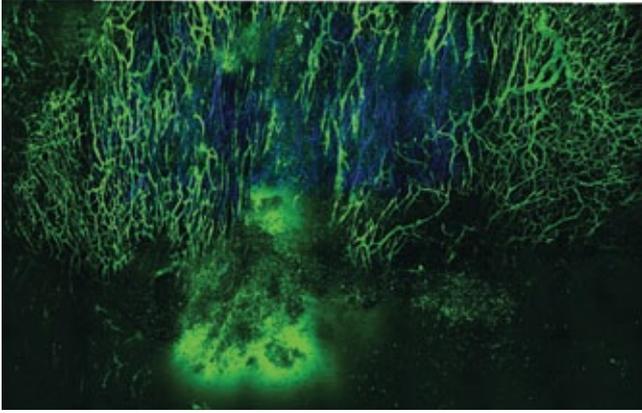
Daher legten wir frühzeitig unser Augenmerk darauf, die Sauerstoffversorgung des Tumors zu verbessern. Um die Jahrtausendwende postulierten wir zunächst, eine »Normalisierung« der Tumorblutgefäße – also ihre Entflechtung und das Herabsetzen der Durchlässigkeit ihrer Wände – sollte dazu führen, dass der Tumor besser durchblutet wird und sein Innendruck sinkt. Dies wiederum sollte dem Sauerstoffmangel und seinen Folgen entgegenwirken und den Transport von Arzneistoffen in den Tumor erleichtern.

Bessere Blutzufuhr lässt Krebskranke länger leben

Mittlerweile liegen überzeugende empirische Ergebnisse vor, die diese Hypothese stützen. Bestimmte Wirkstoffe, die so genannten Angiogenese-Hemmer, verhindern die Neubildung von Blutgefäßen; sie verlängern die Überlebenszeit von Patienten mit Hirntumoren, indem sie die Blutgefäße in den Tumoren normalisieren und so deren Durchblutung und Sauerstoffversorgung verbessern. Der gleiche Effekt erklärt die höhere Überlebensrate von Darm-, Lungen- und Nierenkrebspatienten, die zusätzlich zur üblichen Chemotherapie oder ergänzend zu einer Immuntherapie den Angiogenese-Hemmer Bevacizumab erhalten hatten.

Diese Ansätze lassen sich weiter optimieren, aber sie werden nicht ausreichen. Denn nicht der Flüssigkeitsdruck klemmt Blut- und Lymphgefäße im Tumor ab, sondern die Tumorzellen und die dazwischenliegende Matrix. Erhöht sich einfach nur der Druck um leckende Blutgefäße, sickert die Flüssigkeit eher durch die Poren in den Gefäßwänden zurück, statt die Adern kollabieren zu lassen (siehe Kasten auf S. 36/37). Die logische Schlussfolgerung daraus: Angiogenese-Hemmer allein öffnen keine verengten Tumorblutgefäße. Und genau an dieser Stelle kommen unsere Arbeiten ins Spiel, die auf einen Abbau der extrazellulären Matrix zielen.

Bevor wir nach konkreten Arzneistoffen suchten, wollten wir zunächst besser verstehen, wie Tumoren sich hinsichtlich ihrer extrazellulären Matrix unterscheiden und wie groß der mechanische Druck ist, den dieses Zwischengewe-



(grün) verbessert sich (links: vor der Behandlung, rechts: danach). Diese Effekte gehen häufig mit einer höheren Wirksamkeit von medikamentösen Krebstherapien einher.

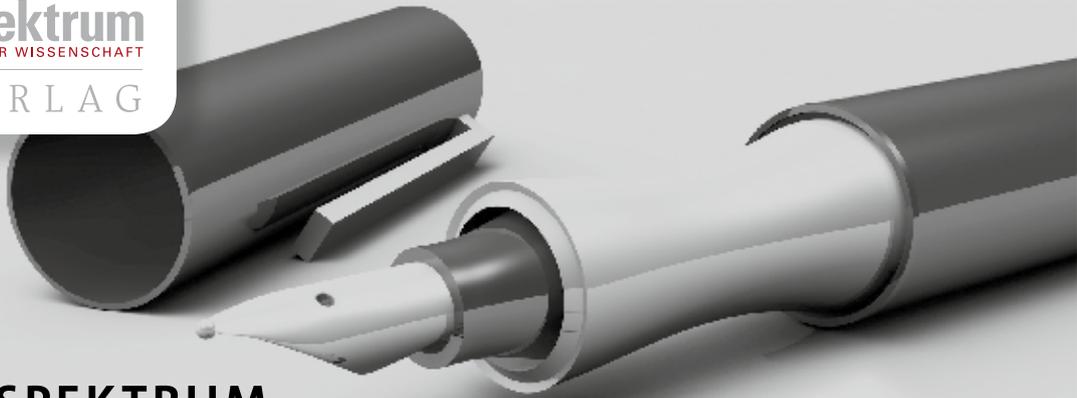
webe ausübt. Wir fanden große Unterschiede zwischen den diversen Krebsarten, obgleich die mikroskopische Untersuchung menschlicher Tumoren belegt, dass die meisten Geschwulste kollabierte Blutgefäße aufweisen.

Wie stark ein Tumor seine Adern abquetscht, hängt davon ab, in welchem Stadium er sich befindet und wo im Körper er sitzt. Wächst er beispielsweise unter beengten Verhältnissen,

wird der Kompressionsdruck in seinem Innern hoch sein – und die Zahl der verengten Gefäße groß. Die Art des Tumors spielt ebenfalls eine Rolle. Die am weitesten verbreitete Form des Bauchspeicheldrüsentumors, das duktales Pankreasadenokarzinom, enthält relativ wenige Krebszellen, die weniger als fünf Prozent der Tumormasse ausmachen. Der weit überwiegende Teil besteht aus extrazellulärer Matrix und Fibroblasten. Andere Krebsarten wie das Medulloblastom, der am häufigsten vorkommende Hirntumor im Kindesalter, weisen dagegen einen relativ geringen Anteil an Zwischenzellgewebe auf. Im Allgemeinen sprechen Geschwulste, die sich zum großen Teil aus Matrix und Fibroblasten zusammensetzen – so genannte desmoplastische Tumoren –, eher schlecht auf Arzneimitteltherapien an. Das legt die Vermutung nahe, der Abbau des Zwischenzellgewebes in diesen Tumoren könnte den Erfolg medikamentöser Behandlungen verbessern, indem er dafür sorgt, dass die Arzneistoffe ihr Ziel erreichen.

Bei der Suche nach geeigneten Wirkstoffen kam meinen Mitarbeitern und mir eine Zufallsentdeckung zu Hilfe. Die extrazelluläre Matrix besteht aus Proteinfasern (vorwiegend Kollagen) und gelähnlichen Bestandteilen wie Hyaluronsäure. Seinerzeit glaubten die meisten Wissenschaftler, die gelähnlichen Komponenten beeinflussten den Arzneistofftransport im Tumor stärker als die Fasern. Zu unserer Überraschung fanden wir aber im Jahr 2000 heraus, dass die

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 Anmelde-möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen.



Festigkeit des Gewebes, die direkt vom Kollagenanteil abhängt, den Ausschlag gibt. Außerdem stellten wir fest: Zerstört man die Fasern mit einem kollagenabbauenden Enzym (einer Kollagenase), verteilen sich 150 Nanometer große Testpartikel viel besser im entarteten Gewebe – selbst in extrem durchdringungsresistenten Tumoren. Ausgehend von dieser Erkenntnis behandelten wir krebskranke Mäuse mit 150 Nanometer großen viralen Partikeln, die Krebszellen abtöten können. Injizierten wir den Tieren zusätzlich Kollagenase in die Tumoren, schrumpften die Geschwulste viel stärker als ohne das Enzym.

Hormon im Körper von Schwangeren verspricht klinische Erfolge

Allerdings wussten wir bereits, dass die Verabreichung von Kollagenase zu schweren Gesundheitsschäden führen kann, denn Kollagen verleiht den Knochen und Geweben ihre Struktur. Wir suchten also eine Substanz ohne solche schwerwiegenden Nebenwirkungen. Schon bald zogen wir hierfür ein Hormon namens Relaxin in Betracht, das der weibliche Körper während der Schwangerschaft produziert. Relaxin hemmt den Aufbau von Kollagen und beschleunigt dessen Abbau, und werdende Mütter haben eine Menge davon in sich, ohne Schäden davonzutragen. Wir fragten uns also, ob dieses Hormon in der Krebstherapie eingesetzt werden könnte.

Im Jahr 2002 behandelten wir Mäuse mit einer Tumorerkrankung zwei Wochen lang mit Relaxin. Tatsächlich baute das Hormon das Kollagen um, machte es durchlässiger und ließ große Moleküle besser in die Tumoren eindringen. Andere Arbeitsgruppen bestätigten unsere Befunde und dehnten sie auf weitere Krebsarten aus. Aber dann erfuhren wir von Forschungsergebnissen, denen zufolge Relaxin das Wachstum einiger Tumoren fördern kann, etwa solchen der Prostata. Uns war klar, dass wir das Hormon niemals in klinischen Studien würden testen können.

Enttäuscht begannen wir, nach anderen Wirkstoffen zu suchen. Wir entschieden uns dafür, eine Schaltstelle der Kollagensynthese anzugreifen: ein Protein namens Transformierender Wachstumsfaktor Beta (TGF- β). Die Möglichkeit hierfür erkannten wir, als wir feststellten, dass bestimmte Arzneistoffe zur Behandlung von Bluthochdruck die Aktivität von TGF- β hemmen. Mehr noch: Diese häufig verschriebenen Mittel, bekannt als Angiotensin-Rezeptorblocker oder »Sartane«, beeinträchtigen außerdem die Funktion eines zweiten Moleküls, das an der Stabilisierung von Kollagen beteiligt ist. Wir wussten, dass mehrere Sartane, einschließlich des Arzneistoffs Losartan, zu Kollagenabbau sowohl in Labortieren als auch in Patienten führen können. Allerdings fanden wir keine publizierten Forschungsergebnisse darüber, wie diese Stoffe den Kollagengehalt oder den mechanischen Druck in Tumoren beeinflussen.

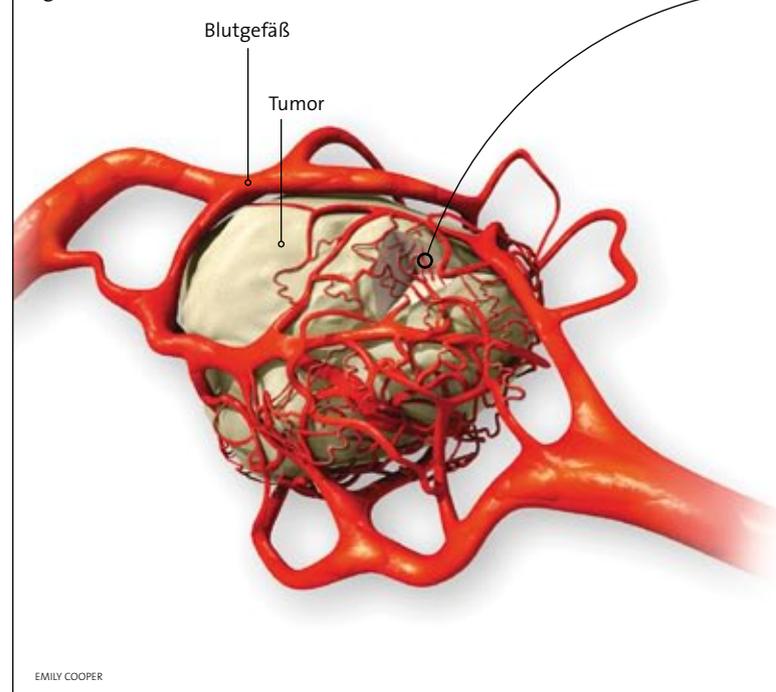
Um zu sehen, ob Angiotensin-Rezeptorblocker die extrazelluläre Matrix in Tumoren ausdünnen und so die Verteilung von Arzneistoffen im entarteten Gewebe verbessern können, verabreichten wir krebskranken Mäusen zwei Wo-

chen lang Losartan. Wir behandelten vier Gruppen von Tieren mit jeweils einer Sorte matrixreicher Tumoren: duktales Pankreasadenokarzinome, Brusttumoren, Melanome (Hautkrebs) oder Sarkome (Stützgewebstumoren). Schon bald erhielten wir zwei ermutigende Befunde: Der Kollagengehalt der Tumoren nahm ab und 100-Nanometer-Testpartikel durchdrangen die Geschwulste besser. Wir vermuteten, dass der erste Effekt den zweiten verursacht. Folgeuntersuchungen an Nagern, veröffentlicht im Jahr 2011, reproduzierten das Ergebnis mit echten Nanomedikamenten: dem zugelassenen Medikament Doxil (wirkstoffbeladene Liposomen mit etwa 100 Nanometer Durchmesser) und viralen Partikeln von zirka 150 Nanometer Durchmesser, die Krebszellen abtöten.

Bei unseren Experimenten stellten wir eine Korrelation zwischen dem Ausmaß des Kollagenabbaus und der Losartandosis fest. Eine solche Dosisabhängigkeit ist ein gutes Zei-

Physikalische Kräfte im Tumor

Arzneistoffe gegen Krebs, die über das Blut verabreicht werden, sollen in einen Tumor eindringen und seine Zellen angreifen. Doch sowohl flüssige als auch feste Tumorbestandteile üben Kompressionskräfte aus, die der Geschwulst einen hohen Innendruck verleihen und das Eindringen der Substanzen behindern. Infolgedessen erreichen die Wirkstoffe zahlreiche Krebszellen nicht. Schon heute verfügen die Mediziner über Medikamente, mit denen sich der Flüssigkeitsdruck in entartetem Gewebe vermindern lässt. Seit einiger Zeit arbeiten sie zudem an Verfahren, die den mechanischen Druck reduzieren, der von den Zellen sowie dem Zwischenzellgewebe des Tumors ausgeht.



chen dafür, dass der getestete Wirkstoff tatsächlich für den beobachteten Effekt verantwortlich ist. Es deutete sich an, dass hinreichend hohe Losartandosen zu einem so starken Kollagenabbau führen würden, dass sich die Blutgefäße selbst in matrixreichen Tumoren weit öffnen und Wirkstoffe von Krebsmedikamenten tief in den Tumor eindringen. Eine Verdopplung der Dosis dünnte das Kollagen in Brust- und Bauchspeicheldrüsentumoren von Labormäusen so weit aus, dass nicht nur Nanopartikel das Innere der Geschwulst erreichten, sondern auch Standardchemotherapeutika, die zur Behandlung dieser Krebsarten herangezogen werden.

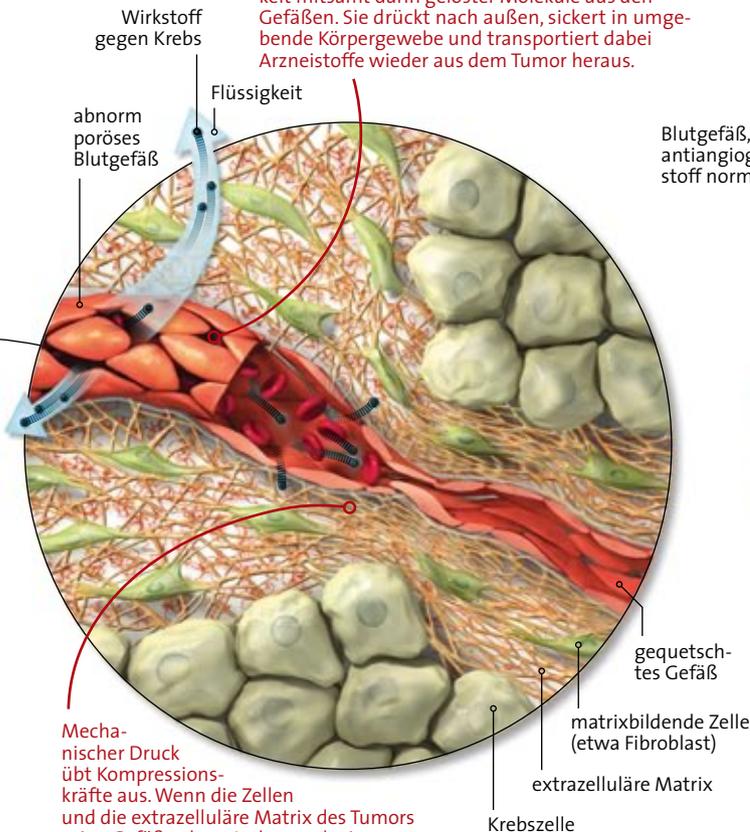
Sodann fragten wir uns, ob genügend hohe Dosen von Losartan oder anderen Blutdrucksenkern die klinische Wirkung von konventionellen Chemotherapien oder Nanomedikamenten verstärken könnten. Bislang haben wir keine endgültige Antwort darauf, aber es besteht Anlass, optimis-

tisch zu sein. Eine Neuauswertung älterer klinischer Studien mit Krebspatienten, die unter Bluthochdruck litten und deshalb zusätzlich zur Krebstherapie blutdrucksenkende Arzneimittel erhielten, lässt darauf schließen, dass diese Medikamente den Erfolg der Krebstherapie etwas zu verbessern scheinen. Die gemeinsame Gabe des Arzneistoffs Gemcitabin (zur Chemotherapie) und bestimmten Angiotensin-Rezeptorblockern beispielsweise ließ Patienten mit duktalem Pankreasadenokarzinom durchschnittlich sechs Monate länger leben, verglichen mit dem alleinigen Verabreichen von Gemcitabin.

Natürlich sind solche rückblickenden Studien nur begrenzt aussagekräftig, aber die Ergebnisse stimmen mit unseren Befunden an Mäusen überein und ermutigen dazu, Angiotensin-Rezeptorblocker auch bei Menschen einzusetzen, um matrixreiche Tumoren zu bekämpfen. Entsprechen-

Barrieren des Arzneistofftransports

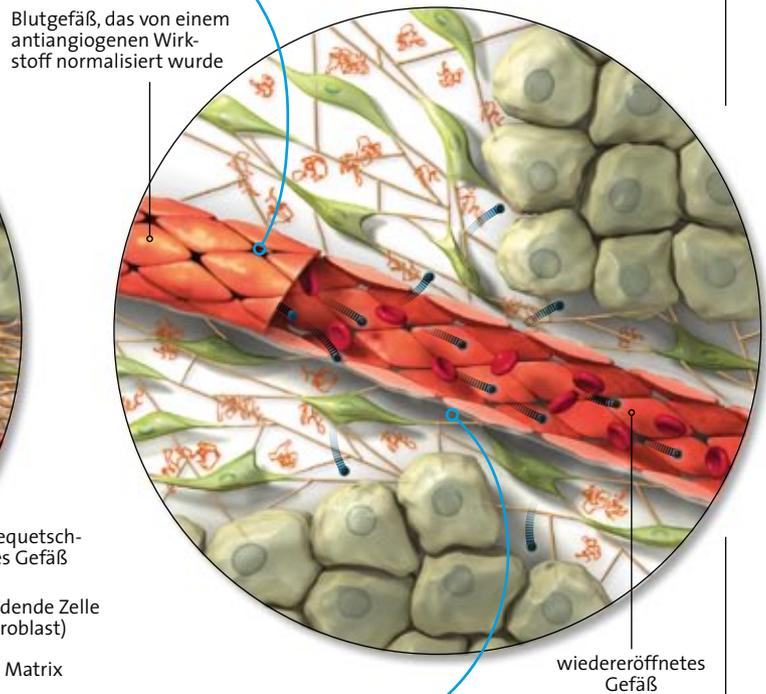
Der Flüssigkeitsdruck im Tumor ist oft sehr hoch, da die Tumorblutgefäße abnorm porös sind. Sobald Blut in den Tumor einströmt, drängt Flüssigkeit mitsamt darin gelöster Moleküle aus den Gefäßen. Sie drückt nach außen, sickert in umgebende Körpergewebe und transportiert dabei Arzneistoffe wieder aus dem Tumor heraus.



Mechanischer Druck übt Kompressionskräfte aus. Wenn die Zellen und die extrazelluläre Matrix des Tumors seine Gefäße abquetschen, reduzieren sie den Blutfluss und hindern Arzneistoffe daran, die entarteten Zellen hinter der gequetschten Stelle zu erreichen. Zudem bleiben Wirkstoffmoleküle, die ins Gewebe hineindiffundieren, im Fasernetzwerk der Matrix hängen, statt ins Innere des Tumors vorzudringen. Das Abquetschen der Adern führt weiterhin zu Sauerstoffmangel in der Geschwulst, was krebsbekämpfende Immunzellen unterdrückt und Metastasenbildung wahrscheinlicher macht.

Lösungsansätze

»Antiangiogene« Arzneistoffe sind bekannt dafür, die Neubildung von Blutgefäßen zu behindern. Seit Anfang des Jahrtausends werden sie in der Krebsmedizin eingesetzt. Sie können aber auch den Flüssigkeitsdruck im Tumor herabsetzen, indem sie dessen Blutgefäße »normalisieren«, das heißt weniger porös machen, so dass weniger Fluid durch die Gefäßwände tritt und sich die Durchblutung des Tumors verbessert.

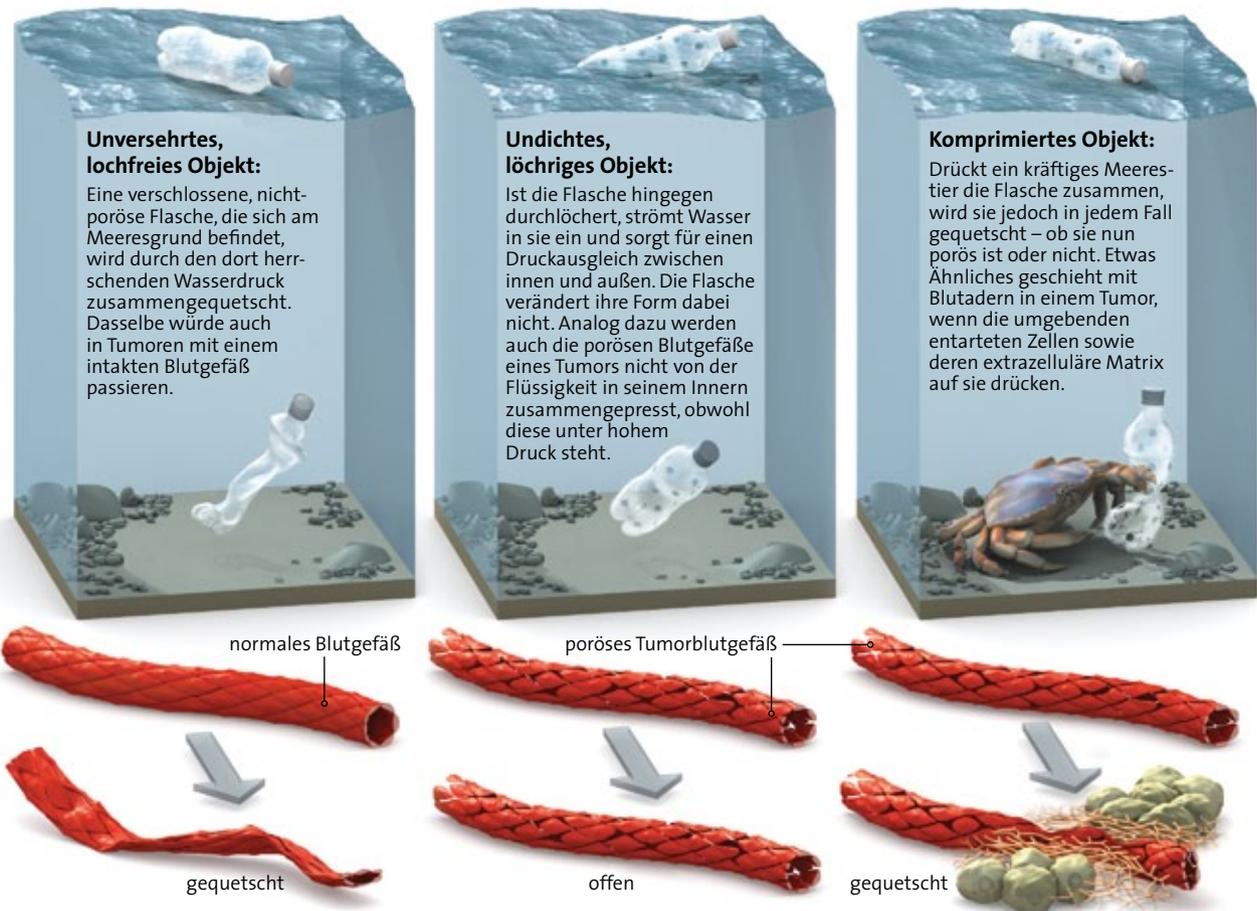


Substanzen, die den Abbau der extrazellulären Matrix fördern, können – wie an Mäusen gezeigt – die Kompressionskräfte im Tumor reduzieren, was ebenfalls die Durchblutung verbessert und Arzneistoffe tiefer ins entartete Gewebe eindringen lässt. Zu diesen zählt ein gängiges blutdrucksenkendes Arzneimittel, das nun in einer klinischen Studie mit Pankreasarzinompatienten getestet wird. Die Mediziner interessieren sich dafür, ob der Blutdrucksenker die Wirksamkeit medikamentöser Krebstherapien erhöht.

EMILY COOPER

Warum nur Festkörper Tumorgefäße abquetschen

Viele sind überrascht, wenn sie hören, dass in Tumoren nur die Zellen und das Zwischenzellgewebe die Gefäße abquetschen – nicht aber die unter hohem Druck stehende Flüssigkeit im Tumor. Warum das so ist, erklärt das Beispiel einer Plastikflasche, die ins Meer geworfen wird.



EMILY COOPER, NACH: LANCE L. MUNN, EDWIN L. STEELE LABORATORY FOR TUMOR BIOLOGY, HARVARD MEDICAL SCHOOL AND MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL

de Untersuchungen laufen bereits. So haben Mediziner am Massachusetts General Hospital (Harvard University, USA) eine klinische Studie gestartet, bei der Patienten mit duktalem Pankreasadenokarzinom zusätzlich zu einer Standardchemotherapie noch Losartan erhalten. Derzeit liegt die Fünf-Jahres-Überlebensrate dieser Tumorerkrankung bei weniger als sechs Prozent. Die Ergebnisse der Studie dürften in einigen Jahren vorliegen. Sollten sie wie erhofft ausfallen, kombinieren die Ärzte in Zukunft vielleicht zielgerichtete Krebstherapien mit der Verabreichung von Arzneimitteln, die Blutgefäße normalisieren (etwa VEGF-Blocker) beziehungsweise einen Abbau der extrazellulären Matrix fördern.

Wie für alle Arzneimittel gilt auch für Blutdrucksenker, dass sie ungünstige Nebenwirkungen haben. Sie eignen sich nicht für Patienten, die niedrigen Blutdruck haben oder an bestimmten Nierenerkrankungen leiden. Selbst bei Normaldruckpatienten muss die Dosierung sorgfältig eingestellt und überwacht werden, um einen bedrohlichen Abfall des Blut-

drucks zu vermeiden. Diese Probleme ließen sich umgehen, wenn man Angiotensin-Rezeptorblocker so verändern könnte, dass sie weiterhin den Abbau der extrazellulären Matrix forcieren, aber nicht mehr den Blutdruck senken. Meine Kollegen und ich verfolgen dieses Ziel. Allgemein neigen Tumoren stark dazu, Arzneimittelresistenzen zu entwickeln. Ob sie das auch gegenüber Sartanen tun werden, bleibt abzuwarten.

Derweil müssen wir darüber nachdenken, welche Alternativen wir für Patienten entwickeln können, die keine Blutdrucksenker einnehmen dürfen oder deren Tumoren nicht hinreichend auf diese Arzneimittel ansprechen. Ein gezielter Angriff auf die nichtfasrigen Hyaluronsäuremoleküle könnte die extrazelluläre Matrix in Tumoren ebenfalls schwächen. Hyaluronsäure ist in etwa jedem vierten menschlichen Tumor reichlich vorhanden, und zwar bei so verschiedenen Krebsarten wie duktales Pankreasadenokarzinom, Brustkrebs, Darmkrebs und Prostatakrebs. Wir fanden kürzlich Belege dafür, dass Hyaluronidasen (Enzyme, die Hyaluronsäure

abbauen), tatsächlich die Kompressionskräfte in Mäusetumoren vermindern. Zudem zeigen wir: Losartan setzt unter bestimmten Umständen die Konzentration von Hyaluronsäure in Tumoren herab. Andere Forscher wiesen nach, dass Hyaluronidasen Blutgefäße aufweiten können. Gestützt auf diese Ergebnisse testen Mediziner nun eine modifizierte Hyaluronidase mit der Bezeichnung PEGPH20 in einer klinischen Studie mit Pankreaskarzinompatienten.

Zerteiltes Tumorgewebe

Um Therapien zu optimieren, die sich gegen die extrazelluläre Matrix richten, müssen Wissenschaftler die Reaktion der Matrix auf die Wirkstoffe zuverlässig erfassen. Vermindern matrixabbauende Substanzen tatsächlich den mechanischen Druck im Tumor? Welche sind darin am effizientesten? Und beeinflusst das Ausmaß des Effekts den Erfolg herkömmlicher Krebsmedikamente, die parallel verabreicht werden? Eine neue bildgebende Methode, die so genannte Frequenzverdopplung (second-harmonic generation, SHG) soll den Forschern helfen, Kollagenstrukturen in Tumoren zu sehen und zu vermessen. Außerdem haben meine Kollegen und ich eine relativ einfache Möglichkeit gefunden, die Kompressionskräfte in einem Tumor abzuschätzen: Wenn man ihn in der Mitte durchschneidet, bauchen sich die Schnittflächen spontan aus. Indem wir diesen Effekt quantitativ messen und die Ergebnisse in von uns selbst entwickelte mathematische Formeln einfließen lassen, können wir den Kompressionsdruck beziffern.

Ich werde manchmal gefragt, ob ein Abbau des Zwischenzellgewebes im Tumor die Gefahr der Metastasierung erhöht, indem er es Krebszellen erleichtert, durch das entartete Gewebe hindurch- und in Blut- und Lymphgefäße einzuwandern, um von dort aus in andere Körperregionen vorzudringen. Ebenso höre ich von der Sorge, ein Abbau der Matrix oder eine anderweitig bedingte Öffnung der Tumoradern führe zu einer intensiveren Durchblutung der Geschwulst, was auf Grund besserer Nährstoffversorgung womöglich das Tumorwachstum ankurble oder den entarteten Zellen helfe, über das Gefäßsystem in benachbarte Gewebe auszuwandern – oder beides. Diese Aspekte gilt es noch näher zu untersuchen, aber verschiedene Beobachtungen legen nahe, dass die verminderten Kompressionskräfte und die normalisierten Blutgefäße weder das Tumorwachstum noch die Metastasierung fördern. Warum? Vermutlich, weil die bessere Durchblutung dem Sauerstoffmangel entgegenwirkt, dadurch die örtliche Unterdrückung der Immunreaktion aufhebt und Immunzellen sowie Arzneistoffe besser in die Geschwulst eindringen lässt. Studien an Mensch und Tier werden zeigen, inwiefern diese Vermutung zutrifft.

Als meine Kollegen und ich erstmals in Betracht zogen, Angiotensin-Rezeptorblocker im Kampf gegen Tumoren einzusetzen, rieten uns etliche von diesem Ansatz ab. Da diese Arzneistoffe den Blutdruck senken und nicht anheben, würden sie eine schlechtere statt einer besseren Durchblutung des Tumors bewirken, so die Überlegung. Gestützt wurden

diese Vorbehalte von Studien, die sowohl an Mäusen als auch an Menschen gezeigt hatten, dass die Gabe von Angiotensin (die den Blutdruck erhöht) den Blutfluss durch die Geschwulst intensiviert. Doch diese Studien hatten nicht die Druckkräfte des Zwischenzellgewebes berücksichtigt, und weitere Untersuchungen zur Wirksamkeit der Angiotensintherapie in der Krebsbehandlung scheiterten. Einige Jahre später konnten wir diesen Fehlschlag erklären: Angiotensin verbessert die Durchblutung des Tumors nur vorübergehend, vermutlich weil der Kompressionsdruck des entarteten Gewebes die betroffenen Gefäße rasch wieder verschließt.

Wir Krebsforscher müssen nicht nur die genetischen und zellphysiologischen Grundlagen von Krebs klären, sondern auch die Auswirkungen physikalischer Kräfte in Tumoren berücksichtigen. Dieses Wissen brauchen wir, um die Mechanismen der Tumorprogression zu verstehen und die Krebsmedizin zu verbessern. Solide Tumoren nutzen physikalische Kräfte, um im Körper zu überleben. Es wird Zeit, unsere Physikkenntnisse anzuwenden und mit ihrer Hilfe zurückzuschlagen. ~

DER AUTOR



Rakesh K. Jain ist Professor für Tumorbiologie und Direktor am Edwin L. Steele Laboratory für Tumorbiologie (Harvard University, USA). Er wirkt in zahlreichen wissenschaftlichen Gremien mit, arbeitet aber auch als Berater von Unternehmen, die in der Krebsforschung tätig sind. Jain hat zudem die Firma XTuit Pharmaceuticals mitbegründet und finanziert, die Krebstherapien entwickelt, und sitzt dort im Aufsichtsrat. XTuit hat auf der Basis der in diesem Artikel zusammengefassten Arbeiten ein Patent für einen Wirkstoff angemeldet.

QUELLEN

Chauhan, V.P. et al.: Angiotensin Inhibition Enhances Drug Delivery and Potentiates Chemotherapy by Decompressing Tumor Blood Vessels. In: Nature Communications 4, 2516, 2013

Jain R.K.: Normalizing Tumor Microenvironment to Treat Cancer: Bench to Bedside to Biomarkers. In: Journal of Clinical Oncology 31, S. 2205–2218, 2013

Stylianopoulos, T. et al.: Causes, Consequences and Remedies for Growth-Induced Solid Stress in Murine and Human Tumors. In: PNAS USA 109 S. 15101–15108, 2012

LITERATURTIPP

Serie »Physik und Krebs«, SdW 8/2013 und 9/2013
Reduktionistische Ansätze für die Tumormedizin

WEBLINKS

<http://steele.mgh.harvard.edu>
Edwin L Steele Laboratory für Tumorbiologie

<http://clinicaltrials.gov/show/NCT01821729>
Klinische Studien über Therapieverfahren, die sich gegen die extrazelluläre Matrix von Tumoren richten

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314682

Ein besseres Leben dank früher Selbstbeherrschung

Selbstdisziplin in der Kindheit fördert Gesundheit, Erfolg und persönliches Lebensglück im Erwachsenenalter. Das zeigt eine seit den 1970er Jahren laufende Längsschnittstudie.

Von Terrie E. Moffitt, Avshalom Caspi und Richie Poulton



Der Marshmallow-Test: Der Impuls, die Leckerei sofort aufzuessen, ist sehr mächtig. Um ihm nicht nachzugeben (und sich

damit die Belohnung zu verdienen), muss das Kind zu den seltsamsten Ablenkungsmaßnahmen greifen.

Im Jahr 1972 beschloss die medizinische Fakultät der kleinen neuseeländischen Stadt Dunedin, sämtliche zwischen April 1972 und März 1973 dort geborenen Kinder in eine Langzeitstudie aufzunehmen. Die Untersuchung dauert bis heute an, und die anfangs 1037 Teilnehmer sind vermutlich die bestuntersuchten Menschen der Welt.

Als wir sie kennen lernten, waren sie Teenager und wiesen beträchtliche Unterschiede in ihrem Verhalten auf, unter anderem in jener Eigenschaft, der ein Großteil unserer Forschung gilt: Selbstbeherrschung.

Zu den wesentlichen Fähigkeiten des Menschen zählt es, die eigenen Gedanken und Handlungen zu kontrollieren. Ein Mangel an dieser Fähigkeit kann in einer persönlichen Katastrophe enden, insbesondere in unserer heutigen schnelllebigen Welt mit ihren unendlichen Möglichkeiten, Ablenkungen und Versuchungen.

So zeigt uns die Werbung viele verführerische Dinge, für die man das Geld jetzt gleich ausgeben könnte, statt es fürs Alter zurückzulegen. Und an jeder Ecke gibt es leckere, kalorienreiche Nahrungsmittel, während die Arbeit den meisten Menschen verschwindend wenig Gelegenheit zu körperlicher Betätigung gibt – was erklärt, warum die westliche Welt mit einer wahren Epidemie der Fettsucht zu kämpfen hat. Kein Wunder, dass praktisch jedes Selbsthilfebuch seinem Leser zu größerer Selbstdisziplin zu verhelfen verspricht.

Heute schauen die Personalchefs bei den Bewerbern um einen Arbeitsplatz nicht nur nach einem guten Abschlusszeugnis, sondern auch nach Anzeichen von Gewissenhaftigkeit und Durchhaltevermögen – schlecht, wenn die Facebookseite des Bewerbers auf das Gegenteil schließen lässt. Damit ist die Selbstbeherrschung mehr als früher entscheidend nicht nur für das persönliche Wohlergehen, sondern auch für den Lebensunterhalt.

Unser Privatleben ist auch nicht einfacher geworden. Heute ist die Familie mit zwei berufstätigen Eltern die Regel; damit ist die Rollenverteilung nicht mehr durch Tradition vorgegeben, sondern muss immer wieder aufs Neue ausgehandelt werden. Bei schweren häuslichen Konflikten gilt eine Ehescheidung als schnelle und sozial akzeptierte Lösung, ebenso wie eine Vielzahl von mehr oder weniger legalen Suchtmitteln. Eine Familie gesund und intakt zu erhalten, erfordert eine ungeheure Willenskraft. Dabei bringen Eltern ihren Kindern nicht nur das ABC bei, sondern auch, sich und ihre Gefühle zu beherrschen.

Die Fähigkeiten, die zur Selbstbeherrschung beitragen, wie Gewissenhaftigkeit, Selbstdisziplin und Beharrlichkeit, sind aus unerwarteter Richtung ins Zentrum des Interesses geraten. Verschiedene amerikanische Förderprogramme für benachteiligte Vorschulkinder hatten nicht den erhofften Erfolg gezeitigt, allen voran das 1965 gegründete, groß angelegte »Head Start« (»Vorsprung«). Auch kleinere Programme mit intensiverer Betreuung wie das Perry Preschool Project von 1962 und das Abecedarian Early Intervention Project von 1972, deren Erfolg bis heute weiterverfolgt wird, konnten den Intelli-

AUF EINEN BLICK

EINE INVESTITION FÜRS LEBEN

1 Psychologen definieren die **Selbstbeherrschung** ähnlich wie die **Intelligenz** als eine Mischung von Fähigkeiten und Eigenschaften, die von Faktoren wie der Person des Beobachters weitgehend unabhängig ist.

2 Je größer die Selbstbeherrschung, die ein Mensch als **Kleinkind** zeigt, desto besser geht es ihm als **Erwachsenem** – gesundheitlich, finanziell und emotional.

3 Zugleich verursacht er der Gesellschaft geringere Kosten durch **medizinische Behandlung, Sozialleistungen** und **Strafverfolgung**.

4 Dieser Zusammenhang ist nicht durch die **Intelligenz** oder den **sozialen Status** allein zu erklären.

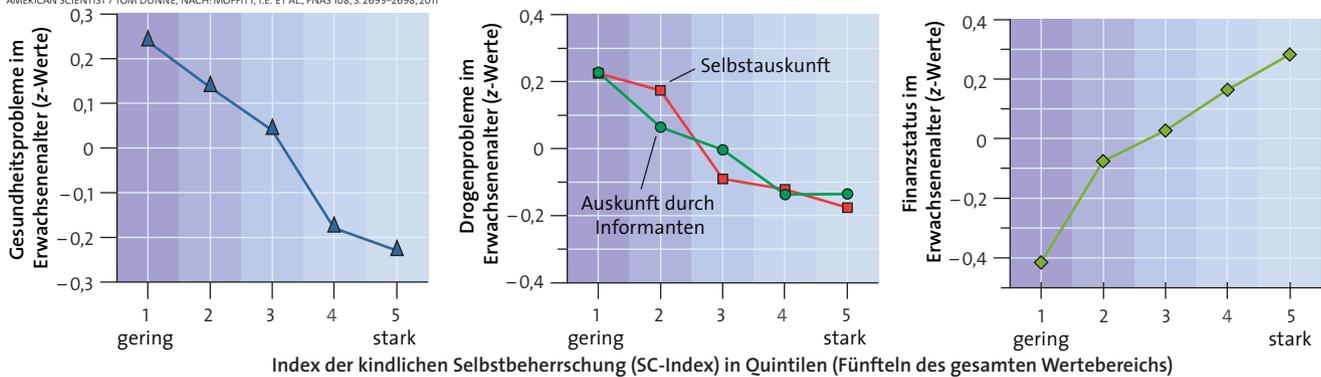
genzquotienten (IQ) ihrer Teilnehmer allenfalls vorübergehend gegenüber der Kontrollgruppe erhöhen. Aber: Die mittlerweile Erwachsenen waren länger zur Schule gegangen, hatten weniger Kinder außerhalb der Ehe oder gar als Jugendliche bekommen, verdienten mehr und waren deutlich seltener mit dem Gesetz in Konflikt geraten als die Kontrollgruppe!

Die Programme hatten also nicht die Intelligenz der Kinder gefördert, sondern etwas anderes. Als der Wirtschaftswissenschaftler James Heckman (Nobelpreis 2000) und seine Koautoren in mehreren Veröffentlichungen die Frage stellten, ob dieses Etwas die Selbstbeherrschung sein könnte, erkannten wir, dass die Daten aus unserer Dunedin-Studie eine einzigartige Gelegenheit boten, diese Frage zu beantworten. Könnten wir beweisen, dass eine frühe Förderung der Selbstbeherrschung nicht nur den Geförderten ein besseres Leben verschafft, sondern auch der Gesellschaft erhebliche Kosten erspart, würde dies politischen Entscheidungsträgern gewichtige Argumente an die Hand geben.

Besser als ein Marshmallow-Test

Als wir uns dem Thema zuwandten, wussten wir, dass wir auf Skepsis stoßen würden. Zahlreiche Argumente gegen unsere These waren im Umlauf: Unbeherrschtes Verhalten sei für Kinder normal und wachse sich rasch aus; insbesondere habe Selbstbeherrschung im Kindesalter mit derjenigen des späteren Erwachsenen nicht viel gemein. Oder sie habe zwar eine gewisse Bedeutung für das Erwachsenenleben, aber weit weniger als der IQ oder die soziale Herkunft eines Kindes. Oder die Diskussion sei müßig, weil Selbstbeherrschung ohnehin ein unveränderlicher Charakterzug sei. Oder sie sei nur insofern von Bedeutung, als ihr Fehlen charakteristisch für eine schwere Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) sei.

Wir waren selbst skeptisch. Doch zu unserer Überraschung stellte sich heraus, dass Selbstbeherrschung im Kindesalter ein starker Indikator für Erfolg im späteren Leben ist – einerlei, ob die Betroffenen hohe oder geringe Intelligenz zeigen oder aus armen oder reichen Verhältnissen



Kinder mit mangelhafter Selbstbeherrschung haben als Erwachsene mehr mit Gesundheits-, Drogen- und finanziellen Problemen zu

kämpfen, geraten häufiger mit dem Gesetz in Konflikt und sind ungeschickter in der Erziehung der eigenen Kinder. Dieses Ergeb-

stammen. Über die gesamte Population hinweg steigen Gesundheit, Wohlstand und gesellschaftlicher Erfolg mit zunehmender Selbstbeherrschung merklich an.

