

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

INFEKTIONEN
Neue Waffen
gegen
Antibiotika-
resistenz

MÄRZ 2015

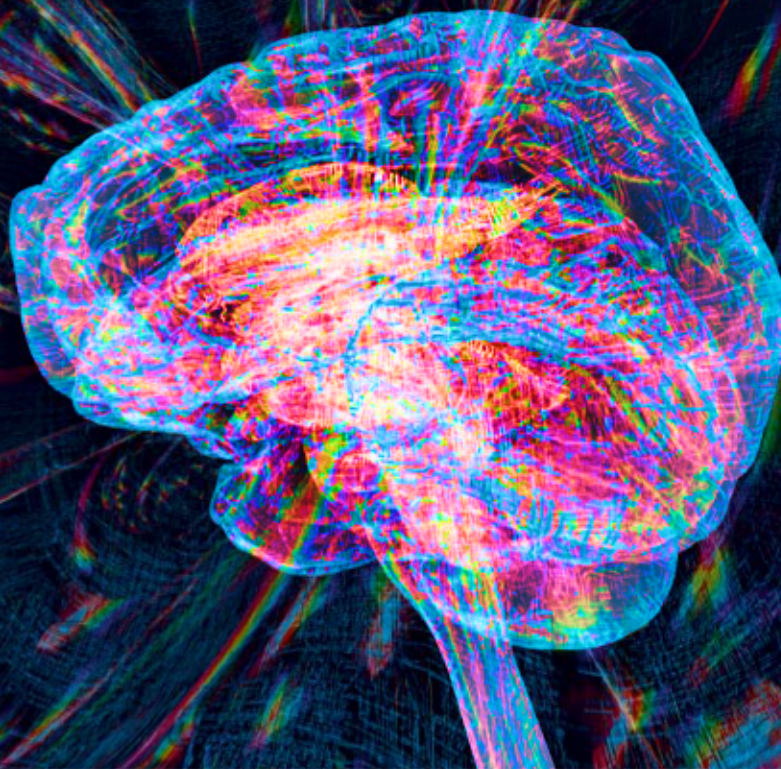
GRAVITATIONSWELLEN
Signale vom Ursprung
des Kosmos

TEOTIHUACAN
So wohnten die
Götter im alten Mexiko

COMPUTER
Die Spin-Revolution
kommt

Wie funktioniert unser Gehirn?

Neue Methoden für die nächste
Epoche der Hirnforschung



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



WENN DER SCHUH EINMAL DRÜCKT:

Spektrum RATGEBER

In unserer Digitalreihe **Spektrum RATGEBER** finden Sie wichtige Tipps zu Themen, die den Alltag betreffen – ob beruflich oder privat.

ALS PDF
ZUM
DOWNLOAD



Ratgeber
»Schule heute«
(€ 3,99)



Ratgeber
»Beruf und Karriere«
(€ 4,99)



Ratgeber
»Schizophrenie«
(€ 4,99)

Diese und weitere Ratgeberausgaben erhalten Sie unter:
www.spektrum.de/ratgeber

QR-Code per
Smartphone
scannen!





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Hirnforschung en gros – der nächste Anlauf

Das haben wir schon einmal erlebt: 1990 rief der damalige US-Präsident George Bush die »Decade of the Brain« aus, mit dem Ziel, die neurowissenschaftliche Forschung zu fördern und zu intensivieren. Da dies auf die Bemühungen hier zu Lande keinen sonderlich belebenden Einfluss hatte, folgte im Jahr 2000 auf Initiative einiger führender deutscher Experten die hiesige »Dekade des menschlichen Gehirns« mit ähnlicher Stoßrichtung. Inzwischen wirkt das alles wie Schnee von gestern, und auch in den Medien gewinnt man den Eindruck, dass der allgemeine »Neurohype« sich in den letzten Jahren wieder etwas abgeschwächt hat.

Doch in den entscheidenden Punkten sind wir trotz aller Anstrengungen nicht so viel weitergekommen. Hirnforscher haben zwar Massen an Detailfakten über unser Denkorgan angesammelt, aber wie es wirklich funktioniert, können sie immer noch nicht erklären.

Offenbar hat sich das nun herumgesprochen. So sprießen erneut allerorten Forschungsprojekte aus dem Boden, die dieses vielleicht größte und schwierigste Rätsel der Wissenschaft endlich knacken wollen. Dazu gehört etwa die 2013 gestartete BRAIN-Initiative, ein rekursives Akronym für »Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies«. Sie hat zum Ziel, mittels neu zu entwickelnder Methoden die elektrische Aktivität jedes Neurons im menschlichen Gehirn aufzuzeichnen – in der Hoffnung, so das Rätsel der Hirnfunktion zu lösen (siehe den Artikel ab S. 22). Im selben Jahr etablierte sich auch das europäische Gegenstück »Human Brain Project«, das der Initiator Henry Markram in unserer Septemberausgabe 2012 ausführlich vorstellte. Hier geht es darum, ein vollständiges Computermodell eines funktionierenden Gehirns zu erstellen, dessen Arbeitsweise also durch rechnerische Simulation zu erforschen. Weitere Unternehmungen umfassen das Human Connectome Project, das seit 2009 daran arbeitet, eine Karte aller neuronalen Verknüpfungen im Gehirn aufzustellen, und die Allen-Brain-Atlas-Projekte, welche die Aktivität von Genen in den verschiedenen Hirnregionen kartieren (ab S. 30).