Die Studie mit dem offiziellen Namen »Dunedin Multidisciplinary Health and Development Study« hatte ursprünglich das Ziel, die Umstände der Geburt und deren Spätfolgen an einem großen Kollektiv zu erfassen. Mit der Zeit erweiterte sich ihr Themenspektrum über Gesundheitsfragen hinaus auf zahlreiche Gebiete, darunter Verhalten und Psychologie.

Die Studienteilnehmer sind bisher nach der Geburt und im Alter von 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 18, 21, 26, 32 und 38 Jahren intensiv untersucht worden. Bemerkenswerterweise war unser Kollektiv bei der jüngsten Bestandsaufnahme 2011 noch fast vollzählig: Von den 1037 Neugeborenen von 1972/1973 lebten noch 1007, und von ihnen folgten 95 Prozent unserer Einladung, für die sie immerhin zu unserem Forschungszentrum in Dunedin anreisen und sich acht Stunden lang aufreibenden Tests, Untersuchungen und Befragungen unterziehen mussten; aber das sind sie ja schon ihr ganzes Leben gewohnt. Wegen der großen Treue unserer Studienteil-

nehmer müssen wir auch nicht befürchten, dass sich das Bild verzerrt, weil zum Beispiel die gewissenhaften Typen regelmäßiger wiederkommen als die chaotischen. Vielmehr sehen wir die ganze Vielfalt des Lebens einschließlich der problematischen Lebensläufe.

In den ersten zehn Lebensjahren der Dunedin-Kinder erfassten wir deren Selbstbeherrschung, indem mehrere Untersucher ihr Verhalten beobachteten und unabhängig voneinander bewerteten. Zusätzlich befragten wir ihre Eltern persönlich, ihre Lehrer mittels Fragebogen und ab einem gewissen Alter auch die Kinder selbst. Da diese vielen Bewertungen stark korrelierten, kombinierten wir sie zu einem einzigen, sehr stabilen Wert, dem Selbstbeherrschungsindex (self-control index oder SC-Index, siehe Kasten unten). Durch diese Summenbildung fallen die gelegentlichen Wutausbrüche, die jedes Kind hat, nicht ins Gewicht. Auf eine niedrige Punktzahl kommen nur diejenigen, die in verschiedenen Situationen und über Jahre hinweg wenig Selbstbeherrschung gezeigt haben. Der Durchschnittswert lag bei Mädchen deutlich höher als bei Jungen, aber die Auswirkungen eines ho-

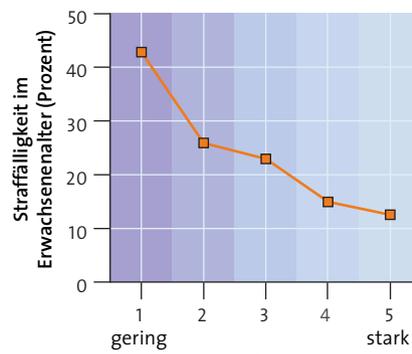
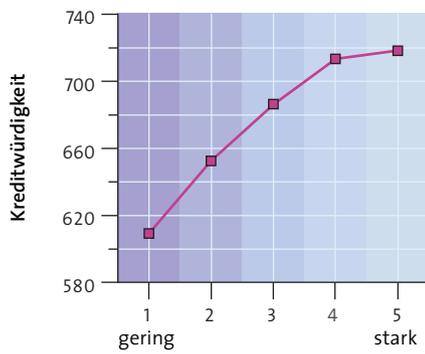
Was ist Selbstbeherrschung?

Ähnlich wie die Intelligenz definieren die Psychologen die Selbstbeherrschung als eine summarische Variable, in der sie Messgrößen und Beobachtungen aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen zusammenfassen.

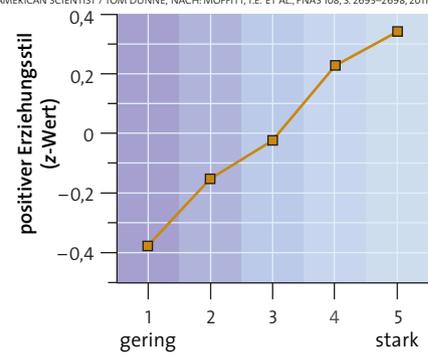
Klassisch geworden ist der »Marshmallow-Test« des Persönlichkeitspsychologen Walter Mischel (Bild S. 40). Man legt einem Kind etwas Leckeres, zum Beispiel ein Marshmallow, auf den Tisch und lässt es allein, mit dem Angebot: »Wenn du den in einer Viertelstunde noch nicht gegessen hast, bekommst du noch einen.« Selbstbeherrschung ist also insbesondere die Fähigkeit, auf ein gegenwärtiges Vergnügen zu Gunsten eines größeren, aber zukünftigen zu verzichten. Umgekehrt sprechen Eigenschaften wie Ablenkbarkeit, niedrige Frustrationstoleranz, geringe Ausdauer, Ruhelosig-

keit, Impulsivität und Ungeduld für mangelnde Selbstbeherrschung.

Dass die so definierte Größe Bedeutendes über das spätere Schicksal eines Kindes aussagt, bestätigen Vertreter verschiedener Fachrichtungen. Gesundheitsforscher finden einen Einfluss auf frühe Sterblichkeit, psychische Störungen und gesundheitsschädliches Verhalten wie übermäßiges Essen, Rauchen, ungeschützten Sex, Fahren unter Alkoholeinfluss und Missachtung medizinischer Empfehlungen. Soziologen stellen fest, dass eine geringe Selbstbeherrschung ein Vorzeichen für Arbeitslosigkeit ist, und Kriminologen sehen darin eine zentrale ursächliche Variable, die Gesetzesbrecher charakterisiert. Das eigentliche Wesen der Selbstbeherrschung wird jedoch noch untersucht.



AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE, NACH: MOFFITT, T.E. ET AL., PNAS 108, S. 2693–2698, 2011



Index der kindlichen Selbstbeherrschung (SC-Index) in Quintilen (Fünfteln des gesamten Wertebereichs)

nis hat auch dann Bestand, wenn man die Einflussfaktoren Geschlecht, IQ und Sozialstatus herausrechnet. Der z-Wert ist eine

aus den Daten ermittelte standardisierte Größe; negative Werte liegen unter dem Durchschnitt, positive darüber.

hen oder niedrigen Werts waren nicht geschlechtsspezifisch. Daher fassten wir Jungen und Mädchen für alle weiteren Analysen zusammen, führten aber zur Sicherheit statistische Kontrollen zum Einfluss des Geschlechts durch.

Für die Darstellung teilten wir die Spanne zwischen dem niedrigsten und dem höchsten vorkommenden SC-Index in fünf gleiche Teile (»Quintile«) und gruppierten unsere Studienteilnehmer nach ihrer Zugehörigkeit zu diesen Quintilen.

Gesundheit und Wohlstand in Dunedin

Es ist bekannt, dass die soziale Schicht und die Intelligenz eines Kindes seinen Erfolg im Erwachsenenalter beeinflussen. Nun stammen Dunedin-Kinder umso eher aus bessergestellten Familien, je höher ihr Selbstbeherrschungsindex war. Diese Maßzahl korrelierte auch positiv mit dem IQ, den wir in den 1970er Jahren im Rahmen der Studie gemessen hatten. Wenn es also einem erwachsenen Teilnehmer unserer Studie finanziell, gesundheitlich und überhaupt gut geht, ist nicht ohne Weiteres klar, ob es an der hohen Intelligenz, dem reichen Elternhaus oder an der guten Selbstbeherrschung

liegt; denn alle drei Merkmale treten häufig gekoppelt auf. Daher haben wir in allen hier beschriebenen Analysen überprüft, ob der SC-Index unabhängig von sozialer Schicht und IQ von prognostischem Wert ist.

Bei der vorletzten Untersuchung 2005 unterzogen wir unsere Studienteilnehmer, die mittlerweile Anfang 30 waren, einem umfassenden Gesundheitstest: körperliche Untersuchungen, Blutproben und andere Labortests zur Überprüfung von Fettleibigkeit, Bluthochdruck, Lungenfunktionsstörungen, Cholesterinspiegel, Geschlechtskrankheiten und chronisch entzündlichen Prozessen sowie eine zahnärztliche Untersuchung. Von den zahlreichen möglichen krankhaften Befunden hatten 43 Prozent unserer Teilnehmer gar keinen aufzuweisen, aber immerhin 20 Prozent zwei oder mehr. Wir fassten alle Ergebnisse zu einem summarischen Gesundheitsindex zusammen – und stellten fest, dass der SC-Index eine gute Prognose dieses Werts gestattet hätte (Bild oben). Je unbeherrschter das Kind, desto ungesünder der Erwachsene.

Gleiches galt für den Drogenkonsum, zu dem wir mit unseren Teilnehmern strukturierte Interviews führten. Da wir damit rechnen mussten, dass uns die Leute in diesem Punkt nicht die ganze Wahrheit sagten, baten wir jeden von ihnen, uns einen »Informanten« zu nennen, der den Betreffenden gut kannte und bereit war, einen Fragebogen zu seiner Person auszufüllen. Auch aus den Auskünften der Informanten ließ sich – geringfügig weniger deutlich – ein Zusammenhang zwischen mangelnder kindlicher Selbstbeherrschung und Alkohol- und Drogenproblemen im Erwachsenenalter herauslesen.

Bei den finanziellen Verhältnissen sah es ähnlich aus: Wer sich als Kind schlecht unter Kontrolle hatte, verfügte als 30-Jähriger mit geringerer Wahrscheinlichkeit über Ersparnisse oder eine Altersversorgung in Form eines Eigenheims oder Rentensparvertrags und hatte häufiger mit finanziellen Problemen wie etwa übermäßiger Verschuldung zu kämpfen. Auch hier zeichneten die Informanten im Wesentlichen dasselbe Bild; zusätzlich ergaben Anfragen bei der Kreditauskunftsstelle Veda, dem Äquivalent der Schufa für Australien und Neuseeland, dass die Leute mit der geringsten Punkt-

Neurowissenschaftler lokalisieren ihr neuronales Korrelat im vorderen Stirnlappen des Gehirns. In MRT-Untersuchungen lassen sich Gehirnstrukturen und -systeme erkennen, die aktiviert werden, wenn Probanden Selbstbeherrschung üben. Verhaltensgenetiker haben gezeigt, dass Selbstbeherrschung sowohl genetischen als auch Umwelteinflüssen unterliegt.

In unserer E-Risk-Zwillingsstudie fanden wir heraus, dass genetisch identische Zwillinge im Alter von fünf Jahren eine größere Ähnlichkeit in der Selbstbeherrschung aufwiesen als zweieiige (die Korrelationen lagen bei 0,68 beziehungsweise 0,36). Genetiker sind nun auf der Suche nach Erbfaktoren, die mit Selbstbeherrschung zusammenhängen. Auch unsere eineiigen Zwillinge unterschieden sich jedoch erheblich in dieser Hinsicht, was auf bedeutende nichtgenetische Einflüsse schließen lässt.

zahl in der kindlichen Selbstbeherrschung am häufigsten als Kreditrisiko eingestuft wurden.

Mit Unterstützung des neuseeländischen Sozialministeriums ermittelten wir darüber hinaus, inwieweit unsere Studienteilnehmer öffentliche Sozialleistungen in Anspruch genommen hatten. Mehr als die Hälfte von ihnen hatte zu irgendeinem Zeitpunkt Sozialhilfe bezogen, und es gab keinen überzeugenden Zusammenhang mit dem SC-Index. Offensichtlich sagt der Bezug von Sozialleistungen an sich weniger über den Bezieher aus als vielmehr über die schlechte Wirtschaftslage Neuseelands. Für die Bezugsdauer dagegen hat der SC-Index einen hohen prognostischen Wert: Die Teilnehmer im höchsten Quintil der SC-Skala hatten im Schnitt weniger als 18 Monate lang Unterstützung bezogen, die im niedrigsten Fünftel dagegen länger als sechs Jahre. Das ist von politischer Bedeutung, denn praktisch alle Wähler befürworten im Prinzip ein soziales Netz, schätzen es allerdings nicht, wenn dieses allzu lang in Anspruch genommen wird.

Außerdem untersuchten wir die Kriminalitätsrate – auch dies ein Thema mit politischen Implikationen, da Kriminalität hohe gesellschaftliche Kosten verursacht. In den USA nehmen Polizei, Justiz und Strafvollzug zusammen geschätzte zehn Prozent des Bruttoinlandsprodukts in Anspruch, fast so viel wie das Gesundheitswesen. Wir recherchierten in den Zentralcomputern der neuseeländischen und australischen Gerichte und fanden, dass jeder vierte unserer Studienteilnehmer bis zum Alter von 30 Jahren schon einmal für eine Straftat verurteilt worden war. Das ist vergleichbar mit den Werten in anderen Industrienationen. Personen mit niedrigem SC-Index waren dabei stärker betroffen. Von den fünf Prozent der Studiengruppe, die sogar im Gefängnis gesessen hatten, gehörten über 80 Prozent zu den beiden Quintilen mit den niedrigsten SC-Werten.

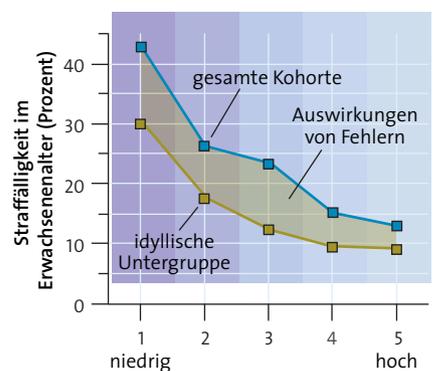
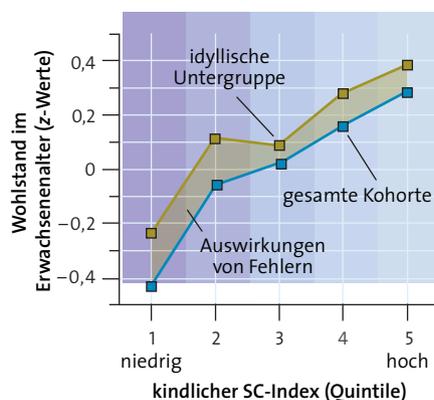
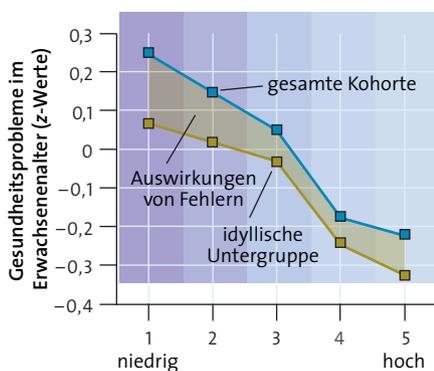
Im Rahmen der Dunedin-Studie erfassen wir nicht nur das Wohlergehen der Teilnehmer, sondern auch das ihrer Kinder. Das erste Studienmitglied bekam 1988 im Alter von 15 Jahren ein Kind, und 2012 waren drei Viertel der 1037 Teilnehmer Eltern. Wenn das erste Kind eines Mitglieds drei Jahre alt wird, besuchen wir die Familie zu Hause und beobach-



ten das Verhalten von Eltern und Kindern in einer Reihe von Standardsituationen. Familienpsychologen, die über die Familie sonst nichts wissen, bewerten anhand der Videos sämtliche Aspekte elterlichen Verhaltens, einschließlich Zuwendung und Einfühlungsvermögen für die Bedürfnisse des Kindes. Wieder werden diese Aspekte zu einer summarischen Maßzahl für Erziehungsqualität zusammengefasst.

Laut diesem Index sind die Leute mit dem niedrigen SC-Index auch die ungeschicktesten Eltern für ihre eigenen Kinder. Darüber hinaus leben sie häufiger als der Durchschnitt nicht mit dem anderen Elternteil zusammen. Kinder unbeherrschter Kinder werden also tendenziell schlechter erzogen als der Durchschnitt. In diesem Sinn ist schlechte Selbstbeherrschung erblich – nicht unbedingt genetisch, aber kulturell.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Jungen und Mädchen mit geringerer Selbstbeherrschung weisen als Erwachsene eine schlechtere Gesundheit, weniger Wohlstand, weniger erzieherisches Geschick und eine höhere Kriminalitätsrate auf als diejenigen mit größerer Selbstbeherrschung. Dieser Befund beschränkt sich nicht auf die Extremfälle, sondern ist entlang der ganzen Skala des SC-Index zu beobachten. Die Ergebnisse der Analyse veränderten sich nicht wesentlich, als wir die beiden Quintile mit dem niedrigsten und dem höchsten Wert des SC-Index unberücksichtigt ließen.



Wer in der Jugend Fehler wie Rauchen, Schulabbruch und vorzeitige Elternschaft vermeiden konnte, war als Erwachsener gesünder,

reicher und gesetzestreu als der Durchschnitt – über die ganze Skala der Selbstbeherrschungswerte hinweg.

Die Folgen mangelnder Selbstbeherrschung betreffen keineswegs nur krankhafte Störungen. Auch ohne die 61 Teilnehmer, bei denen ADHS diagnostiziert worden war, blieb der Hauptbefund unverändert. Er hatte auch Bestand, nachdem wir die Auswirkungen von Geschlecht, sozialer Herkunft und IQ herausgerechnet hatten.

Wenn es also überhaupt möglich ist, Selbstbeherrschung im Kindesalter einzuüben, dann würde jedes Kind davon profitieren – auch diejenigen, die bereits über eine überdurchschnittliche Selbstbeherrschung verfügen, intelligent sind oder aus wohlhabenden Familien stammen.

Wann beginnen die Schwierigkeiten?

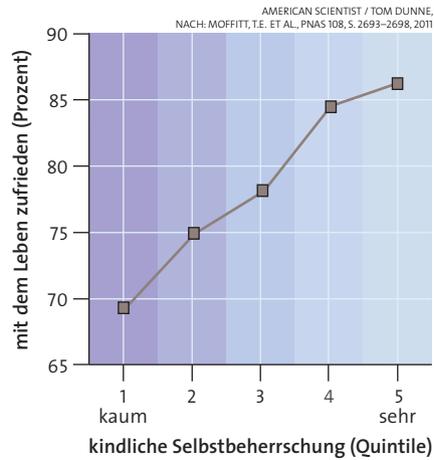
Bisher hatten wir zwischen unserem SC-Index für Kinder und der Lebensqualität im Erwachsenenalter nur eine – allerdings sehr starke – Korrelation gefunden. Nun galt es zu klären, welcher Art ein kausaler Zusammenhang dahinter sein könnte und in welchem Alter er sich auswirken würde.

Zur Beantwortung der zweiten Frage zerlegten wir den SC-Index, der ja Daten aus verschiedenen Lebensaltern zusammenfasst, in die Bewertungen, die im Alter zwischen drei und fünf Jahren vorgenommen wurden, und den Rest. Das Ergebnis: Selbst die frühen Beobachtungen allein ließen Rückschlüsse auf das Wohlergehen im vierten Lebensjahrzehnt zu, allerdings nicht so zuverlässig wie der gesamte Index.

Die ersten dramatischen Weichenstellungen für ein problematisches Erwachsenenleben finden allem Anschein nach in der Pubertät statt. Aber es war uns nicht klar, ob es für Interventionen in dieser Lebensphase nicht schon zu spät ist. Aus den Daten, die wir im Alter von 13, 15, 18 und 21 Jahren erhoben haben, geht hervor, dass Kinder mit niedrigem SC-Index als Heranwachsende eher Fehler mit gravierenden Auswirkungen machten: rauchen, die Schule abbrechen und ungeplant Nachwuchs in die Welt setzen. Und je mehr dieser Fehler wir verzeichneten, desto schlechter ging es den Betroffenen als Erwachsenen, in allen vier genannten Aspekten (Gesundheit, Wohlstand, Kriminalität, pädagogisches Geschick). Wirkt eine schwache Selbstbeherrschung also unmittelbar oder aber nur indirekt, indem sie die Jugendlichen zu schweren Fehlern verleitet, deren Folgen dann erst den Erwachsenen zu schaffen machen?

Unsere Daten geben darauf als Antwort ein klares Sowohl-als-auch. Wir griffen die »idyllische Untergruppe« (utopian subsample) der kinderlosen Nichtraucher mit Schulabschluss heraus. Diesen Leuten ging es in allen drei Messgrößen – Gesundheit, Wohlstand, Kriminalität – deutlich besser als dem Durchschnitt. Aber selbst unter diesen »braven« Leuten machte der SC-Index aus der Kindheit einen deutlich sichtbaren Unterschied (Bild links unten).

Für die Politik folgt daraus: Es ist dem allgemeinen Wohlstand, der Gesundheit und der öffentlichen Sicherheit förderlich, zweierlei zu tun – die Heranwachsenden vor den üblichen Fallstricken zu bewahren und die Selbstbeherrschung der Kleinkinder zu fördern. Selbstverständlich fordert die Politik Beweise, dass genau die Selbstbeherrschung den we-



Kinder, die mehr Selbstbeherrschung zeigen, fühlen sich als Erwachsene zufriedener mit ihrem Leben. Auch dieses Muster zeigt sich unabhängig von den Variablen IQ, soziale Herkunft und Geschlecht.

sentlichen Unterschied ausmacht und nicht etwa andere Faktoren, die mit dieser gekoppelt einherzugehen pflegen. Was Intelligenz und soziale Herkunft angeht, konnten wir aus unseren Daten heraus diese Unabhängigkeit belegen.

Es bleibt ein wesentlicher Faktor, den unsere Studie nicht direkt erfassen konnte: die Familie. Die Interaktionen von Eltern mit ihren Kindern gehen weit darüber hinaus, ihnen eine hohe Intelligenz zu vererben und ein gut ausgestattetes Zuhause zu verschaffen.

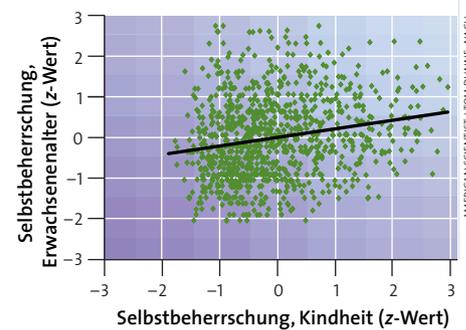
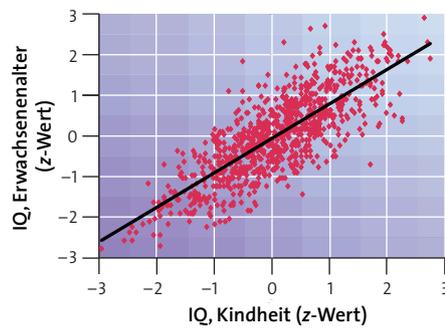
Vergleiche bei Zwillingen

Um diese Frage zu studieren, konnten wir auf eine unabhängige Längsschnittstudie zurückgreifen: die Environmental-Risk Longitudinal Twin Study (E-Risk Study). Sie umfasst 1116 britische Zwillingspaare, die wir seit ihrer Geburt zwischen 1994 und 1995 begleitet haben und von denen immer noch 96 Prozent mitmachen. Wir haben die E-Risk-Studie nach dem Vorbild der Dunedin-Studie angelegt, dieses Mal jedoch mit dem Vorteil, zwei Kinder pro Familie beobachten zu können.

Das verschafft uns die einmalige Gelegenheit, den Einfluss der Selbstbeherrschung auf das spätere Wohlergehen isoliert von anderen elterlichen Einflüssen zu beobachten; denn die sind ja für beide Geschwister dieselben. Wir konzentrierten uns auf 509 zweieiige Zwillingspaare gleichen Geschlechts, da diese sich im Gegensatz zu eineiigen Zwillingen in ihrer genetischen Ausstattung nicht ähnlicher sind als gewöhnliche Geschwister.

Im Alter von fünf Jahren unterzogen wir die E-Risk-Kinder denselben Beobachtungen und Auswertungen wie die gleichaltrigen Kinder der Dunedin-Studie. Sie waren zwar erst zwölf Jahre alt, als wir die Daten für diesen Artikel analysierten, aber Tendenzen, die wir in der Dunedin-Studie gesehen haben, sind auch hier bereits erkennbar. Von jedem Paar hatte das Geschwister, das als Kleinkind die schlechtere Selbstbeherrschung gezeigt hatte, mit signifikant größerer Wahrscheinlichkeit das Rauchen angefangen, schlechte schulische Leistungen gezeigt und war wegen asozialer Verhaltensweisen wie Diebstahl und Schlägereien aufgefallen. Lehrer schätzten den Zwilling mit dem niedrigeren SC-Wert regel-

Der IQ im Kindesalter korreliert stark mit dem des Erwachsenen (links). Bei der Selbstbeherrschung ist die entsprechende Korrelation zwar vorhanden, zeigt jedoch mehr Veränderungsspielraum. Die Werte sind auf den Mittelwert 0 normalisiert.



AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNIE, NACH MOFFITT, LEE ET AL. PNAS 108, 5: 2699-2698, 2011

mäßig als denjenigen ein, der sie im Unterricht mehr Mühe kostete. Geringe Selbstbeherrschung verursacht also gesellschaftliche Kosten, indem sie die Energien des Lehrers von den anderen Kindern abzieht und langfristig zu dessen allgemeiner Frustration und Zermürbung beiträgt.

Das Selbst neu gestalten

Aus den Ergebnissen beider Studien geht hervor, dass eine Förderung der Selbstbeherrschung im Kleinkindalter großen gesellschaftlichen Nutzen abwerfen würde. Aber wie geht es den Kindern dabei? Unweigerlich kommen einem Schreckensbilder in den Sinn: von Kindern, die stets gehorsam und ohne nachzudenken den Anweisungen der Erwachsenen folgen und sich jede spontane Regung verkneifen müssen, bis hin zu drakonischen Strafen nach dem Muster des »Struwelpeter«, wo dem Daumenlutscher die Daumen abgeschnitten werden. Muss eine Erziehung zur Selbstbeherrschung nicht schrecklich sein und die Betroffenen unglücklich machen?

Wenn dem so wäre, dann hat das Unglück zumindest bei den Erwachsenen keine Spuren hinterlassen – im Gegenteil (Bild S. 45). Auf einer Skala der Zufriedenheit mit dem Leben kreuzten 70 Prozent der Dunedin-Teilnehmer Werte von »einigermaßen zufrieden« bis »sehr zufrieden« an. Aber diejenigen, die ihr Leben bereits mit guter Selbstbeherrschung begonnen hatten, erklärten sich zu fast 90 Prozent für zufrieden bis sehr zufrieden. Umgekehrt ist ein objektiver Indikator für stark empfundenes Unglücklichsein ein Suizidversuch. Den hatten bis zum Alter von 38 Jahren 22 Prozent unserer Teilnehmer aus dem untersten Fünftel des SC-Index unternommen, einige von ihnen erfolgreich. Dagegen waren es nur 7 Prozent im obersten Quintil.

Interventionen zur Verbesserung der kindlichen Selbstbeherrschung sind schon deswegen besonders attraktiv, weil spektakuläre Erfolge zumindest denkbar sind. Ein schlechter SC-Index beeinträchtigt das individuelle wie gesellschaftliche Wohlergehen – sprich Gesundheit, Wohlstand und Gesetzestreue – ebenso oder sogar stärker als eine niedrige Intelligenz oder ein ungünstiger Sozialstatus der Eltern. Es ist bekannt, dass sich an den Folgen der letztgenannten Eigenschaften durch Intervention kaum etwas ändern lässt, an der Selbstbeherrschung aber sehr wohl. Das hat Brent Roberts von der University of Illinois in einer Metaanalyse mehrerer Längsschnittstudien belegt.

In der Tat waren in der Dunedin-Studie die Selbstbeherrschungswerte der Studienteilnehmer in den ersten vier Lebensjahrzehnten nur etwa halb so stabil wie ihre IQ-Testwerte (Bild oben). Und wir haben immerhin einen Faktor gefunden, der den Selbstbeherrschungswert des Betroffenen verbessert: die Tätigkeit als Vorgesetzter. Diejenigen Studienteilnehmer, die Führungskräfte wurden, verfügten bereits über eine gute Selbstbeherrschung. Unter anderem deswegen wurden sie ja wahrscheinlich eingestellt oder befördert. Aber ihre hohen Werte stiegen nochmals rasant an, als sie Führungsaufgaben übernahmen.

Da nach unseren Studien von einem verbesserten Selbstbeherrschungswert alle profitieren, die in dieser Hinsicht Starken ebenso wie die Schwachen, liegt es nahe, Interventionen nicht nur für die Bedürftigen, sondern für jedermann vorzusehen. Zudem haben die Wähler wenig gegen solche allgemeinen Programme einzuwenden, weil sie selbst zu den Nutznießern gehören, und niemand wird schief angesehen, weil er sie in Anspruch nimmt. Ein Beispiel ist das zur Kindersendung »Sesame Street«, dem amerikanischen Original der »Sesamstraße«, gehörige Multimediaangebot »For me, for you, for later«, das Vorschulkindern nahelegt, Geld für ein späteres Ziel zu sparen.

Kampfkunst, Musikunterricht, Computerspiele und Fremdsprachen gelten ebenfalls als förderliche Aktivitäten. Es gibt Programme für Schulklassen, die auf dem Prinzip »planen, ausführen und dann überprüfen« basieren. Andere richten sich an die Eltern mit dem Ziel, die Selbstbeherrschung ihrer Kinder zu fördern.

Als kleine Modellversuche, die engagierte Experten mit aufgeschlossenen Familien durchführen, erreichen viele solcher Programme beeindruckende Ergebnisse. Es bleibt eine

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Kinder – vom Baby zum Teenager« finden Sie unter



www.spektrum.de/kinder



HELENE SOUZA / PIXELIODE

schwere Aufgabe, sie so zu gestalten, dass sie in einem landesweiten Schulsystem mit angelehrten, nicht unbedingt motivierten Kräften immer noch funktionieren. Ein Erfolg wäre mit einer aufwändigen randomisierten Studie nachzuweisen: Man bildet zwei Gruppen von Kindern, in denen alle Einkommensklassen, sozialen Schichten und so weiter gleich stark vertreten sind, lässt nur einer Gruppe die Maßnahme zukommen, beobachtet dann, ob deren Selbstbeherrschung sich positiv von derjenigen der Kontrollgruppe abhebt, und überprüft Jahre später, ob diese Veränderung nachhaltig ist. Eine Kosten-Nutzen-Rechnung müsste zeigen, ob die Kostenersparnis in Gesundheitswesen, Verbrechensbekämpfung und Sozialwesen den Aufwand für derartige Programme aufwiegt.

Unsere Ergebnisse sprechen für eine »Doppelschlag-Strategie« (»one-two punch strategy«) aus Interventionen einerseits im frühen Kindesalter, andererseits in der Pubertät. Da gewisse Jugendsünden das ganze spätere Leben beeinträchtigen, lohnt es sich erstens, die Heranwachsenden in der kritischen Lebensphase davon abzuhalten. Zweitens ist es sinnvoll, den kleinen Kindern die Selbstbeherrschung nahezu zu bringen, damit sie als Jugendliche gar nicht erst in Versuchung kommen.

Selbst im Erwachsenenalter gibt es noch Raum für Verbesserung. Sozialpsychologen haben experimentelle Beweise dafür zusammengetragen, dass Selbstbeherrschung wie ein Muskel funktioniert: Sie wird stärker durch Training und baut ab unter Stress, Alkohol und Überbeanspruchung. In einer Kultur, in der geringe Selbstkontrolle vorherrscht, neigt die Politik dazu, das richtige Verhalten – gesunde Ernährung, Sparen, gesetzestreu Verhalten – zur Standardoption zu machen, die am wenigsten Selbstbeherrschung erfordert: automatischer Abzug der Rentenbeiträge vom Lohn, Sicherungssysteme, die einem potenziellen Autodieb gute Vorbereitung und Sorgfalt abfordern, Alkoholverkaufsverbot nach 22 Uhr.

Solche Pläne gehen davon aus, dass bereits ein kleiner Schubs in die richtige Richtung einen Mangel an Selbstbeherrschung ausgleichen kann. Von solcher Art Politik profitieren am ehesten die Unbeherrschtesten unter uns; das sind nach unseren Forschungen genau diejenigen, welche die größten gesellschaftlichen Kosten verursachen. Wenn dann alle kleinen Schubse nicht helfen, verlegen sich Regierungen darauf, Selbstbeherrschung durch Gesetze zu erzwingen, indem sie etwa das Rauchen an öffentlichen Orten verbieten und Motorradhelme, Sicherheitsgurte und Kindersitze vorschreiben.

Weiterentwicklungen

Am Beginn der beiden Studien musste sich unser Team mit Themen wie Geburtsgewicht, Stillzeiten, frühkindlichen Schlafgewohnheiten und Sprachentwicklung auseinandersetzen. Inzwischen stehen Themen wie Unfruchtbarkeit, Altersvorsorge, Kindererziehung und die altersbedingte Verkürzung der Telomere im Vordergrund. Nach wie vor messen wir in jedem Alter bestimmte Parameter für Gesundheit und geistige Ver-

fassung einschließlich Selbstbeherrschung, schon um die Reihe der Daten nicht abbrechen zu lassen.

Zugleich erweitern wir unsere Forschung auf neue Themen. Ein besonders ergiebiges ist das Zusammenspiel von Vererbung und Umwelt. Außerdem bereiten wir eine Untersuchung der Gehirnstrukturen mit bildgebenden Verfahren vor. Wir erhoffen uns Befunde darüber, wie die Gehirne unserer Studienteilnehmer Bedrohungen, Belohnungen, Erinnerungen und die exekutiven Funktionen der Selbstbeherrschung verarbeiten. Für die fernere Zukunft stehen bereits die Themen Wechseljahre, Gedächtnisverlust, Großelternschaft und Ruhestand auf dem Programm. Durch ihre lebenslange Mitwirkung machen die Studienteilnehmer der Wissenschaft ein unschätzbbares Geschenk.

Die Teilnehmer beider Studien werden den demografischen Wandel zu einer alternden, schrumpfenden Gesellschaft am eigenen Leib miterleben – und damit die steigende Bedeutung der Selbstbeherrschung: einerseits weil auf jedem der wenigen Nachwachsenden mehr Verantwortung für das Wohlergehen der Gesellschaft einschließlich der Sorge für die vielen Alten liegen wird, andererseits weil sie selbst voraussichtlich sehr lange leben werden und daher gut daran tun, beizeiten für ein Auskommen und eine erträgliche Gesundheit im Alter Sorge zu tragen. ~

DIE AUTOREN



Terrie E. Moffitt und ihr Lebensgefährte **Avshalom Caspi** (Mitte) arbeiten als Professoren für Psychologie, Psychiatrie und Verhaltensforschung an der Duke University in Durham (North Carolina) und am King's College in London. **Richie Poulton** leitet die für das beschriebene Projekt zuständige Forschungsabteilung an der Dunedin School of Medicine in Dunedin (Neuseeland).

QUELLEN

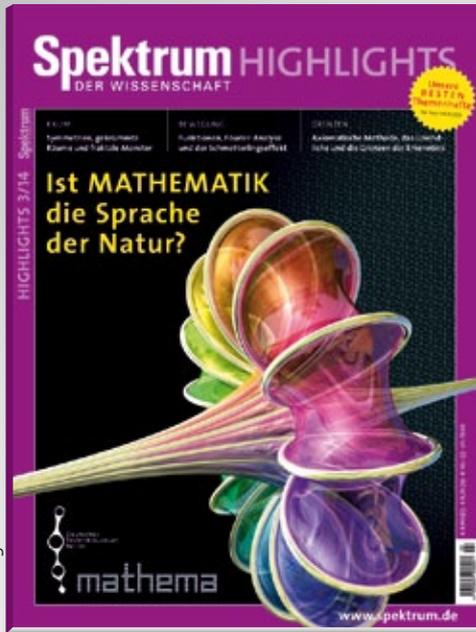
Heckman, J. et al.: Analyzing Social Experiments as Implemented: A Reexamination of the Evidence from the HighScope Perry Preschool Program. In: *Quantitative Economics* 1, S. 1–46, 2010
Knudsen, E.I. et al.: Economic, Neurobiological, and Behavioral Perspectives on Building America's Future Workforce. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.* 103, S. 10155–10162, 2006
Moffitt, T.E. et al.: A Gradient of Childhood Self-Control Predicts Health, Wealth, and Public Safety. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.* 108, S. 2693–2698, 2011
Roberts, B.W. et al.: Patterns of Mean-Level Change in Personality Traits across the Life Course: A Metaanalysis of Longitudinal Studies. In: *Psychological Bulletin* 132, S. 1–25, 2006

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314683

© American Scientist

UNSERE NEUERSCHEINUNGEN

Neuaufgabe



Kann man den Zufall überlisten? • Wozu dienen Funktionen? • Streng geheim! – Mathematik und vertrauliche Nachrichtenübermittlung • Fraktale in der Natur • € 8,90



Erde: Ein Ozean im Verborgenen • Marsvulkane: Giganten des Sonnensystems • Reisen zu den Planeten: Jenseits des Mars • Dem Mond unter die Haut geblickt • € 8,90

Ab 21. 11. 2014, im Handel



Ruhestand: Jeder Tag ein Sonntag • Länger leben: Bleiben wir dabei auch länger fit? • Vor Alzheimer schützen: 7 goldene Regeln • Tanzen: Hält Körper und Geist in Schwung € 8,90

Neuaufgabe



Computerspiele: Sucht nach virtueller Anerkennung • Messie-Syndrom: Warum manche Menschen nichts wegwerfen können • Medienopfer: Vorgeführt und bloßgestellt • € 8,90

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!



1914

Intelligenter Wurm

»Der Biologe R.M. Yerkes setzte einen Regenwurm in eine T-förmige Röhre. Von ihren Seitenästen führte der

eine ins Freie, der andere zu einem verbotenen Garten, zu dessen Schutz ein elektrischer Kontakt angebracht war. Geriet der Wurm in die falsche Röhre, berührte er den Kontakt und erhielt einen kräftigen Schlag. Doch unser Regenwurm wurde »durch Schaden klug«, und hat die Fertigkeit erlangt,

stets den rechten Ausgang zu erreichen. Der Forscher wollte sehen, wie dieser Richtungssinn mit dem Gehirn in Beziehung steht. Er »enthaupdete« den Wurm, d. h. trennte die fünf ersten Segmente ab, da zeigte sich, daß der Wurm genau so sicher, nur etwas langsamer, seine Wanderung ins Freie

antrat. Mit einsetzender Regeneration des Kopfes verschwand diese Sicherheit, der Wurm schlug gerade die entgegengesetzte Richtung ein. Erst nach zwei Wochen Übung hatte der Wurm die neue Gewohnheit verloren und seinen Richtungssinn wieder erlangt.« Kosmos, Dezember 1914, S. 521

Wettrüsten der Materialforscher

»Die Panzerungen, die unsere lieben Brummer (gemeint sind schwere Haubitzen, Anm. d. Red.) vor Lüttich und anderen Festungen glatt durchschlugen, galten bisher als das *non plus ultra* von Festigkeit. Welche Folgen aus ihrer Schwäche für Landbefestigungen zu ziehen sind, wird die Zukunft lehren. Panzerturm und Panzerbatterie (Geschützstellungen einer Festung, erstere drehbar, Anm. d. Red.) unterscheiden sich von dem Panzerschiff dadurch, daß ihr Panzer aus einem eigenartig behandelten Gußeisen, dem Hartguß besteht. Dies hat die wichtige Folge, daß man Bauteile kompliziertester Form herstellen kann.

Das Wesentliche bei der Herstellung des Hart- oder Schlangengusses besteht darin, daß das glühende Roheisen in metallene Formen hineingegossen wird. Hierbei tritt an den Wandungen ein »Abschrecken« des Eisens ein und hat zur Folge, daß die Oberfläche des Gußstückes eine außerordentlich große Härte annimmt. Dem deutschen Ingenieur Hermann Gruson, Begründer des Grusonwerkes, war es beschieden, die Herstellung des Hartgusses methodisch derart auszugestalten, daß dieser für die verschiedensten Zwecke Verwendung fand. Als Gegenstände, die außer den Panzerbefestigungen aus Hartguß angefertigt werden, nennen wir



Zerschossener belgischer Panzerturm bei Lüttich.

die Herzstücke der Eisenbahnweichen und die Scheibenräder der Eisenbahnwagen.

Durch eine beschleunigte Abkühlung entsteht an der Oberfläche eine sehr harte Schicht, die nach dem Innern immer weicher wird. Die Schwierigkeit bestand nun darin, die äußere harte Schicht allmählich in die weiche übergehen zu lassen, so daß sie, wenn sie beschossen wird, nicht abblättert. Die im Laufe des jetzigen Völkerkrieges gemachten Erfahrungen weisen darauf hin, daß gegenwärtig der Sieg auf Seiten der Geschütze und Geschosse liegt.« Die Welt der Technik 23, Dezember 1914, S. 402/403

Archäologisches Finale am Nil

»Seit dem Winter 1960/61 ist das Gebiet des neuen Stausees von Assuan ein Schwerpunkt archäologischer Forschung. Unermüdlich sind

die Forscher aus vielen Ländern tätig, um zu bergen, was noch zu bergen ist, ehe das Wasser das Tal überschwemmt. Die Erkenntnisse übertreffen weit die Erwartungen. Insgesamt werden 24 Bauwerke verlegt. Die berühmtesten sind die beiden Felsentempel von Abu Simbel. Deutschland hat die Kosten der Bergung des Tempels von Kalabsche übernommen.« Kosmos, Dezember 1964, S. 533



Felsentempel von Abu Simbel.

Metall aus dem All?

»In der kanadischen Provinz Ontario liegt bei Sudbury das größte Vorkommen von Nickelerz auf der Erde. Das sulfidische Erz bildet die unterste Zone eines 60 Kilometer langen, schüsselförmigen Magmakörpers (eines »Lopoliths«). Gewöhnlich wird angenommen, daß die nickelreiche Zone durch gravitative Differentiation entstanden sei. Durch Rob S. Dietz wird jetzt eine zum mindesten in geistreicher Weise dargelegte Deutung zur Diskussion gestellt: das Nickelerz stamme nicht aus dem Magma, sondern von einem Meteoriten her. Der Lopolith von Sudbury wäre demnach extraterrestrischen Ursprungs, und das Ganze ein »Astroblem« – eine durch einen Stern erzeugte Wunde.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Dezember 1964, S. 483

1964

Große Physik ganz klein

Manche Experimente sind schlicht und durchführbar: Für die einen müsste der weltgrößte Teilchenbeschleuniger noch hundertmal größer sein, für andere bräuchte man gar ein Schwarzes Loch. Doch es gibt analog funktionierende Systeme, die auf einen Labortisch passen und trotzdem Erkenntnisse versprechen.

Von Sophie Hebden

Ob detailgetreu nachgebildete Modelleisenbahnen, flugfähige Minihelikopter oder handgroße Dampfmaschinen, die sich fauchend in Gang setzen lassen: Immer wieder machen sich Tüftler ans Werk, um liebevoll Miniaturen technischer Gerätschaften zu konstruieren. Diese sollen möglichst genau so funktionieren wie ihre großen Vorbilder, damit wir sie im Kleinen besser begreifen, verstehen und bestaunen können. Derselbe Tüftlergeist ist aber nicht nur in Kellern, Schuppen und auf Dachböden lebendig, sondern auch in physikalischen Laboren. Denn vieles, was Forscher gern untersuchen würden, liegt außerhalb ihrer Möglichkeiten: Weder können sie den Urknall erneut in Gang setzen noch nach Belieben mit energiereichen Elementarpartikeln herumspielen oder gar ein Schwarzes Loch aus der Nähe erkunden.

Und doch finden sich überall auf der Welt Versuchsanordnungen, die genau das ermöglichen sollen. Die Wissenschaftler verzichten dabei zwar auf »echte« Schwarze Löcher und auf das »echte« Higgs-Boson, versuchen aber, diese Objekte auf dem Labortisch möglichst genau nachzuahmen, indem sie etwa den Rand Schwarzer Löcher mit Wasserwellen nachbilden und das Higgs-Teilchen bei Experimenten mit flüssigem Helium. Kurz: Sie schaffen Analogien physikalischer Systeme, die idealerweise genau so oder zumindest fast so wie das Original funktionieren. Auf diese Weise hoffen die Forscher, trotz mancher praktischer und finanzieller Grenzen der experimentellen Physik neue Erkenntnisse zu gewinnen.

AUF EINEN BLICK

FAST WIE DAS ORIGINAL

- 1** Mathematik ist die Sprache, in der sich alle Physik formulieren lässt. Erstaunlicherweise beschreiben **dieselben Gleichungen** manchmal ganz **unterschiedliche Phänomene**.
- 2** Dann sind **Analogieexperimente** möglich. Statt eines Higgs-Teilchens oder der Supersymmetrie untersuchen Forscher deren Analogien – das ist oft **billiger und einfacher**.
- 3** Je stärker die Analogie, desto größer der mögliche **Erkenntnisgewinn**. Dann lassen sich selbst **kosmische Objekte** untersuchen, die für immer außerhalb unserer Reichweite liegen werden.

Die Idee, physikalische Phänomene zu untersuchen, ohne dass man sie tatsächlich beobachtet, ist nicht neu. Schon den Griechen der Antike dienten Gedankenexperimente dazu, die – bisweilen absurden – Konsequenzen ihrer Theorien zu prüfen, und sie erfüllen ihren Zweck auch noch in Zeiten der Relativitäts- und Quantentheorie. In den letzten Jahrzehnten haben leistungsstarke Computer zudem Möglichkeiten eröffnet, physikalische Prozesse durch umfangreiche Berechnungen zu simulieren. Das reine Rechnen stößt allerdings auf Grenzen: »Es sind noch immer viele Fragen offen, die wir an die von uns untersuchten Systeme stellen – wir können mit Software eben nur das nachbilden, was wir bereits über die Systeme wissen«, sagt Daniele Faccio von der Heriot-Watt University im schottischen Edinburgh.

Mit Analogien ist das anders. Die universelle Sprache, die jeglichem physikalischen Phänomen zu Grunde liegt, ist die Mathematik. Und oft tauchen in unterschiedlichen Zusammenhängen, die auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun haben, identische Gleichungen auf. Wenn Forscher also darauf stoßen, dass zwei scheinbar unterschiedliche physikalische Systeme denselben mathematischen Regeln folgen, dann können sie das eine System durch das andere ersetzen. »Das ist zwar nicht dasselbe wie das Originalsystem. Aber es ist allemal interessanter als die Beschäftigung mit einem Computermodell«, sagt Faccio.

Ein Beispiel liefert das Higgs-Boson. Dieses Teilchen war das letzte noch fehlende Puzzlestück im Standardmodell der Elementarteilchenphysik, das beschreibt, wie die Elementarteilchen über drei der vier Grundkräfte der Natur miteinander wechselwirken; nur die Gravitation als Kraft Nummer vier bleibt in diesem Modell außen vor. Die Idee, dass es so etwas wie das Higgs-Teilchen geben könnte, kam in den 1960er Jahren auf. Ihr zufolge ist das Vakuum von einem unsichtbaren Feld durchdrungen, dem Higgs-Feld. Indem es stärker oder schwächer mit den Elementarteilchen wechselwirkt, verleiht es diesen unterschiedliche Massen. Und wenn man sehr viel Energie in das Feld pumpt, so dass es stark in Schwingung gerät, manifestiert es sich plötzlich in Form von Higgs-Teilchen.

Doch erst 2012 vermeldeten Forscher des CERN, dem bei Genf gelegenen Teilchenforschungszentrum, das Higgs am



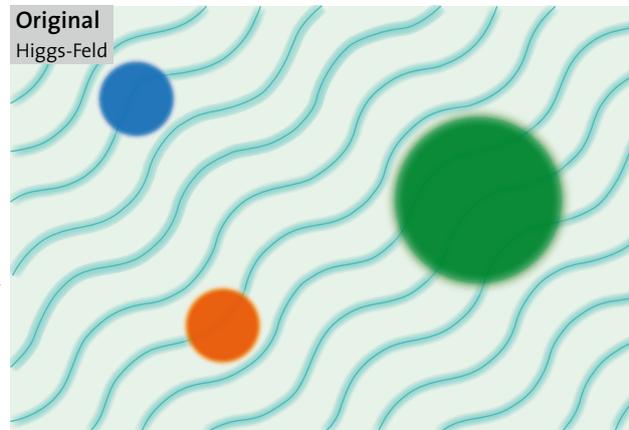
ISTOCKPHOTO / JIMMY ANDERSON

Ein Schwarzes Loch, das alle Materie in seiner Umgebung verschlingt, oder doch nur ein Wasserstrudel? Mit Hilfe von Wasser und Laserlicht erschufen Forscher ein Experiment, das Analogien zur Hawking-Strahlung aufweist, wie sie vom Rand eines Schwarzen Lochs ausgeht. So hoffen sie, diese genauer untersuchen zu können.

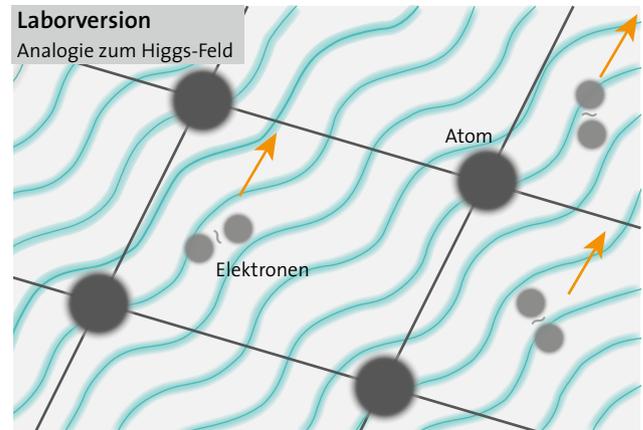
Dasselbe – und doch nicht dasselbe

Analogieexperimente ermöglichen es, physikalische Prozesse, deren Untersuchung extrem aufwändig ist oder die der direkten

Beobachtung nicht zugänglich sind, dennoch im Labor zu untersuchen. Die Ähnlichkeit zwischen den interessierenden Original-



Elementarteilchen gewinnen ihre Massen, indem sie mit dem Higgs-Feld in Wechselwirkung treten, welches das Vakuum erfüllt. Bislang ist es nur an einem Teilchenbeschleuniger wie dem LHC möglich, dieses Phänomen zu untersuchen.



In Materialien, die bei tiefen Temperaturen supraleitend werden, führt eine ähnliche Wechselwirkung zwischen Feld und Teilchen dazu, dass sich Elektronen zu Paaren zusammenschließen und widerstandsfrei durch den Leiter fließen.

Hadronenbeschleuniger LHC erzeugt und nachgewiesen zu haben. Einer der Gründe dafür, dass der Nachweis so lange auf sich warten ließ, war, dass niemand die genaue Höhe der dafür nötigen Energie vorhersagen konnte; sicher war nur, dass sie sehr hoch sein würde. Den präzisen Wert fanden die LHC-Forscher erst heraus, als sie die Trümmer milliardenfacher Kollisionen zwischen energiereichen Teilchen überprüft hatten.

Vielleicht haben sie es sich aber auch unnötig schwer gemacht. Als der Higgs-Mechanismus in den 1960er Jahren von Theoretikern diskutiert wurde, war bereits ein ähnliches Konzept im Umlauf. Allerdings war es in einem anderen Zusammenhang entwickelt worden, dem der Supraleitung. Supraleitende Materialien verlieren bei niedrigen Temperaturen praktisch jeden elektrischen Widerstand, transportieren Strom also verlustfrei. Der Grund dafür: Auf mikroskopischer Ebene beginnen Elektronen im Leiter paarweise miteinander und mit dem Atomgitter ihrer Umgebung zu wechselwirken. Das wiederum führt zur Entstehung teilchenähnlicher Gebilde, die als Cooper-Paare bekannt sind, keinen elektrischen Widerstand kennen und sich völlig frei im Leiter bewegen. Tatsächlich ist die Mathematik, die diesen Prozess beschreibt, nahezu die gleiche wie die, mit denen sich die Higgs-Wechselwirkungen in Formeln fassen lassen, wenngleich Letztere bei höheren Energien stattfinden.

Zum erstaunlichen Effekt der Supraleitung kam es bei den anfänglichen Experimenten zwar nur in Materialien, die mit aufwändigen Verfahren fast auf den absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273 Grad Celsius heruntergekühlt worden waren – gleichwohl ist die experimentelle Ausstattung,

um den Effekt zu untersuchen, erheblich kleiner und billiger als ein Teilchenbeschleuniger. Indem man also bestimmte Prozesse in einem Supraleiter beobachtet, könnte man entscheidende Hinweise auf die Beschaffenheit des realen Higgs-Bosons gewinnen (Grafiken oben).

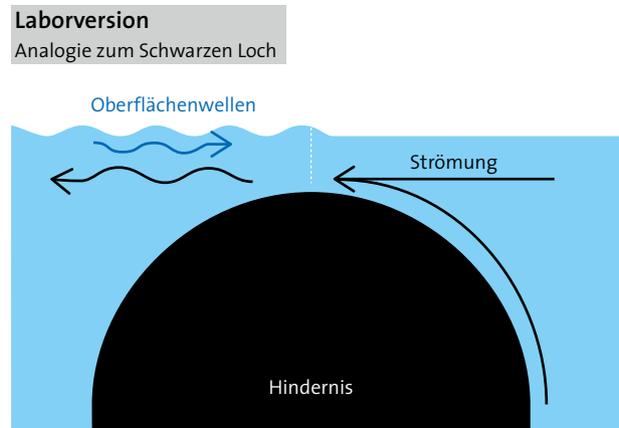
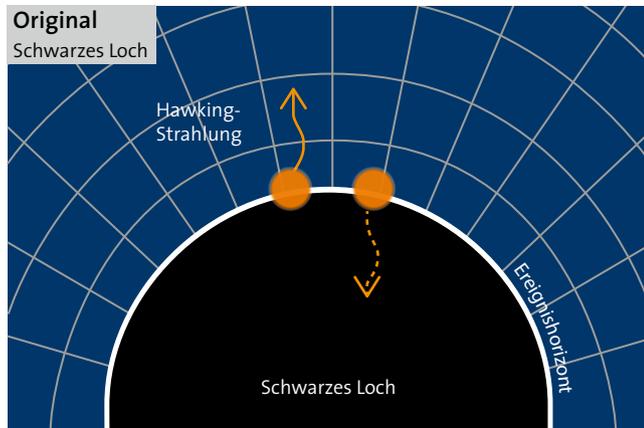
Schon 1981 sahen die Forscher der Supraleitung ein higgsähnliches Teilchen

Es brauchte einige Zeit, um das zu erkennen. Tom Kibble vom Imperial College in London gehörte 1964 zu den sechs Physikern, welche die Idee des Higgs-Mechanismus vorstellten, um zu erklären, wie Elementarteilchen zu ihrer Masse kommen. Er und seine Kollegen hatten damals aber noch nicht recht erfasst, was sich in der Theorie der Supraleitung bereits abzeichnete und welche Bedeutung es hatte. »Natürlich kannten wir diesen Vorschlag, aber wir verstanden ihn nicht sehr gut – zumindest ich nicht«, berichtet er.

1981 wiederholte sich diese Geschichte in ähnlicher Weise: Damals wurde in einem Supraleiter tatsächlich die Signatur eines higgsähnlichen Teilchens entdeckt. Weil die Theorie der Supraleitung bei niedrigen Temperaturen gut etabliert war, registrierten die Wissenschaftler sie aber nur als weitere, eher zufällige Bestätigung ihrer Theorie, während theoretische Teilchenphysiker zur gleichen Zeit nach Möglichkeiten suchten, wie sich die Theorie des Higgs-Mechanismus irgendwie experimentell überprüfen ließe. Für nützliche Hinweise aus dem Lager der Supraleiterforscher wären sie sicher dankbar gewesen. Aber »wir erkannten schlicht nicht, wie groß das Higgs werden würde«, konstatiert Peter Littlewood vom Ar-

nalphänomenen und ihren Laborversionen liegt darin, dass sie durch dieselben mathematischen Gleichungen beschrieben wer-

den. Die gewonnenen Resultate gelten darum für beide Experimente gleichermaßen – zumindest im Prinzip.



Entsteht am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs ein verschränktes Photonenpaar aus dem Vakuum, wird unter Umständen das eine Photon vom Schwarzen Loch verschlungen, während das andere als Hawking-Strahlung entkommt.

Ein mathematisch analoger Prozess läuft ab, wenn Wellen, die über eine Wasseroberfläche laufen, auf eine entgegenkommende Wasserströmung treffen, die um ein Hindernis gelenkt wird.

gonne National Laboratory in Illinois, der an der Deutung der Supraleiterexperimente mitgearbeitet hat.

Letztendlich wurde das Higgs-Teilchen entdeckt, ohne dass die Forschung an Supraleitern dazu beigetragen hätte. Aber sein Nachweis gelang zu einer Zeit, in der die Instrumente zur Nutzung von Analogien schon sehr leistungsfähig waren, wie es Marie-Aude Méasson von der Université Paris Diderot beschreibt. Dies liegt zum Teil daran, dass es inzwischen eine explodierende Zahl von Sichtungen higgsähnlicher Objekte gibt – nicht nur in Supraleitern, sondern auch in Wolken aus kalten Rubidiumatomen, die so stark heruntergekühlt wurden, dass sie alle denselben Quantenzustand einnehmen, sowie in bestimmten Typen von Magneten. Inzwischen sind gemeinsame Konferenzen und Forschungsprojekte ins Leben gerufen worden, um das Wissen der Beteiligten zu bündeln. »Weil es immer mehr Beispiele gibt, sind viele Forscher mittlerweile davon überzeugt, dass sich Analogien und Teilchenphysik tatsächlich gegenseitig befruchten können«, sagt Méasson.

In der Tat ruht auf den Analogien manche Hoffnung. Eine davon besteht darin, Experimente zu finden, die bei niedrigen Energien stattfinden können, die aber gleichzeitig neue Wege aufzeigen, das Higgs-Teilchen bei sehr energiereichen Kollisionen nachzuweisen. Vor allem aber könnten Analogien zur Entdeckung von so genannter neuer Physik beitragen. Das Higgs-Teilchen passt zwar wunderbar zu allen Voraussagen des Standardmodells, doch es gibt auch vieles, was das Standardmodell nicht erklärt, etwa die dunkle Materie, die anscheinend den größten Teil der Masse des Universums

ausmacht, die Dunkle Energie, die Forscher für die sich beschleunigende Expansion des Universums verantwortlich machen, und den kosmischen Überschuss von Materie gegenüber Antimaterie.

Supersymmetrische Teilchen in Helium-3?

Einen theoretischen Rahmen, der auf manchen dieser Gebiete Fortschritte verspricht und sich als Theorie der nächsten Generation anbietet, liefert die so genannte Supersymmetrie, kurz SUSY. Zu ihren zentralen Voraussagen gehört, dass mehr als nur eine einzige Art von Higgs-Teilchen existieren sollte. Grigori Volovik von der Aalto-Universität in Helsinki und Mikhail Zubkov vom Institut für Theoretische und Experimentalphysik in Moskau glauben, 2013 möglicherweise Anhaltspunkte dafür gefunden zu haben, wo sich diese zusätzlichen Teilchen aufspüren lassen könnten: in suprafluidem Helium-3. Jene seltene Form des Heliums ist dank ihrer Reinheit besonders wertvoll für die Erforschung winziger Quanteneffekte. Analysiert man das Spektrum angeregter Zustände darin, deuten sich tatsächlich auch Higgs-Teilchen bei 210 und bei 325 Gigaelektronvolt an; das 2012 entdeckte Higgs besitzt hingegen eine Masse von etwa 125 Gigaelektronvolt. Für sichere Aussagen sei es aber noch viel zu früh, sagt Zubkov. Immerhin schließen die Beobachtungen am LHC die Existenz dieser Teilchen bislang nicht aus.

Ashvin Vishwanath, Theoretiker an der University of California in Berkeley, glaubt, die Dinge noch weiter treiben zu können. Der Ausgangspunkt seiner Überlegungen: Statt wie im Standardmodell strikt zwischen Fermionen (aus denen

Materie besteht) und Bosonen (die Kräfte vermitteln) zu unterscheiden, nimmt man bei SUSY an, dass zwischen Fermionen und Bosonen eine enge Beziehung besteht und jedes Fermion einen bosonischen Superpartner hat und umgekehrt.

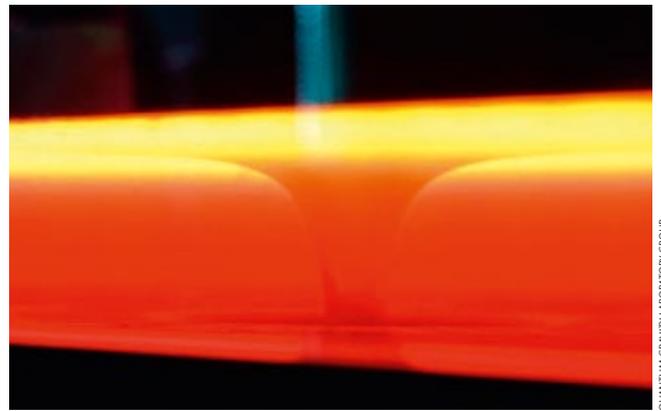
»Wir hatten gehofft, am LHC Spuren von SUSY zu sehen – aber nachdem uns das nicht gelungen ist, gehen wir jetzt andere Wege«, sagt Vishwanath, der jetzt ebenfalls auf Analogien setzt. Geht Materie von einer Phase in eine andere über, wechselt sie also in einen neuen Zustand, passieren seltsame Dinge. Kühlt beispielsweise Eisenschmelze ab und erstarrt, ordnen sich die quantenmechanischen Spins ihrer Elektronen parallel an. Dadurch wird das Metall magnetisch. Kühlt man es weiter ab, bis nahe zum absoluten Temperaturnullpunkt, führen Quantenfluktuationen zu weiteren Phasenübergängen, bei denen noch exotischere Formen von Symmetrie ins Spiel kommen. Beispielsweise nähern sich die Geschwindigkeiten, mit denen sich Elektronen und Phononen in der Probe bewegen, zunehmend aneinander an, bis sie schließlich übereinstimmen. (Als Phononen bezeichnet man Schallwellen, die in Form von Wellenpaketen durch das Metall laufen und die man sich als Teilchen vorstellen kann.) Elektronen zählen nun aber zu den Fermionen und Phononen zu den Bosonen. Vishwanath und seine Kollegen vermuten daher, dass die Mechanismen, die im Metall zu einer Symmetrie zwischen beiden Teilchenarten führen, möglicherweise auch Aufschluss darüber geben, wie es zur Supersymmetrie kommt.

Gut möglich, dass kosmische Strings gar nicht existieren

Aber es genügt nicht, eine Analogie zu einem interessanten Phänomen zu finden – man muss auch sicher sein, dass dieses in der realen Welt überhaupt existiert. Kibble mahnt deshalb zur Vorsicht. In den frühen 2000er Jahren gehörte er zur COSLAB-Initiative (Cosmology in the Laboratory), die sich für die verstärkte Anwendung von Analogien in der Kosmologie einsetzte. Diese eignen sich zum Beispiel, um die von Kibble entwickelten Ideen zu so genannten kosmischen Strings zu untersuchen. Solche Störungen der Raumzeit könnten nach den Voraussagen vieler Theoretiker im frühen Universum entstanden sein, als dessen Expansion und Abkühlung begann. Sicher ist das aber keineswegs, sagt Kibble: »Gut möglich, dass kosmische Strings gar nicht existieren.«

Ein weiterer Fall sind Monopole, also einzelne Magnetpole, die unabhängig von ihrem Gegenstück existieren und sich frei bewegen. In der Natur scheint zwar alles, was mit Magnetismus zusammenhängt, jeweils zwei entgegengesetzte Pole aufzuweisen. Aber hinter dieser Feststellung lauert ein Problem, wie der Theoretiker Paul Dirac bereits in den 1930er Jahren zeigte. Dass wir nämlich im Universum einzelne, frei bewegliche *elektrische* Ladungen beobachten, setzt der Theorie zufolge voraus, dass im Verlauf des Urknalls eben auch *magnetische* Monopole entstanden.

In Analogieexperimenten tauchen sie inzwischen häufig auf. Zunächst geschah dies in Spin-Eis, also in stark herabgekühlten Kristallen mit bestimmten Spin-Konfigurationen



QUANTUM GRAVITY LABORATORY GROUP

Auch rotierende Schwarze Löcher lassen sich mit Wasser modellieren. Für ein Experiment, das Silke Weinfurter von der University of Nottingham mit Kollegen aus dem italienischen Triest konzipierte, erzeugten die Forscher einen Wirbel in fließendem Wasser (Foto). Läuft eine Wasserwelle auf dieses künstliche Schwarze Loch zu, wird sie reflektiert. Weil sie dem Objekt Rotationsenergie entzieht, erhöht sich dabei ihre Amplitude.

(siehe »Nordpole ohne Südpole«, SdW 2/2014, S. 48). Anfang 2014 berichteten Forscher, Monopole auch in einer extrem kalten Wolke aus Rubidiumatomen entdeckt zu haben. Sind darüber hinaus freie Monopole denkbar, die außerhalb solcher Materialien existieren? Die Antwort steht noch aus, aber für David Hall vom Amherst College in Massachusetts, der die Rubidiumexperimente durchgeführt hat, ist es »auf jeden Fall beruhigend, dass die diracsche Monopolstruktur in der Natur existieren kann«.

Ihre beste Wirkung erreichen Analogien dann, wenn es um Objekte im Universum geht, die wir nicht direkt beobachten können. Ein gutes Beispiel sind Schwarze Löcher. Diese kosmischen Schwerkraftmonster werden von der einsteinschen Gravitationstheorie, also der allgemeinen Relativitätstheorie, vorhergesagt. Sie bilden sich aus kollabierenden Sternen, und auch in den Zentren vieler Galaxien werden extrem massereiche Vertreter dieser Gattung vermutet. Außerdem öffnen sie einen Weg zum heiligen Gral der Physik: eine Theorie der Quantengravitation. Dies muss erklären, was geschieht, wenn Teilchen des Standardmodells unter den Einfluss extrem starker Gravitation geraten, also der vierten fundamentalen Kraft.

Weil ein Schwarzes Loch kein Licht aussendet, lässt sich allerdings nicht leicht herausfinden, was in ihm oder auch nur an seinem Rand vorgeht. Silke Weinfurter von der University of Nottingham in Großbritannien hat sich vorgenommen, den Schleier zu lüften, indem sie im Labor die so genannte Hawking-Strahlung eines Schwarzen Lochs simuliert – mit Hilfe von Wasser und Laserlicht. Den Prozess, durch den diese Strahlung emittiert wird, hat in den 1970er Jahren der britische Theoretiker Stephen Hawking vorgeschlagen. Im Bereich des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs – also beim »Punkt ohne Wiederkehr«, ab dem für einfallende Materie und Energie kein Entkommen mehr möglich ist –

können Quantenfluktuationen im Vakuum ein verschränktes Teilchen-Antiteilchen-Paar hervorbringen. Befindet sich eines der Partikel in diesem Moment unentrinnbar im Einflussbereich des Schwarzen Lochs, während das andere gerade noch entkommen kann, wird das Paar auseinandergerissen: Das eine Teilchen bleibt für immer eingeschlossen, das andere tritt als Hawking-Strahlung in Erscheinung.

Ein Weißes Loch, das Materie ausspuckt

Weinfurtners Team untersucht zwar kein Schwarzes, sondern ein »Weißes« Loch: Dieses würde nicht alles in seiner Umgebung verschlingen, sondern es im Gegenteil ausspucken. Die Ergebnisse kann man aber leicht auch auf Schwarze Löcher anwenden – dazu muss man in den Grundgleichungen nur die Zeitrichtung umkehren.

Bei ihren Experimenten lassen die Wissenschaftler Wasser reibungsfrei durch einen Kanal strömen, in dem sich ein stromlinienförmiges Hindernis befindet. Dann erzeugen sie wellenartige Rippel auf dem Wasser, die sich entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten und im Bereich des Hindernisses reflektiert werden. Mit einer zweidimensionalen Fläche aus Laserlicht, die sie über die Wasseroberfläche legen, können sie nun die Eigenschaften der Wellenmuster analysieren. Auf diese Weise wiesen die Forscher nach, dass die Amplituden der Oberflächenwellen und die Verteilung ihrer Frequenzen genau dem entsprechen, was man von Hawking-Strahlung erwarten würde, die vom Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs ausgeht.

Theoretiker haben sich auf Basis dieser Arbeit schon mit der Frage beschäftigt, wie ein Experiment, das ausschließlich den Gesetzen der klassischen Physik gehorcht, Aspekte der Hawking-Strahlung reproduzieren kann, obwohl letztere ein quantenphysikalischer Effekt ist. Eine »echte« Analogie müsste aber dennoch quantenphysikalischen Gesetzen folgen. Gemeinsam mit ihrem Nottinghamer Kollegen Peter Krüger arbeitet Weinfurtners derzeit mit ultrakalten Atomen, um Fortschritte in dieser Richtung zu erzielen.

In Faccios Labor in Edinburgh laufen unterdessen Experimente, die den Ereignishorizont eines Weißen Lochs mit intensiven Laserpulsen zu simulieren suchen. Dabei wird Laserlicht auf einen kleinen Punkt in einem Glasblock gelenkt, der als Wellenleiter fungiert und dessen Brechungsindex sich durch das eintreffende Laserlicht vorübergehend ändert. Dieser Effekt beeinflusst auch die Geschwindigkeit, mit der Licht durch das Material läuft. So bremst das Glas die eintreffenden Laserpulse ab und wirft sie letztlich sogar zurück. Während einem Schwarzen Loch nichts entrinnen kann, kann in ein Weißes Loch nichts eindringen: Die Pulse treffen gewissermaßen auf einen Ereignishorizont, den sie nicht überwinden können. »Was solche Analogieexperimente so aussagefähig macht«, sagt Faccio, »ist die Tatsache, dass sich aus der Perspektive der Photonen oder Wasserwellen nicht unterscheiden lässt, ob sie gerade den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs durchqueren oder lediglich einen Wellenleiter, in dem etwas eigenartige Bedingungen herrschen.«

Im Oktober 2014 stellte auch Jeff Steinhauer von der Technischen Universität Israels in Haifa ein Modellsystem für Schwarze Löcher vor. Dafür kühlte er Rubidiumatome auf weniger als ein Milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt ab. Die entstandene Flüssigkeit, ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat, brachte er daraufhin auf Überschallgeschwindigkeit. Paare von Schallwellen, die entgegen der Stromrichtung eingestrahlt werden – sie sollen die Teilchen-Antiteilchen-Paare am Ereignishorizont echter Schwarzer Löcher repräsentieren –, wurden nun von der Flüssigkeit »eingefangen«, die damit als akustisches Gegenstück eines gravitativen Ereignishorizonts gelten kann. Faccio nennt die Studie den »vielleicht belastbarsten und eindeutigsten Beweis«, dass Labormodelle die Phänomene an der Schnittstelle zwischen allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik nachzubilden vermögen.

Während das ursprüngliche Ziel von Analogieexperimenten darin bestand, Grenzfragen der Physik zu untersuchen, haben sie möglicherweise auch unmittelbareren Nutzen. Beispielsweise bemühen sich die Wissenschaftler um Faccio derzeit, ausgehend von ihren Erfahrungen mit Analogien, dem Vakuum paarweise verschränkte Photonen abzurufen; dieses kürzlich entdeckte Phänomen wird als dynamischer Casimir-Effekt bezeichnet. Derzeit setzt die Erzeugung verschränkter Photonen unhandliche quantenoptische Geräte voraus. Eine billige und einfach handhabbare Quelle für verschränkte Photonen wäre ein Segen für die Quantenkommunikation, bei der man solche Teilchen zum hochsicheren Transport von Information einsetzt. Keine Frage: Der Tüftlergeist ist auch hier höchst lebendig. ~

DIE AUTORIN



Sophie Hebdon ist Wissenschaftspublizistin und lebt im britischen Mansfield.

QUELLEN

- Hawking, S.W.:** Black Hole Explosions? In: Nature 248, S. 30–31, 1. März 1974
- Ray, M.W. et al.:** Observation of Dirac Monopoles in a Synthetic Magnetic Field. In: Nature 505, S. 657–660, 30. Januar 2014
- Steinhauer, J.:** Observation of Self-Amplifying Hawking Radiation in an Analogue Black-Hole Laser. In: Nature Physics, Onlineveröffentlichung, 12. Oktober 2014. doi:10.1038/nphys3104
- Volovik, G.E., Zubkov, M.A.:** Nambu Sum Rule and the Relation between the Masses of Composite Higgs Bosons. In: Physical Review D 87, 075016, 19. April 2013
- Weinfurtners, S. et al.:** Classical Aspects of Hawking Radiation Verified in Analogue Gravity Experiment. arxiv.org/abs/1302.0375, eingereicht am 2. Februar 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314684

© New Scientist
www.newscientist.com



Spiralen aus Wachs

Lässt man von einer brennenden Kerze flüssiges Wachs in Wasser laufen, bilden sich formschöne Muscheln.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Diesen schönen Silvesterbrauch kennen wir alle: Wir halten einen Löffel mit Blei (oder dem weniger giftigen Zinn) über eine Kerzenflamme, warten, bis sich das Metall verflüssigt, und gießen es dann auf einen Schlag in eine Schale mit kaltem Wasser. Dort nimmt es beim Erstarren bizarre Formen an, die wir nach Belieben deuten können und denen mancher gar wahrergerische Kräfte zuschreibt.

Als Kind hatte ich in Ermangelung von Blei ersatzweise Kerzenwachs benutzt und damit nicht minder eindrucksvolle Ergebnisse erzielt. Darüber hinaus stieß ich auf ein fast noch faszinierenderes Phänomen. Stellte ich eine

brennende Kerze in eine Schale mit Wasser und ritzte eine Rinne in ihren Rand, so dass flüssiges Wachs entlang der Kerze hinab ins Wasser lief, entstanden Gebilde, die keineswegs dem reinen Zufall entsprungen sein konnten. Im Gegenteil: Stets meinte ich, Muscheln vor mir zu sehen. Trotz ihrer individuellen Verschiedenheit waren sie einander so ähnlich, dass sie zweifelsfrei als Vertreter derselben Gattung gelten mussten; selbst im Fall »verunglückter« Exemplare erkannte ich in ihnen immer noch das Muschelhaftige. Der Zufall, der Wachsmuscheln ihre Gestalt verleiht, wirkt offenbar nicht blind, sondern ist Teil eines selbstorganisierten Prozesses.

»Schließlich besteht ja jedes Ding nur durch seine Grenzen und damit durch einen gewissermaßen feindseligen Akt gegen seine Umgebung«

Robert Musil (1880–1942)

Was genau spielt sich hier ab? Die Wärme, die von der Kerzenflamme abgestrahlt wird, schmilzt eine Art Vorratschüssel in deren oberes Ende hinein. Der Rand der Kerze schmilzt ebenfalls, aber langsamer, weil ihn die angrenzende Luft kühlt; so erhebt er sich schließlich über das verflüssigte Wachs. Vertiefen wir den Rand dieses gefüllten Brennstoffreservoirs an einer Stelle, kann ein Teil des flüssigen Wachses herausfließen. Noch auf dem Weg nach unten haften kleinere Mengen davon an der Kerze an und hinterlassen einen feinen Steg, bevor sie zu einem Tropfen erstarren. Dieser Steg wiederum lenkt dann die folgenden Wachsströme.



Selbst bei diesen ungewöhnlichen Exemplaren ist das Muschelartige unverkennbar. Im hier gezeigten Fall floss so viel Wachs auf das ursprüngliche Wachsfloß nach, dass der See darin zweimal überschwappte und je eine neue Muschel entstehen ließ.

Hier verfestigte sich das Wachs auf dem Wachsfloß, bevor schubweise weiteres nachlief. Als dieses über den Rand ins Wasser gelangte, fügte es sich in Form einzelner, einander ein wenig überlappender Tropfen an.

Diese Konstellation verdankt sich einer kleinen Sprungchance. Einzelne Tropfen sprangen darüber ins Wasser, trieben weg und wurden vom folgenden Tropfen gerade noch erreicht, so dass ein lockerer Zusammenhang entstand.



Erreicht das Wachs erstmals die Wasseroberfläche, erstarrt es an seiner Unterseite zu einem schalenartigen Gebilde. Weil die Dichte von Wachs geringer ist als die von Wasser, geht dieses Wachsfloß nicht unter; es schwimmt aber auch nicht davon, weil es mit dem Wachssteg verbunden bleibt. Da immer wieder heißes Wachs nachströmt, bleibt die Verbindung zudem biegsam – ein wichtiges Detail, wie wir sehen werden.

Das noch flüssige Wachs im Floß erstarrt nun, wobei es der natürlichen Tendenz folgt, möglichst schnell möglichst viel Wärme abzugeben. Seine Verfestigung beginnt daher dort, wo es an das kühle Wasser grenzt, und breitet sich dann nach innen aus. Weil die Dichte des Wachses mit seiner Erstarrung zu- und somit sein Volumen abnimmt, bleibt in der Mitte eine Delle zurück, in die der nächste Schub heißen Wachses nachfließt. Sobald es über den Rand tretend das Wasser berührt, erstarrt es seinerseits und fügt dem runden Wachsfloß einen weiteren Ring hinzu – denn nur die Ringform stellt sicher, dass die Grenzfläche des neu hinzugekommenen Wachses mit dem Wasser und damit die Grenzflächenenergie unter gegebenen Bedingungen so klein wie möglich ist.

Schub um Schub, Ring um Ring, sorgt nachfließendes Wachs nun dafür, dass sich das Floß weiter ausdehnt. Es wird dabei auch schwerer, sinkt aber nicht als Ganzes tiefer ins Wasser, sondern hängt weiterhin am Verbindungsteg. Dieser arbeitet wie ein an der Kerze fixiertes Scharnier, so dass sich das äußere Ende des Floßes ins Wasser neigt, und zwar umso steiler, je größer seine jeweilige Masse ist. Strömt weiteres Wachs nach, folgt es der stärksten Nei-

gung, fließt also vorzugsweise geradeaus in Richtung Wasseroberfläche. So entsteht eine ungefähr elliptische Form.

Auf diese Weise breitet sich das Gebilde in allen drei Dimensionen immer weiter ins Wasser aus. Seine ellipsenförmige Oberfläche wächst in der Horizontalen; dabei entfernt sich ihr Mittelpunkt von der Kerze. Gleichzeitig sinkt der Außenrand des Wachskörpers immer mehr in die Tiefe. Dabei vergrößert sich nach und nach der Radius der senkrecht verlaufenden Kreisbahn, die er um seinen Fixpunkt an der Kerze beschreibt. Das erinnert an das Wachstumsgesetz einer logarithmischen Spirale: Auch bei dieser wächst mit jeder Drehung der Abstand zum Drehzentrum um denselben Faktor. Kein Wunder, dass unsere Wachsgelbe so verblüffende Ähnlichkeit mit Muschel- oder Schneckengehäusen haben, die ja als Prototyp einer natürlichen Spirale schlechthin gelten.

Raum für Variation gibt es dennoch genug. Zum Beispiel leuchtet sofort ein, dass die Wassertemperatur die Schnelligkeit der Erstarrung beeinflusst und die Form der heranwachsenden Muschel maßgeblich mitbestimmt. Bei niedrigen Temperaturen bilden sich eher höher gewölbte und schmalere Gebilde, bei wärmerem Wasser fallen sie hingegen breiter und flacher aus. Noch wärmer, und sie verlieren ihre Struktur und erinnern schließlich an Fettaggen auf der Suppe.

Überraschenderweise brachte es unsere physikalische Spielerei sogar schon zum Thema wissenschaftlicher Publikationen. Unter dem Titel »Selbstorganisation bei Kerzenmuscheln« berichteten Forscher in den 1990er Jahren, wie sie Kerzenwachsexperimente unter

kontrollierten Bedingungen durchführten. Dabei kamen sie zu weit reichenden, allerdings recht spekulativen Folgerungen. Sie glaubten zum Beispiel, dass die Wechselwirkung zwischen flüssigem und erstarrtem Wachs derjenigen zwischen lebendem Muschelgewebe und dem harten Biomineralisat der Muschelschale entspricht. In dieser Wechselwirkung, so schrieben sie, liege der Schlüssel zur Formbildung nicht nur der Muscheln, sondern auch von Skeletten überhaupt. Falls sich das bewahrheitet, könnte unser Kerzenwachsexperiment nicht weniger leisten, als zur Aufklärung der Entwicklungsgeschichte des Lebens beizutragen. Und falls nicht, nun ja: Der Sinn des Blei- und Wachsgießens besteht ja gerade darin, dass sich die erzielten Ergebnisse frei interpretieren lassen. ~

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

Seilacher, A., Klug, C.: Selbstorganisation bei Kerzenmuscheln. In: Naturwissenschaftliche Rundschau 46, S. 132–134, 1993
Seilacher, A.: Candle Wax Shells, Morphodynamics and the Cambrian Explosion. In: Acta Palaeontologica Polonica 38, S. 273–280, 1994

WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1314685

Wissen verschenken und Freude bereiten – mit einem Geschenk-Abonnement!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie.

12 AUSGABEN, € 89,-
(ERMÄSSIGT € 69,90)



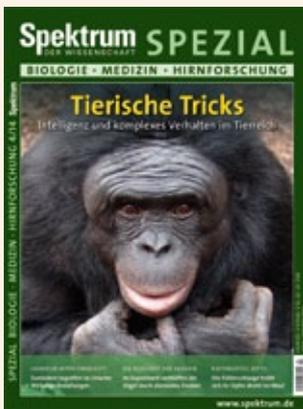
Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung.

12 AUSGABEN, € 85,20
(ERMÄSSIGT € 68,40)



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung.

12 AUSGABEN, € 89,-
(ERMÄSSIGT € 67,80)



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

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

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogstraße 3–5, 69126 Heidelberg



+ GRUSSKARTE



Ein ganzes Jahr Freude:

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

Mit Grußkarte:

Der Beschenkte erhält das erste Heft mit einer Grußkarte in Ihrem Namen. Auf Wunsch auch zu Weihnachten.

Plus Geschenk zur Wahl:

- 1 Kalender »Himmel und Erde 2015«
- 2 Sudoku aus Holz
- 3 Loqi-Taschenset »Pop-Prism« und »Artists Moon«
- 4 Buch »Rotkäppchen und der Stress«
- 5 DVD »Die Zelle«
- 6 Füllhalter »pur« aus dem Hause Lamy

+ EIN GESCHENK FÜR SIE



COMPUTER

jagd

nach

PLAGIATEN



Eigentlich wollte ein amerikanischer Forscher nur ein Programm entwickeln, das ihm helfen sollte, medizinische Fachausdrücke zu verstehen. Zu seiner großen Überraschung entdeckte er damit aber zahlreiche wissenschaftliche Plagiate – und obendrein mögliche Betrügereien in der Forschungsförderung. Schadenssumme: hunderte Millionen Dollar.

Von Harold »Skip« Garner

Im Jahr 1994 nahm mein Leben eine ungeahnte Wendung. Als Physiker und Ingenieur gehörte ich damals bei der Firma General Atomics zu einer betriebseigenen Denkfabrik, die knifflige Fragen aus den Bereichen Kernenergie und Militärtechnik beantworten sollte. Im Lauf der Jahre bearbeitete ich Projekte, die von kalter Fusion bis zu Predator-Drohnen reichten. Doch Anfang der 1990er Jahre bekam ich zunehmend häufig mit Biologen und Genetikern zu tun. Sie erzählten mir von den schlaunen neuen Techniken, die sie für ihre Forschung brauchten; die sollte ich für sie finden.

Etwa zur gleichen Zeit hörte ich von einem neuen Vorhaben namens Humangenomprojekt. Es sollte die Abfolge der rund drei Milliarden DNA-Basen oder Kodebuchstaben in menschlichen Chromosomen entziffern. Das faszinierte mich. Zufällig las ich einen Artikel in »Scientific American«, in dem stand, dass ein Teil der erforderlichen Technik erst erfunden werden müsse. Dafür waren Physiker und Ingenieure gefragt. Und ehe ich mich versah, war ich Professor am Southwestern Medical Center der University of Texas in Dallas und errichtete zusammen mit einem Genetiker eines der ersten Forschungszentren des Humangenomprojekts.

Auf der Suche nach der passenden Suchmaschine für medizinische Fachausdrücke

Ich musste mich völlig umstellen, denn meine Kollegen verwendeten die medizinische Fachsprache. Ich kam dagegen aus der Physik, wo für fast alles mathematische Gleichungen gelten. In der Medizin gibt es keine universellen Formeln, sondern nur unzählige Beobachtungen, Einzelerkenntnisse und Fachausdrücke. Ich besuchte Seminare, schrieb ellenlange Listen nie gehörter Worte auf und verbrachte dann Stunden damit, sie nachzuschlagen. Um einen Fachartikel zu lesen, musste ich stets ein medizinisches Wörterbuch zur Hand haben.

Da ich unfähig war, ein zusammenhängendes Textstück zu verstehen, beschloss ich, eine Software zu entwickeln, die mich unterstützen könnte. Ich brauchte eine Suchmaschine, die zu einer Textpassage Hinweise auf weiterführende Literatur lieferte; kurze Inhaltsangaben – so genannte Abstracts – und komplette Artikel sollten mir raschen Zugang zu dem jeweiligen Thema verschaffen. Das war gar nicht so einfach. Damals kamen erst allmählich Suchmaschinen für das Internet auf. Sie eigneten sich zwar, um das beste Falafelrestaurant am Ort zu finden, scheiterten aber daran, einen Absatz mit thematisch verwandten Begriffen zu verarbeiten und mich auf relevante Quellen hinzuweisen.

Zusammen mit einigen Studenten und bereits Promovierten begann ich, mich mit Textanalyse auseinanderzusetzen. Gemeinsam entwickelten wir eine Software namens eTBLAST (electronic Text Basic Local Alignment Search Tool: elektronische Suchmaschine zum einfachen lokalen Textabgleich). Sie beruhte auf der Suchmaschine BLAST zum Durchforsten von Datenbanken für DNA- und Proteinsequenzen. Eine BLAST-Anfrage bestand meist aus einer Folge

von 100 bis 400 DNA-Buchstaben und lieferte längere Abschnitte, die diese Sequenzen enthielten. Entsprechend sollte eine eTBLAST-Anfrage einen Absatz oder eine Seite Text umfassen – normalerweise mindestens 100 Worte. Der Aufbau des Suchprotokolls war komplizierter als bei einer Software für Buchstabenfolgen, denn das Programm durfte nicht an Schreibweisen kleben. Es sollte auch Synonyme, Abkürzungen sowie verwandte, mit anderen Worten ausgedrückte Ideen erkennen, und es musste die Wortfolge berücksichtigen. Als Antwort auf eine Anfrage, die aus einem Stück Text bestand, sollte eTBLAST eine Rangliste von »Treffern« aus der untersuchten Datenbank auswerfen und jedes Mal ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen dem Suchtext und jedem aufgespürten Abstract eines verwandten Artikels angeben.

Als Datenbank bot sich Medline an, im Internet unter pubmed.org erhältlich. Dieser Datenschatz wird von der National Library of Medicine bei den amerikanischen Gesundheitsbehörden, den National Institutes of Health, gepflegt und umfasst die gesamte medizinisch relevante biologische Forschung. Medline enthält Titel und Abstracts von Millionen Artikeln in Tausenden von wissenschaftlich begutachteten Fachjournalen. Die Datenbank verfügt über eine Suchmaschine, die auf Stichworten beruht. Darum ergibt die gezielte Suche nach wenigen Schlüsselbegriffen zahlreiche Treffer, oft mit Hinweisen auf komplette Artikel. Doch als frischgebackener Biomedizinforscher wusste ich meist nicht einmal, wonach ich suchen sollte.

Die ersten Versionen von eTBLAST brauchten Stunden, um einen wenige hundert Worte langen Absatz mit Medline abzugleichen – aber die Software funktionierte. So erlaubte mir eTBLAST, Fachartikel Absatz für Absatz zu verstehen. Ich konnte eine Doktorarbeit eingeben und automatisch die relevante Literatur herausbekommen. Meine Forschungskollegen und ich verhandelten sogar mit Google über die kommerzielle Nutzung unserer Software, wurden aber belehrt, sie passe nicht zum Geschäftsmodell des Konzerns.

Dann nahmen die Ereignisse eine seltsame Wendung. Mehrfach fand ich in Dissertationen einen Text, der mit einer Passage in einem anderen, nicht zitierten Artikel identisch war. Die Studenten wurden daraufhin eigens überfor-

AUF EINEN BLICK

ÜBERRASCHENDE ÜBEREINSTIMMUNGEN

1 Als der Autor die medizinische Literatur mit einem **Computerprogramm zur Textanalyse** durchsuchte, stieß er häufig auf Dubletten – Indizien für Plagiate.

2 Da derzeit dubiose Fachzeitschriften wie Pilze aus dem Boden schießen, ist es besonders einfach geworden, **Plagiate** zu publizieren.

3 Vielleicht ist die Zeit für ein **neues Modell wissenschaftlichen Publizierens** gekommen: Forscher könnten kontinuierlich an einer umfassenden elektronischen Textsammlung im Stil von Wikipedia arbeiten.

schungsethische Standards belehrt. Und ich bekam eine Forschungsaufgabe, die meine Laufbahn ändern sollte: Wie häufig sind Plagiate in der biomedizinischen Fachliteratur?

Als ich begann, mich mit der neuen Aufgabe zu beschäftigen, beschränkte sich die biomedizinische Plagiatsforschung auf anonyme Befragungen. In der aktuellsten Untersuchung gaben die Forscher zu 1,4 Prozent an, sie würden abschreiben. Doch die Genauigkeit dieser Zahl hing von der Ehrlichkeit derer ab, die auf die Befragung antworteten. Mit eTBLAST konnten wir herausfinden, ob sie die Wahrheit sagten.

Déjà vu

Sobald wir genügend studentische Helfer und einen leistungsstarken Computer zur Verfügung hatten, wählten wir zufällig Abstracts aus Medline aus und machten damit eTBLAST-Anfragen. Der Computer verglich den Suchtext mit dem gesamten Inhalt von Medline, suchte nach Übereinstimmungen und gab dann eine Trefferliste aus. Jeder Treffer hatte ein Ähnlichkeitsmaß. Die Suchanfrage stand immer an der ersten Stelle der Liste – 100 Prozent Übereinstimmung. Der zweite Treffer hatte meist ein Ähnlichkeitsmaß zwischen einigen wenigen und 30 Prozent. Doch manchmal fanden wir, dass der zweite oder sogar der dritte Treffer nahe an 100 Prozent herankam. Nach einigen tausend Suchanfragen zeichneten sich in rund 5 Prozent der Fälle verdächtig hohe Ähnlichkeitsmaße ab. Wir nahmen diese Abstracts in Augenschein, um sicherzustellen, dass die Software tatsächlich etwas fand, was ein Mensch als ähnlich betrachten würde. Anschließend verglichen wir den kompletten Text von Artikeln, deren Abstracts auffallend übereinstimmten.

Bald fanden wir krasse Plagiatsfälle – nicht nur gleich lautende Sätze, sondern zur Gänze abgekupferte Artikel. Das enttäuschte und erstaunte uns. Zwar wussten wir, dass 1,4 Prozent von befragten Forschern Plagiate einräumen. Doch es ist etwas anderes, plagierte Artikel mit eigenen Augen zu sehen. Vor allem für die Studenten war die Suche aufregend; sie kamen sich vor wie Detektive auf der Suche nach Verbrechen – und in gewissem Sinn waren sie das auch.

Nun erweiterten wir den Computereinsatz und die Analyse. Wir wollten mit jedem genügend langen Eintrag in Medline eine gründliche Ähnlichkeitssuche durchführen; das bedeutete damals fast neun Millionen Einträge zu je rund 300 Worten mal fast neun Millionen Vergleiche. Die Suche dauerte Monate und verschlang einen Gutteil der Rechenkapazität unseres Labors. Schließlich analysierten wir die Ergebnisse und stellten alle hochgradig ähnlichen Resultate in eine Datenbank namens Déjà vu.

Diese füllte sich mit rund 80000 Paaren stark übereinstimmender Medline-Abstracts, die einander zu mindestens 56 Prozent glichen. Die allermeisten Dubletten kamen aus durchaus ehrbaren Gründen zu Stande: Sie waren etwa Aktualisierungen älterer Artikel oder Inhaltsangaben von Kongressvorträgen. Doch andere blieben verdächtig.

Wir reichten daraufhin bei der Fachzeitschrift »Nature« einen Artikel ein, der Daten über die Häufigkeit von Plagiaten



und Mehrfachveröffentlichungen – so genannten Eigenplagiaten – enthielt sowie Details über den Inhalt der Déjà-vu-Datenbank und einige herausragende Beispiele. Die Redakteure akzeptierten den Artikel, doch da wir einige Abstracts explizit als Plagiate bezeichneten, zerrissen die Juristen den Text in der Luft. Sie hatten völlig Recht: Nur Redakteure und Ethikkommissionen dürfen ein Plagiat feststellen. Wir konnten nur Fakten präsentieren – das Ausmaß an Textgleichheit zwischen zwei Publikationen. Letztlich änderten wir unseren Artikel entsprechend ab.

Als der »Nature«-Artikel erschien, löste das einen Riesenswirbel aus. Die Wissenschaftsredakteure waren aufgebracht, weil sie Mehrarbeit bekamen. Die Herausgeber der Originalartikel mussten zum Schutz des Urheberrechts erreichen, dass die Plagiate zurückgezogen wurden. Der Herausgeber einer Dublette war erst recht in Verlegenheit. Die wissenschaftlichen Gutachter schäumten, weil unsere Resultate sie der Schlamperei zu bezichtigen schienen. Doch alle gaben zu, dass ein ernstes und interessantes Problem aufgetaucht war. Forscher und Ärzte müssen schließlich wichtige Entscheidungen auf Grund ihrer Fachlektüre treffen. Diese Entscheidungen sollten nicht auf unsauberen Studien beruhen.

Mein Leben als Ethikpolizist

Am Ende stellten wir fest, dass 0,1 Prozent aller Fachpublikationen glatte Plagiate anderer Arbeiten waren. Wir suchten allerdings nur nach fast identischen Artikelpaaren. Es muss viel mehr Fälle geben, in denen nur Bruchteile abgekupfert wurden; doch da unsere Software nur Abstracts durchsuchte, konnte sie so etwas nicht entdecken. Rund ein Prozent waren Eigenplagiate; die Arbeit eines Autors erschien oft wortwörtlich in bis zu fünf Fachzeitschriften. Wem diese Prozentzahlen klein vorkommen, der sollte bedenken, dass jedes Jahr rund 600000 neue biomedizinische Artikel veröffentlicht werden.

Wie wir bald bemerkten, begann das den Publikationsvorgang zu beeinflussen: Die Fachredakteure fingen an, die Manuskripte mit eTBLAST zu prüfen. Auch ich veränderte mich – ich durfte mich zusätzlich »Ethikforscher« nennen.

Die erste große Plagiatsstudie war aber erst der Anfang. Als viel schwieriger erwies es sich, die Ursachen solcher Vergehen und ihre Wirkung auf den Wissenschaftsbetrieb zu

verstehen. Wann ist Textwiederholung akzeptabel? Wann und warum plagieren Forscher? Welche anderen Formen von unethischem Verhalten vermag die Textanalyse aufzudecken? Also verfeinerten wir unsere Software, erweiterten unsere Datenbanken und begannen neue Studien.

Dabei kamen unerwartete Nuancen zu Tage. In manchen Fällen ist Textähnlichkeit nicht nur akzeptabel, sondern sogar erwünscht. Beispielsweise geht es im Methodenabschnitt eines Forschungsartikels vor allem um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Hier dient eine nicht originelle Ausdrucksweise dem wichtigen Zweck, deutlich zu zeigen, dass genau dasselbe Versuchsprotokoll verwendet wurde.

Wir fanden aber auch wirklich unerhörte Verletzungen ethischer Standards. In einer im Fachjournal »Science« publizierten Analyse präsentierten wir die krassesten Fälle, in denen die Plagiate zu durchschnittlich 86 Prozent mit den abgekupferten Originalen identisch waren. Per E-Mail sandten wir den betreffenden Autoren und Redakteuren kommentierte Kopien der Artikel sowie vertrauliche Gutachten. War ihnen die Ähnlichkeit bewusst? Hatten sie eine Erklärung dafür? 90 Prozent der kontaktierten Personen antworteten uns.

Einige Autoren gaben eklatante ethische Verfehlungen zu. Manche hatten doch tatsächlich einen Artikel geschrieben, während er ihnen zur fachlichen Begutachtung vorlag – und ihn dann schlecht beurteilt, um die Veröffentlichung zu blockieren. Andere gaben erfundenen Medizinstudenten die Schuld. Ein Autor behauptete, er habe den Artikel nur zum Spaß plagiiert. Diese Person war zufällig Vizepräsident der nationalen Ethikkommission der USA. Wie nicht anders zu erwarten, sind die meisten der von uns angeprangerten Plagiate seither zurückgezogen worden.

Finanzieller Schaden durch Abschreiben

Anfang 2012 begannen wir dann nach Fällen von doppeltem Abkassieren zu suchen. Dabei erschleichen sich Forscher Geld von mehreren Regierungsbehörden für ein und dieselbe Arbeit. Wir verschafften uns ungefähr 860 000 Inhaltsangaben von öffentlichen und privaten Forschungssubventionen, die unter anderem von den amerikanischen Gesundheitsbehörden, der National Science Foundation, dem Verteidigungs- und Energieministerium sowie von einem Verein für Brustkrebshilfe bewilligt worden waren, und analysierten sie mit eTBLAST. Die Studie erforderte 800 000 mal 800 000 – mehr als eine halbe Billion – Abgleiche und die Rechenkapazität eines Supercomputers.

Unter den 1600 besonders ähnlichen Subventionsbeschreibungen entdeckten wir rund 170 Paare mit praktisch identischen Forschungszielen oder Hypothesen. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass doppeltes Abkassieren eine lange Tradition hat, dass auch die angesehensten Universitäten daran beteiligt sind und dass der finanzielle Schaden für die biomedizinische Forschung bis zu 200 Millionen Dollar beträgt.

Ein kleiner Teil der Menschen hat schon immer soziale Normen verletzt – und Wissenschaftler bilden keine Ausnah-

me. In Zeiten knapper Forschungsgelder und intensiven Wettstreits um akademische Stellen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass einige Forscher sich danebenbenehmen. Außerdem hat eine Schwemme von zweifelhaften und kurzlebigen Fachjournalen aus dem wissenschaftlichen Publizieren eine Art Wildwestshow gemacht. Es ist heute leichter als jemals zuvor, eine Arbeit zu veröffentlichen, selbst wenn sie schamlos abgeschrieben wurde.

Als probates Gegenmittel bietet sich die Textanalyse an. Sie vermag nicht nur die Unsitte des Plagiiereins abzuschaffen, sondern könnte auch völlig neue wissenschaftliche Kommunikationsformen unterstützen.

Eine faszinierende Idee hierzu ist vom Modell des Onlinelexikons Wikipedia inspiriert: Man schafft eine dynamische, elektronische Sammlung von Veröffentlichungen zu einem Thema, die von Wissenschaftlern kontinuierlich redigiert und verbessert wird. Jede neue »Publikation« besteht aus einem Beitrag zu einem einheitlich wachsenden Wissensschatz; redundante Methodenabschnitte werden überflüssig. Das Wikipedia-Modell wäre ein Schritt zu einer zentralen Datenbank, die alle wissenschaftlichen Publikationen in sämtlichen Disziplinen umfasst. Autoren und Redakteure würden mittels Textanalyse die Originalität einer neuen Forschungsarbeit bestätigen und zuverlässige Messverfahren für den Impact-Faktor – den Informationsgehalt, die Wirkung – einer Idee oder Entdeckung entwickeln. Im Idealfall würden wir den Impact nicht bloß anhand der Häufigkeit messen, mit der die betreffende Arbeit zitiert wird, sondern vielmehr ihren Einfluss auf unser gesamtes Fachwissen und auf die Gesellschaft überhaupt bestimmen. ~

DER AUTOR



Harold »Skip« Garner ist Professor für Biologie, Informatik und Medizin beim Virginia Polytechnic Institute and State University in Blacksburg sowie Mitbegründer der Textanalyse-Firma Heliotext.

QUELLEN

- Errani, M., Garner, H.:** A Tale of Two Citations. In: Nature 451, S. 397–399, 2008
Garner, H. et al.: Research Funding: Same Work, Twice the Money? In: Nature 493, S. 599–601, 2012
Long, T. C. et al.: Responding to Possible Plagiarism. In: Science 323, S. 1293–1297, 2009
Sun, Z. et al.: Systematic Characterizations of Text Similarity in Full Biomedical Publications. In: PLOS One 5, e1204, 2010

LITERATURTIPP

Bennett, C. H. et al.: Die Evolution der Kettenbriefe. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2004, S. 78–83
Textanalyse findet Verwandtschaftsrelationen für Genome in der Biologie, in Sprachen – und in Kettenbriefen.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314686

SPIELTHEORIE

Gefangenendilemma mit Erpressung

Neue Ideen in einem alten Spiel:

»Auge um Auge, Zahn um Zahn« ist gut,
»Gnade vor Recht« ist besser.

VON BRIAN HAYES

Auf der Polizeiwache werden zwei Verdächtige in getrennten Räumen verhört. Der Beamte verspricht demjenigen, der zuerst den Mund aufmacht, große Vorteile – Strafmilderung oder gar Kronzeugenstatus. Aber beide wissen, dass er ihnen nichts nachweisen kann, wenn sie schweigen.

Die Szene gibt einen guten und viel genutzten Filmstoff ab. Aber die Dramatik interessiert die Spieltheoretiker wenig. Bei ihrem »Gefangenendilemma« geht es um Punkte, unter denen man sich Jahre in Freiheit oder sonst etwas Erstrebenswertes vorstellen darf. Jeder der beiden Spieler hat die Wahl zu kooperieren oder zu »betrügen«, ohne die Entscheidung des Partners zu kennen. Für die Kriminellen heißt Kooperieren Schweigen und Betrügen Gestehen. In den meisten anderen Situationen sind Gut und Böse vertauscht, und der Kooperierende ist derjenige, der eine Vereinbarung – zum Beispiel ein Gut gegen Bezahlung zu liefern – einhält, während der Betrüger genau das nicht tut.

Wie dem auch sei: Wenn beide Spieler kooperieren (*kk*), bekommt jeder drei Punkte, wenn beide betrügen (*bb*), bleibt ihnen nur jeweils ein Punkt. Wenn aber einer kooperiert und der andere betrügt (*kb* oder *bk*), kriegt der Ehrliche gar nichts und der Betrüger volle fünf Punkte (Bild rechts oben).

Auf den ersten Blick ist der Ehrliche immer der Dumme. Kooperiert sein Partner, dann kann er durch Betrügen fünf statt drei Punkte ernten; betrügt der andere, ist es vorteilhaft, es ihm gleichzutun, denn das bringt immer

noch einen Punkt statt gar nichts. Also wird er betrügen; sein Partner kommt zu demselben Ergebnis, und beide enden mit einem mickrigen Punkt, obwohl sie bei einer Kooperation je drei hätten haben können.

Gegen diese trostlose Logik ist kein Kraut gewachsen – wenn sich die Spieler nie wieder begegnen. Wenn es aber um eine lange Serie solcher Spiele geht, kann Kooperation sich auszahlen. Und wenn ein solches »iteriertes Gefangenendilemma« (iterated prisoner's dilemma, IPD) mit vielen Beteiligten in einem Ökosystem gespielt wird und jeder Spieler so viele Nachkommen in die Welt setzt, wie seiner Gesamtpunktzahl entspricht, dann pflegen sich die Kooperativen auf die Dauer durchzusetzen. Das wiederum liefert eine Erklärung, warum in der Evolution Kooperation in einer Population von Egoisten entstehen kann: Sie bietet einen Selektionsvorteil (Spektrum der Wissenschaft 8/1995, S. 46, und 3/2002, S. 52).

Spieltheoretiker, Psychologen, Wirtschaftswissenschaftler, Politologen und Evolutionsbiologen beschäftigen sich seit mehr als 60 Jahren intensiv mit dem iterierten Gefangenendilemma. Eigentlich schien das Gebiet im Wesentlichen abgegrast. Deswegen war es eine große Überraschung, als 2012 eine völlig neue Klasse von Strategien entdeckt wurde. So kann einer der Spieler – in einem gewissen Rahmen – einseitig bestimmen, welche Punktzahl der Gegner einfährt. Mit einer anderen Strategie bestimmt er zumindest das Verhältnis der gegnerischen zur eigenen Punktzahl. Und neben diesen »mani-

		Spieler X	
		kooperieren	betrügen
Spieler Y	kooperieren	3 3	5 0
	betrügen	0 5	1 1

Die Auszahlungsmatrix im klassischen Gefangenendilemma für die beiden Spieler X (rot) und Y (blau).

pulierenden« Strategien gibt es auch großzügige: Das sind solche, die zur Kooperation anstiften und sich dadurch evolutionär durchsetzen.

Wie du mir, so ich dir

Die Konfliktsituation, die das klassische Gefangenendilemma beschreibt, ist sicher so alt wie die Menschheit. In der gegenwärtigen Form erfunden haben es in den 1950er Jahren Merrill M. Flood und Melvin Dresher von der RAND Corporation. Die beiden ließen zwei Kollegen in rascher Folge 100 Spiele zu je 100 Zügen ausführen. Dabei ist ein »Zug« das, was bisher das ganze Spiel war: Beide Spieler treffen gleichzeitig und unabhängig voneinander die Entscheidung Kooperieren oder Betrügen. Dann wird jedem Spieler die Entscheidung des anderen bekannt gegeben und die zugehörige Punktzahl gutgeschrieben – »Auszahlung« sagen die Spieltheoretiker –, und weiter geht das Spiel. Ohne sich vorher verständigt zu haben, erreichten die von Flood und Dresher angestifteten Spieler in ungefähr 60 Prozent der Fälle den Zustand beiderseitiger Kooperation.

Zehn Jahre später unternahm Anatol Rapoport, Mathematiker und Psychologe an der University of Michigan, weitere Experimente und Analysen. Als in den 1980er Jahren Robert Axelrod, ebenfalls in Michigan, seine berühmt gewordenen Turniere veranstaltete, in denen

Computerprogramme gegeneinander das iterierte Gefangenendilemma spielten, ging Rapoport's Werk als klarer Sieger daraus hervor (Spektrum der Wissenschaft 8/1983, S. 8). Das Programm hieß »Tit for Tat« (»Wie du mir, so ich dir«) und war denkbar einfach gebaut: Es kooperiert im ersten Zug und tut dann immer das, was sein Gegner im vorigen Zug getan hat. Es belohnt also Kooperation mit Kooperation und bestraft Betrug mit Betrug – aber jeweils nur einmal.

Tit for Tat ist nicht optimal in dem Sinn, dass es stets mehr Punkte als andere erzielen würde – im Gegenteil: Es bleibt stets unter der Punktzahl seines Gegners, weil es gewissermaßen ein Unentschieden anstrebt. Aber es schlägt sich bemerkenswert gut gegen eine Vielzahl anderer Strategien.

Aus dem Erfolg seines einfachen Programms zieht Axelrod einige Lehren für IPD-Spieler: Sei nett, provozierbar und nicht nachtragend. Oder genauer: Betrüge nie als Erster; vergelte einen Betrug sofort; vergiss alles, was dein Gegner getan hat, bis auf den jeweils letzten Zug.

Die genannte Überraschung verdanken wir zwei gestandenen Wissenschaftlern. William H. Press von der University of Texas in Austin, Jahrgang 1948 und ursprünglich Astrophysiker,

wurde zu einem Experten im wissenschaftlichen Rechnen und wandte sich 2007 biologischen Problemen zu. Im Februar 2012 wurde er zum 165. Präsidenten der amerikanischen Wissenschaftsvereinigung AAAS gewählt. Der 90-jährige Freeman J. Dyson vom Institute for Advanced Study in Princeton hat sich als Physiker, Mathematiker, Autor, Visionär und Universalgelehrter einen Namen gemacht. Wie die beiden zu ihrer Entdeckung kamen, ist eine interessante Geschichte, die ich hier aus Platzmangel nicht erzählen kann.

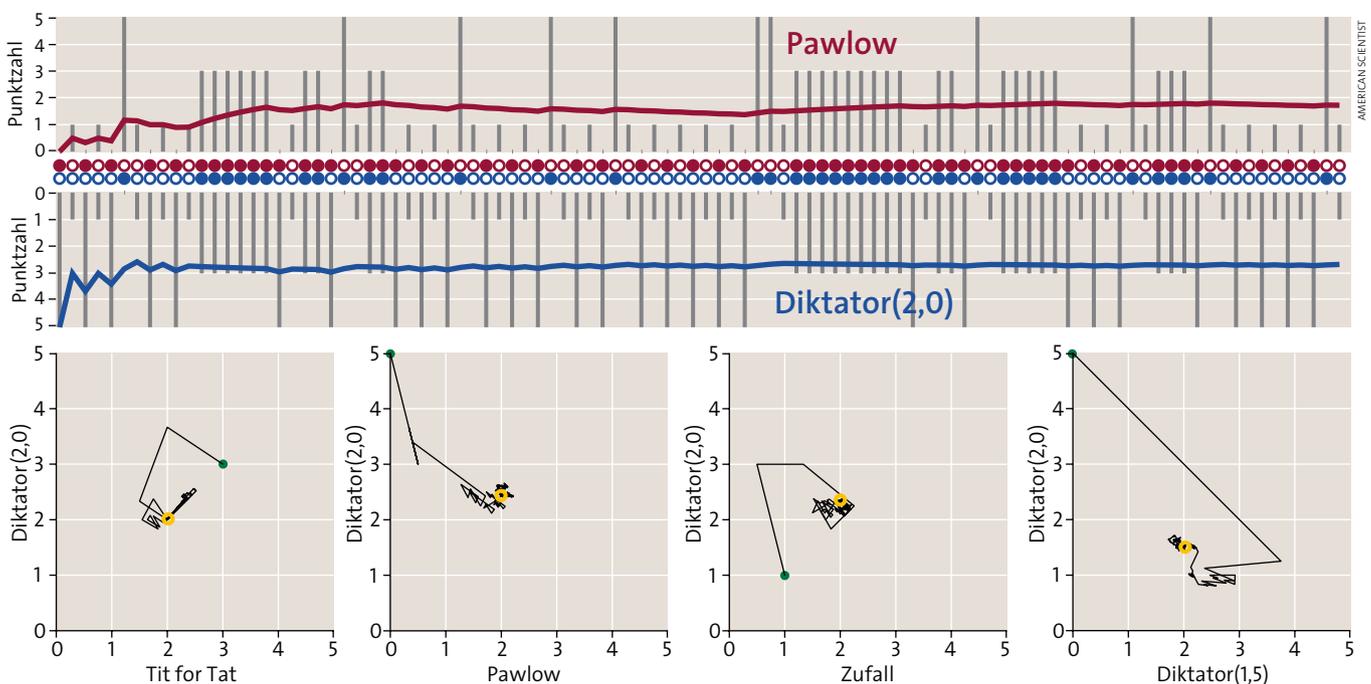
Kurzzeitgedächtnis reicht aus

Press und Dyson studierten »vergessliche« IPD-Strategien, das heißt solche, bei denen der nächste Zug von der jeweils letzten Aktion beider Beteiligten abhängen darf, aber von nichts, was davor liegt. Das scheint zunächst die Freiheit des Programmierers empfindlich einzuschränken. Wenn ein Computer-

programm sich das Verhalten des Gegners über eine längere Zeit merken darf, könnte es sich doch darauf einstellen und einen Vorteil daraus ziehen. Aber es erweist sich, dass »der Spieler mit dem kürzesten Gedächtnis das Geschehen bestimmt«. Nehmen wir an, Spieler Y verfolgt eine vergessliche Strategie, und X berechnet seinen jeweils nächsten Zug aus den letzten, sagen wir, 10 oder 100 Zügen. Unter dieser Voraussetzung können Press und Dyson beweisen, dass es für X eine vergessliche Strategie gibt, die im Spiel gegen Y dieselbe Auszahlung liefert.

Jeder Spielzug im IPD hat eines von vier Ergebnissen, kk , kb , bk oder bb . Eine vergessliche Strategie ist nichts weiter als eine Liste von vier Zahlen zwischen 0 und 1, die angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Spieler auf den jeweiligen Ausgang des letzten Zugs hin kooperiert. So entspricht Tit for Tat der Strategie $(1, 0, 1, 0)$: Kooperiere stets

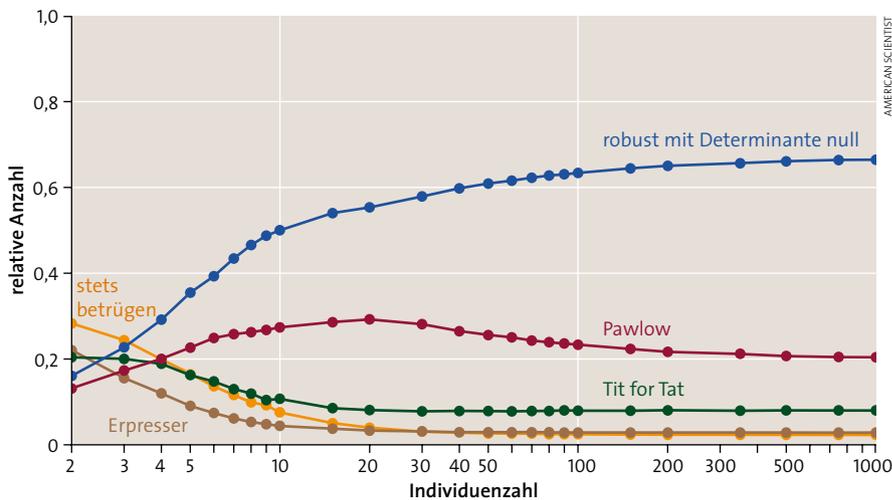
Die Strategien Pawlow $= (1, 0, 0, 1)$ und Diktator $(2,0) = (4/5, 2/5, 2/5, 1/5)$ spielen 100 Züge gegeneinander (oben). Allgemein bezeichnet Diktator (x) eine Strategie, die für ihren Gegner die Auszahlung x erzwingt. Kooperation ist durch einen ausgefüllten Kreis gekennzeichnet, Betrug durch einen leeren. Auf die Dauer pendelt sich die durchschnittliche Punktzahl für Pawlow auf den Wert 2,0 ein. Unten der Verlauf dieser Punktzahl über die ersten 1000 Züge für Diktator $(2,0)$ gegen vier andere Strategien. Jeder Streckenzug beginnt beim grünen Punkt und strebt gegen den gelben Kreis, und dessen x -Koordinate – die Punktzahl des Gegners von Diktator $(2,0)$ – liegt unweigerlich bei 2,0.



nach kk und bk , betrüge stets nach kb und bb . Eine andere Strategie namens »Pawlow« oder »Win-stay-lose-shift« ist $(1, 0, 0, 1)$: Kooperiere, wenn du und der Gegner dieselbe Wahl getroffen haben (kk oder bb), betrüge im anderen Fall. Diese beiden Strategien sind deterministisch, das heißt, der Zufall spielt keine Rolle, vielmehr kommen nur die Wahrscheinlichkeiten 0 und 1 vor. Aber das muss nicht sein: Die Strategie Zufall $= (1/2, 1/2, 1/2, 1/2)$ kümmert sich gar nicht um die Vorgeschichte, sondern wirft für jeden Zug eine Münze.

Zwei Strategien kann man bequem im Computer gegeneinander spielen lassen und dabei mitzählen, wie oft jedes Ergebnis (kk , kb und so weiter) vorkommt. Das Spiel konvergiert gegen einen »stationären Zustand«, das heißt, die relativen Häufigkeiten dieser Ergebnisse nehmen auf die Dauer konstante Werte an. Aus ihnen kann man eine durchschnittliche Punktzahl pro Zug für beide Spieler und damit ein Endergebnis im Grenzwert unendlich vieler Spielzüge bestimmen. Für vergessliche Strategien muss man noch nicht einmal ein Computerprogramm laufen lassen, sondern kann alles, was man wissen will, direkt aus den Wahrscheinlichkeiten berechnen. So lässt sich mit Leichtigkeit eine große Palette von denkbaren Vorgehensweisen analysieren.

Das taten Press und Dyson – und entdeckten etwas Merkwürdiges. Es gibt vergessliche Strategien, die auf den ersten Blick aussehen wie jede andere, aber die Punktzahl des Gegners auf einen bestimmten Wert festlegen, einerlei, wie dieser spielt. Solche einseitigen Strategien, die den Gegner wie einen Hampelmann aussehen lassen – mach, was du willst, es ändert nichts am Ergebnis für dich –, gehören zu einer neu entdeckten Klasse, die Press und Dyson »zero-determinant strategies« nennen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass die Determinante einer gewissen Matrix, die aus den Wahrscheinlichkeiten gebildet wird, gleich null ist; aber diese Eigenschaft hilft nicht viel zum Verständnis. Es genügt, zu wissen, dass zwischen den vier Wahrscheinlichkeiten algebraische Beziehungen bestehen. So kann



Unter verschiedenen Strategien mit Determinante null dominieren in der Evolution auf die Dauer die großzügigen, außer bei sehr kleiner Individuenzahl. Das Bild zeigt Ergebnisse der Simulationen von Alexander J. Stewart und Joshua B. Plotkin.

man in manchen Fällen die Wahrscheinlichkeiten für kk und bb noch frei wählen, aber die für kb und bk sind dann damit festgelegt.

Diktatoren und Erpresser

Die Möglichkeit, das Ergebnis des Gegners zu bestimmen, gibt »Gelegenheit zu allerlei Gemeinheiten«, schreiben Press und Dyson. So kann eine »Diktator«-Strategie die Punktzahl des Gegners auf jeden Wert zwischen der Auszahlung für gegenseitiges Betrügen und derjenigen für gegenseitiges Kooperieren festnageln. Für die üblichen Auszahlungswerte 0, 1, 3 und 5 (Bild S. 64) bedeutet das: zwischen 1 und 3.

Nehmen wir die Strategie $(4/5, 2/5, 2/5, 1/5)$, wobei die vier Zahlen wieder die Wahrscheinlichkeit für kk, kb, bk und bb bedeuten. Wenn Y damit gegen X spielt, wird X auf die Dauer bei einer durchschnittlichen Auszahlung von 2,0 enden, egal was er selbst tut (Bild S. 65). Zu allem Überfluss muss sich Y in keiner Weise auf seinen Gegner einstellen. Der Y -Spieler kann die Wahrscheinlichkeiten festsetzen und »Kaffee trinken gehen«, wie Press und Dyson es ausdrücken.

Eine alternative Gemeinschaft besteht darin, dem Gegner nicht eine absolute Punktzahl aufzudrücken, sondern das Verhältnis zwischen seiner und der eigenen Punktzahl. Nennen wir die langfristigen Durchschnittspunktzahlen

der beiden Spieler P_X und P_Y , dann kann Y die Beziehung $P_Y = 1 + M(P_X - 1)$ erzwingen, wobei M eine beliebige Konstante größer als 1 ist. X kann dagegen die Strategie »stets betrügen« setzen, was beiden den Minimalertrag von einem Punkt verschafft. Jede Bemühung, darüber hinaus zu kommen, bringt ihm einen gewissen Zuwachs, seinem Gegner aber den M -fachen, von der Basis 1 aus gerechnet. Press und Dyson nennen diese Technik »Erpressung«. Realisiert wird sie zum Beispiel von der Strategie $(11/13, 1/2, 7/26, 0)$, die $M=3$ erzwingt. Wenn Y nach dieser Strategie spielt, kann X sich aussuchen, ob er »stets betrügen« oder Tit for Tat spielt; in jedem Fall enden beide mit einem Punkt pro Zug. Pawlow würde X ungefähr 1,46 Punkte einbringen, seinem Gegner aber 2,38. Und wenn X für sich selbst das Maximum herausholen möchte, muss er bedingungslos kooperieren, womit er 1,91 Punkte pro Zug kassiert, und ohnmächtig zusehen, wie Y mit 3,73 Punkten pro Zug vom Platz geht.

Der Erpressungsfaktor M ist nach oben nicht begrenzt; aber Y kann trotzdem nicht beliebig viel Gewinn aus dem Spiel ziehen. Denn für große Werte von M strebt das, was X maximal erreichen kann, gegen 1, so dass er keinen Anlass zum Kooperieren hat.

Nachdem die erste Überraschung sich gelegt hat, stellt sich heraus, dass

es etwas Ähnliches schon vorher gab. Maarten C. Boerlijst, Martin A. Nowak und Karl Sigmund haben Teile der Entdeckung bereits in den 1990er Jahren vorweggenommen. Und eine Erpressungsstrategie mit $M=1$ ist nichts weiter als das altbekannte Tit for Tat. In der Tat: Es handelt sich um eine Strategie, die gleichen Gewinn für beide erzwingt, ohne dass der Gegner etwas dagegen tun kann. Nur nennt man das normalerweise nicht Erpressung.

Wenn ich so eine Erzwingungsstrategie beobachte (oder gegen sie spiele), beschleicht mich unweigerlich ein übles Gefühl. Wie kann das sein, dass in einem völlig symmetrischen Spiel der eine solch eine Macht über den anderen ausüben kann? Bei den diktatorischen Strategien ist die Symmetrie nicht wirklich gebrochen, sondern nur irgendwie verschoben: Wenn ich die Herrschaft über die Punktzahl des Gegners an mich reiße, gebe ich zugleich jede Kontrolle über die eigene auf. Ich kann seine Punktzahl bestimmen und er meine – ein Sodomaspiegel, bei dem jeder der Willkür des anderen schutzlos ausgesetzt ist.

Die Erpressungsstrategien sind nicht so leicht wegzuerklären. Wenn sich mein Gegner einen unfairen Anteil an gemeinsamen Gut unter den Nagel reißt, kann ich nichts dagegen tun, als in den Zustand totalen Misstrauens zu verfallen, der alle Beteiligten arm macht. Damit scheint das iterierte Gefangenendilemma in derselben trüben Gefängniszelle angekommen zu sein, von der es seinen Ausgang nahm.

Darwinistisches Dilemma

Aber es gibt einen Ausweg, und wieder führt er über die Evolutionsbiologie. Welche Fische im Teich auf Kosten der anderen Erfolg haben und sich vermehren, hängt von der Zusammensetzung der ganzen Fischgesellschaft ab. Aber nach vielen Generationen gilt auch das Umgekehrte: Welche Fische überhaupt im Teich schwimmen, hängt davon ab, welche bisher erfolgreich waren.

Schon unter den klassischen Strategien fressen sich die »bösen« (häufig betrügenden) Strategien an den gut-

gläubigen (zum Beispiel bedingungslos kooperierenden) Mitspielern dick und fett, bis ihre Nachkommen die Szene dominieren. Dann beginnt ihr Abstieg, weil zwei Böse miteinander nicht satt werden, während die Teilgesellschaft der Tit-for-Tat-Spieler blüht und gedeiht. Auch Diktatoren und Erpresser kommen mit ihresgleichen nicht gut zurecht.

Bald nachdem die Arbeit von Press und Dyson erschienen war, ließen Christoph Adami und Arend Hintze von der Michigan State University verschiedene Strategien mit Determinante null in einer evolutionären Simulation gegeneinander antreten. In der Tat vermehrten sich die Erzwingungsstrategien zunächst sehr stark, wurden aber auf lange Sicht von anderen, namentlich Pawlow, verdrängt.

Aber damit ist die Geschichte immer noch nicht zu Ende. Nicht alle Strategien mit Determinante null sind böse. Alexander J. Stewart und Joshua B. Plotkin von der University of Pennsylvania haben unter ihnen eine Klasse »großzügiger« Strategien gefunden, die eine Art Spiegelbild der Erpresser darstellen. Diese beanspruchen mehr als ihren fairen Anteil vom Kuchen, müssen sich aber, wenn der Gegner nicht mitspielt, mit den Minimalkrümeln begnügen. Ein großzügiger Spieler macht es genau umgekehrt: Er gibt sich von vornherein mit weniger als dem fairen Anteil zufrieden, setzt aber damit einen starken Anreiz zur Kooperation – und wird fett damit.

Nur – der Gegner wird noch fetter und hat entsprechend auch mehr Kinder. Es scheint, als ob die Großzügigen sich damit auf die Dauer ihr eigenes Grab schaufeln, aber das ist nicht der Fall. In einer Serie von evolutionären Experimenten fanden Stewart und Plotkin, dass die Großzügigen regelmäßig zur dominanten Spezies avancierten – außer in sehr kleinen Teichen, die weniger als zehn Individuen Platz bieten (Bild links oben). Die beiden Wissenschaftler konnten sogar beweisen, dass Großzügigkeit eine »robuste« Strategie ist: Ihre Anhänger setzen sich in den verschiedensten Umwelten durch und wehren sogar Attacken böser Eindring-

linge ab. Offensichtlich zahlt es sich aus, etwas Unfairness in Kauf zu nehmen, weil das die Gelegenheiten zu gedeihlicher Kooperation vermehrt.

Ist das die Moral von der Geschichte? Man hüte sich vor voreiliger Vermenschlichung. Die Spieler sind sehr einfach, mechanistisch und mit Personen nicht zu vergleichen. Gleichwohl kann man es sich kaum verkneifen, ihnen wertende Attribute wie »Erpresser« oder »großzügig« zuzuschreiben. Axelrods Analyse der Strategie Tit for Tat läuft auf die alte Regel »Auge um Auge, Zahn um Zahn« hinaus (aber eben nicht mehr als ein Auge für ein Auge). Die Ergebnisse von Stewart und Plotkin setzen noch ein Prinzip dazu: Gnade vor Recht. ~

DER AUTOR



Brian Hayes ist Verfasser der Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«, aus der dieser Artikel stammt. In seinem Blog <http://bit-player.org> präsentiert er unter anderem ergänzendes Material zu seinen Kolumnen.

QUELLEN

- Adami, C., Hintze, A.:** Evolutionary Instability of Zero-Determinant Strategies Demonstrates that Winning is not Everything. In: Nature Communications 4, 2193, 2012
- Boerlijst, M.C. et al.:** Equal Pay for All Prisoners. In: The American Mathematical Monthly 104, S. 303–305, 1997
- Delahaye, J.-P.:** Le dilemme du prisonnier et l'illusion de l'extorsion. In: Pour la Science 435, S. 78–83, Januar 2014
- Press, W.H., Dyson, F.J.:** Iterated Prisoner's Dilemma Contains Strategies that Dominate Any Evolutionary Opponent. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 109, S. 10409–10413, 2012
- Stewart, A.J., Plotkin, J.B.:** From Extortion to Generosity, the Evolution of Zero-Determinant Strategies in the Prisoner's Dilemma. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 110, S. 15348–15353, 2013

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1313485

© American Scientist

Unser rätselhafter neuer Verwandter

Als der moderne Mensch in Eurasien auftauchte, lebten in Fernost schon seit Langem die Denisovaner. Doch erst jetzt entdeckten Paläogenetiker ihre Spuren.

Von Michael Marshall

Ein winziges Knochenfragment von einem menschlichen Finger war zunächst alles. Das Fossil tauchte 2008 in Südsibirien bei archäologischen Ausgrabungen in einer Höhle hoch im Altai-Gebirge auf. Es musste von jemandem stammen, der dort vor ungefähr 40000 Jahren gelebt hatte. Doch zu welcher Menschenart hatte er gehört? Nach den an diesem Ort gefundenen Artefakten zu urteilen, bewohnten sowohl Neandertaler als auch *Homo sapiens* die Denisovahöhle. Um Klarheit zu gewinnen, gaben die beteiligten Forscher, darunter Michael Shunkov von der Russischen Akademie der Wissenschaften, ein Stück des Fossils den Paläogenetikern um Svante Pääbo am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig zur genetischen Analyse. Diese standen gerade kurz davor, die erste Sequenzierung eines kompletten Neandertalergenoms abzuschließen. Shunkov hoffte, das Leipziger Labor könnte auch aus dem Fingerknöchelchen alte DNA isolieren und seine Vermutung bestätigen, dass dies ein Neandertalerfossil sei.

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

NATURWISSENSCHAFT IM DIENST DER ARCHÄOLOGIE

- | | | |
|--------|---|---------------|
| Teil 1 | ► Antike Farbenspiele
<i>Ina Reiche und Katharina Müller</i> | November 2014 |
| | Dem Eisen auf der Spur
<i>Philippe Dillmann und Roland Schwab</i> | |
| Teil 2 | ► Unser rätselhafter neuer Verwandter
<i>Michael Marshall</i> | Dezember 2014 |
| | Elektroden statt Spaten
<i>Stefan Hecht</i> | |
| Teil 3 | ► Datieren nach dem Magnetfeld
<i>Elisabeth Schnepf</i> | Januar 2015 |



In dieser hoch gelegenen Höhle im Altai-Gebirge – nach einem Einsiedler Denisovahöhle genannt – hielten sich offenkundig Neandertaler und moderne Menschen auf, aber vor 40 000 oder 50 000 Jahren auch Menschen einer erst kürzlich entdeckten anderen Evolutionslinie.



Es kam anders: Das Genom aus Sibirien stammte nicht von einem Neandertaler. Es passte aber auch nicht zum *Homo sapiens*, also zum modernen Menschen. Offensichtlich handelte es sich, zum großen Erstaunen der Forscher, um eine bislang unbekannte Menschenform. Nach den groben Schätzungen war der Fingerknochen zwischen 30 000 und 50 000 Jahre alt, stammte also vielleicht sogar aus der Zeit, als unsere Vorfahren in Südfrankreich in der Grotte Chauvet meisterhafte Wandbilder malten.

Die neue Menschenform wurde nach der Höhle im Altai-Gebirge benannt, in der im 18. Jahrhundert ein Einsiedler namens Denis lebte. Abgesehen vom Genom haben die Wissenschaftler immer noch sehr wenig von den Denisovanern in Händen: außer dem Knochenfragment, das von einem Mädchen stammen dürfte, mittlerweile zwei Backenzähne von verschiedenen Erwachsenen. Doch zusammengenommen liefern die paar Fossilien Anlass genug, unser Bild von der Menschenentwicklung zu überdenken. Denn DNA-Vergleiche lassen vermuten, dass die Denisovaner ein größeres Verbreitungsgebiet hatten als die Neandertaler – und dass sie einem Teil der heutigen Menschheit Gene vermacht haben.

Rätselraten um Herkunft von Artefakten

Die ersten Zeugnisse früher Menschen in der Denisovahöhle – Steinwerkzeuge – entdeckte der russische Paläontologe Nikolai Ovodov in den 1970er Jahren, als er darin nach Spuren von Höhlenbären grub. Mittlerweile haben Archäologen dort einige hundert Artefakte gefunden, die besagen, dass Menschen sich in dieser Höhle mindestens in den letzten 125 000 Jahren zeitweise aufhielten. Menschliche Knochenfossilien gab es zwar kaum. Doch als Shunkovs Team 2008 besagtes Fragment eines Fingerknöchelchens fand, stand damit für die Forscher fest: In der Vorzeit hatten sich an dem Ort nicht nur moderne Menschen, sondern auch Neandertaler aufgehalten.

Genauere Zeitbestimmungen sind allerdings schwierig, denn in der Höhle lebten nicht in der Hauptsache Menschen,

AUF EINEN BLICK

GENOM SUCHT FOSSIL

1 Völlig unerwartet stießen **Paläogenetiker** Ende 2009 auf eine **neue Menschenlinie**, als sie DNA aus einem winzigen Knochenfossil aus dem Altai-Gebirge untersuchten.

2 Diese Menschen lebten vor rund 40 000 Jahren auf dem Gebiet des heutigen **Südsibirien**, scheinen sonst aber in Südostasien verbreitet gewesen zu sein. Mit **Neandertalern** waren sie nah verwandt.

3 Die Denisovamenschen hinterließen bei den **Melanesiern und Australiern** deutliche Spuren ihres Erbguts, bei Festlandasiaten dagegen fast gar nicht.

sondern Hyänen, Höhlenlöwen und Höhlenbären. Und diese Tiere brachten die Schichtung der Ablagerungen durcheinander, weil sie Mulden scharften und Löcher gruben. Speziell Hyänen sind dafür bekannt, dass sie unterirdische Baue anlegen, erläutert der Anthropologe Bence Viola vom Leipziger Max-Planck-Institut, der vor Ort an Ausgrabungen teilnahm. Die Forscher können deswegen nicht mehr exakt nachvollziehen, in welchen Zeiträumen die verschiedenen Menschenformen jeweils in dieser Höhle lebten, ob sich die Besiedlung manchmal überlappte und von wem welches Werkzeug stammt.

In einigen Fällen vermag heute die Paläogenetik zu helfen. Vor allem Pääbo und seine Kollegen entwickeln molekularbiologische Methoden weiter, mit denen sie immer ältere Genome lesen können. DNA verändert und zersetzt sich zwar im Lauf der Zeit, doch geschieht das in bestimmter Weise. Daraus können die Forscher oft die ursprünglichen Sequenzen erschließen. Und weil sich DNA in kalter Umgebung am besten erhält, bot die hoch gelegene Höhle im Altai-Gebirge geradezu ideale Konservierungsbedingungen. Um die neue Menschenform aufzuspüren, genügten 30 Milligramm zermahlener Knochen.

Als Pääbos Gruppe erkannte, dass sie es mit einem bisher unbekanntem Homininen zu tun hatte, tauchte gleich die Frage auf, wohin er im Menschenstammbaum gehört. Bewusst verzichteten die Forscher bisher darauf, gleich von einer neuen Art (Spezies) zu sprechen. Weil sie sich nicht festlegen möchten und können, reden sie von Menschenform. Im Rahmen der Anfang 2010 erschienenen ersten Publikation hatte das Forscherteam zunächst die mitochondriale DNA des Denisovamenschen sequenziert. Die Mitochondrien sind Zellstrukturen mit einem eigenen, relativ kleinen Genom, das nur die Mutter mit der Eizelle vererbt. Nach diesen ersten Analysen sah es so aus, als hätte sich die Linie der Denisovaner von unserer eigenen viel früher abgespalten als die der Neandertaler, nämlich möglicherweise bereits vor einer Million Jahren. Allerdings kann das Erbgut der Mitochondrien wegen der Weitergabe nur über die mütterliche Linie täuschen – so auch in diesem Fall.

Die anschließende Ermittlung der Zellkern-DNA brachte denn auch andere, verlässlichere Verwandtschaftsverhält-

MPT/FLUR.EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE



Dieser kräftige Backenzahn eines Denisovaners – wie auch ein zweiter – lässt annehmen, dass jene archaische Menschenform besonders stark gebaut und wohl recht groß war.

nisse an den Tag. Für eine erste Rohsequenz dieses Erbguts benötigten die Forscher nur wenige Monate, was sie selbst verblüffte. Ein Mitwirkender, David Reich von der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts), erzählt: Beim Neandertalergenom hätten sie alle Blut und Wasser geschwitzt, so schwierig ließ es sich gewinnen und erschließen. Das Denisovanergenom war jedoch in einem viel besseren Zustand, so dass dessen Sequenzierung wesentlich leichter gelang. Wie sich nun mit den neuen Daten zeigte, stellten die Denisovaner eine so genannte Schwestergruppe der Neandertaler dar: Mit ihnen waren sie deutlich näher verwandt als mit dem *Homo sapiens*.

Ein Mensch mit altertümlichem Gebiss?

Derzeit sieht es so aus, als hätten die letzten gemeinsamen Vorfahren aller drei Linien vor etwa 600 000 Jahren gelebt. Eine Linie führte zum modernen Menschen, eine andere verzweigte sich rund 200 000 Jahre später in die Evolutionslinien zum Neandertaler und zum Denisovaner. Letzteres geschah möglicherweise im Nahen Osten: Die Vorfahren der Neandertaler gelangten dann nach Europa, die der Denisovaner nach Asien.

Natürlich suchten die Forscher nach weiteren Fossilien der neuen Menschenform. Dabei stießen sie auf einen bisher unbeachteten hinteren Backenzahn, der in der Denisovahöhle schon im Jahr 2000 gefunden worden war und dessen Erbgut sie ebenfalls bestimmen konnten: Auch dieser Zahn stammte von einem Denisovaner, ist mit fast eineinhalb Zentimetern Breite für einen Menschen aus dieser Zeit allerdings geradezu ein Monstrum. Sehr viel frühere Homininen besaßen recht kräftige, große Zähne, mit denen sie zähe und harte Nahrung wie Gräser zermahlten. Die Menschen vor 50 000 Jahren aßen aber weichere Kost und hatten deutlich kleinere Zähne.

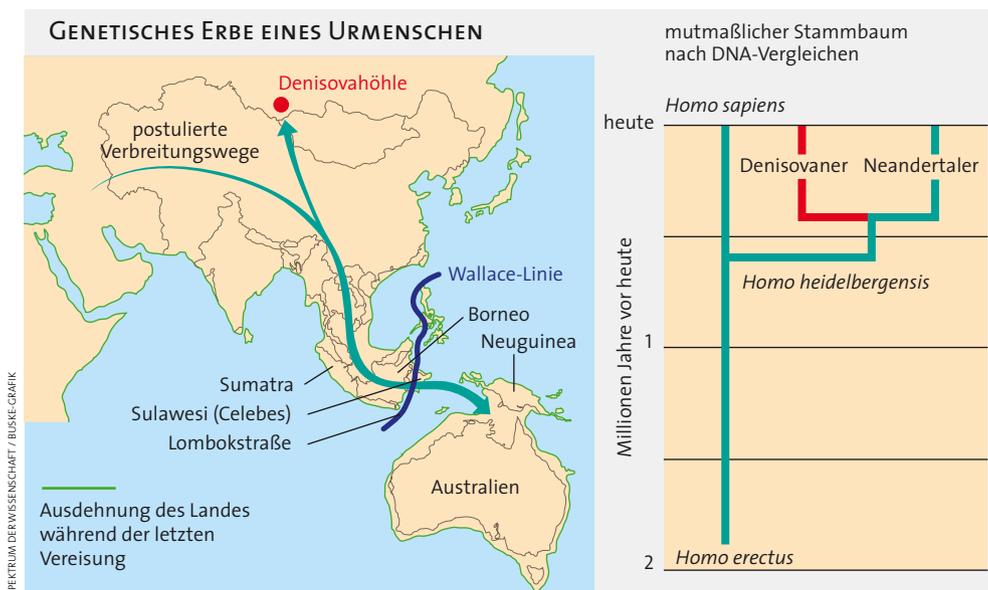
Demgegenüber wirkt der neue Backenzahn sehr altertümlich. Laut Viola könnte dies das bisher größte bekannte

Exemplar der Menschengattung aus den letzten zwei Millionen Jahren darstellen. Nun sind fossile Homininen mit auffallenden Zähnen nicht so ungewöhnlich, und besonders die hintersten Zähne können recht unterschiedlich ausfallen. Gewissheit brachte allerdings ein zweiter kolossaler Backenzahn, den Forscher im August 2010 in der Denisovahöhle fanden. Viola, der damals zugegen war, hielt ihn auf den ersten Blick für einen Bärenzahn. Genetische Untersuchungen wiesen auch ihn als Denisovafossil aus. Und er stammte von einem anderen Individuum.

Demnach, vermutet Viola, besaßen diese Menschen wohl wirklich in der Regel ungewöhnlich große Zähne. Um die Frage zu beantworten, ob sie hauptsächlich faserreiche Pflanzenkost aßen, fehlen aber noch bessere Anhaltspunkte. Nahrungsspuren wie Mikrofossilien oder DNA von Pflanzen konnten die Forscher an den Zähnen nicht finden. Jetzt untersuchen sie die beiden Exemplare auf feinste Verschleißspuren durch Kauen harter Nahrung. Die Ernährungsart würde die Lebensweise dieser Menschen erhellen. Erlegten sie Wild? Gruben sie Wurzeln und Knollen aus? Beherrschten sie das Feuer und erhitzen ihr Essen?

Auch das Genom der Denisovaner hielt weitere Überraschungen bereit. Als die Forscher um Pääbo und Reich die erste Sequenz eines Neandertalergenoms publizierten, war die eigentliche Sensation, dass die heutigen Menschen ein wenig Erbgut vom Neandertaler in sich tragen, im Durchschnitt 1,7 Prozent – mit Ausnahme der Afrikaner. In grauer Vorzeit muss es folglich sexuelle Kontakte zwischen Neandertalern und modernen Menschen gegeben haben.

Hatten sich die Denisovaner ebenfalls derart verewigt? Bei den meisten heutigen Menschen, deren DNA die Forscher daraufhin prüften, entdeckten sie keine Sequenzen des fremden Erbguts. Sie fanden solche Spuren zunächst nicht einmal bei Personen vom asiatischen Festland, deren Vorfahren der Population vom Altai-Gebirge hätten begegnen können. Doch im Rahmen der Neandertalerstudie hatte man



Der Denisovamensch – der gemeinsame Vorfahren mit den Neandertalern hatte – entstand vermutlich im Nahen Osten und war später wohl hauptsächlich in Südostasien verbreitet. In heutigen modernen Bevölkerungen der dortigen Inseln vor allem östlich der so genannten Wallace-Linie und bei den australischen Ureinwohnern finden sich einige genetische Spuren. In Kaltphasen gehörten Sumatra und Borneo zum asiatischen Festland, Neuguinea zur Landmasse Australiens.

auch das Genom einer Person aus Papua-Neuguinea sequenziert. Bei diesem »Glücksgriff«, wie Reich sagt, stießen die Forscher plötzlich auf umfangreiche Übereinstimmungen. Sie untersuchten daraufhin mehr Melanesier und fanden heraus: Durchschnittlich 4,8 Prozent von deren Erbgut stammt vom Denisovamenschen.

Nur – wo mag der sich mit dem *Homo sapiens* gekreuzt haben? Konnte sein Erbgut tausende Kilometer weit von Sibirien bis zur asiatischen Inselwelt gelangen, ohne auf dem Festland Spuren zu hinterlassen? Einfacher, allerdings auch spektakulärer, wäre folgendes Szenario: Die Denisovaner besiedelten früher ein riesiges Gebiet, das sich über weite Teile Asiens erstreckte und bis zu den heutigen großen Inseln im Südosten reichte. Ihre Verbreitung wäre dann weiträumiger gewesen als die der Neandertaler. Denkbar wäre allerdings auch, dass die Denisovaner moderne Menschen irgendwo auf dem asiatischen Festland trafen und dass deren gemeinsame Nachfahren nach Melanesien gelangten – oder zumindest nur dort überlebten. In dem Fall mag ihr Lebensraum wesentlich kleiner gewesen sein.

Wo kreuzten sich die Menschenformen?

Diese Möglichkeiten haben Reich und Mark Stoneking vom Leipziger Institut genauer geprüft. Sie sequenzierten Genome von indigenen Menschen sowohl vom asiatischen Festland als auch von den Philippinen, von Polynesien, Australien und Papua-Neuguinea. Ihre Überlegung lautete: Hätte die Begegnung bereits auf dem jetzigen Festland stattgefunden, also vor der Besiedlung der heutigen Inseln, dann müssten überall in Melanesien genetische Spuren von Denisovanern vorkommen. Im anderen Fall, wenn sich moderne Menschen und Denisovaner erst auf den Inseln gekreuzt hätten, wäre das Muster unter Umständen uneinheitlich. Vor allem könnte es heute auch Populationen ohne Denisovaner-DNA geben. Und genau dies stellten die Paläogenetiker fest. Laut Reich bildeten die Bevölkerungen im Gebiet jener Inseln daher vor 45 000 Jahren ein Mosaik; es gab damals Gruppen mit und ohne Denisovanererbe. Das macht einen Kontakt bereits auf dem Festland unwahrscheinlich.

Wie auch immer – die Denisovamenschen beziehungsweise ihre direkten Vorfahren scheinen überaus erfolgreiche Kolonisten gewesen zu sein. Nach der Abtrennung von der Neandertalerlinie dürften sie vom Nahen Osten aus sowohl

nach Sibirien als auch nach Indonesien und weiter nach Melanesien gelangt sein. Dort im Südosten scheinen sie die »Wallace-Linie« gequert zu haben, jene nach dem Mitentdecker der biologischen Evolution Alfred Russel Wallace (1823–1913) benannte tiergeografische Grenzlinie, jenseits derer die australische Tierwelt mit den Beuteltieren beginnt. Zu dieser Grenze gehört die Lombokstraße, eine tiefe Meerenge mit reißender Strömung, die auch in Kaltzeiten nicht trockenfiel.

Trotzdem müssen die Denisovaner nicht unbedingt tüchtige Seefahrer gewesen sein, die zum Beispiel hochseetaugliche Einbaumkanus zu bauen verstanden. Der Paläoanthropologe Chris Stringer vom Natural History Museum in London spekuliert, dass sie die Wasserstraße bei Naturkatastrophen unabsichtlich überquerten, was im Lauf vieler Jahrtausende wiederholt geschehen sein könnte. Nach dem verheerenden Tsunami vom 26. Dezember 2004, der die Küsten rund um den Indischen Ozean heimsuchte, fand man noch eine Woche später Überlebende, die auf Flößen aus Pflanzenmaterial 150 Kilometer weit getrieben waren.

Generell war Südostasien in der letzten Eiszeit, in der Phase von vor etwa 110 000 bis vor 12 000 Jahren, für Menschen ein günstiger Lebensraum. Damals herrschte hier nicht dichter Wald vor, sondern eine offene Graslandschaft, und das Klima war kühler und trockener. Weil das Eis der Pole riesige Mengen Wasser band, lag der Meeresspiegel Dutzende Meter tiefer als heute. Die Inseln Sumatra und Borneo gehörten zum asiatischen Festland, Neuguinea zu Australien. Stringer glaubt, dass Jäger und Sammler vor allem an den Küsten ideale Bedingungen vorfanden. Seiner Ansicht nach könnte somit Südostasien die eigentliche Heimat der Denisovamenschen gewesen sein. Zeitweise, wenn die Umweltverhältnisse dies erlaubten, verbreiteten sie sich von dort aus nach Norden und manchmal sogar bis nach Südsibirien. Sobald die Lebensbedingungen wieder schlechter wurden, zogen sie sich aber wieder zurück oder lokale Populationen starben aus.

Das könnte erklären, wieso die Denisovahöhle nur so spärliche Überreste dieser Menschen aufweist: Vielleicht lag sie an der äußersten Grenze ihres Verbreitungsgebiets. Hierzu würden gewisse Unterschiede alten Ursprungs in den besagten DNA-Abschnitten zwischen Melanesiern und den Denisovanern vom Altai-Gebirge passen. In den Küstengebieten und in Sibirien scheinen demnach verschiedene Populationen gelebt zu haben, wobei allerdings ihre Zugehörigkeit zur gleichen Menschenform genetisch eindeutig ist. Eine 2012 publizierte genauere Version des Denisovanergenoms ergab zudem Genvarianten, die mit dunkler Haut, braunen Haaren und braunen Augen einhergehen – was auf heutige Melanesier zutrifft. Womöglich spiegelt sich darin jenes Erbe.

Falls also der Hauptlebensraum der Denisovaner tatsächlich in Südostasien lag, sollte man vor allem dort nach ihren Fossilien suchen. Womöglich liegen manche sogar unerkannt in Schubladen von Museen, denn viele früher in der Region gefundene menschliche Knochen wurden nie gründ-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser
Online-Dossier
zum Thema
»Evolution –
Die Entstehung der Arten«
finden Sie unter



www.spektrum.de/evolution



FOTOLIA / HL PHOTO



Ein winziges Stück vom Fingerknochen eines Kindes, zusammen mit zwei auffallend großen Backenzähnen, brachte Paläogenetiker auf die Spur des Denisovamenschen.

lich untersucht. Erbgutanalysen werden allerdings schwierig sein, weil DNA in einem heißen, feuchten Klima sehr rasch zerfällt. Dennoch baut Pääbo nun in Peking ein Labor auf, wo Forscher versuchen werden, DNA aus asiatischen Fossilien zu gewinnen. Viola setzt ebenfalls große Hoffnungen auf China, schaut sich aber gleichzeitig auch in kühleren Gegenden wie Usbekistan und Kirgisien um.

Bislang wurden die Forscher dort nirgends fündig. Aber sie wissen auch gar nicht so recht, wonach sie suchen sollen: Denn noch weiß niemand, wie die Denisovaner aussahen. Ihre Gene könnten theoretisch zwar erste Anhaltspunkte liefern, doch selbst die Körpergröße wird von hunderten Erbfaktoren bestimmt. Immerhin kam Ende 2013 ein Einblick aus einer unerwarteten Ecke: Pääbos Team war es gelungen, mitochondriale DNA eines 400000 Jahre alten Homininen aus Nordspanien zu lesen, eines mutmaßlichen *Homo heidelbergensis*. Überraschenderweise zeigte sich hierbei nicht nur die erwartete Verwandtschaft mit dem Neandertaler, sondern auch eine verblüffend nahe Beziehung zum Denisovamenschen. Womöglich war somit der *H. heidelbergensis* Vorfahre von beiden späteren Menschenlinien.

Unerwartete Verbindung zu Spanien

Die »Knochenhöhle« in Spanien barg über zwei Dutzend Individuen derselben Population. Offensichtlich waren jene Frühmenschen groß und robust gebaut; manche mögen um die 100 Kilogramm gewogen haben. Ähnlich kräftig stellt sich Viola die Denisovaner vor.

In dem langen Zeitraum bis zu ihrem Aussterben könnte sich ihre Statur allerdings verändert haben, vielleicht sogar auch durch Kreuzungen mit dem *Homo sapiens*. Als wären die Verhältnisse nicht schon kompliziert genug: Genomvergleiche ergaben, dass die Denisovaner sexuelle Kontakte mit Neandertalern hatten, und zwar lange nachdem sich beide Evolutionslinien getrennt hatten. So enthielt der Zehenknochen eines Neandertalers aus der Denisovahöhle Denisovaner-DNA. Umgekehrt stammt mindestens ein halbes Prozent des Erbguts des sibirischen Denisovamenschen vom Neandertaler; ein weiterer kleiner Anteil seines Genoms geht

offenbar auf die Begegnung mit einer anderen, wohl sehr alten Menschengruppe zurück. Vielleicht waren das letzte Vertreter von *H. heidelbergensis*, vielleicht auch Angehörige des asiatischen *H. erectus*.

Weitere aufschlussreiche Befunde sind zu erwarten, darunter Erkenntnisse zu unserem eigenen genetischen Erbe. Von den Neandertalern haben wir anscheinend Gene für die Haut- und Haarfarbe übernommen; andere erhöhen bestimmte Krankheitsrisiken, etwa für Altersdiabetes. Reichs Team sequenziert jetzt noch mehr Genome von Melanesiern, um herauszufinden, welche ihrer Gene von Denisovanern stammen. Dabei interessiert neben deren heutiger Funktion auch, wie die alte Menschenform an ihre asiatische Umwelt angepasst war – einschließlich Krankheitsresistenzen. Laut einer internationalen Studie von 2014 sieht es so aus, als hätten die Tibeter von ihr ein Blutgen übernommen, welches das Leben in großer Höhe erleichtert.

Über das geistige Niveau der Denisovaner wissen die Forscher bisher nichts: ob sie von eher schlichtem Verstand waren und darin ihren *H.-heidelbergensis*-Vorfahren glichen oder mehr den fortschrittlicheren Neandertalern und den frühen modernen Menschen. Das Pääbo-Team fand beim *Homo sapiens* 96 nur bei ihm vorhandene funktionelle Mutationen – die sich also auf Proteine auswirken. Die Bedeutung der meisten davon ist unbekannt. Jedoch beteiligen sich drei an der Regulation von Zellteilungen im Gehirn, könnten somit zu unserer Hirnleistung beitragen.

Den Denisovamenschen nennt Reich ein Genom auf der Suche nach seinem Fossil. Ein Schädel Fund, an dem sich die Gehirngröße ablesen ließe, steht ganz oben auf der Wunschliste. Doch noch gibt es nicht einmal andere Skeletteile. ~

DER AUTOR



Michael Marshall arbeitet in der Umweltredaktion der englischen Zeitschrift »New Scientist«.

QUELLEN

- Krause, J. et al.:** The Complete Mitochondrial DNA Genome of an Unknown Hominin from Southern Siberia. In: Nature 464, S. 894–897, 2010
- Meyer, M. et al.:** A High-Coverage Genome from an Archaic Denisovan Individual. In: Science 338, S. 222–226, 2012
- Reich, D. et al.:** Genetic History of an Archaic Hominin Group from Denisova Cave in Siberia. In: Nature 468, S. 1053–1060, 2010
- Reich, D. et al.:** Denisova Admixture and the First Modern Human Dispersals into Southeast Asia and Oceania. In: The American Journal of Human Genetics 89, S. 516–528, 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314687

© New Scientist
www.newscientist.com

Elektroden statt Spaten

Messungen des elektrischen Widerstands in den oberen Bodenschichten helfen, verschüttete Mauern, Gänge oder Grabstrukturen sichtbar zu machen – bevor Archäologen den Spaten ansetzen.

Von Stefan Hecht

Ramat Rahel liegt auf einer Anhöhe im Südwesten Jerusalems, auf halbem Weg nach Bethlehem. Im 7. Jahrhundert v. Chr. residierte dort König Hezekiah. Lässt man den Blick von den Ruinen der Palastanlage schweifen, wird auch heute noch deren strategische Bedeutung deutlich: Von der erhöhten Warte aus war die Handelsroute zu kontrollieren, die den Süden des Landes mit Jerusalem und der Küstenebene verband. Andererseits gab und gibt es dort oben keine Quellen; die nächsten befinden sich am Hangfuß und damit außerhalb der befestigten Siedlung. Um sich mit Trinkwasser zu versorgen, so vermuten die Grabungsleiter Oded Lipschits von der Universität Tel Aviv und Manfred Oeming von der Universität Heidelberg, ließ der Herrscher eine Zisterne anlegen, also ein unterirdisches Reservoir, um die Regenfälle der Wintermonate zu speichern.

Statt ihre These ausschließlich mittels Probebohrungen und Sondagegräben zu überprüfen, nahmen die Archäologen auch Geografen der Universität Heidelberg mit ins Boot. Gefördert von der Manfred Lautenschläger-Stiftung spürten diese tatsächlich größere Hohlräume unter dem Palast auf. Gezielte Grabungen brachten dann die gesuchte Zisterne zum Vorschein.

Dabei setzten sie die geoelektrische Prospektion ein, die ähnlich der Geomagnetik Besonderheiten der physikalischen Verhältnisse in den Bodenschichten entdeckt. Solche Anomalien liefern wertvolle Hinweise auf verborgene archäologische Strukturen. Denn Grabungen sind nicht nur sehr aufwändig, sie zerstören zwangsläufig auch die Fundsituation. So sorgsam Archäologen diese auch dokumentieren mögen – jedes Entfernen von Material, und sei es mit dem Spatel, ist endgültig. Umso wichtiger ist es für den grabenden Archäologen daher, gezielt vorzugehen.

Bei der Entwicklung der geoelektrischen Verfahren Anfang des 20. Jahrhunderts standen allerdings ganz andere Fragen im Vordergrund: Pioniere wie die französischen Ingenieure Conrad und Marcel Schlumberger suchten nach Möglichkeiten, Erdölvorkommen aufzufinden. Heute führen ihre Nachfolger eines der größten Explorationsunternehmen der Welt. Zeitgleich zu ihnen entwickelte der US-Amerikaner Frank Wenner vom National Bureau of Standards and Technology ebenfalls eine Methode zur Messung des Bodenwiderstands. Einer der ersten, der diese Methode bei einer ar-

AUF EINEN BLICK

SUCHE NACH DER ANOMALIE

1 **Geophysikalische Verfahren** machen die unter der Erdoberfläche verborgenen Überreste von Siedlungen, Gräbern und Tempeln sichtbar. Ein Beispiel dafür ist die **Geoelektrik**.

2 Sie misst dazu den Widerstand der Bodenschichten mit verschiedenen Elektrodenanordnungen. **Archäologische Strukturen** zeichnen sich durch Anomalien ab, also vom Durchschnitt deutlich verschiedene Werte.

3 Anhand der **Messbilder** können Archäologen gezielter graben. Außerdem verraten die Widerstandswerte viel über die Bodenbeschaffenheit. Das wiederum gibt mitunter Informationen über die Klimaentwicklung in einer Region.

Vor der Kulisse der »Flammenden Berge« im Nordwesten Chinas erblühte im 2. Jahrhundert v. Chr. die Metropole Gaochang an der Seidenstraße. Heute sind davon nur noch Ruinen erhalten, doch unter der Erdoberfläche stoßen Archäologen auf aufschlussreiche Gebäudereste und Gräber. Die Geoelektrik soll ihre Suche optimieren. Dabei werden oft 100 Elektroden im Abstand von einem Meter verwendet.



chäologischen Stätte einsetzte, war der Brite Richard J.C. Atkinson. Im englischen Dorchester bestimmte er 1946 damit die Strukturen einer neolithischen Kreisgrabenanlage, Grabungen bestätigten den Befund.

Damals wurden bereits die so genannten Vierpunktverfahren eingesetzt: Zwei Metallspieße in der Erde speisen einen definierten Strom ein, zwei weitere dienen als Messelektroden für das elektrische Potenzial, das sich infolge des Ladungsflusses einstellt. Nach dem ohmschen Gesetz entspricht das Verhältnis von gemessener Spannung und Strom dem Widerstandswert des Bodens. Versetzt man nun zwei oder alle vier Elektroden Stück für Stück entlang einer Linie

nach außen, wächst der Messbereich sukzessive in die Tiefe. Bestände der Boden aus parallelen, horizontalen und in sich homogenen Schichten, ergäben die Berechnungen eindeutige Widerstandswerte entlang einer vertikalen Linie. Die tatsächlichen geologischen Verhältnisse sehen anders aus, was Mehrdeutigkeiten beziehungsweise mehrere mögliche 1-D-Tiefenmodelle zur Folge hat. Hier liefern Bohrungen die notwendigen Zusatzinformationen, um nicht zutreffende Varianten auszuschließen.

Man kann auch die Elektrodenabstände konstant lassen und die gesamte Anordnung in der Fläche versetzen. Wird dabei ein festes Raster eingehalten, ergibt sich eine Karte der



STEFAN HECHT

obersten Bodenschichten. Multielektrodenapparaturen aus mitunter 100 Metallspießen und oft mehreren tausend Einzelmessungen liefern schließlich sogar ein räumliches Bild der Widerstandsverteilung; man spricht dann von geoelektrischer Tomografie. Diese Vorgehensweise schließt Mehrdeutigkeiten schon im Ansatz aus.

Erwarten die Archäologen kleinräumige Strukturen wie Mauerreste oder Gräben in bestimmten Bereichen, kann man die Empfindlichkeit der Messung über die Anordnung der Strom führenden und potenzialmessenden Elektrodenpaare steuern. Bei der Messung einer geoelektrischen Tomografie mit 100 Elektroden beispielsweise können die vier Elektroden immer als zwei Dipole angeordnet werden, die mit wachsendem Abstand entlang der Untersuchungsfläche verschaltet werden. Dabei wird aus über 3000 Einzelmessungen die räumliche Verteilung der spezifischen Widerstandswerte im Untergrund ermittelt.

Um die Daten zu deuten, müssen die geologischen Verhältnisse einbezogen werden. Deutlich zeigt sich dies bei Kalkgestein, das sehr dicht und kompakt, bei starker Verkarstung aber auch zerklüftet sein kann. Im ersten Fall fallen die Widerstandswerte geringer aus als im zweiten. Neben Porosität, Klüftigkeit, der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung spielt auch der Wassergehalt im untersuchten Bereich eine große Rolle. Feinkörnige Sedimente etwa können Feuchtigkeit in ihren kleinen Zwischenräumen gut halten, während Wasser durch grobkörnigen Schotter hindurch rasch versickert. Mauerreste, die im Lauf der Zeit von Schlamm bedeckt wurden, zeichnen sich daher auf Grund vergleichsweise hoher Widerstandswerte von ihrem Umfeld ab. Gleiches gilt beispielsweise auch für ein Grab, denn der einstige Hohlraum wurde durch Erde und Sedimente aufge-

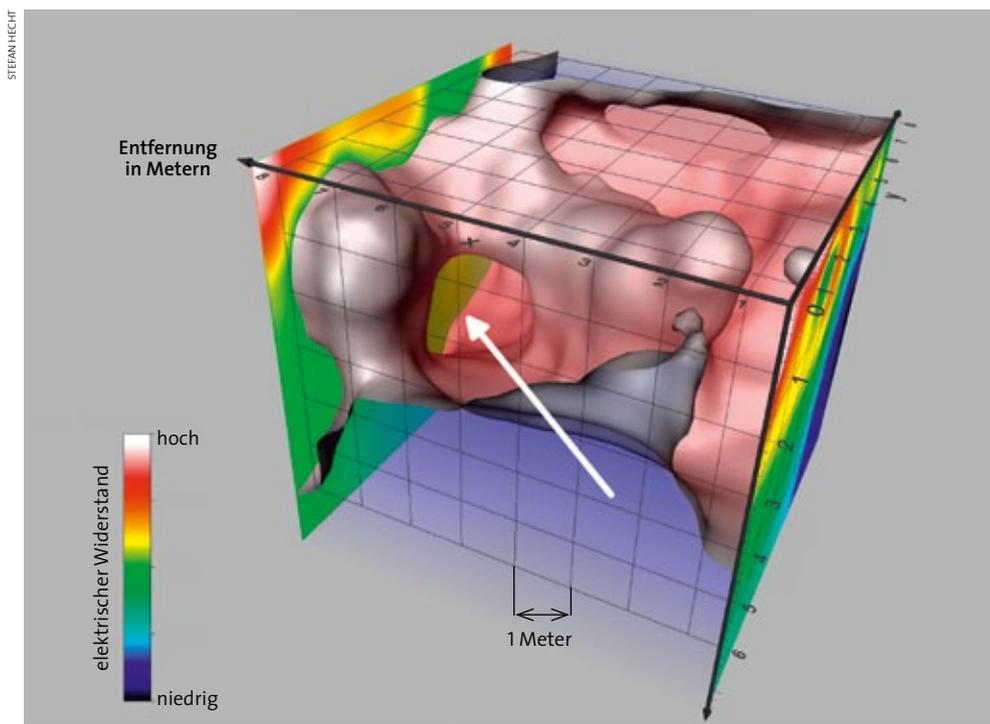
füllt. Dieses Material ist in seiner Struktur lockerer als das umgebende Erdreich. Je verschiedener die Widerstandswerte, desto deutlicher lassen sich Untergrundstrukturen in den Messwerten erkennen.

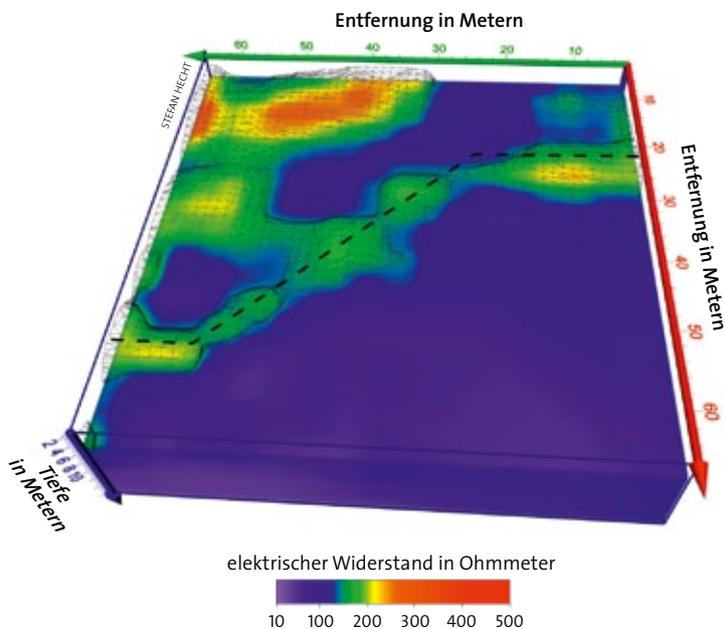
Das Potenzial dieser Methode illustrieren aktuelle Beispiele aus der autonomen uigurischen Provinz Xinjiang in Nordwestchina. In der Region um die Oasenstadt Turfan waren die Ruinenstädte Jiaohe und Gaochang zwischen dem 2. Jahrhundert v. Chr. und dem 5. Jahrhundert n. Chr. geschäftige Handels- und Verwaltungszentren an der Seidenstraße. Mit der Herrschaft der Mongolen im 14. Jahrhundert verloren sie an Bedeutung und wurden aufgegeben; Baureste und Gräber erinnern heute noch an die einstige Pracht.

Metropolen der Seidenstraße

Zwischen 1902 und 1914 unternahmen die Archäologen Albert Grünwedel und Albert von Le Coq Expeditionen in die Oase. In der Folge rief die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften einen Forschungsschwerpunkt Turfan ins Leben, der sich vor allem mit den dort gefundenen Handschriften beschäftigt. Seit 2008 kooperiert die Academia Turfanica mit der Chinesischen Akademie der Wissenschaften und dem Geographischen Institut der Universität Heidelberg, um die historische Forschung zur Seidenstraße in der Provinz Xinjiang voranzubringen. Im Sommer 2014 erhob die UNESCO die Seidenstraße inklusive der genannten archäologischen Stätten zum Weltkulturerbe.

Schon Grünwedel fiel die besondere Lage von Gaochang am Fuß der Flammenden Berge auf (siehe Bild S. 74). Auch heute beeindruckt die Überreste der fast 500 Hektar großen Handelsmetropole vor der Kulisse aus rötlichem Sandstein. Geoelektrische Messungen wurden dort 2008 und 2009 im





Auf dem Gebiet des antiken Olympia enthüllte die Geoelektrik den unterirdischen Verlauf einer Mauer, die Forscher als Hochwasserschutzmauer deuten (gestrichelte Linie). Die niedrigen Werte des elektrischen Widerstands für die feinkörnigen Hochflutsedimente (blau) wurden für die Grafik in den obersten Metern ausgeblendet, um die Mauerstruktur als Anomalie höherer Werte sichtbar zu machen. Vergleichbare Werte im oberen Bildabschnitt stammen vermutlich von grobkörnigem Kies.

überdeckt haben. Geoelektrische Messungen zeigten nun, dass eine zweite, vermutlich jüngere Mauer existiert, deren Verlauf mehrfach die Richtung wechselt. Hier hat die Naturwissenschaft einen Befund geliefert, der den Forschern des Deutschen Archäologischen Instituts ein Rätsel aufgibt.

Auch das verborgene archäologische Strukturen umgebende oder ausfüllende Material kann interessant sein. Denn die Messungen verraten beispielsweise, ob es sich dabei um Ablagerungen handelt, wie sie nur Regenfälle oder Fließgewässer hervorbringen, oder im Gegenteil um Staubschichten, wie es nur in trockenen Gebieten der Fall ist. In Gaochang und Jiaohe ist es Schwemmlöss, der auch als Baumaterial Verwendung fand. Das Sediment ist ein Archiv der Klimaänderung: Während der Zeit der Lössbildung im Hinterland gab es genügend Wasser für eine Graslandschaft. Doch als es immer trockener wurde, ging die schützende Bodenvegetation verloren, und das feinkörnige Material wurde bei gelegentlichen starken Regenfällen ins Vorland gespült. So ermöglicht die geoelektrische Tomografie nicht nur das Wiederfinden verschütteter Strukturen, sondern leistet auch einen wichtigen Beitrag zur Rekonstruktion vergangener Klima- und Umweltbedingungen. ~

Bereich des ehemaligen Königspalasts unternommen, um noch unbekannte unterirdische Räume auszumachen. In den dort typischen extrem heißen Sommern wie in den bitterkalten Wintern boten sie den Bewohnern Vorteile.

Tatsächlich ließ sich anhand der Schuttfüllung ein Verbindungsgang gut nachweisen, denn das umgebende Erdreich besteht aus feinem Schwemmlöss (siehe Bild links). Die geoelektrische Prospektion diente zudem der Kartierung und Dokumentation der noch erhaltenen unterirdischen Bausubstanz, deren Zerfall zweifellos voranschreitet.

Die zweite Ruinenstadt Jiaohe thront auf einem spitz zulaufenden Sporn, der beiderseits von Flüssen begrenzt wird. Nördlich der ehemaligen Siedlung befindet sich die Nekropole Goubei, wo die Angehörigen der damaligen Oberschicht bestattet wurden. Einige Grabhügel sind bereits archäologisch untersucht. Daher wissen die Forscher, dass sie aus einem zentralen Schacht bestehen, von dem aus in vier bis sechs Meter Tiefe seitliche Kammern abgehen.

Ein Elektrodenraster über einem der größten, noch unerforschten Hügel lieferte jüngst eine 3-D-Widerstandsverteilung, in der sich der Zugangsschacht sowie eine Grabkammer abzeichnen. Deren klare Konturen versprechen, dass die Anlage noch gut erhalten ist – und nicht ausgeraubt wurde. Die Archäologen der Academia Turfanica hoffen nun auf neue Einsichten in das Jushi-Königreich, das bis zum 5. Jahrhundert n. Chr. bestand und Einflüsse aus Zentralchina, der im Norden angrenzenden Steppen sowie der südlichen Ausläufer des Tien-Shan-Gebirges zu verschmelzen wusste.

Mitunter geben die geophysikalischen Methoden aber auch Rätsel auf. Im Gelände des antiken Olympia etwa erstreckt sich zwischen den heiligen Sportstätten und dem Fluss Kladeos eine bislang undatierte Mauer, die Archäologen als vorgeschichtlichen Hochwasserschutz interpretieren. Das Bauwerk ist nur noch an wenigen Stellen erkennbar, da Überschwemmungen es mehr und mehr mit Sedimenten

DER AUTOR



Der Geograf **Stefan Hecht** ist Akademischer Oberrat am Geographischen Institut der Universität Heidelberg. Der Einsatz geophysikalischer Methoden in der Archäologie bildet einen seiner Forschungsschwerpunkte.

QUELLEN

- Hecht, S.:** Sedimenttomographie für die Archäologie – Geoelektrische und refraktionsseismische Erkundungen für on-site und off-site studies. In: Wagner, G. A. (Hg.): Einführung in die Archäometrie. Springer, Heidelberg, Berlin, New York 2007, S. 95–112
- Hecht, S. et al.:** Erkundung der Kladeos-Mauer mit Hilfe geoelektrischer Tomographien (2D/3D). In: Kyrieleis, H. (Hg.): Deutsches Archäologisches Institut. XIII. Bericht über die Ausgrabungen in Olympia, 2000 bis 2005. Ernst Wasmuth, Tübingen, Berlin 2013, S. 403–414
- Lipshits, O. et al.:** Palace and Village, Paradise and Oblivion: Unraveling the Riddles of Ramat Rahel. Near Eastern Archaeology, Bd. 74, Nr. 1, S. 1–49, März 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314688

Die Große Grüne Mauer

Das Projekt ist kühn: einen Vegetationsstreifen am Rand der Sahara zu pflanzen, der sich durch den gesamten afrikanischen Kontinent zieht. Er soll die Ausbreitung der Wüste nach Süden aufhalten.

Von René Bally und Robin Duponnois

Zehn Millionen Hektar Ackerland verwandeln sich weltweit pro Jahr in öde Wüstenareale. Eine drastische Verarmung der Böden, meist als Folge übermäßiger landwirtschaftlicher Nutzung, veranlasst immer mehr Bauern dazu, ihre Anbauflächen aufzugeben. Wind und Erosion machen die Böden dann endgültig unfruchtbar, indem sie die lockere Krume abtragen.

Diese Desertifikation bedroht weite Teile Afrikas, Südamerikas und Asiens. In reichen Ländern wie Australien tritt sie zwar ebenfalls auf. Doch hier haben die Farmer die Möglichkeit, das Vordringen der Wüste aufzuhalten – etwa durch gezielte Bewässerung. Rund 70 Prozent der trockenen und halbtrockenen Böden weltweit sind gefährdet; das entspricht 41 Prozent der irdischen Landflächen. 480 Millionen Menschen leben unter der Drohung, ihr Land verlassen oder sich einen anderen Lebensunterhalt suchen zu müssen.

Afrika ist besonders stark betroffen. Nach Schätzungen von Experten sind dort in den letzten 50 Jahren schon rund 650 000 Quadratkilometer fruchtbare Erde verloren gegangen – eine Fläche so groß wie Frankreich. Im vergangenen Jahrhundert ist die Sahara stellenweise um 250 Kilometer nach Süden vorgerückt. Der Kampf gegen die Desertifikation hat deshalb inzwischen oberste Priorität nicht nur für die Gemeinschaft der Sahel-Sahara-Staaten, sondern auch für die Afrikanische Union, die ihm in dem Programm »New

Partnership for Africa's Development« (NEPAD) einen zentralen Platz einräumt.

Leider ist es mit den bisherigen Maßnahmen nicht gelungen, den Trend aufzuhalten. Deshalb bedarf es einer grundlegend neuen Strategie. Im Zusammenhang damit hat die Afrikanische Union 2005 das Projekt »Afrikas Grüne Mauer im Sahel« beschlossen. Ein etwa 15 Kilometer breiter pflanzlicher Schutzwall soll den gesamten Kontinent durchziehen und den Vormarsch der Sahara nach Süden stoppen. Er würde den Senegal mit Äthiopien verbinden, elf Länder durchqueren und hätte eine Gesamtlänge von 7000 Kilometern (siehe Bild rechts). Vorgesehen ist das großräumige Anpflanzen von Bäumen, so dass eine Art Waldgürtel entsteht, stellenweise aufgelockert durch landwirtschaftliche Anbauflächen.

Jahrzehnte fruchtloser Anstrengungen

Schon seit Jahrzehnten bemühen sich die meisten Länder der Sahelzone, die Lebensbedingungen der Bauern zu verbessern, die Ernährung der Bevölkerung zu sichern, den Energiebedarf durch die Erzeugung von Brennholz zu decken und bei alledem die Artenvielfalt zu bewahren. Auf der Agenda standen neben der Diversifikation der Landwirtschaft und dem Anlegen von Bassins für Regenwasser auch Maßnahmen gegen die Desertifikation und den Abtrag fruchtbarer Böden. Zum Beispiel wurden auf Hängen kleine halbmondförmige Erdmauerchen errichtet, welche die Erde zurückhalten und gleichzeitig Wasserreservoir bilden. Zudem verhindern sie das Ausschwemmen von tierischen Exkrementen und anderem wertvollem Dünger.

Auch gab es Anreize zum Einsatz traditioneller landwirtschaftlicher Praktiken wie dem Mulchen – dem Bedecken des Bodens mit pflanzlichen Abfällen – oder der Zaï-Methode. Dabei überzieht man das Feld mit zahllosen etwa einen Meter breiten, flachen Becken und bringt darin die Samen aus (Bild S. 82). In den Vertiefungen sammeln sich Regenwasser und organischer Dünger, so dass die Pflanzen gut gedeihen. Das steigert nicht nur die Erträge, sondern verbessert auch ausgelaugte Böden, so dass sie wieder lockerer und durchlässiger werden. Da die Methode sehr arbeitsintensiv ist, lohnt sie sich freilich nur in Gebieten mit sehr geringen Niederschlägen von weniger als 300 Millilitern im Jahr.

AUF EINEN BLICK

DIE DESERTIFIKATION STOPPEN

- 1 Die **Ausbreitung der Sahara nach Süden** droht bis zu mehrere hundert Millionen Menschen ihrer Lebensgrundlage zu berauben.
- 2 Die **Große Grüne Mauer** soll die fortschreitende **Desertifikation** stoppen. Geplant ist ein Streifen aus Wald und landwirtschaftlich genutzten Flächen, der sich quer über den gesamten Kontinent zieht.
- 3 Bisher hat nur der **Senegal** mit dem Projekt begonnen, doch **Mali** und **Burkina Faso** wollen demnächst einsteigen.
- 4 Das Vorhaben umfasst auch die Suche nach Möglichkeiten, die **Produktivität der Agrarsysteme** zu steigern und der Aufgabe landwirtschaftlicher Flächen entgegenzuwirken.

Trotz der Förderung haben diese Praktiken bisher allerdings kaum Verbreitung gefunden. Hauptgrund ist der Mangel an organischen Überresten, da pflanzliche Abfälle in sehr trockenen Gebieten meist als Viehfutter dienen.

Insgesamt brachten die verschiedenen Initiativen deshalb nicht die erhofften Erfolge. Viele Faktoren, vor allem knappe Finanzmittel, behindern die Entwicklung der meisten Länder in der Sahelzone. Weniger kostspielige neue Projekte sollen deshalb nun die Wende bringen. Besondere Hoffnungen ruhen dabei auf der Großen Grünen Mauer. Die erste Präsentation fand am 1. und 2. Juni 2005 in Ouagadougou, der Haupt-

stadt von Burkina Faso, anlässlich des siebten Gipfeltreffens der Staatsechefs der Gemeinschaft der Sahel-Sahara-Staaten statt. Zwei Jahre später billigte die Afrikanische Union das Vorhaben. Zunächst war ein schlichter, 15 Kilometer breiter Waldgürtel vorgesehen, der den Kontinent durchziehen sollte. Dies stieß jedoch auf Skepsis, weil bereits negative Erfahrungen mit solchen Maßnahmen vorlagen.

So wurde in den 1970er Jahren in Algerien damit begonnen, einen »Grünen Damm« zu errichten: Ein 20 bis 30 Kilometer breiter Waldstreifen von der östlichen bis zur westlichen Landesgrenze sollte die Ausdehnung der Wüste nach





In dieser Akazien-Baumschule in der Region von Tessékéré im Norden Senegals werden die Keimlinge vor dem Einpflanzen in freier Natur (Foto rechts) vier Monate lang in Töpfen gezogen.



Norden stoppen. Prozessionsspinnerraupe zerstörten jedoch die ersten Pflanzungen, die ausschließlich aus Aleppo-Kiefern bestanden. Anscheinend hatte niemand bedacht, dass Monokulturen besonders anfällig für den Befall durch Schädlinge und Krankheitserreger sind. Weitere Probleme kamen hinzu. So fraßen Herden von Weidetieren beim Durchqueren der Pflanzungen die jungen Triebe ab. Bis jetzt wurden daher nur 160 000 Hektar aufgeforstet, gerade einmal fünf Prozent der ursprünglich angestrebten Fläche von mehr als drei Millionen Hektar. Trotzdem läuft das Projekt weiter – nun mit einem Mix unterschiedlicher Baumarten.

Eine ähnliche Anstrengung unternimmt China. Dort soll eine Große Grüne Mauer die Wüste Gobi einfrieden, um sie am Vorrücken zu hindern und die angrenzenden Städte vor Sandstürmen zu schützen. Auch hier pflanzte man ursprünglich nur einen Baumtyp – schnell wachsenden Eukalyptus – und setzt nun auf ein breiteres Artenspektrum. Die geschätzten Kosten des 1978 gestarteten Projekts liegen bei rund einer Milliarde Euro. Bis zu seinem Abschluss werden noch mehrere Jahrzehnte vergehen. Aber die bisher fertig gestellten rund 18 Prozent des Gürtels bilden schon jetzt den größten künstlich angepflanzten Wald der Welt.

Ein umfassender Entwicklungsplan

Angesichts dieser Erfahrungen begnügt sich das Projekt der Großen Grünen Mauer nicht mehr mit dem bloßen Anlegen eines Waldstreifens. In dem ausgeklügelten Entwicklungsplan ist vielmehr ein vielfältiger Pflanzengürtel vorgesehen, der außer Bäumen auch landwirtschaftliche Anbauflächen enthält. Angepflanzt werden sollen vor allem Arten, die einen ökonomischen Nutzen haben und an die Trockenheit angepasst sind. Zum Plan gehört ferner, Wassersammelbecken zu bauen, weitere Erwerbszweige wie Kunsthandwerk und Holzschnitzerei zu etablieren und den örtlichen Verwaltungsapparat sowie das Angebot an Dienstleistungen zu verbessern.

Die Große Grüne Mauer in Zahlen

Der Senegal kommt schnell voran mit der Errichtung der Großen Grünen Mauer. Von 2008 bis 2010 wurden

- 13 Baumschulen gegründet,
- 7 750 000 Setzlinge gezogen,
- 16 225 Hektar Wald angebaut,
- 4540 Kilometer Feuerschneisen gegraben.

Für die Verbreitung Erfolg versprechender Praktiken sorgt ein Netzwerk aus ländlichen Entwicklungszentren, von denen aus Vertreter des Projekts – Funktionäre, Ingenieure und Agronomen – die beteiligten Gruppen und Werkstätten beraten. So will man das Abwandern der Bevölkerung aufhalten, das dazu führt, dass Äcker brach liegen und schließlich veröden. In einem Bericht des Sahara and Sahel Observatory – einer internationalen Organisation, die unter anderem gegen die Ausdehnung von Wüsten kämpft – von 2008 heißt es: »Die Große Grüne Mauer ist nicht als reine Baumwand konzipiert, die sich am Rand der Wüste entlangzieht, sondern als ein Bündel von Maßnahmen und multisektoriellen Eingriffen zur Erhaltung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen mit dem Ziel, die Armut zu bekämpfen.«

Trotzdem bildet das Pflanzen von Bäumen ein wesentliches Element des Plans, sind diese doch die wichtigsten Garanten für die Gesundheit der Böden. Sie sorgen für die Zirkulation des Bodenwassers und halten die biochemischen Kreisläufe von essenziellen Nährstoffen wie Kohlenstoff, Phosphor und Nitrat aufrecht, die für die dauerhafte Fruchtbarkeit der Landflächen entscheidend sind. Eine zwei Meter hohe Akazie zum Beispiel hat bis zu vier Meter tief reichende Wurzeln, die Wasser und Nährstoffe aus dem Boden heraufholen. Mit ihrer Hilfe bildet der Baum neue Blätter, die wiederum das Erdreich düngen, wenn sie herabfallen. Als weiterer Dünger fun-

gieren die Exkremente von im Geäst sitzenden Vögeln. Außerdem begünstigen Bäume die Entwicklung vieler für die Landwirtschaft nützlicher Mikroorganismen im Boden.

Für die Große Grüne Mauer wurden drei Hauptarten einheimischer Bäume ausgewählt: die Verek-Akazie (*Acacia senegal*), die Wüstendattel (*Balanites aegyptiaca*) und die Indische Jujube (*Ziziphus mauritiana*). Der als Gummiarabikum bekannte Saft der Verek-Akazie kommt unter anderem in der Lebensmittelindustrie, als Baumaterial und als Zusatzstoff in Textilien zum Einsatz. Auch die Wüstendattel findet vielerlei Verwendung: Blätter und Rinde werden als Heilmittel für Diarrhö pharmakologisch genutzt, die Früchte sind essbar und lassen sich zu Saft oder Mus verarbeiten. Die Indische Jujube produziert ebenfalls genießbare Früchte.

Der Senegal hat vorerst als einziges Land mit dem Aufbau der Großen Grünen Mauer begonnen. In eigens errichteten Baumschulen werden die Sämlinge vor dem Ausbringen in die Natur vier Monate lang in Töpfen gezogen (Bild links). Zwischen 2008 und 2010 entstanden so aus fast acht Millionen Pflanzen gut 16 000 Hektar Wald; mehr als 4500 Kilometer Feuerschneisen dienen dem Schutz vor Bränden. Die Zahlen nach 2010 sind noch nicht veröffentlicht, doch hat sich das Projekt in einem vergleichbaren Tempo weiterentwickelt.

Um die Dörfer herum angelegte Gärten verschaffen den Bewohnern zusätzliche Einkünfte. Frauen bauen dort Pflanzen mit hohem Mehrwert wie etwa Gemüse an. Es hat lange gedauert, das Projekt in Gang zu bringen – vor allem wegen institutioneller Hindernisse. Jüngste Ereignisse wie der Krieg in Mali wirkten gleichfalls hemmend. In den kommenden Jahren sollten schnellere Fortschritte zu erreichen sein.

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass die Bäume erst nach 20 bis 30 Jahren voll ausgewachsen sind. Und nach ihrer Anpflanzung dauert es etwa zehn Jahre – im Fall der Großen Grünen Mauer also bis 2018 –, ehe sie überhaupt einen Einfluss auf die Ökosysteme haben. Die einheimische Bevölkerung muss sie so lange pflegen und beschützen, ohne unmittelbar davon zu profitieren. Zahlreiche Forschungsprojekte verfolgen deshalb das Ziel, das Baumwachstum zu beschleunigen.

Das Institut für Ökologie und Umwelt des französischen Forschungsverbands CNRS (Centre national de la recherche



Nutztierherden bedrohen die Pflanzungen, weil die Tiere die jungen Triebe fressen. Zum Gelingen der Großen Grünen Mauer ist deshalb ein Ausgleich zwischen den Interessen von Viehzüchtern und Landwirten erforderlich.

AVEL DUCOURNÉAL, CNRS-PHOTOPIQUE, PROJET OAHU TESSÉKÉRE, SENEGAL

scientifique) hat 2009 in Tessenkéré im Nordosten Senegals in Zusammenarbeit mit mehreren Organisationen das Observatoire Hommes-Milieus international (OHMi) eingerichtet. Dort befassen sich Forschungsgruppen des CNRS und des IRD (Institut de recherche pour le développement) sowie der Universitäten des Senegals und Burkina Fasos mit verschiedenen Fragestellungen – biologischen, ökologischen, kulturellen, sozialen, sanitären und klimatischen – im Zusammenhang mit der Errichtung der Großen Grünen Mauer.

Die Forstwirtschaft zum Beispiel ist an einer höheren Produktivität der Baumschulen interessiert. Hier ergaben Versuche mit Samen unterschiedlicher Herkunft, dass einige davon schneller wachsende und größere Bäume hervorbringen, die mehr Samen produzieren. Getestet wurde auch, inwiefern unterschiedliche Mischungen aus Sand und organischem Material das Wachstum eines Baums beeinflussen oder welche Rolle Größe und Form der Pflanzgefäße spielen. So haben wir ein Verfahren patentieren lassen, das darin besteht, verlassene Termitenhügel zu zermahlen und das Pulver mit Erde zu vermengen. Dieses Substrat lässt Sämlinge üppiger sprießen.



Rivalitäten zwischen Viehzüchtern und Farmern

Ein weiteres zentrales Forschungsgebiet ist die Modellierung der lokalen sozioökologischen Verhältnisse, um ein besseres Regelungssystem zu erreichen. Wie sich in Algerien zeigte, gefährden Rivalitäten zwischen Viehzüchtern und Farmern Projekte wie die Große Grüne Mauer. Verschiedene Maßnahmen sollen dazu dienen, sie zu entschärfen. Zum Beispiel werden Durchgänge für die Herden geschaffen und Durchzugszeiten festgelegt, bei denen die Kulturen keinen Schaden nehmen.

Im sanitären Bereich geht es unter anderem um die Frage, ob das Anlegen großer Wasserreservoirs nicht zur Verseuchung umliegender Dörfer mit Insekten führt, die Krankheiten wie Malaria übertragen. Ein Forschungsprogramm zum

Thema Biodiversität erfasst die heimischen Vogelarten und verfolgt, wie sie sich angesichts der landschaftlichen Veränderungen entwickeln, die der Bau der Großen Grünen Mauer mit sich bringt. Nicht zuletzt werden mögliche Einflüsse auf das Klima geprüft.

Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit den Mikroorganismen, die natürlicherweise im Boden vorkommen und sich als wertvolle Helfer beim Bau der Großen Grünen Mauer erweisen könnten. Einige erleichtern die Aufnahme von Mineralien durch die Pflanzen, während andere Pathogene oder Parasiten in Schach halten. In diesem Bereich schlummern potenziell nützliche Ergebnisse in den Forschungslabors – in manchen Fällen schon seit Jahrzehnten –, die noch nie im großen Stil praktisch angewendet wurden. Eines der Ziele des Netzwerks ländlicher Entwicklungszentren und des OHMi ist es, den Farmern bedeutsame wissenschaftliche Erkenntnisse nahezubringen. Das betrifft zum Beispiel den nützlichen Effekt von Mykorrhizapilzen oder den Einsatz von Biopestiziden gegen parasitisch wachsende Pflanzen.

Pilze zur Bodenverbesserung

Mykorrhizapilze sind mikroskopisch kleine Bodenorganismen, die in Symbiose mit den Wurzeln bestimmter Pflanzen leben. Vor allem in trockenen und halbtrockenen Regionen tragen sie entscheidend zur Fruchtbarkeit des Bodens bei. Sie beschleunigen das Wachstum der Pflanzen, indem sie mineralische Ressourcen erschließen und Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff bereitstellen (Bilder auf der rechten Seite). Außerdem produzieren sie Substanzen, die für Schädlinge giftig sind.

Lange herrschte die Ansicht, dass sich die Interaktion zwischen Pilz und Pflanze jeweils nur auf die beiden Partner auswirkt. Durch die Symbiose ändert sich aber auch die von den Wurzeln abgesonderte Flüssigkeit, und das beeinflusst die sich davon ernährende Mikroflora im Boden insgesamt. In der Umgebung der Wurzeln und in ihnen selbst entwickelt sich eine spezifische Mikrobepopulation, die so genannte Mykorrhizosphäre. Sie enthält insbesondere Stickstoff bindende Bakterien, unter anderem der Gattung *Azospirillum*: Diese leben im Zellinneren der Pflanzen, deren Wachstum sie fördern, weshalb man von Endosymbiose spricht. Eine solche Lebensgemeinschaft mit Mikroorganismen bilden Hül-



EDMOND HIEN, UNIVERSITÉ DE DUNGACUOUCOU

Bei der traditionellen Zai-Methode sind die Felder mit flachen Vertiefungen überzogen, in denen sich Wasser und Dünger sammeln. Das Verfahren ließe sich gut mit modernen Anbautechniken kombinieren, die im Rahmen des Projekts der Großen Grünen Mauer gefördert werden.

senfrüchtler wie Klee, Bohnen und Linsen oder bestimmte Bäume wie Erlen.

Landwirtschaftliche Praktiken, die Mykorrhiza-Symbiosen begünstigen, fördern das Wachstum der Pflanzen, ohne die Böden auszulaugen. Insofern tragen sie zur nachhaltigen Nutzung der Ackerflächen bei. Sie würden auch die Lösung für einen scheinbaren Widerspruch bieten: Die Pflanzen leiden an Phosphormangel, obwohl dieses Element in großer Menge im Erdreich vorkommt. Es liegt jedoch meist in Form wasserunlöslicher Verbindungen mit Metallen vor – etwa als Aluminium- oder Eisenphosphat. Pflanzen können es deshalb nicht nutzen. Die Mykorrhizapilze sind dazu hingegen in der Lage. So setzen sie organische Säuren frei, welche die chemischen Verbindungen aufbrechen und den Phosphor herauslösen. Diesen übertragen sie dann mittels ihrer langen Filamente, die teils in die Wurzelzellen eindringen, auf die Wirtspflanze.

Es gibt mehrere recht einfache Methoden, das Vorkommen der Mykorrhiza zu fördern. Leider sind sie in Afrika nur wenig verbreitet. Man kann zum Beispiel hypermykotrophe Pflanzen – etwa Hülsenfrüchte – anbauen, die bereitwillig eine Symbiose mit dem Pilz eingehen und seine Vermehrung begünstigen. So reichert sich der Boden dauerhaft mit den Pilzsporen an, von denen künftige Pflanzenkulturen profitieren. In der freien Natur sind hypermykotrophe Pflanzen die ersten, die sich nach einem Kahlschlag im Wald ansiedeln.

Man kann die Pilze aber auch direkt in den Boden einbringen. Das verträgt sich bestens mit traditionellen landwirtschaftlichen Praktiken wie dem Zai. Die Mikroorganismen würden dann gezielt in den Vertiefungen angesiedelt. Dadurch käme man mit kleineren Mengen aus.

Auch in den Baumschulen kann man mit Pilzen angereicherte Wurzeln in die Topferde geben. Das wurde erstmals im Juni 2012 bei Jujube-Bäumen praktiziert. Nach den üblichen vier Monaten Wachstum im Topf waren die Setzlinge wesentlich größer als ohne Pilze gezüchtete Vergleichsexemplare (Bild rechts unten). Auch nach einem Jahr lagen sie bei

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Wüsten – die Faszination der Sand- und Steinmeere« finden Sie unter

www.spektrum.de/wuesten



FOTOLIA / FORC DAN

der Größe sowie der Überlebensrate vorn. Der Einfluss auf den Ertrag – die Bäume beginnen etwa ab dem vierten Jahr Früchte zu bilden – ließ sich noch nicht ermitteln.

Pflanzungen von mit Pilzen besiedelten Bäumen – und pilzfriren zum Vergleich – sind demnächst auch im Senegal, in Mali und in Burkina Faso geplant. Sie sollen der örtlichen Bevölkerung die Vorteile der Mykorrhiza-Symbiosen demonstrieren. So will man diese Praktiken bekannt machen und weiter verbreiten.

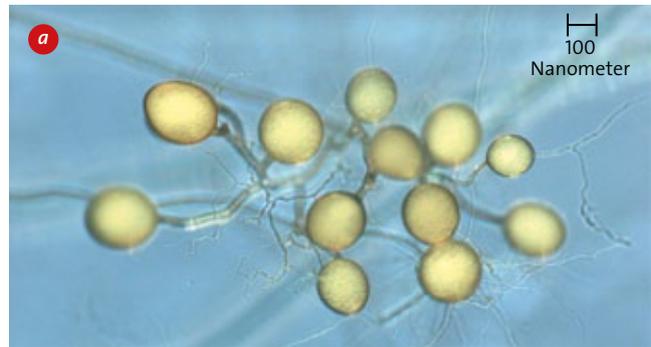
Eine parasitäre Pflanze zerstört 40 Prozent der Ernten

Mikroorganismen im Boden könnten auch beim Kampf gegen Phytoparasiten helfen. Solche Schmarotzerpflanzen schädigen in der Subsahararegion Getreide, das dort als Nahrungsgrundlage dient. Am schlimmsten wütet die Art *Striga hermonthica*, die sich an die Getreidewurzeln heftet und von ihnen mit Nährstoffen versorgen lässt, so dass die Nutzpflanze verkümmert und abstirbt (Bild S. 84). Dieser Phytoparasit kommt sehr häufig in den ausgelaugten Böden der halbtrockenen Regionen vor, wo er beträchtliche Ernteeinbußen verursacht, vor allem bei der Mohrenhirse, der Hirse, dem Mais, dem Reis und der Foniohirse. Die Verluste schwanken zwischen 10 und 90 Prozent und betragen im Durchschnitt etwa 40 Prozent. In der Subsahararegion entspricht das ungefähr 8 300 000 Tonnen Getreide. Auf diese Weise bedroht *S. hermonthica* mehr als 300 Millionen Menschen mit Hungersnot.

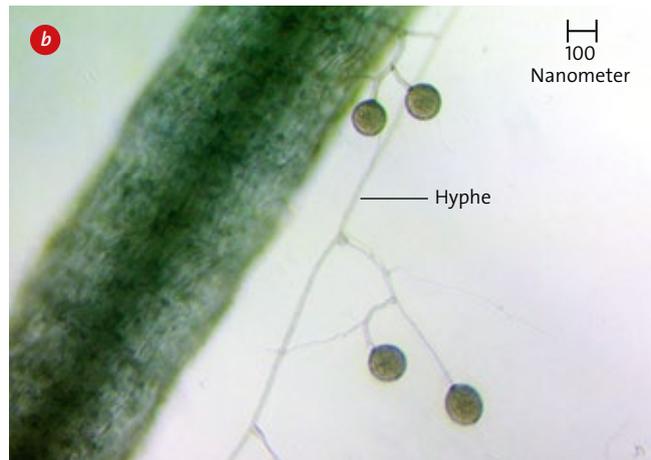
Diverse Methoden zur Bekämpfung der parasitären Pflanze wurden erprobt: das Herausreißen der jungen Sprosse, die Züchtung resistenter Kultursorten und der Einsatz von Herbiziden. Doch die Ergebnisse enttäuschten. *S. hermonthica* ist schwer auszurotten; denn selbst wenn man die Pflanzen ausmerzt, überleben die Samen noch jahrzehntelang im Boden.

Schon seit Langem wird deshalb in etlichen Forschungsprogrammen nach besseren Ansätzen zur Bekämpfung gesucht. Dazu gehört, die Samen am Keimen oder die Keimlinge am Wachsen zu hindern. Besonders aussichtsreich scheint, ein Keimen ohne Wirtspflanze auszulösen, was dem Schmarotzer keine Überlebenschance lässt. Dadurch könnten die im Erdreich schlummernden Samen vernichtet werden. Bestimmte Pilze und Bakterien der einheimischen Mikroflora im Boden produzieren Substanzen mit ähnlichem Ergebnis. Wie einer von uns (Bally) schon vor über zehn Jahren entdeckt hat, synthetisieren etwa Bakterien der Art *Azospirillum* ein Molekül, das die Keimung von *S. hermonthica* in einem frühen Stadium blockiert und den Samen absterben lässt.

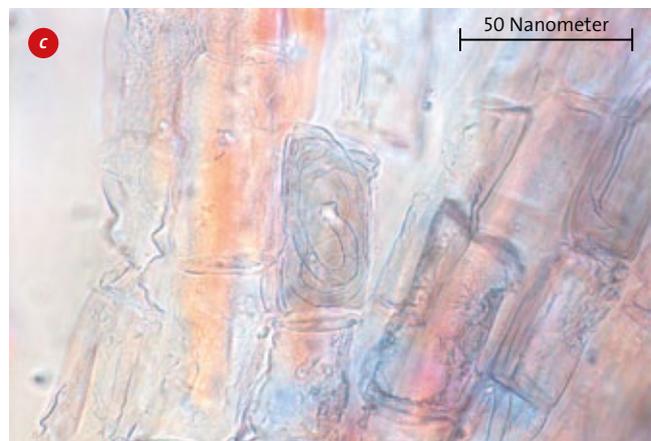
Mykorrhizapilze (a) sind Mikroorganismen im Boden, die Symbiosen mit Pflanzen eingehen. Sie fördern deren Wachstum, indem sie ihnen Wasser und Mineralien liefern, die sie über ihre langen Filamente aufnehmen (b). Einige dieser so genannten Hyphen dringen dazu in Wurzelzellen ein (c, in Blau). Im Gegenzug versorgen die Pflanzen die Pilze mit organischer Materie. Wie sehr ihnen die Symbiose nutzt, zeigt der Vergleich zwischen Setzlingen, die ohne und mit Mykorrhiza gewachsen sind (d).



YVES PRIN / CIRAD



ALEXANDRA HAOUY / UPS-CNRS



YVES PRIN / CIRAD



YVES PRIN / CIRAD

Warum die Wüsten auf dem Vormarsch sind

Von Desertifikation bedroht sind vor allem trockene und halbtrockene Regionen. Sie machen 41 Prozent der irdischen Landfläche aus. Auslöser sind teils natürliche Faktoren wie geringe Niederschläge, hohe Temperaturen und starke Sonneneinstrahlung. Manchmal kommen außergewöhnliche Ereignisse hinzu – wenn etwa Überschwemmungen durch Meerwasser bei Sturmfluten küstennahe Böden versalzen.

Aber auch der Mensch trägt zur Desertifikation bei – vor allem durch übermäßige landwirtschaftliche Nutzung von Anbauflächen. Der Bedarf an Brennholz, Feldern und Weideland führt zur fortschreitenden Rodung von Wäldern. Monokulturen lassen den Boden verarmen, weil sie immer den gleichen Typ an Nährstoffen verbrauchen. Außerdem bieten sie günstige Bedingungen für die Verbreitung von Schädlingen und Parasiten. Die angebauten Pflanzen und Bäume können ihnen umso weniger Widerstand leisten, je mehr es den Böden an Nährstoffen mangelt.

Einer der schlimmsten Parasiten in der Sahelzone ist die Pflanze *Striga hermonthica* (Bild). Sie führt bei verschiedenen Getreidearten zu Ernteeinbußen zwischen 10 und 90 Prozent. Die befallenen Felder können ihre Besitzer nicht mehr ernähren und werden aufgegeben. Ausgelaut und ohne Vegetation, die den fruchtbaren Oberboden festhält, wird die Erde dann vom Wind davongeweht oder von Regenfällen weggeschwemmt. Die zurückbleibende nackte, verödete Landfläche entwickelt sich zur Wüste.



GEORGES SALLÉ, UNIVERSITÄT PARIS 6

Der Phytoparasit *Striga hermonthica* verursacht beträchtliche Ernteeinbußen in der Sahelzone, indem er Getreidewurzeln anzapft und ihnen Nährstoffe entzieht.

Trockene Regionen sind am anfälligsten für die Desertifikation, weil die natürliche Regeneration des Pflanzenwuchses und der Böden hier fünf- bis zehnmal so lange dauert wie in Gebieten mit häufigen, ergiebigen Niederschlägen. Außerdem liegt das Bruttoinlandsprodukt der betreffenden Länder meist mehr als 50 Prozent unter dem von klimatisch günstigeren Regionen, so dass es sich die Bauern nicht leisten können, teure moderne Anbaumethoden zu verwenden. Und nicht zuletzt hat ein Bevölkerungswachstum um 18,5 Prozent in den von Desertifikation bedrohten Gebieten während der 1990er Jahre den Druck auf die natürlichen Ressourcen dramatisch verstärkt.

Die Nutzung solcher Mikroben hat den Vorteil, dass sie bereits an die örtlichen Umweltbedingungen angepasst sind. Inzwischen wurde damit begonnen, sie als Bestandteil von Biopestiziden zu verwenden. So entsteht in Ouagadougou eine neue technische Anlage zur groß angelegten Nutzung von Bakterien der Gattung *Azospirillum*. Derzeit führen Vertreter bei Demonstrationen in kleineren landwirtschaftlichen Betrieben die Wirksamkeit ihres Produkts vor. Der Einsatz solcher Biopestizide ist kurzfristig möglich und sehr einfach in die herkömmlichen Anbaumethoden vor Ort zu integrieren. Gemeinsam mit den Mykorrhizapilzen dürfte sich auf diese Weise die landwirtschaftliche Produktion beträchtlich steigern lassen – und das ohne die hier zu Lande üblichen synthetischen Dünger und Pestizide.

Das bedrohliche Ausmaß der Desertifikation in Afrika hat die politischen Entscheidungsträger und die Wissenschaftler gleichermaßen aufgerüttelt. Die Große Grüne Mauer bietet eine Plattform zur Entwicklung, Erprobung und Demonstration unterschiedlichster Gegenmaßnahmen. Hauptziel muss es sein, die vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen, um die verödeten Regionen am südlichen Sahararand wieder zu begrünen und die Lebensbedingungen der Bewohner zu verbessern. Sogar Länder außerhalb Afrikas interessieren sich schon für das Vorhaben.

So will sich Brasilien an der Finanzierung der Großen Grünen Mauer beteiligen, weil es hofft, dadurch Anregungen für den eigenen Kampf gegen die Desertifikation in den trockenen Regionen im Nordosten des Landes zu erhalten. ~

DIE AUTOREN



René Bally (links) ist Forschungsleiter im Labor für Mikrobiologische Ökologie an der Universität de Lyon. In der gleichen Funktion arbeitet **Robin Duponnois** dort im Labor der Tropischen und Mediterranen Symbiosen.

QUELLEN

- Boëtsch, G.:** La Grande Muraille Verte: Des arbres contre le désert. Éditions Privat, Toulouse 2013
- Dia, A., Duponnois, R.:** La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux. Éditions IRD, Marseille 2012
- Dia, A., Duponnois, R.:** Le projet majeur africain de La Grande Muraille Verte: Concepts et mise en œuvre. Éditions IRD, Marseille 2010

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314689

Bausatz Stirling-Motor Handwärme

☎ (9-4341-8) **59,-**

Der Stirlingmotor wurde 1816 vom damals 26-jährigen schottischen Pfarrer Robert Stirling erfunden. Es ist nach der Dampfmaschine die zweitälteste Wärmekraftmaschine, in der ein abgeschlossenes Arbeitsgas wie Luft oder Helium von außen an zwei verschiedenen Bereichen abwechselnd erhitzt und gekühlt wird, um mechanische Energie zu erzeugen. Beim Handstirling reicht die Handwärme aus um die Drehscheibe zu bewegen. Maße: 10,5 x 10,5 x 17 cm. Material: Metall, Kunststoff. Ab 14 Jahren geeignet.



Armbanduhr Higgs Boson

☎ (9-4045-7) **37.90**

Eine Armbanduhr, die dem Higgs-Teilchen gewidmet ist, das erst 2012 durch den Large Hadron Collider in CERN nachgewiesen werden konnte. Ein Jahr später galt die experimentelle Bestätigung als so weit fortgeschritten, dass Francois Englert und Peter Higgs dafür den Nobelpreis für Physik zuerkannt bekamen. Die Uhr mit ihrer ungewöhnlichen Aufmachung ist auch für Nicht-Physiker ein schönes Geschenk. Japanisches Quarzwerk, Lederarmband.



Paul Murdin: Die Entdeckung des Universums

☎ (9-4342-6) **49.99**

Die Faszination des Sternenhimmels zieht die Menschheit seit Jahrtausenden in ihren Bann. Dieses besondere Werk nimmt den Leser mit auf eine Entdeckungstour von prähistorischen Kultstätten über die Entwicklung der modernen Astronomie bis hin zur aktuellen Erforschung des Urknalls. Dank zahlreicher historischer Dokumente zum Herausnehmen wird dieses

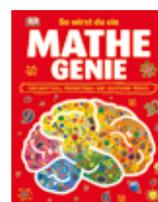


Buch zu einem besonderen Erlebnis. So kann man die weltbewegenden Entdeckungen und kulturellen Einflüsse der astronomischen Forschung hautnah nachvollziehen. 124 Seiten, 123 Farbfotos, 22 s/w-Fotos, 47 Zeichnungen (Bilder zum Teil herausnehmbar), 27 x 30,6 cm, geb. (Komsos, 2014)

So wirst du ein Mathe-Genie Zahlentricks, Rechen-tippis und spannende Rätsel

☎ (9-3824-0) **14.95**

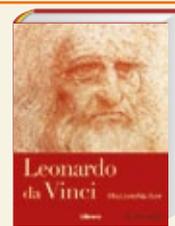
Was haben Honigwabennetze, Blütenblätter und Landkarten mit Mathematik zu tun? Das Buch zeigt auf sehr anschauliche Weise, wie spannend Mathe sein kann und überzeugt sogar Rechenmuffel, dass Rechnen kein Hexenwerk sein muss. 128 Seiten, über 400 farbige Abbildungen, Format 22 x 28 cm, gebunden. Ab 10 Jahren geeignet. (Dorling Kindersley)



VIBRO-Roboter - Entdecke die Roboter-Technik der Zukunft

☎ (9-3563-1) **statt 39.90 nur 16.99**

Baue mit diesem Experimentierkasten den VIBRO-Roboter und erlebe, wie er sich selbstständig fortbewegt! Die Anleitung zeigt Schritt für Schritt wie der Roboter oder eines der anderen möglichen Modelle (z. B. Rüttelmaschine, Spinne, Mars-Auto) zusammengesetzt werden und erklärt die physikalischen Grundlagen. Ab 8 Jahren geeignet.



Leonardo da Vinci Skizzenbücher **nur 9.95**

☎ (9-4325-1) **statt 35.90**

Im Verlauf seines langen Lebens füllte Leonardo unzählige Notiz- und Skizzenbücher mit Skizzen, Zeichnungen und Schriften. Sie sind heute über Bibliotheken und Archive in der ganzen Welt verstreut. Der Band versammelt die wichtigsten von ihnen. (SA) 334 Seiten, durchg. faksimilierte Abbildungen, Format 25 x 29 cm, gebunden.



Theodore Gray Die Elemente – Kartenbox **19.95**

☎ (9-4338-0)

Die Elemente ist eine Kombination aus atemberaubender Bildsprache und verständlicher Wissenschaft. Auf 118 Karten bekommt jedes Element ein Schaufenster mit einem großflächigen Foto, das den Baustein unserer Welt in seiner ursprünglichen Form zeigt. Sauerstoff beispielsweise ist bei Raumtemperatur ein farbloses Gas. Bei -183 °C aber ist es eine wunderschöne zartblaue Flüssigkeit, die Theodore Gray fotografiert hat. Auch die wissenschaftlichen Fakten fehlen nicht: Angeführt werden atomares Gewicht, Dichte sowie Schmelz- und Siedepunkt eines jeden Elements. 126 Karten (Vorder- und Hinterseite bedruckt), Format 12 x 12 cm, in stabiler Box.



Ernst Peter Fischer: Die Verzauberung der Welt Eine andere Geschichte der Naturwissenschaften

☎ (9-4338-3)

24.99

Fischer, einer der renommiertesten Vermittler von populärer Wissenschaft, zeigt in seinem neuen Werk, dass wir uns die Neugier und das Staunen bewahren müssen, um »das Gefühl für das Geheimnisvolle«, wie Einstein es nannte, wiederzuerlangen. Denn für die großen Fragen und Phänomene der Wissenschaft – Was ist Schwerkraft? Was ist Licht? Was ist Zeit? – gibt es keine einfache Erklärung, keine alleingültige Antwort, sondern eine Geschichte, die sich ständig erneuert, und ein »tiefes Geheimnis«, das es zu entdecken gilt. Nur durch das Vordringen zu diesem Geheimnis erfahren wir den Zauber der Welt. Ein aufregender Streifzug durch die moderne Wissenschaft – und eine Anleitung zum Staunen. 336 Seiten, Format 13 x 21 cm, geb. (Siedler, 2014)



Bauernring Sonnenuhr Bronze

☎ (7-1159-4) **nur 24.50**

Im 18. Jahrhundert erfanden Mönche in den Wäldern Preußens diese kleine und praktische, tragbare Sonnenuhr, welche die Zeit der Sonnenhöhe entsprechend anzeigt. **Material Bronze. Durchmesser 28 mm.** Lieferung erfolgt mit Anleitung. Mit Lederband.

Science-Shop.de

bei Mail:Order:Kaiser

Postfach 80791 München

Tel. 0180 5 34 17 34*

Fax 0180 5 33 33 23*

info@science-shop.de

Name, Vorname

Straße

PLZ/Ort

Datum / Unterschrift

SciA1414

Stück ☎ Bestellnummer/Titel

Lieferung bequem per Rechnung (*Bonität vorausgesetzt)

Versandkostenanteil: 4.95 € (in Deutschland)

Alle Preise in Euro inkl. MwSt. und zzgl. Versandkosten

Volles Rückgaberecht für 14 Tage

Strom aus dem Übergitter

Nanotechnologie und Spinelektronik sollen künftig winzige Temperaturunterschiede zur Stromgewinnung nutzbar machen.

Von Kornelius Nielsch, Sonja Heiderich, Sebastian Zastrow und Christian Back

Gut minus 50 Grad Celsius herrschen im Durchschnitt auf dem Mars, doch in der Radionuklidbatterie des Mars Rover Curiosity ist es mehrere hundert Grad heißer. Aus solchen Temperaturdifferenzen Strom zu gewinnen, hat sich im Weltraum seit 1969 bewährt. Damals setzte Apollo 12 eine Basisstation auf dem Mond ab, in der ein thermoelektrischer Generator (TEG) fünf Jahre lang diverse Geräte versorgte. Inzwischen interessieren sich auch Automobilindustrie und Energieerzeuger für diese Technik, denn bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe entsteht gut 1000 Grad Celsius heißes Abgas. Weltweit arbeiten Forscher nun daran, auch Temperaturunterschiede von nur wenigen Grad zu nutzen, um beispielsweise Messfühler unabhängig zu betreiben. Solche energieautarken Sensoren, die ihre Daten über Funk weitergeben, eignen sich insbesondere zur Überwachung von Motoren oder kritischer Infrastruktur wie Brücken und Tunnel.

Alle thermoelektrischen Generatoren basieren auf einem nach seinem Entdecker benannten Effekt: Der deutsche Physiker Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831) hatte beobachtet, dass eine Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen zweier verschiedener Metalle eine Kompassnadel ausschlagen ließ. Er hielt dies für ein magnetisches Phänomen. Heute wissen wir, dass freie Ladungsträger am wärmeren Ende eines Festkörpers auf ein geringfügig höheres Energieniveau versetzt werden als die am kälteren. Während beide Enden zuvor dieselbe Ladungsdichte hatten, bauen sich nun ein Ladungsunterschied und damit eine elektrische Spannung auf. Deshalb fließt ein Strom, der durch den Temperaturunterschied getrieben ist. Das Pendant dazu ist der Peltier-Effekt:

Indem sie elektrischen Strom verbrauchen, kühlen entsprechende Module beispielsweise Lebensmittel in Hotel-Minibars oder empfindliche Bauteile in elektronischen Schaltungen.

Dass thermoelektrische Stromgeneratoren noch nicht zu einem festen Baustein der Energiewende geworden sind, hat zwei Gründe: Zum einen kostet es einigen Aufwand, die Temperaturdifferenz aufrechtzuerhalten; zum anderen setzen TEGs die eingesetzte Energie im Vergleich zur Fotovoltaik oder zu Windkraftanlagen schlecht um, haben also einen schlechten Wirkungsgrad.

Um diesen zu beschreiben, definieren Materialforscher gern eine Gütezahl, für die sich hier die Bezeichnung ZT eingebürgert hat. Dabei steht T für die über das Modul hinweg abfallende Temperatur; das Z symbolisiert die Zusammenfassung dreier materialabhängiger Parameter: des Seebeck-Koeffizienten S sowie der elektrischen und der thermischen Leitfähigkeit σ beziehungsweise κ . Damit berechnet sich ZT zu $S^2 \cdot \sigma / \kappa \cdot T$.

Elektronen an der Fermi-Kante

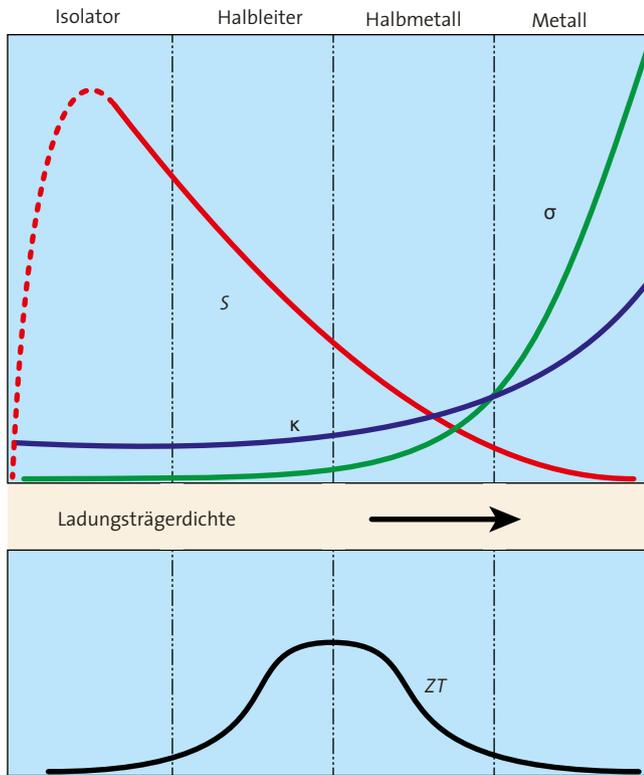
Diese Gütezahl wächst demnach mit dem Wert des Seebeck-Koeffizienten, der beschreibt, wie eine Temperaturdifferenz in Spannung umgesetzt wird: Bei Metallen beträgt S wenige Mikrovolt pro Grad Celsius, bei Halbleitern sind es einige hundert. Der Koeffizient ist umso größer, je mehr Elektronen ohnehin schon fast die höchste mögliche Energie besitzen, die sie in diesem Festkörper annehmen können, ohne bereits als freie Elektronen auf Wanderschaft zu gehen. Physiker sprechen von der »Zustandsdichte an der Fermi-Kante«. Je größer sie ist, desto mehr Elektronen sind in der Lage, auf die kalte Seite zu reisen und dort nicht besetzte Zustände einzunehmen. Weil Atomkerne elektrisch positiv geladen sind, bleibt dabei ein »Loch« zurück, das ebenfalls durch das Kristallgitter wandert.

Auch die elektrische Leitfähigkeit eines Materials hängt davon ab, wie viele Elektronen beziehungsweise Löcher sich in der Nähe der Fermi-Kante befinden und dann durch eine anliegende Spannung verschoben werden können. Bei Isolatoren sind es unter Normalbedingungen nur sehr wenige, bei Metallen sehr viele, und bei Halbleitern bewegt sich der Wert zwischen diesen Extremen.

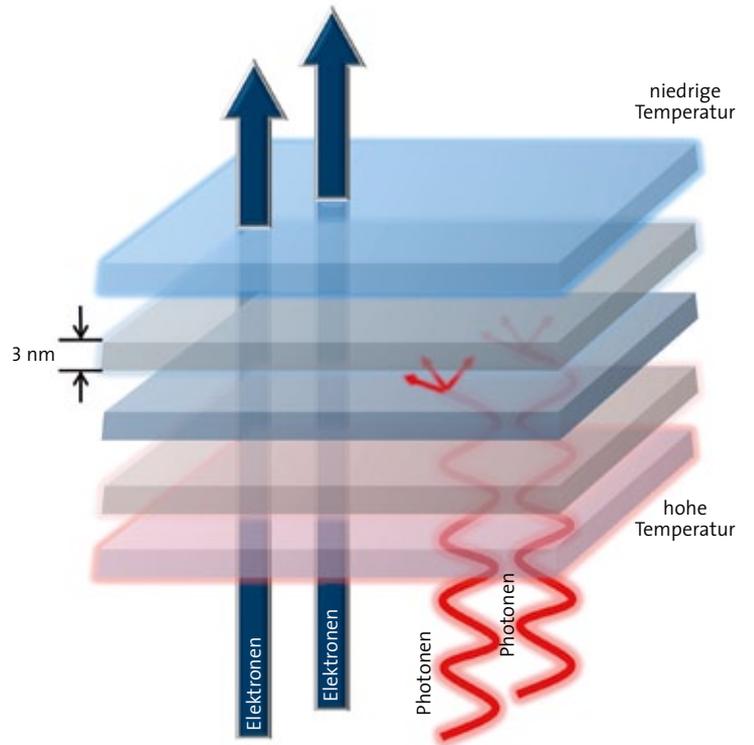
AUF EINEN BLICK

DER KLEINE UNTERSCHIED

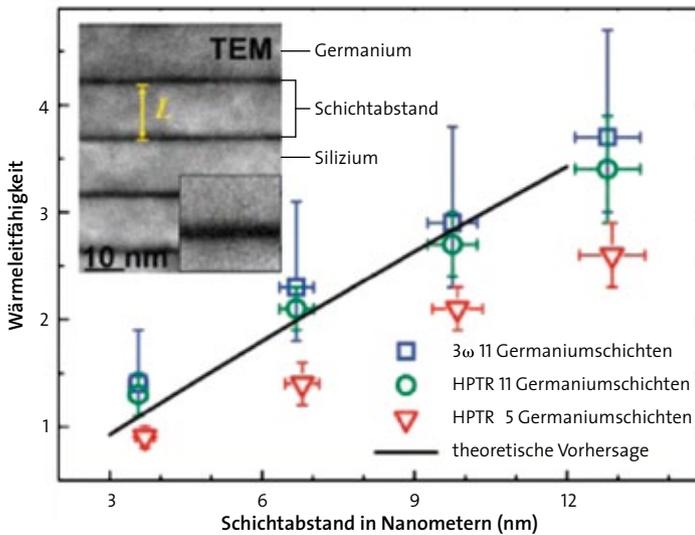
- 1 Physiker wollen den **Seebeck-Effekt** stärker nutzen: Wird ein Festkörper erhitzt, wandern Ladungsträger vom warmen zum kalten Ende – es fließt Strom.
- 2 **Thermoelektrische Generatoren** (TEGs) sollen Temperaturunterschiede von wenigen Grad effizient umsetzen.
- 3 Halbleiter mit so genannten **Übergittern** gelten als viel versprechende Kandidaten, ebenso **spinelektronische Bauelemente**.



KORNELIUS NIELSCH, SONJA HEIDERICH, SEBASTIAN ZASTROW UND CHRISTIAN BACK



KORNELIUS NIELSCH, SONJA HEIDERICH, SEBASTIAN ZASTROW UND CHRISTIAN BACK



PERNOT, C. ET AL. PRECISE CONTROL OF THERMAL CONDUCTIVITY AT THE NANOSCALE THROUGH INDIVIDUAL PHONON-SCATTERING BARRIERS. IN: NATURE MATERIALS 9, S. 491-495, 2010. FIG. 1B + 2B

BOSTON COLLEGE / MIT / GMZ INC.

Noch versorgen thermoelektrische Generatoren vor allem Satelliten mit Strom. Sie nutzen die extremen Temperaturunterschiede im Weltraum, um mit Hilfe des Seebeck-Effekts elektrische Spannungen zu generieren. Auf der Erde sollten wenige Grad Celsius Differenz genügen; heutige Technik stößt hier an ihre Grenzen. Insbesondere setzt ein hoher Wirkungsgrad (Gütezah ZT , oben links) gleichzeitig eine hohe elektrische und eine geringe thermische Leitfähigkeit voraus. Das ist am ehesten mit Halbleitern zu erreichen, vor allem mit so genannten Übergittern aus nur wenige Nanometer dicken Schichten (oben rechts). Diese Struktur dämpft den Transport von Wärme umso stärker, je kleiner die Abstände im Gitter sind, wie Armando Rastellis Team vom Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik der Johannes Kepler Univer-

sität Linz zeigte (unten links). Weil die Messung der Wärmeleitfähigkeit bei dünnen Schichten heikel ist, setzten die Forscher zwei Verfahren ein: Bei der 3ω -Methode wird das Material über einen Kontakt periodisch erhitzt, beim HPTR-Verfahren (nach englisch: heterodyne picosecond thermoreflectance) mit einem Laserstrahl. Der fragliche Parameter wird bei ersterer aus den resultierenden Temperaturosillationen berechnet, bei HPTR aus der Lichtrückstreuung. Eine industriell umsetzbare Methode bietet eine Alternative zum Übergitter: Wird thermoelektrisches Material zu Nanopulver zermahlen und anschließend in eine Form gepresst, werden die Wärme transportierenden Phononen an den Grenzflächen der unterschiedlich orientierten Kristallgitter gestreut (unten rechts, Transmissionselektronenmikroskopaufnahme).

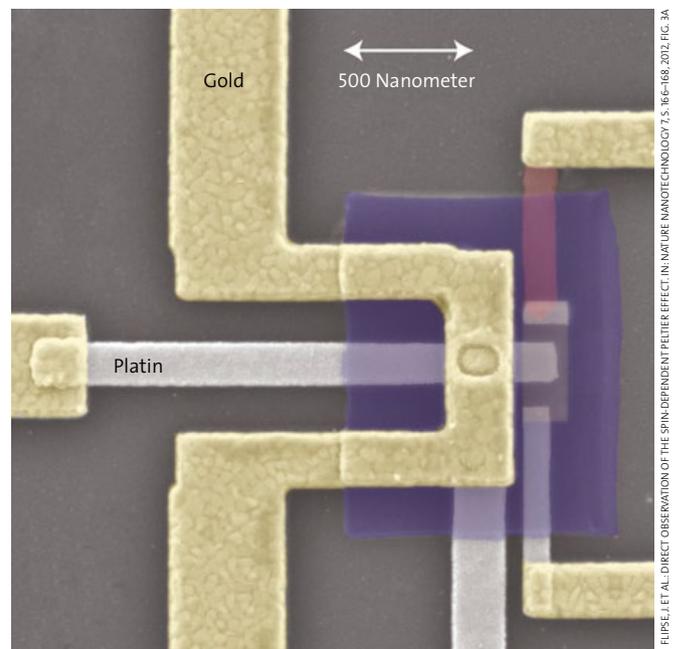
Der Wirkungsgrad, der beschreibt, wie gut eine Temperaturdifferenz in Spannung umgesetzt wird, wächst mit dem Gütewert ZT . Im Idealfall eines unendlich hohen ZT entspräche er dem Carnot-Wirkungsgrad, der die Energieausbeute jeder Wärmekraftmaschine nach oben begrenzt. Gute thermoelektrische Materialien kommen heute aber nur auf ein ZT von 1, was unter günstigen Bedingungen einer Effizienz von 10 Prozent entspricht. Ein ZT von 3 scheint in naher Zukunft machbar, was die Effizienz auf Grund der rechnerischen Zusammenhänge auf 20 Prozent erhöht.

Ein optimales thermoelektrisches Material erfordert neben hoher elektrischer Leitfähigkeit aber auch eine nur geringe Wärmeleitfähigkeit. Ansonsten würde die antreibende Temperaturdifferenz schnell ausgeglichen werden, und man müsste Energie aufwenden, um sie konstant zu halten. Metalle sind daher für TEGs ungeeignet, denn sowohl der Transport elektrischer Ladung als auch die Wärmeleitung erfolgen in ihnen über freie Elektronen – die beiden Parameter lassen sich nicht zur gleichen Zeit in entgegengesetzte Richtungen optimieren. Isolatoren bieten zwar hohe Werte für S und niedrige für κ , doch hier ist die schlechte elektrische Leitfähigkeit das Problem.

Übergitter bremst Phononen

Halbleiter hingegen sind viel versprechende Kandidaten. Denn Wärme wird dort nicht nur von Elektronen, sondern auch von Gitterschwingungen transportiert, so genannten Phononen. Lässt man nun Schichten zweier Halbleiter mit unterschiedlichen Gitterkonstanten – einem Maß für die Abstände im Kristallgitter – aufeinander aufwachsen und hält dabei die Schichtdicke in der Größenordnung dieser Abstände, entsteht ein so genanntes Übergitter. Ladungsträger können dieses ungehindert passieren, Phononen hingegen werden daran zurückgestreut, denn ihre Wellenlängen sind viel größer als die der Elektronen (siehe Grafik S. 87, oben rechts). Somit wird die Wärmeleitung reduziert, nicht aber die elektrische Leitfähigkeit. Allerdings gelingt die Herstellung einer solchen Struktur bislang nur im Labormaßstab, da einige Fertigungsschritte ein Hochvakuum und extrem hohe Temperaturen erfordern. Außerdem wachsen die Schichten zu langsam für eine industrielle Anwendung.

Nanostrukturierung bietet noch weitere Möglichkeiten, den Wirkungsgrad von TEGs zu verbessern. Die Physikerin



Der Spin-Peltier-Effekt, das magnetische Analogon zum Ladungs-Peltier-Effekt, tritt in nanostrukturierten metallischen Viel-lagenschichten auf. Die Abbildungen zeigen die Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Bauteils (links) sowie dessen Aufbau

Mildred Dresselhaus vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge berechnete Anfang der 1990er Jahre, dass Nanodröhte aus Bismut mit einem Durchmesser von zehn Nanometern bei einer Temperaturdifferenz von 77 Kelvin ein ZT von 3 besäßen. Das ist 15-mal höher als der Wert des unstrukturierten Materials. Der Grund: Bei diesen Dimensionen ist die Bewegungsfreiheit der Elektronen stark eingeschränkt, was jene mit höherer Energie zur Fermi-Kante drängt. Die Zustandsdichte dort wächst, und folglich steigt der Seebeck-Koeffizient. Einen solchen Effekt können auch zweidimensionale Nanostrukturen wie dünne Schichten und eindimensionale wie Quantenpunkte haben. Bislang ist das allerdings noch vor allem ein Feld für Theoretiker, eine Fertigung im industriellen Maßstab kaum angedacht.

Wir haben daher eine Alternative für den kommerziellen Einsatz entwickelt. Bismutellurid, ein handelsübliches thermoelektrisches Material, lässt man zusammen mit Kugeln aus einer härteren Substanz in einem Zylinder so schnell rotieren, dass es zu annähernd gleich großen Körnern von wenigen zehn Nanometern Durchmesser zermahlen wird. Presst man sie nun wieder zu einem dichten Körper zusammen, bilden die Pulverteilchen einen Festkörper mit unterschiedlichsten Kristallorientierungen, also einer Vielzahl von Grenzflächen, die Phononen sehr effektiv streuen.

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten bieten auch die magnetischen Eigenschaften von Elektronen. Weil jede Bewegung einer Ladung ein elektromagnetisches Feld erzeugt, reagieren sie auf äußere Magnetfelder. Die Quantenmechanik bezeichnet diese Eigenheit als Spin und lässt dafür zwei Werte

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

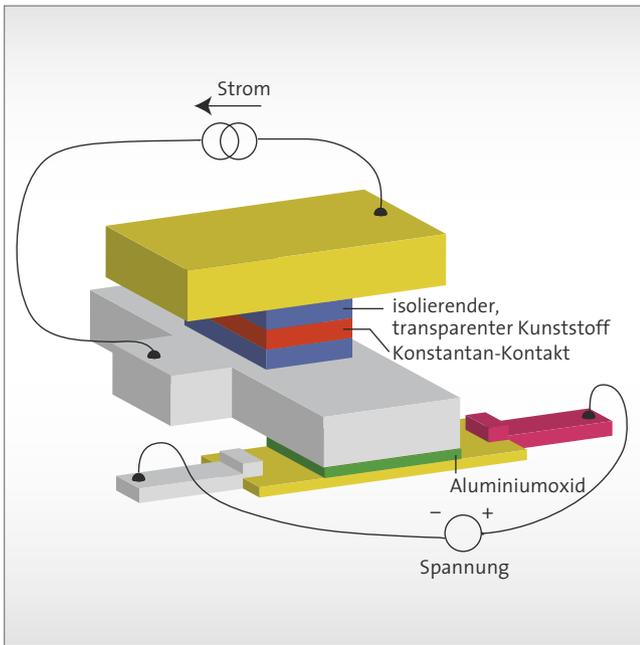
Unser Online-Dossier zum Thema »Energie – wie die Energieversorgung der Zukunft aussieht« finden Sie unter



www.spektrum.de/energie



FOTOLIA/VDR



(Schema, rechts). Schickt man einen Ladungsstrom durch das magnetische Schichtsystem, wird das Nanoelement gekühlt oder geheizt. Die Temperaturänderung kann als elektrische Spannung im integrierten Nanothermometer bestimmt werden.

zu: »up« oder »down«, je nachdem, ob er sich zu einem Magnetfeld parallel oder antiparallel ausrichtet. In den meisten Materialien sind die beiden Spins statistisch verteilt, in so genannten Ferromagneten hingegen überwiegt eine der Sorten.

Das so genannte Pauli-Prinzip verbietet es nun Elementarteilchen, die sich am gleichen Ort befinden, in allen Quantenzahlen übereinzustimmen. Deshalb spalten sich Energiebänder der Elektronen nach ihren Spins auf. In der Nähe der Fermi-Kante sind die beiden Sorten aus quantenphysikalischen Gründen nicht gleichermaßen vertreten, sondern eine dominiert. Vor diesem Hintergrund ist sogar möglich, das Konzept von Strom und Spannung auf den Spin zu erweitern: Baut sich an Grenzflächen verschiedener Temperatur infolge unterschiedlicher Seebeck-Koeffizienten der Materialien ein Überschuss von einer Spinsorte auf, fließt zwar kein herkömmlicher elektrischer Strom, doch es entstehen eine Spinspannung und ein Spinstrom. Schickt man den nun durch einen Nichtferromagneten wie Platin, würden die beiden Spinsorten in verschiedene Richtungen abgelenkt; und weil eine Sorte überwiegt, baut sich senkrecht zum Spinstrom dann doch eine nutzbare elektrische Spannung auf. Man nennt dies den inversen Spin-Hall-Effekt. Wie genau das gehen soll und ob sich damit überhaupt ausreichend große Ströme erzeugen lassen, ist noch offen. Auf jeden Fall müssen die Bauteile nanostrukturiert sein, da die Spinspannungen bereits auf Längenskalen von wenigen zehn Nanometern abklingen.

Ein weiteres solches »spinkalorisches« Bauelement haben kürzlich zwei Arbeitsgruppen von den Universitäten Biele-

feld, Göttingen und Gießen sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig vorgeschlagen: den thermoelektrischen magnetischen Tunnelwiderstand. Beim gewöhnlichen Tunnel-Magneto-Widerstand, der zum Beispiel in ABS-Sensoren eingesetzt wird, trennt ein nur wenige Atomlagen dicker Isolator zwei dünne ferromagnetische Schichten. Auf Grund ihrer Wellennatur können Ladungsträger die Barriere zwischen ihnen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit »durchtunneln«. Diese steigt, wenn die beiden magnetischen Schichten gleich magnetisiert sind; bei antiparalleler Ausrichtung sinkt sie drastisch, und der elektrische Widerstand wächst bis zum 30-Fachen.

Verschiedene Arbeitsgruppen haben inzwischen bestätigt, dass solche Bauelemente einen spinabhängigen Seebeck-Effekt aufweisen, der die gleiche Größenordnung wie die besten Thermoelektrika erreicht. Der Vorteil: Die thermoelektrischen Effekte können durch externe Magnetfelder geschaltet werden. Potenzielle Bauelemente weisen also einen zusätzlichen Freiheitsgrad auf. Mögliche Anwendungen des Magneto-Seebeck-Effekts sind aber noch unklar.

Während die Erforschung spinabhängiger Thermoelektrika noch in den Kinderschuhen steckt, sind nanostrukturierte keine Zukunftsmusik mehr. Längst gibt es kleine Unternehmen, die sich auf die Kommerzialisierung von Miniatur-TEGs für die autarke Energieversorgung von Sensoren spezialisiert haben. Auch große Firmen mit eigenen Forschungsabteilungen arbeiten an der Patentierung entsprechender Materialsysteme. Ob wir in Zukunft mehr solcher Stromgeneratoren oder Kühlelemente im Einsatz finden, hängt aber maßgeblich davon ab, ob es möglich sein wird, Nanostrukturen im großen Maßstab herzustellen. ~

DIE AUTOREN



Kornelius Nielsch (links) leitet die Arbeitsgruppe »Multifunctional Nanostructures« am Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg, in der **Sonja Heiderich** ihre Promotion abgeschlossen hat und **Sebastian Zastrow** promoviert. **Christian Back** (rechts) hat den Lehrstuhl für Magnetismus und Magnetoelektronik am Institut für Experimentelle Physik der Universität Regensburg inne.

QUELLEN

Goldsmid, H.J.: Introduction to Thermoelectricity. Springer, Berlin, Heidelberg 2009
Nielsch, K. et al.: Thermoelectric Nanostructures: From Physical Model Systems towards Nanograined Composites. In: Advanced Energy Materials 1, S. 713–731, 2011
Tritt, T.M.: Thermoelectric Phenomena, Materials, and Applications. In: Annual Review of Materials Research 41, S. 433–448, 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314690

Stromkabel als Akkuersatz

Kabel und Drähte werden verwendet, um Strom zu übertragen, aber sie können auch Energie speichern – sofern sie von einem Superkondensator umhüllt sind.

Von Yury Gogotsi

Elektrische Leitungen versorgen Gebäude, Maschinen und Geräte mit Strom. Die insbesondere für mobile Anwendungen benötigten Energiespeicher sind davon unabhängige, meist Platz raubende Systeme. Im Juli 2014 beschrieben die Nanowissenschaftler Zenan Yu und Jayan Thomas von der University of Central Florida eine Kombination beider Welten (*Advanced Materials* 26, S. 4279–4285): ein Koaxialkabel, in dem ein Superkondensator einen Kupferkern umgibt und das deshalb Elektrizität sowohl leitet als auch zwischenspeichert.

Kondensatoren sind Bauelemente, welche die Ladung und die damit verbundene elektrische Energie zwischen zwei leitfähigen Oberflächen speichern, die nur einen geringen Abstand voneinander haben. Ihrer Kapazität liegt kein elektrochemischer Prozess in einem größeren Volumen zu Grunde wie bei einer Batterie oder einem Akkumulator. Vielmehr funktioniert der Speicherprozess, weil sie an ihren Elektrodenoberflächen Ionen nach der Polarität trennen und dort anlagern. Bei einem Abstand in atomaren Dimensionen erreichen Superkondensatoren eine hohe Kapazität, mithin eine große Energiedichte. Bei so genannten Pseudokondensatoren laufen zudem schnelle elektrochemische Reaktionen an den Oberflächen ab, aber eben nur dort.

Weil die Bewegung der Ladungsträger keine Diffusionsvorgänge erfordert wie bei Batterien, erfolgen diese Prozesse extrem schnell. Und da auch im Fall der Pseudokapazität keine komplexen chemischen Reaktionen notwendig sind, geht

deutlich weniger gespeicherte Energie verloren, und es sind bis zu einer Million Ladezyklen möglich.

Diese Technologie ist seit Jahren etabliert und wird vor allem in elektrischen Fahrzeugen verwendet, um Bremsenergie zwischenspeichern. Die Stadt Mannheim setzt solche Systeme bereits seit 2009 im öffentlichen Nahverkehr ein; Schanghai hat sein Bus-Netzwerk 2012 damit ausgestattet und berichtet über eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs um 30 Prozent.

Bislang sind solche Systeme aber in der Größenordnung herkömmlicher Speicherzellen geblieben. Auch hier leisten Yu und Thomas jetzt Pionierarbeit, denn ihre Kabel haben Durchmesser von etwa einem Millimeter. Dazu ließen sie Nanodrähte aus isolierendem Kupferoxid senkrecht auf der Oberfläche eines Kupferdrahts wachsen. Diese beschichteten sie mit einer Gold-Palladium-Legierung, die Strom sehr gut leitet; darauf wurde wiederum eine elektrochemisch aktive Schicht aus Manganoxid aufgebracht. Der resultierende bürstenförmige Aufbau ergab eine 100-mal größere Oberfläche als der Drahtkern allein. Die Nanodrähte bildeten die erste Elektrode des Superkondensators.

Als Nächstes beschichteten die Forscher diese mit einem festen Elektrolyten, also einem Ionen leitenden Material, auf den eine poröse Trennschicht aus Kunststoff kam. Die zweite Elektrode wurde auf gleiche Weise hergestellt. Weil die Nanodrähte hier aber auf einer Kupferfolie aufwuchsen, ließ sie sich um die erste Elektrode wickeln. In der resultierenden koaxialen Geometrie mit etwa einem Millimeter Durchmesser vereint dieses Kabel alle Komponenten eines Superkondensators. Messungen zeigten, dass der Kupferkern zumindest Gleichstrom bei geringer Spannung gut leitet.

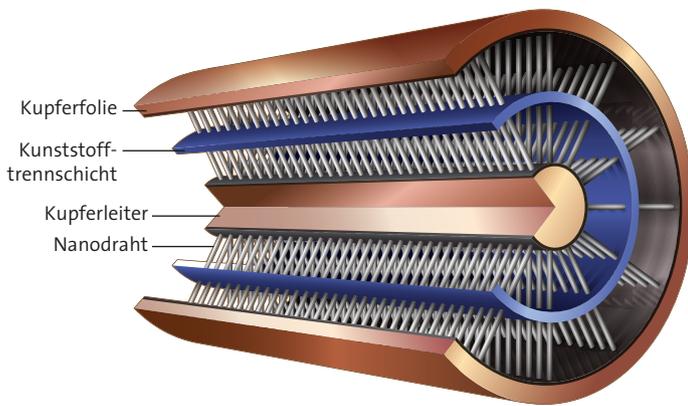
Yu und Thomas berichten von einer hohen Kapazität, solange nicht mehr als 0,5 Milligramm Manganoxid pro Quadratzentimeter eingesetzt wurde; bei dickeren Schichten ist sie deutlich kleiner, was die speicherbare Energiemenge begrenzt. Nach 5000 Lade-Entlade-Zyklen sank die Kapazität nur wenig: um lediglich ein Prozent.

Für eine praktische Anwendung muss ein solches Kabel aber auch mechanisch belastbar sein. Wird es zum Beispiel gebogen, dürfen die Elektroden nicht brechen oder direkt

AUF EINEN BLICK

WELT AM DRAHT

- 1 Superkondensatoren** speichern Ladungen in Strukturen atomarer Dimensionen. Daher haben sie eine hohe Kapazität.
- 2** Elektrochemische Umwandlungen spielen dabei keine Rolle, anders als bei Batterien. Daher erfolgen **Speichern und Freisetzen der Ladungen** extrem schnell.
- 3** Amerikanische Forscher haben nun **koaxiale Kabel** vorgestellt, die dank Nanotechnologie gleichzeitig Strom leiten und als Superkondensatoren fungieren.



GOGOTSI, Y.: ENERGY STORAGE WRAPPED UP. IN: NATURE 509, S. 568–570, 2014, FIG. 1

miteinander in Kontakt kommen, denn das hätte einen Kurzschluss zur Folge. Die Forscher deformierten ihre Anordnung bis zu 100-mal unter verschiedenen Winkeln und maßen danach eine weit gehend konstante Kapazität. Erst nach 100 Biegungen um 180 Grad fiel sie um etwa sieben Prozent ab.

Superkondensatoren fangen Verbrauchsspitzen ab

Da der Elektrolyt bei höheren Temperaturen zunehmend instabil wird, ist die Spannungsabgabe bisheriger Superkondensatorzellen auf ein bis drei Volt Gleichstrom begrenzt. Für Einsätze in Autos in Serie geschaltet, können somit die dort erforderlichen 12 bis 24 Volt erreicht werden. Das genügt auch für mobile elektronische Geräte wie Smartphones oder Kameras: Wird etwa ein Blitz ausgelöst, kann der Superkondensator diese Energie in Sekunden bereitstellen und so Verbrauchsspitzen von den Lithium-Ionen-Akkus fernhalten, was deren Haltbarkeit verlängert. Einige Forschergruppen arbeiten daran, den Elektrolyten durch so genannte ionische Flüssigkeiten zu ersetzen, also Ionenleiter, die bei Raumtemperatur flüssig sind. Deren höhere Stabilität würde bis zu fünf Volt erlauben.

Als Ersatz für Akkumulatoren fördern solche Systeme schon heute die weitere Miniaturisierung. Und als Ergänzung können sie die Zeit bis zur nächsten Aufladung und damit auch die Lebensdauer dieser elektrochemischen Energielieferanten verlängern. Ob die neuen Energie speichernden Kabel diesen Part einmal übernehmen, wird davon abhängen, ob preisgünstigere Materialien und ein serien-tauglicher Herstellungsprozess gefunden werden.

Vor allem dürfte die noch junge Technologie der erneuerbaren Energien dem Speicherkabel der amerikanischen Forscher neue Möglichkeiten eröffnen. So könnte man damit benachbarte Strom erzeugende Module verbinden, um ihre Leistungen zu harmonisieren, etwa wenn eine Wolke einige Solarzellen einer größeren Anlage verschattet. Weil die Kombination von Stromleitung und Ladungsspeicherung ein neues Konzept ist, lassen sich die Perspektiven noch kaum abschätzen.

Bei neuartigen Kabeln, die Strom leiten und elektrische Energie speichern können, ragen elektrochemisch aktive Nanodrähte aus einem Kupferleiter, der mit isolierendem Kupferoxid beschichtet ist (schwarz). Eine Lage Nanodrähte bildet die erste Elektrode dieses Superkondensators. Eine poröse Kunststoffschicht (blau) trennt sie von der zweiten Elektrode. Beide werden vor dem Zusammenbau mit einem Elektrolytgel beschichtet (nicht dargestellt), das sicherstellt, dass sie elektrisch miteinander verbunden sind.

Das gilt auch für den sich erst anbahnenden Markt für elektronisch aufgerüstete Textilien. Ein Beispiel wäre Kleidung, die den Gesundheitszustand überprüft und gegebenenfalls Alarm auslöst. Dazu müssen sich die Komponenten, also Leitungen, Batterien und Schaltungen, einweben lassen. Es gibt tatsächlich schon koaxiale Superkondensatordrähte für die textile Elektronik. Dabei wurde eine Mittenelektrode von 230 Mikrometer Durchmesser aus einem Bündel aus Kohlenstoffmikrofasern gefertigt und mit mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren beschichtet; ein dünnes Gewebe aus Kohlenstoffnanofasern diente als äußere Elektrode. Elektroden, die ausschließlich aus Kohlenstoff bestehen, sind sowohl leicht als auch stabil und könnten eventuell um Kupferdrähte gewickelt werden – auch um solche, die eine Schicht aus Kupferoxid um sich haben. Somit würden ähnliche koaxiale Anordnungen entstehen, wie Yu und Thomas sie nun vorgestellt haben. ~

DER AUTOR



Der ukrainische Materialwissenschaftler **Yury Gogotsi** forscht am A.J. Drexel Nanomaterials Institute der Drexel University in Philadelphia (US-Bundesstaat Pennsylvania).

QUELLEN

Jost, K., Dion, G., Gogotsi, Y.: Textile Energy Storage in Perspective. In: Journal of Materials Chemistry A 4, S. 10776–10787, 2012

Kwon, Y.H. et al.: Cable-Type Flexible Lithium Ion Battery Based on Hollow Multi-Helix Electrodes. In: Advanced Materials 24, S. 5192–5197, 2012

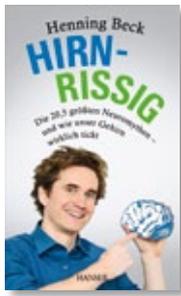
Yu, Z., Thomas, J.: Energy Storing Electrical Cables: Integrating Energy Storage and Electrical Conduction. In: Advanced Materials 26, S. 4279–4285, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1314691

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 509, S. 568–570, 29. Mai 2014



Henning Beck
Hirnrissig
*Die 20,5 größten Hirnmythen –
 und wie unser Gehirn wirklich tickt*
 Hanser, München 2014
 271 S., € 16,90

NEUROWISSENSCHAFTEN

Schlaumeiern mit Hirn

Ein Aufklärungsbuch für Neuroskeptiker.

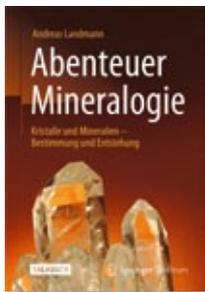
Nutzen wir nur zehn Prozent unseres Gehirns? Ist Intelligenz angeboren? Arbeiten die grauen Zellen wie ein Computer? Solche Neuromythen sind immer noch verbreitet. Nun nimmt sich der Neurobiologe und deutsche »Science Slam«-Meister Henning Beck der größten Legenden rund um die Hirnforschung an. Und kommt auf sage und schreibe 20,5.

Beck entlarvt diese Irrtümer sehr anschaulich und launig. Wenn auch mancher Scherz ein wenig bemüht erscheint (»Wir verplempern fast ein Drittel unseres Lebens damit, das Bewusstsein auszuschalten ... okay, manche Menschen machen das auch ohne Schlaf permanent«), der Versuch, Wissenschaft und Witz zu verbinden, ist aller Ehren wert.

Man stelle sich den idealen Leser dieses Buchs als jemanden vor, der schon immer geahnt hat, dass ihn um Aufmerksamkeit heischende Forscher und Medien hinters Licht führen wollen – und der nun nach kurzweiliger Bestätigung seines Verdachts sucht. Beck kann sich manche Häme über die Presse sowie über Neurowissenschaftler nicht verkneifen. Doch verzeiht man ihm das gern, denn sein aufklärerischer und gleichzeitig unterhaltsamer Stil entschädigt dafür. Da er nicht allzu tief in wissenschaftliche Details einsteigt, ist seine Übersicht eher für (neuroskeptische) Laien geeignet. Die jedes Kapitel illustrierenden Comics und das luftige Layout beugen Berührungsängsten zusätzlich vor. Wohl auch deshalb betont der Autor wiederholt, wie »klasse« und »cool« die Hirnforschung doch sei. Fazit: ein Buch für Schlaumeier und solche, die es werden wollen.

Steve Ayan

Der Rezensent ist Redakteur bei »Gehirn und Geist«.



Andreas Landmann
Abenteuer Mineralogie
*Kristalle und Mineralien –
 Bestimmung und Entstehung*
 Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2014
 235 S., € 19,99

MINERALOGIE

Widersprüche und Unklarheiten

Ein Mineraloge möchte seine Fachrichtung erzählerisch und fesselnd vorstellen, überzeugt dabei aber kaum.

Fachwissen sowohl verständlich als auch fehlerfrei an Laien weitergeben zu können, ist ein Wunsch, den viele Wissenschaftler hegen. Mit dem Buch »Abenteuer Mineralogie« wagt sich der Edelsteingutachter Andreas Landmann auf dieses schwierige Ter-

rain. Auf gut 230 Seiten möchte er den Lesern zeigen, wie vielseitig und spannend sein Fachgebiet ist.

Leider wird Landmann seinem Vorhaben nur schwer gerecht. Bis er endlich zu Kernfragen seines Gebiets vorstößt – Was ist ein Mineral? Wie unterscheidet

man Mineralien voneinander? –, ermüdet er das Publikum mit zahlreichen Details, deren Zusammenhang er nicht schlüssig aufzeigt. Nebensächlichkeiten wie die Versteinierung von Holz erläutert er in vielen Einzelheiten, während er bedeutende Prozesse wie die Bildung von Sedimentgesteinen verfälschend oberflächlich anreißt.

Auch enthält das Werk manchen Widerspruch. So definiert der Autor in Kapitel 5 Minerale als Produkte anorganischer Ausgangsstoffe. In Kapitel 3 aber behandelt er Bernstein, der als fossiles Harz ein organischer Stoff ist, ganz selbstverständlich als Mineral.

Das »Abenteuer« im Buchtitel bezieht sich auf Exkursions- und Reiseberichte, die Landmann in sein Buch aufgenommen hat. Seit 1999 hat er mehr als 350 geologische Exkursionen organisiert und geleitet. Es hätte dem Werk gut zu Gesicht gestanden, wenn der Autor diese Berichte deutlicher auf mineralogische Funde oder das Erlebnis ei-

ner erfolgreichen Mineralbestimmung fokussiert hätte.

Am Ende bleibt unklar, an welches Publikum sich das Buch richtet. Für Laien erscheint es unübersichtlich und schwer verständlich, für Fortgeschrittene enthält es zu wenig Information. Als Einstieg in die Mineralogie überzeugt es nicht – so listet das Literaturver-

zeichnis nur wenige und zum Teil recht alte Werke auf, die zudem kaum geeignet scheinen, sich in diese wirklich spannende Wissenschaft einzuarbeiten.

Wolf Rottke

Der Rezensent ist Geologe und mit Softwareentwicklung im Bereich der geologischen Beckenmodellierung befasst.



Achim Landwehr

Geburt der Gegenwart

Eine Geschichte der Zeit im 17. Jahrhundert

S. Fischer, Frankfurt am Main 2014

445 S., € 24,99

GESCHICHTE

Alles im Fluss

Ein Historiker beschreibt die Veränderung des Zeitbegriffs nach dem Ende des Mittelalters.

Der »Kriegs Mord und Todt Jammer und Noth Calender« des thüringischen Pfarrers Abraham Seidel (gestorben 1680) erfreute sich lange Zeit enormer Beliebtheit. Mehr als 170 Jahre lang, von 1678 bis 1849, fand das Werk Absatz. Das Besondere an ihm war, dass es nicht nur die damals übliche Auffassung bediente, wonach die menschliche Zivilisation seit den Zeiten des himmlischen Paradieses permanent im Abstieg begriffen sei und unausweichlich aufs Verderben zusteure. Sondern es stellte auch zeitgenössische politische Ereignisse in den Fokus und wandte den Blick somit der Gegenwart zu.

Der »Calender« markierte damit einen Paradigmenwechsel, wie der Historiker Achim Landwehr im vorliegenden Buch beschreibt. Im 17. Jahrhundert löste man sich langsam von der christlichen Heilsgeschichte, wonach die ferne Vergangenheit eine goldene gewesen sei, während sich in der jetzigen Zeit ein steter Niedergang vollzie-

he und Gott für die Zukunft den Weltuntergang und das jüngste Gericht vorherbestimmt habe. Die Reflexion der Gegenwart hatte in diesem Zeitschema fast keinen Platz gehabt – nun jedoch, in der Neuzeit, änderte sich die Situation. Man hatte blutige Konfessions- und Bürgerkriege überstanden, ebenso Wirtschaftskrisen, Klimaverschlechterungen und verheerende Seuchen. Sogar die Türkegefahr und die Pest, zuvor als göttliche Strafgerichte sowie als Aufruf zu Buße und Umkehr gedeutet, wusste man gegen Ende des 17. Jahrhunderts hinter sich. Es stimmte offenkundig nicht, dass alles immer schlechter würde, und auch die Apokalypse ließ trotz vieler Ankündigungen auf sich warten. Somit richtete sich die Aufmerksamkeit der Menschen verstärkt auf das Jetzt.

Landwehr belegt das an zahlreichen Beispielen – unter anderem am Pressewesen, das ab 1600 aufkam und in periodischen Abständen über gegenwärtige

Ereignisse berichtete. Im deutschsprachigen Raum erschienen gegen Ende des 17. Jahrhunderts bereits 60 Zeitungen, die sich vielfach an eine breite Öffentlichkeit wandten. Sie reflektierten aktuelle Begebenheiten, wirkten ihrerseits aber auch auf das Zeitgeschehen zurück.

Landwehr zufolge rief die bis dahin ungekannte Nachrichtenflut den Eindruck eines stetigen Zeitflusses hervor. Das gleichzeitige Wahrnehmen der Nachrichten seitens vieler Leser habe zudem das Gefühl einer gemeinsam geteilten Gegenwart erzeugt. Wer Schwierigkeiten damit hatte, die Lektüre zu verstehen, konnte auf Konversations- und Zeitungslexika zurückgreifen. Zu Landwehrs Belegen zählen auch historische Modejournale und Romane. Letztere waren zwar fiktiv, knüpften in ihren Handlungssträngen aber an die Gegenwart an.

Das Hauptaugenmerk richtet der Autor jedoch auf die Kalender, die seit dem 17. Jahrhundert mit leeren Blättern für eigene Notizen veröffentlicht wurden. Zuvor hatten in ihnen astrologische Informationen und lebenspraktische Hinweise dominiert, etwa zum Aderlass, zum Säen oder Ernten, die nun zu Gunsten beschreibbarer Seiten reduziert wurden. In der Gegend um Mecklenburg wurde 1682 sogar das Publizieren astrologischer Inhalte in Kalendern verboten.



Deckblatt des »Kriegs Mord und Todt Jammer und Noth Calenders«.

Neu war auch die mathematisch begründete Wahrscheinlichkeitsrechnung. Sie stellte der vorher heilsgeschichtlich hergeleiteten apokalyptischen Zukunft eine Vielzahl möglicher künftiger Entwicklungen gegenüber, die aus der Gegenwart heraus und auf Berechnungen gestützt postuliert wurden. Zwar waren die Ergebnisse fiktiv, aber durch ihre Verwurzelung im Jetzt keineswegs irrational.

Landwehr bietet in seinem Buch einen spannenden Einblick in die Kulturgeschichte des Zeitbewusstseins. Er zeigt zudem, dass es viele sich überschneidende Zeitsysteme gibt, die in

einer Kultur parallel existieren können. Das heute dominierende Konzept einer linearen Zeit (»Zeitstrahl«) ist nur eines von vielen möglichen. Weiterhin versucht der Autor, Parallelen zu unserer Gegenwart aufzuzeigen. Am Anfang des 21. Jahrhunderts, schreibt er, haben sich erneut apokalyptische Ängste ausgebreitet, nachdem die Fortschritts- und Wachstumsgläubigkeit vergangener Jahrzehnte verloren gegangen ist. Die Furcht vor der Katastrophe ist heute wohl begründeter als im späten Mittelalter, zumal wir unsere ökologischen und ökonomischen Probleme selbst verursachen. Dennoch ver-

hindern hochkomplexe ökologische, wirtschaftliche und soziale Mechanismen auch jetzt eine detaillierte Zukunftsprognose.

Das Werk liefert interessante Antworten auf die Frage, welche Folgen der Verlust vermeintlich sicheren Wissens hat, vor allem im Hinblick auf die Wirklichkeits- und Zeitwahrnehmung. Zudem zeigt es exemplarisch auf, wie historische Erkenntnisse die Gegenwart beeinflussen können.

Martin Schneider

Der Rezensent ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.



Bernd Sommer, Harald Welzer

Transformationsdesign

Wege in eine zukunftsfähige Moderne

Oekom, München 2014

240 S., € 19,95

NACHHALTIGKEIT

Gesund schrumpfen

Ohne eine Kultur des Verzichts gibt es keine nachhaltige Zukunft, schreiben Bernd Sommer und Harald Welzer.

Der Kulturwissenschaftler Bernd Sommer und der Soziologe Harald Welzer haben sich Großes vorgenommen: Sie suchen »Wege in eine zukunftsfähige Moderne«. Im vorliegenden Buch stellen sie solche vor. Unter »Transformationsdesign« verstehen die Autoren den Wandel der heutigen Ressourcenverschwendung zum Prinzip der Nachhaltigkeit. Das Wirtschaften und Zusammenleben, schreiben sie, müsse weg vom Leitgedanken des »Mehr«.

Welzer und Sommer beschreiben das Wesensmerkmal der »expansiven Moderne«: eine kontinuierliche Zunahme des Ressourcen- und Energieverbrauchs, die natürliche Lebensgrundlagen zerstört und in der auch »grünes

Wachstum« keine dauerhaft tragfähige Perspektive bietet. Auf 240 Seiten stellen die Autoren dar, warum es ihrer Ansicht nach einer »reduktiven Moderne« bedarf – einer Lebensweise also, die den heutigen zivilisatorischen Standard bewahrt, dabei aber ohne Wirtschaftswachstum, exzessiven Konsum und Raubbau an der Natur auskommt.

Man mag Zweifel haben, ob die westlichen Gesellschaften, auf die Welzer und Sommer ihre Analyse beschränken, zu der von den Autoren geforderten »Selbst-Deprivilegierung« bereit sind. Doch gelingt es den Verfassern in acht Kapiteln, plausibel zu machen, dass eine gesellschaftliche Transformation unausweichlich ist – ob wir sie nun wol-

len oder nicht. Die Frage, schreiben sie, sei lediglich, wie dieser Wandel passieren wird: »by design« (also kontrolliert) oder »by disaster« (also in einem katastrophalen Prozess).

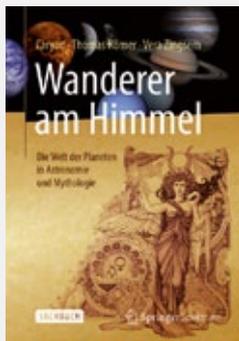
Die Autoren stellen zunächst die expansive Dynamik moderner Gesellschaften dar, die gekennzeichnet ist durch einen enormen Anstieg der Kaufkraft und des Wohlstands innerhalb weniger Jahrzehnte. Sodann gehen sie auf die bekannten Schattenseiten ein – vor allem eine nie da gewesene, irreversible Ausbeutung der Natur. Anschließend umreißen Sommer und Welzer die in ihren Augen alternativlose Transformation und vergleichen diese mit früheren (gelungenen) gesellschaftlichen Umwandlungen: von der neolithischen und industriellen Revolution über die Abschaffung der Sklaverei bis hin zur Frauenbewegung.

Fazit der Autoren: Die gegenwärtigen, technisch geprägten Zukunftsentwürfe greifen zu kurz. Welzer und Sommer sind überzeugt, dass selbst die Ökologiebewegung und ihre Institutionen – Forschungsinstitute, Nichtregierungsorganisationen und Parteien – sich einer expansiven Mainstreamkultur angepasst haben und fast noch begeisterter von »Ressourceneffizienz« und »grünem Wachstum« sprechen als mancher Wirtschaftsliberale. Was nach Ansicht der Verfasser jedoch keine Lösung bietet.



Religion & Wissenschaft

Spektrum-Sachbücher zu Weihnachten



2014. 350 S. 400 Abb. in Farbe. Geb.
ISBN 978-3-642-55342-4
€ (D) 29,99 | € (A) 30,83 | *sFr 37,50

Vera Zingsem, Thomas Römer, Caryad
Wanderer am Himmel

Von der Venus über den ringgeschmückten Saturn und bis hinaus zu den Zwergplaneten jenseits der Neptunbahn begeben sich die Autoren auf eine spannende Reise durch unser Planetensystem. Jedem astronomischen Kapitel folgt ein Kapitel zu den Mythen der Göttergestalten, die den Himmelskörpern ihre Namen geben. Die Krönung des Buches sind nicht zuletzt die speziell für dieses Buch angefertigten Zeichnungen der beliebten Illustratorin Caryad. **Ein wundervoller Brückenschlag zwischen Astronomie und Mythologie**

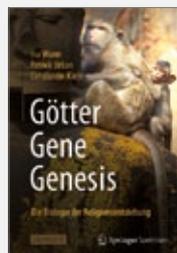
€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. Die mit * gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.



2014. 130 S. Geb.
ISBN 978-3-642-55349-3
€ (D) 24,99 | € (A) 25,69 |
*sFr 31,50

Reiner Kümmel
Die vierte Dimension der Schöpfung

Ist Gott, wie ihn der christliche Glaube bekennt, vereinbar mit dem naturwissenschaftlichen Weltbild? Der Autor, Prof. der theoretischen Physik, setzt sich in seinem Buch unterhaltsam und tief sinnig mit dieser Frage auseinander.



2014. 271 S. 110 Abb. Geb.
ISBN 978-3-642-55331-8
€ (D) 24,99 | € (A) 25,69 |
*sFr 31,50

I. Wunn, P. Urban, C. Klein
Götter – Gene – Genesis

Ist Gott in den Genen zu finden? Ist Religion göttlichen Ursprungs – oder doch ein natürliches, also biologisches Phänomen? Und wenn Religion in unserer Biologie angelegt ist, wie und warum ist sie entstanden? Dieses Buch liefert spannende Antworten!



2014. XXX, 143 S. 3 Abb.
Brosch
ISBN 978-3-642-37771-6
€ (D) 14,99 | € (A) 15,41 |
*sFr 19,00

J. Anderson Thomson, Clare Aukofer
Warum wir (an Gott) glauben

Der Mensch ist Gottes Schöpfung? – Nein, sagen die Autoren: Der Mensch hat sich die Götter geschaffen! Sie liefern mit ihrem Buch eine kurze und präzise, leicht lesbare Einführung in die Wissenschaft der Religion.

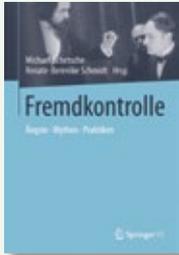


2014. XIII, 283 S. Brosch.
ISBN 978-3-642-41758-0
€ (D) 19,99 | € (A) 20,55 |
*sFr 25,00

Wolfgang Wickler
Die Biologie der Zehn Gebote und die Natur des Menschen

Können Biologen etwas dazu beitragen, die Grundlagen der zehn Gebote zu verstehen? Der Verhaltensforscher Wolfgang Wickler beleuchtet in seinem Buch theologische Fragen aus Sicht der Naturwissenschaften.

Einfach bestellen: SpringerDE-service@springer.com



Michael Schetsche, Renate-Berenike Schmidt (Hg.)

Fremdkontrolle. Ängste – Mythen – Praktiken

Springer VS, Wiesbaden 2014. 278 S., € 39,99

Werden wir bisweilen von außen gesteuert? Die Furcht davor ist verbreitet und bereitet den Boden für diverse Mythen und Praktiken wie den Exorzismus. Die Autoren liefern einen facettenreichen Abriss des Themas. Sie gehen etwa auf Gehirnwäsche ein, die CIA-Mitarbeiter mittels Hypnose durchführten – unterstützt von Elektroschocks und Drogen. Diese Praktiken werden manchmal als Steuerung von außen aufgefasst, ebenso die tiefe Hirnstimulation, die es erlaubt, die Stimmung eines Probanden zu verändern. Auch die Frage, inwieweit das Strafrecht noch gilt, wenn Traumata, Drogen oder psychische Erkrankungen ein selbstbestimmtes Handeln unterbinden, diskutieren die Verfasser. Ihr Buch umspannt das weite Feld der Fremdsteuerung recht überzeugend. Das Fazit: Kontrolle von außen ist zwar möglich, aber nur eingeschränkt. »Fremdkontrolle« richtet sich in erster Linie an fachnahe Leser. ELISABETH STACHURA



Michael Höveler-Müller

Hieroglyphen lesen und schreiben – In 24 einfachen Schritten

C.H. Beck, München 2014. 256 S., 14,95 €

Der Ägyptologe Michael Höveler-Müller leitet seit 15 Jahren Kurse, in denen er die ägyptische Hieroglyphenschrift vermittelt. Das merkt man seinem Buch an: Er kommt Einsteigern sehr entgegen, indem er einen verständlichen Schreibstil pflegt, didaktisch geschickt vorgeht und die komplizierte Grammatik des Altägyptischen weit gehend ausklammert. Auf eine Einleitung zur Geschichte der Hieroglyphen folgen acht Lektionen, die nach »Lebensräumen« der Ägypter – wie Grab, Haus und Tempel – unterteilt sind. Ergänzend hat der Autor Übungen dazugestellt, deren Lösungen sich im Anhang finden. Mit fortschreitender Seitenzahl steigt der Anspruch, und wer Hieroglyphen wirklich lesen lernen möchte, sollte diese Übungen gewissenhaft durcharbeiten. Es wäre übertrieben zu erwarten, am Ende des Buchs die Schriftzeichen zu beherrschen – für einen guten Einblick jedoch reicht es allemal. Zudem beschreibt der Autor sehr anschaulich das Leben und die Denkweise der alten Ägypter. FENJA SCHMIDT



Sonia Fernández-Vidal

Quantic Love

Aus dem Spanischen von Kristin Lohmann. Hanser, München 2014. 240 S., € 15,90

Die klassische Ausgangslage eines Romans für junge Frauen: eine 18-jährige Protagonistin, die sich zwischen zwei grundverschiedenen, aber gleichermaßen attraktiven Männern entscheiden muss. Das Besondere ist, dass Sonia Fernández-Vidal ihren Roman an der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN spielen lässt. Die promovierte Quantenphysikerin hat selbst dort gearbeitet und kann die Atmosphäre des Ortes gut einfangen. Die Protagonistin ihres Buchs heißt Laila, ist Kellnerin und führt zahlreiche Gespräche mit CERN-Wissenschaftlern, die oberflächliche, aber leicht verständliche Einblicke in die moderne Physik vermitteln. Dies sorgt – neben etlichen Anekdoten aus dem Leben berühmter Physiker – dafür, dass die Leser sowohl romantische Verwicklungen genießen als auch die Physik aus ungewöhnlichem Blickwinkel erleben können. KATRIN HOCHBERG



Renata Salecl

Die Tyrannei der Freiheit – Warum es eine Zumutung ist, sich anhaltend entscheiden zu müssen

Aus dem Englischen von Yvonne Badal. Blessing, München 2014. 237 S., € 16,99

Die Philosophin und Soziologin Renata Salecl erörtert, wie uns der ständige Zwang, Entscheidungen treffen zu müssen, unglücklich macht. Im ersten Drittel ihres Buchs beleuchtet sie dieses Problem noch aus verschiedenen Perspektiven, später leider nur noch aus Sicht der Psychoanalyse. Dadurch mangelt es dem Werk an Einbettung. Oft untermauert die Autorin ihre Hypothesen mit Patientengeschichten. Das macht den Text zwar interessanter, aber zu manchen Behauptungen würden harte Zahlen besser passen – etwa zu der Aussage, dass die Häufigkeit von Psychosen zunimmt. Ein wenig absurd muten jene Anekdoten an, die nicht von realen Personen handeln, sondern von Romanfiguren. Salecl zitiert hin und wieder aus einschlägigen Büchern, die offenbar deutlich konkreter darlegen, wie uns die Möglichkeiten der Freiheit überfordern. Statt des vorliegenden Werks lieber diese zu lesen, ist dann vielleicht doch eine gute Entscheidung – zumindest für all jene, die nicht für Psychoanalyse schwärmen. JÖRG WIPPLINGER

Der Gegenentwurf der Autoren sieht tief greifende Veränderungen in fast allen Lebensbereichen vor: Wirtschaft, Mobilität, Ernährung, Zeitnutzung, Besitz und Beziehungsstrukturen. Sein Kerngedanke ist der Konsumverzicht und die Etablierung völlig neuer Sozialstrukturen. Welzer und Sommer umreißen anhand zahlreicher Beispiele, was das konkret bedeutet: von »Einübungen des Weglassens« über den Leitgedanken »reduzieren, aufarbeiten, wie-

derverwenden« bis hin zu verkürzten Arbeitszeiten.

Ob man diese Visionen teilt oder nicht, die Ausführungen sind in jedem Fall ausgesprochen interessant und regen zum Nachdenken an. Dies vor allem, weil die Autoren eben keine (kurzfristigen) technischen Lösungen anbieten, sondern den Weg in eine nachhaltige Zukunft vor allem mit sozialwissenschaftlichen Ansätzen suchen, – und weil ihr Ton dabei stets an-

genehm unaufgeregt bleiben. Welzer und Sommer prognostizieren für die bevorstehende Transformation glasklar: Selbst in einem Wandel »by design« wird es Konflikte geben, erzwungene Verschiebungen von Machtverhältnissen und – ja, auch gewaltsame Auseinandersetzungen.

Tim Haarmann

Der Rezensent ist Meeresgeologe und arbeitet in Bonn.



Geheimnisse der Erde
Die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft unseres Planeten

Discovery Channel 2013
 2 DVDs, Laufänge insgesamt 400 Minuten,
 € 16,99

GEOLOGIE

Zwischen Naturwundern und Apokalypse

Zwei Wissenschaftler gehen der Frage nach, wo und wie sich in naher Zukunft globale Naturkatastrophen ereignen könnten.

Was haben der Krakatau in Indonesien, die hawaiischen Inseln und Japan gemeinsam? Es sind allesamt Orte, an denen eine globale Katastrophe ihren Ausgang nehmen könnte. Was an ihnen gefährlich ist, erkunden die Biologin Liz Bonnin und der Geologe Martin Pepper auf insgesamt acht Expeditionen. Zusammen mit Experten fahnden die beiden Wissenschaftler in den genannten Regionen nach geologischen, biologischen und geschichtlichen Indizien. Dabei erheben sie sich in die Luft, besteigen Berge, tauchen durch faszinierende Unterwasserwelten und trotzen Hitze und Eis.

In Indonesien prüfen die beiden Wissenschaftler das Potenzial des Vulkans Krakatau, mit einem Ausbruch die Menschheit um Jahrhunderte zurück-

zuwerfen. Auf Hawaii beschäftigen sie sich mit der Gefahr enormer Flutwellen, die entstünden, würden große Teile der Inseln abbrechen und ins Meer rutschen. Die resultierenden Wogen könnten noch in 4000 Kilometer Entfernung die Westküste Amerikas überfluten – das belegen historische Daten. Wieder ganz woanders, nämlich rund um die japanischen Inselketten, stoßen vier Kontinentalplatten aufeinander. Bonnin und Pepper erkunden das hier lauernde Risiko gewaltiger Seebeben. Spannend ist auch der Besuch am Ames Research Center der NASA, wo Wissenschaftler den Einschlag des Meteoriten nachstellen, der vor 65 Millionen Jahren die Ära der Dinosaurier beendete.

Mit einfachen Experimenten erklärt Pepper die jeweils beteiligten geologi-

schen Vorgänge. Mit einer Metallplatte und einem Schweißbrenner demonstriert er, wie entlang der hawaiischen Inselkette immer neue Vulkane entstehen. Dass der Ausbruch eines einzelnen isländischen Feuerbergs die ganze Erde verdunkeln kann, verdeutlicht der Wissenschaftler mit Hilfe von Hitze, feinem Aschestaub und Wasser. Derweil sucht seine Kollegin Bonnin nach Hinweisen auf frühere weltweite Katastrophen, wobei sie eingehend Flora und Fauna analysiert und sich häufig unter Wasser begibt.

Die vom Discovery Channel produzierte Dokumentation erhebt keinen hohen wissenschaftlichen Anspruch, sondern möchte in erster Linie unterhalten. Die nicht immer ganz gelungenen Animationen von Flutkatastrophen, vereisten Großstädten und donnernden Aschewolken wirken manchmal etwas reißerisch – ein Eindruck, der durch häufige Wiederholung noch verstärkt wird. Da für den amerikanischen Markt produziert, konzentriert sich die Dokumentation auf die potenziellen Auswirkungen globaler Katastrophen für US-Bürger. Wer sich daran nicht stört und auch die Synchronisation verkraftet, die direkt über den Originalton gesprochen wurde, findet auf den beiden DVDs 400 Minuten gute Unterhaltung, schöne Bilder und viele kleine Einblicke in die Geologie.

Janina Horst

Die Rezensentin hat Biochemie studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



Robin Haring

Der überforderte Patient*Gesund bleiben im Zeitalter der Hightech-Medizin*

C.H. Beck, München 2014

203 S., € 14,95

MEDIZIN

Wegweiser auf dem Gesundheitsmarkt

Von den Nach- und Vorteilen der modernen Versorgung.

Wer heute krank ist oder glaubt, es zu sein, sieht sich mit einer kaum überschaubaren Fülle an diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten konfrontiert. Was davon ist in welchen Fällen sinnvoll? Führen mehr Diagnose und mehr Behandlung auch zu mehr Gesundheit? Und was bedeuten Begriffe wie Epigenetik oder personalisierte Medizin? Der Demograf und Epidemiologe Robin Haring nimmt sich dieser Fragen an. Differenziert widmet er sich den Entwicklungen der Hightech-Medizin, entlarvt übertriebene Versprechen und Erwartungen, stellt aber ebenso heraus, wie leistungsfähig die neuen Verfahren sein können. Oft bezieht er sich dabei auf aktuelle Studien, die er nach ihrer Aussagekraft gewichtet.

Kritisch, pointiert und nie reißerisch greift Haring Themen auf, die in der Öffentlichkeit oft problematisiert, aber selten sachlich erörtert werden. So schreibt er zum Beispiel, dass die Grenzwerte für Blutdruck, Cholesteringehalt und andere Größen immer weiter gesenkt werden, weshalb mehr und mehr Menschen als krank gelten und Medikamente verschrieben bekommen – was Pharmaunternehmen einen größeren Profit beschert. Das Buch wirft ein Schlaglicht auf Interessenkonflikte von Kommissionsmitgliedern, erklärt andererseits aber auch, welchen Zwängen unser Gesundheitsmarkt unterliegt und dass niedrigere Grenzwerte

durchaus das Risiko für Herzerkrankungen senken können.

Während viele Medien die »medizinische Unterversorgung« geißeln, leiden wir laut dem Autor vielmehr unter einer Überversorgung. So kämen Diagnoseverfahren und Therapien vielfach selbst dann zum Einsatz, wenn sie für den Einzelnen eher eine Belastung als einen Nutzen bedeuten. Das Screening auf Prostatakrebs etwa bietet zwar die Chance, zeitig entdeckte Erkrankungen wirksamer zu behandeln – liefere aber auch zahlreiche falsch-positive Diagnosen, verunsichere damit Menschen, die gar nicht krank sind, und führe zu überflüssigen Behandlungen mit schädlichen Nebenwirkungen. Ebenso untergrabe der Trend, bereits wegen Kleinigkeiten sofort einen Arzt zu konsultieren, ein vernünftiges Verhältnis zu Gesundheit und Krankheit.

Eine wichtige Botschaft lautet, dass jeder Einzelne für sein Wohlergehen verantwortlich ist. Das beginnt bei Entscheidungen zum persönlichen Lebensstil und endet beim informierten Arztbesuch. Haring ermuntert seine Leser, sich über Therapien, Diagnosen, Erfolgchancen und Risiken schlau zu machen und dabei ruhig auch das Internet zu nutzen. Jedoch warnt er vor dem »Morbus Google«, der Gefahr, dass man nach einer Internetrecherche plötzlich simple Kopfschmerzen für einen Hirntumor hält oder ein Kribbeln in den Beinen als Vorboten von multip-



FOTOLIA / DAN RACE

ler Sklerose deutet. Wichtig sei, aus den vielen Informationen die glaubwürdigen und relevanten herauszufiltern und sinnvoll anzuwenden. Eine Hilfe können dabei die Links sein, die Haring angibt.

Obwohl das Buch anspruchsvolle Themen behandelt, ist es so locker und anschaulich geschrieben, dass auch medizinische Laien es verstehen und mit Freude lesen können. Dazu tragen übersichtlich gestaltete Grafiken bei, die Zusammenhänge auf einen Blick verdeutlichen. Wer sich genauer über die erwähnten Studien informieren möchte, findet Quellenangaben im Anhang.

Elena Bernard

Die Rezensentin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Mehr Rezensionen finden Sie unter

www.spektrum.de/rezensionen



Neil Shubin
Das Universum in dir
 Eine etwas andere Naturgeschichte
 Aus dem Englischen von Sebastian Vogel
 S. Fischer, Frankfurt am Main 2014
 302 S., € 21,99

PALÄONTOLOGIE

Durch vergangene Äonen

Der Paläontologe Neil Shubin legt eine außergewöhnliche Naturgeschichte vor – und überzeugt einmal mehr als Autor fesselnder Sachbücher.

»Farishs Überschwang ließ mich vergessen, wie absurd es eigentlich war, sich so über die Entdeckung eines Zahnes zu freuen, der nicht viel größer war als ein Körnchen Sand (...) Der winzige Zahn stellt die Verbindung zwischen uns und einer längst vergangenen Welt dar.« Mit solchen Worten beschreibt

Fossilien stammen und was sie uns über frühere Welten verraten. Auch auf berühmte Paläontologen und ihre wissenschaftlichen Leistungen geht er ein.

Wir Menschen, so das Fazit, tragen unzählige Spuren der Vergangenheit in uns. In diese Kerbe schlug Shubin schon früher. In seinem viel beachteten Buch

Wir Menschen, so das Fazit des Buchs, tragen unzählige Spuren der evolutionären Vergangenheit in uns

der amerikanische Paläontologe Neil Shubin, was er auf seiner ersten Expedition in die Arktis erlebte. 1986 reiste er mit drei weiteren Forschern in entlegene Winkel Grönlands, um nach fossilen Überresten von Organismen zu suchen, die evolutionär zwischen Reptilien und Säugern standen. Packend schildert Shubin die Enttäuschungen, Strapazen und euphorischen Momente des Unternehmens.

Doch dient ihm das nur als Einstieg, um einen ganz großen Wurf zu versuchen. Beginnend bei der Entstehung des Mondes vor 4,5 Milliarden Jahren bis zum Aussehen der Welt vor 200 Millionen Jahren unternimmt er einen Streifzug durch vergangene Äonen. Dabei präsentiert er zahlreiche astronomische, geologische und paläontologische Fakten. Er erörtert die Entstehung organischer Moleküle, behandelt die Verschiebungen der Kontinente und die Veränderungen im atmosphärischen Sauerstoffgehalt; er erklärt, woher die

»Der Fisch in uns« zeigte er vor einigen Jahren glänzend auf, dass in unseren Körpern überall noch der Bauplan der Fische erkennbar ist, aus denen wir evolutionär hervorgegangen sind.

Trotz der hohen Faktendichte überfordert »Das Universum in dir« seine Leser nicht. Shubin pflegt eine durchweg laienverständliche Sprache und einen erzählenden, eingängigen Stil. Auf Fachtermini verzichtet er weitestgehend. Leider ist das Werk nur mit kleinformatischen Schwarz-Weiß-Fotos bebildert, häufig aus der eigenen Sammlung des Autors. Farbige Abbildungen, größere Karten und gehaltvollere Infografiken hätten den Text besser unterstützt und auch intensiver das Gefühl vermittelt, an Shubins Zeitreise teilzuhaben. Trotzdem überzeugt das Werk als gelungene Mischung aus Sachbuch und Novelle.

Rosana Erhart

Die Rezensentin ist Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

WWW.SPEKTRUM.DE



**GEHIRN
UND GEIST**



Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hrsg.)

Kinder brauchen Nähe

Sichere Bindungen aufbauen und erhalten

Dieses Buch ist kein Erziehungsratgeber im üblichen Sinn. Vielmehr präsentiert es wichtige Ergebnisse der Bindungsforschung und leitet daraus ab, wie sich eine vertrauensvolle Beziehung zu Kindern aufbauen lässt. Dabei ist eine sichere Bindung nicht nur entscheidend für eine gelingende Erziehung. Sie fördert auch nachweislich die seelische Gesundheit und den sozialen Erfolg im späteren Leben.

Vor diesem Hintergrund bietet »Kinder brauchen Nähe« vertiefte Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in wissenschaftlich fundierten und gleichzeitig unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.

2012. 160 Seiten, 27 Abb., kart.
 € 19,99 (D) / € 20,60 (A)
 ISBN 978-3-7945-2872-1

Jetzt bestellen!

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



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

 **Schattauer**
www.schattauer.de



Spektrum Spezial Archäologie · Geschichte · Kultur 1/2014

Denke ich an das alte Ägypten, kommen mir sofort die Pyramiden und Tempel in den Sinn, goldene Grabbeigaben, geheimnisvolle Hieroglyphentexte und natürlich die Mumien der Pharaonen. In dieser gängigen Vorstellung erscheint der Nilstaat als monumentaler Koloss: beeindruckend und gleichzeitig unbeweglich, jeglicher Veränderung abhold. Umso faszinierender fand ich das ganz andere Bild, das dieses Spezialheft zeichnet. Die Autoren dokumentieren, wie stark fremde Völker das Reich am Nil beeinflussten. In Zeiten der Stärke wurden sie integriert, um ihre besonderen Fertigkeiten zu nutzen, in Zeiten der Schwäche entzogen sie sich der Kontrolle oder übernahmen gar die Herrschaft. Wer weiß, welche Überraschungen das Pharaonenreich noch bereit hält?

Klaus-Dieter Linsmeier / Redakteur



Spektrum Spezial Physik · Mathematik · Technik 3/2014

Wir fahnden in den Tiefen des Alls nach der zweiten Erde, simulieren in Teilchenbeschleunigern das Universum kurz nach dem Urknall und warten mit Sehnsucht auf die Weltformel, die endlich alles erklären soll. Angesichts solcher Sensationen verlieren wir zuweilen den neugierigen Blick auf unsere ganz alltägliche Umwelt. Wie H. Joachim Schlichting, viel gefragt als Vortragsredner und bis vor Kurzem Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster, diesen wieder schärft, finde ich in höchstem Maß bewundernswert. Er selbst hat das Staunen darüber, dass die Dinge sind, wie sie sind, nicht verlernt. Im Gegenteil: Wohin er auch blickt, sieht er fasziniert die Naturgesetze am Werk. Und geht den Dingen nachdenkend, experimentierend und recherchierend auf den (physikalischen) Grund. Dabei begleitet man ihn je länger, je lieber und fängt plötzlich selbst an, wieder zu staunen.

Thilo Körkel / Redakteur



Spektrum Spezial Biologie · Medizin · Hirnforschung 3/2014

Als Redaktionsleiter für die Sonderhefte bin ich natürlich von jedem einzelnen überzeugt und halte es für gut und lesenswert. Trotzdem gibt es gelegentlich eines, das mir besonders ans Herz gewachsen ist. In diesem Jahr war das die Ausgabe zum Thema »Mensch 2.0«. Wir erleben ja hautnah, in welch atemberaubendem Tempo der wissenschaftlich-technische Fortschritt uns neue Möglichkeiten erschließt. Das macht auch vor dem menschlichen Körper nicht Halt. So vermag die Medizin mit Medikamenten und Prothesen in wachsendem Maß Fähigkeiten wiederherzustellen, die durch Krankheit, Unfall oder Alter verloren gegangen sind. Doch am Horizont zeichnen sich Entwicklungen ab, die weit über das hinausgehen. Schon heute lassen sich Konzentration und Denkvermögen mit Drogen steigern. Die Intelligenzpille scheint keine Sciencefiction mehr. Und werden die elektronischen Systeme, deren Wissen und Rechenkraft wir derzeit noch mit einem Fingerklick abrufen, demnächst in unser Gehirn integriert? Welche ethischen und gesellschaftlichen Folgen hat das? Solche Fragen lassen wohl niemanden unberührt.

Gerhard Trageser / Redaktionsleiter



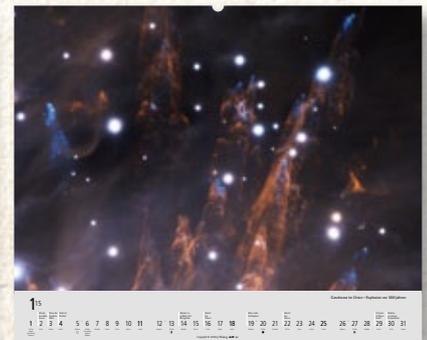
Spektrum neo Nr. 8/2014

Im Frühjahr 2014 besuchten Clara, Oscar und Tobias, alle zwischen 11 und 13 Jahre alt, das Karlsruher Institut für Technologie. Die drei waren wohl die bislang jüngsten »Reporter«, die ein paar Runden in einem selbstfahrenden Auto drehen durften. Anschließend löcherten sie die Wissenschaftler vor Ort mit ihren Fragen: Wie sicher ist so ein Roboter auf vier Rädern? Wann wird die Technik ausgereift sein – werden die Fahrer vielleicht gar keinen Führerschein mehr brauchen? Dieses Interview ist für mich ein Highlight in der achten Ausgabe von »Spektrum neo«, dem Wissenschaftsmagazin für junge Leserinnen und Leser aus dem Hause »Spektrum«. In dem Heft dreht sich alles um Roboter und künstliche Intelligenz. Es beschreibt, wie virtuelle Schildkröten ihren Weg finden, und berichtet über Maschinen im Weltall, in Fabriken und unter Wasser sowie über intelligente Technik, die schon heute älteren oder kranken Menschen das Leben erleichtert. Obwohl das alles für Wissenschaftsfans ab zehn Jahren geschrieben ist, fand auch ich es äußerst spannend.

Joachim Retzbach / Redakteur



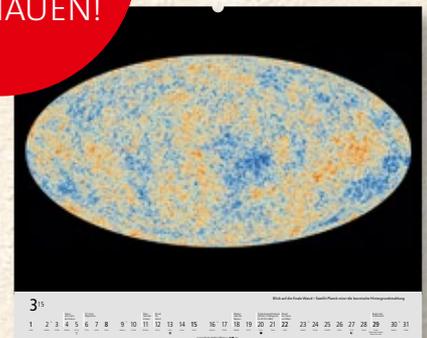
www.spektrum.de/lesershop



**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 Staubbenebeln 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!

Kopernikus und die Folgen

Dennis Danielson, Professor für englische Literatur, und der Physikprofessor Christopher Graney erläuterten als Kenner der kopernikanischen Wende, dass auch die zeitgenössischen Astronomen dem neuen Weltmodell zunächst nicht folgen wollten. (»Kopernikus – Revolution mit Hindernissen«, Oktober 2014, S. 54)

MIKE CALDWELL



Wolfgang Wildgen, Bremen: Die Autoren zeigen viel Verständnis für die Ablehnung der Innovation des Kopernikus. Diese hatte immerhin fast 300 Jahre Bestand, und das in einer Zeit des raschen wissenschaftlichen Fortschritts. Große intellektuelle Persönlichkeiten, die schon früh den Kopernikanismus verteidigt haben, wie Giordano Bruno, Johannes Kepler und Galileo Galilei, erscheinen im Kontrast dazu als leichtsinnige Fantasten.

Dies bedarf einer Korrektur: So war die ptolemäische Konstruktion bereits vor Kopernikus als recht willkürliches Konstrukt durchschaut, das Bewegungsformen annahm, die in natürlichen Systemen nie beobachtet wurden, etwa gegenläufige Bewegungen von Planeten und verschobene Kreiszentren. Das geschah schon in der arabischen Astronomie bei Ibn al-Shāṭir (1304–1375). Die Konstruktion von Tycho Brahe war relativ trivial, und mehrere zeitgenössische Astronomen wie Ursus

Nikolaus Kopernikus (1473–1543) stellte die heliozentrische Theorie auf, der zufolge die Erde um die Sonne kreist statt umgekehrt.

hatten einen vergleichbaren Kompromiss vorgeschlagen.

Die Autoren haben allerdings Recht, wenn sie sagen, dass die Frage auf Grund von Beobachtungen und Berechnungen lange Zeit nicht eindeutig entscheidbar war. Aber welche astrophysikalische Theorie kann schon endgültig bestätigt werden? Es gibt neben den technischen auch philosophische und weltanschauliche Fragen, die im Zusammenhang des Kopernikanismus relevant waren – das heißt, auch andere Disziplinen durften sich einmischen. Dies taten die Theologen aller christlichen Organisationen; und der Versuch Galileis und anderer, den Kopernikanismus mit der Heilslehre zu versöhnen, führte zu seiner Verurteilung. Giordano Bruno hat keine astronomische Kompetenz beansprucht, zog aber die philosophischen Konsequenzen aus dem Kopernikanismus. Mit seiner Verurteilung in Rom wurde ihm (und allen anderen) das Recht darauf verwehrt. Die Macht der religiösen Bevormundung darf besonders für die Zeit bis zur Aufklärung nicht unterschätzt werden. Der Artikel verharmlost deshalb den Konflikt, den das Buch des Kopernikus ausgelöst hat.

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

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

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

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Finkelde (Bild des Monats); 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. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Christine Kemet, Claudia Kryzstofiak, Katharina Neuser, 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: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 35 vom 1.1. 2014.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2014 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, 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.



Keine »German Angst«

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

Dieter Meinert, Osterbrock: Zu den Schadstoffemissionen aus dem Bohrloch: Die Methanemissionen sind zwar endlich, aber ein zusätzlicher Klimaschadfaktor, und die Verweildauer in der Atmosphäre ist wesentlich größer als die Nutzungsdauer der nichtkonventionellen Öl- und Gasquellen, also eine weitere Altlast für unsere Nachfahren. Schlimmer als die Methanemissionen sind jedoch die zu befürchtenden und in den USA nachgewiesenen Schadstoffemissionen in das Trinkwasser: Die Bohrungen zum Aufschluss der neuen Öl- und Gasquellen führen zwangsläufig durch Grundwasserleiter. Und absolute dichte Bohrungen kann es prinzipiell nicht geben, vor allem, wenn das Ziel gerade das Gegenteil, nämlich das Aufbrechen von Schichten, ist. Die freigesetzten Stoffe steigen auch an den Förderlöchern vorbei auf und bringen die für das Fracking verwendeten Stoffe wieder mit hoch.

Zur Notwendigkeit der Nutzung fossiler Brennstoffe für unseren »Technologiestandort«: Intelligente Nutzung aller Energiequellen würde den umgehenden Ausstieg aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe erfordern, da der Technologiestandort gerade durch Innovation hervorstechen sollte, nicht durch krampfhaftes Verharren auf frühindustrieller, somit veralteter Technologie. Der Technologiestandort, speziell die chemische Industrie, ist auch dann auf Öl angewiesen, wenn der Energiehunger in vielleicht 20 oder erst in 100 Jahren die letzten nutzbaren Vorräte verbrannt hat.

Hier ist keine »German Angst« im Spiel, sondern die realistische Einschätzung, dass eine kurzfristige scheinbare Entlastung des fossilen Brennstoffmarktes mit Gewinnen für wenige derart hohe Folgekosten für die Allgemeinheit und Zukunft bedeutet, dass dies nicht zu verantworten ist. Die Förde-

rung durch Fracking liefert keine günstige Energie, da die Fördertechnologie selbst teurer ist als bisher angewandte Methoden. Der Preissenkung(schein-)effekt beruht lediglich darauf, dass fossile Brennstoffe mittlerweile so teuer geworden sind, dass es sich für die Industrie lohnt, teurere Fördertechniken zu verwenden; sowie darauf, dass weiterhin unersetzliche Ressourcen als quasi gottgegeben ausgenutzt werden, ohne den tatsächlich entstehenden Schaden zu bezahlen.

Gerontologische Raserei und Alterstristesse

Selbstwahrnehmung und Zeiterleben sind augenscheinlich untrennbar miteinander verbunden, konstatierte der Psychologe Marc Wittmann. (»Wie unser Gefühl für die Zeit entsteht«, Oktober 2014, S. 24)

Oliver Harder, München: Die zunehmende Monotonie des Daseins ist gemäß dem besagten Beitrag ursächlich für ex post beschleunigt empfundene Zeitverläufe im fortgeschrittenem Lebensalter. Andererseits führt hier beim aktuellen Zeiterleben explizit die Eintönigkeit physischer Selbstreflexion zur gefühlten temporalen Dehnung. So mag sich an Stelle der gerontologischen Zeitraserie eher langlebige Langeweile einstellen.

Unabhängig davon, ob man dieser etwas eigenwilligen Einwendung folgt, möchte ich mit dem von mir als relative Zeiterfahrung bezeichneten Ansatz ein weiteres, eher pragmatisches Verständnis zur senilen Zeitflucht vorschlagen: Je länger die Lebensspanne, desto weniger fallen in Relation dazu kurze, weitere Perioden ins Gewicht. Mögen bei einem Teenager wenige Jahre noch einen erheblichen Prozentsatz an der memorierten Lebenszeit jenseits der diesbezüglich kaum manifestierten frühkindlichen Erinnerungen ausmachen, schrumpft dieser Anteil mit zunehmendem Alter. Die empfundene Dauer eines vorangegangenen Abschnitts bemisst sich danach stets am Verhältnis, wie dieser zur aktuellen Ge-

VERNETZEN SIE SICH MIT IHREM »SPEKTRUM«!



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus

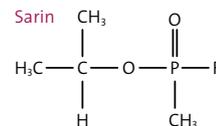


www.spektrum.de/twitter

samtlebenszeit – eben zur erworbenen Zeiterfahrung – steht. Je kleiner diese Relation, desto tendenziell schneller scheint die betreffende Periode vergangen zu sein; analog zu dem Multimillionär, dessen gefühlter Wohlstand durch die nächste Million, verglichen zu seiner ersten, weniger anwächst.

Erratum

»Giftgas gegen den Feind«, September 2014, S. 46



Die Formel von Sarin auf S. 48 war nicht ganz richtig dargestellt. Zwischen dem Sauerstoff und dem zentralen C-Atom des Isopropanolrests fehlte eine Atombindung; hier die korrigierte Formel. Wir bitten den Fehler zu entschuldigen.

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

BENJYS GEBURTSTAG

VON JOHN GRANT

Lucy liebte ihren Mann Hiram, aber als er ihr beim Abendessen sagte, was ihr Sohn Benjy sich zu seinem 13. Geburtstag wünschte, erstickte sie fast an ihrem Hamburger.

»Er will ein ... was?«, stammelte sie.

Nervös wiederholte er: »Ein Universum.«

»Aber die sind sündhaft teuer!«

»Er sagt, alle anderen Jungs haben eins.«

»Aber ihre Eltern sind reich. Ich bin nur eine einfache Angestellte.«

»Mark Pollock hat eines zum zehnten Geburtstag bekommen«, erklärte Hiram. »Benjy ist nicht unvernünftig. Penelope Saunders ...«

»Diese kleine Kröte!«

»Penelope Saunders hat eines. Dwayne Simmons. Lottie McPhee. Denny Barden ... na ja, Denny Barden hat nur einen Galaxienhaufen gekriegt, aber seine Mutter ist seit zwei Jahren arbeitslos. Und ...«

»Trotzdem.«

Hiram zuckte die Achseln. »Benjy wird 13«, sagte er. »Das ist vielleicht sein letzter Geburtstag als kleiner Junge. Im nächsten Jahr könnten ihn schon Mädchen mehr interessieren.«

Beide schüttelten sich.

»Wir werden es uns vom Mund absparen müssen«, wandte sie ein.

»Wir schaffen das. Für unseren kleinen Champion.«

Drei Tage darauf sah Lucy, als sie von der Arbeit heimkam, an dem verschämt triumphierenden Gesichtsausdruck ihres Mannes sofort, dass er das Geschenk gekauft hatte. Es schien beiden eine Ewigkeit zu dauern, bis Benjy schläfrig wurde, und noch länger, bis er sich endlich überreden ließ, zu Bett zu gehen.

»Schauen wir es uns an«, flüsterte Lucy, als sie sicher sein konnten, dass der Bub tief und fest schlief.

Hiram führte sie ins Schlafzimmer und öffnete den Kleiderschrank.

»Das ist alles?«, fragte sie und betrachtete die Kiste.

»Ein AC49-Universum, genau wie unser Sohn es wollte«, sagte Hiram stolz. »Ich konnte einen saftigen Rabatt herauschinden, weil ich bar bezahlte.«

»Sieht nicht nach viel aus, oder?«

Die Box hatte nur ein Viertel der von Lucy erwarteten Größe und lag seltsam harmlos auf dem Schrankboden, trotz der grellen Bilder von explodierenden Galaxien und dergleichen auf der Verpackung.

Sie bückte sich und hob die Schachtel auf.

»Sie ist so klein«, sagte sie.

»Offenbar wird sie viel größer, wenn man alle Teile zusammenbaut und in Bewegung setzt«, versicherte Hiram. »Das hat mir der Verkäufer erklärt. Siehst du?« Er klopfte auf die Schrift

auf der Oberseite. »Dieses Ding hat sogar einen eingebauten Inflationsantrieb.«

»Ja wenn du dir sicher bist, dass es das Richtige ist ...«

Lucy bückte sich und stellte die bunte Box wieder zurück unter die Kleider. Trotz Rabatt entsprach der Preis einem Monatslohn. Aber so etwas kauft man nur einmal im Leben, dachte sie. Wenn es meinen kleinen Jungen glücklich macht, ist es jeden Cent wert.

Dennoch schlief sie schlecht in dieser Nacht; mehrmals erwachte sie, von Geldsorgen geplagt.

Da Benjys Geburtstag zum Glück auf ein Wochenende fiel, musste Lucy nicht durch die graue Morgendämmerung zur Arbeit hetzen. Dennoch stellten sie und Hiram den Wecker auf sechs Uhr. Sie schlichen auf Zehenspitzen durchs Haus und bereiteten alles vor, bevor Benjy erwachte. Außer seinem Hauptgeschenk gab es von den Großeltern ein Päckchen und von seiner Tante einen Scheck, der vermutlich wie in den Vorjahren beschämend klein ausfallen würde.

Und dann gab es noch den Kuchen, den Hiram am Vortag gebacken hatte, während Benjy in der Schule war. Er hatte die Form eines knallroten Rennautos; das war wahrscheinlich ein Feh-

ler, aber daran ließ sich jetzt nichts mehr ändern.

Als Benjy schließlich Viertel nach acht aus dem Schlafzimmer schlurfte, wobei seine Haare in alle Richtungen abstanden, hatte sich das Wohnzimmer in eine wahre Schatzkammer verwandelt.

So kam es Lucy jedenfalls vor.

Sobald Benjy die Schachtel mit seinem AC49-Universum auf dem Ehrenplatz in der Mitte des Teppichs erblickte, wurden seine verschlafenen Augen hellwach.

»Wow!«

Lucy und Hiram strahlten vor Stolz.

Benjy setzte sich auf das Sofa und drehte die Box hin und her. Alle anderen Geschenke interessierten ihn nicht. In diesem Moment war es Lucy egal, dass in den kommenden Monaten das Geld ziemlich knapp sein würde. Wichtig war nur die Begeisterung auf dem Gesicht ihres Jungen.

»Baut sich in Minutenschnelle zusammen«, las Benjy ehrfürchtig vor. »Enthält Kleinteile, die für Kinder ungeeignet sind. Keine Batterien erforderlich.«

Er schlitzte mit dem Daumennagel den Deckel auf.

Stunden später herrschte Stille; nur aus der Dachkammer, in der Platz für Benjys Universum geschaffen worden

war, hörte man eine Art Geklimper. Seine Eltern hatten ihm versprochen, sie würden nur im Notfall dort hinaufgehen. Von nun an war das ausschließlich sein Reich.

Lucy und Hiram waren noch nicht ganz eingeschlafen.

»Ich hätte nicht erwartet, dass es so viel Lärm macht, wenn man es in Betrieb nimmt«, murmelte er schläfrig.

»Ganz am Anfang gab es einen furchtbaren Knall«, ergänzte sie.

»Oder dass er so lange braucht, bis es läuft.«

»Beim AC49 gibt es die Option, die physikalischen Konstanten fein abzustimmen«, sagte Lucy. »Benjy wollte alles richtig optimieren. Anscheinend hat sein Freund Buster sich nicht darum gekümmert, und am Ende kam etwas völlig Chaotisches heraus. Unser Bub will, dass sein Universum organisches Leben und so weiter ermöglicht. Wir haben den halben Vormittag damit verbracht, die Lichtgeschwindigkeit anzupassen.«

Hiram schwieg so lange, dass sie sich fragte, ob er eingeschlafen war.

»Organisches Leben, hä?«, sagte er plötzlich. Sie schreckte auf.

»Das ist das Ziel.«

»Meinst du, er wird seine Geschöpfe sorgsam behandeln?«

»Das bezweifle ich stark«, sagte sie, drehte sich um und rollte sich zusammen. »Kann uns doch egal sein ...« 

DER AUTOR

John Grant hat mehr als 60 Science-fiction-Romane und Sachbücher verfasst. Unter anderem hat er zweimal den Hugo Award sowie den World Fantasy Award gewonnen.

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.

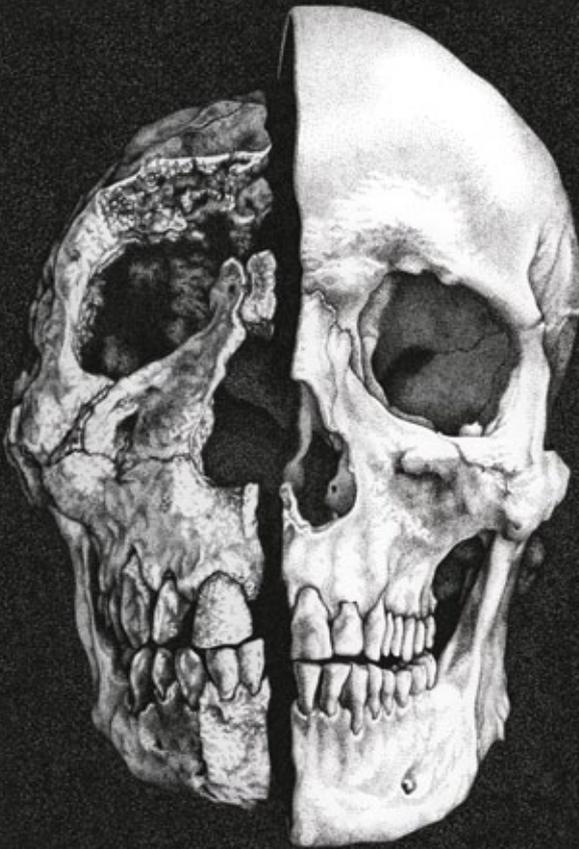
© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 511, S. 258, 10. Juli 2014

Die Evolution des Menschen

Unsere neue sechsteilige Serie beleuchtet die biologische und kulturelle Sonderstellung des Menschen – von seiner frühen Herkunft bis zu den Auswirkungen der modernsten Kommunikation. Der erste Teil stellt neue Erkenntnisse zur Entwicklung der Homininen an der Wurzel der Gattung *Homo* und unseren komplizierten Stammbaum vor.



KATY WIEDEMANN

Hochleistungspolymer aus Bakterien

Herkömmliche Kunststoffe belasten Umwelt und Klima. Alternativen auf pflanzlicher Basis sind daher gesucht. Ein besonders aussichtsreiches Produkt ist biotechnologisch erzeugte Nanozellulose. Mit ihrer einzigartigen Kombination von Eigenschaften eignet sie sich für vielerlei Einsatzzwecke.

Wie funktioniert die totale Erinnerung?

Manche Menschen erinnern sich an kleinste Details von Ereignissen, die sie vor 20 Jahren erlebt haben, als wäre es gestern gewesen. Nun wollen Forscher herausfinden, auf welchen biologischen Grundlagen dieses überlegene autobiografische Gedächtnis beruht.



ESA / JACES MEDIA LAB

Über Pluto hinaus

Erstmals blicken Raumsonden aus der Nähe auf die Eis- und Felsbrocken des Kuipergürtels, jener weit entfernten Region, in der Pluto und zahllose andere Objekte kreisen. Wir erreichen so nie zuvor studierte Himmelskörper – und verstehen damit besser, wie einst unser Sonnensystem entstand.



VINCENT BORBELLE, SUD ABBANE, FRANCIS KAZANUS, DAMIEN ROHMER UND BODIST THIERY

Fraktale Deformation einer Fläche

Ein quadratisches Stück Papier lässt sich zum Torus verbiegen – wenn man es unendlich oft und unendlich fein verknittert.

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

Zu Weihnachten direkt auf den Bildschirm – unsere digitalen Geschenkabonnements



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

12 AUSGABEN IM JAHR;
€ 60,- (ERMÄSSIGT € 48,-)



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

12 AUSGABEN IM JAHR;
€ 60,- (ERMÄSSIGT € 48,-)



Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung

12 AUSGABEN IM JAHR;
€ 60,- (ERMÄSSIGT € 48,-)



Das wöchentliche Wissensmagazin

52 AUSGABEN IM JAHR;
€ 39,95 (ERMÄSSIGT € 30,-)

+ EIN GESCHENK FÜR SIE

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743, Fax: 06221 9126-751, E-Mail: service@spektrum.de
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogstraße 3-5, 69126 Heidelberg

www.spektrum.de/geschenk





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 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 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