Das massive, konzertierte Vorgehen der Forschergemeinschaft soll einen Schub auslösen, ähnlich dem des Humangenomprojekts vor einem Vierteljahrhundert, das tatsächlich ganze Wissenschaftszweige revolutionierte oder gar neu begründete. Allerdings zeigt gerade dieses Vorbild auch, wie lang der Weg trotz aller Anstrengung sein kann. So rückten parallel zur Sequenzierung des menschlichen Erbguts Phänomene wie RNA-Interferenz und Epigenetik (siehe S. 14) in den Fokus, die vermeintlich sichere Überzeugungen in Frage stellten oder zumindest als sehr unvollständig enttarnten. Akzeptieren wir es einfach: Forschung ist nie »am Ziel«, man wird nie etwas wirklich ganz verstehen, schon gar nicht etwas so Komplexes wie das menschliche Gehirn. Aber wir können uns der Wahrheit Schritt für Schritt nähern und dabei immer wieder spannende Überraschungen erleben.

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Gautam Dantas von der Washington University in St. Louis (links) und **Morten O.A. Sommer** von Dänemarks Technischer Universität in Lyngby beschreiben ab S. 36 ungeahnte Wege, über die sich Antibiotikaresistenzen unter Bakterien verbreiten.



Verbergen sich in der kosmischen Hintergrundstrahlung Spuren urchimlicher Gravitationswellen, die kurz nach dem Urknall entstanden? Dieser Frage geht der Kosmologe **Lawrence M. Krauss** von der Arizona State University in Tempe ab S. 46 nach.



Seit Jahrzehnten ergründet der Anthropologe **Ian Tattersall** vom American Museum of Natural History in New York das Rätsel der Menschwerdung. Besonders haben es ihm die Kulturentwicklung und die Sprachentstehung angetan (ab S. 58).

3 Editorial

6 Spektrogramm

Ertragreiche Klärgruben • Medikament gegen Strahlenschäden • Durstschalter im Gehirn • Uralte Planeten • Weiche Neuroimplantate • Röntgentechnik entziffert verkohlte Schriftrollen

9 Bild des Monats

Neuer Blick auf die Säulen der Schöpfung

10 Forschung aktuell

Molekularer Drudenfuß und Davidstern

Chemiker brillieren in der Kunst, Moleküle zu verknoten und ineinander zu verschlingen

Die Sterne schießen zurück

Das extrem intensive Licht einer Galaxie schleudert Materie ins All

Genregulation durch RNA-Schnipsel

RNA-Moleküle können Resistenzen vermitteln. Aber ist das Epigenetik?

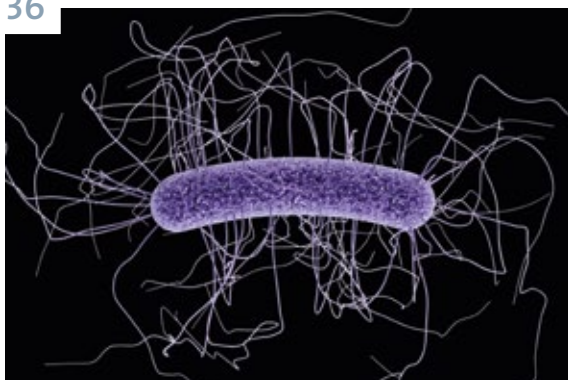
SPRINGER'S EINWÜRFE

Nachruf auf

meine Privatsphäre

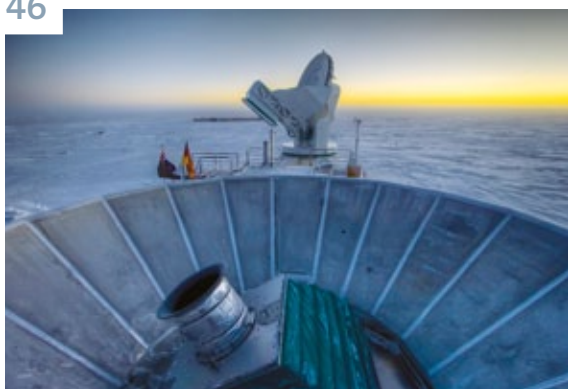
Ist Datenschutz im Internet überhaupt möglich?

36



CDC / MELISSA BROWER

46



STEFFEN RICHTER, HARVARD UNIVERSITY

58



SCIENCE SOURCE / JOHN READER

BIOLOGIE & MEDIZIN

► 36 Die vielen Wege zur Antibiotikaresistenz

Gegen Medikamente unempfindliche Keime gefährden zunehmend unsere Gesundheit. Nun zeigt sich: Sie erwerben ihre Resistenzen oft von harmlosen Mikroben.
Gautam Dantas und Morten O. A. Sommer

PHYSIK & ASTRONOMIE

SERIE »DIE GEBURT DES UNIVERSUMS« TEIL 2

► 46 Wellenschlag des Urknalls

Die kosmische Inflation erzeugte unmittelbar nach dem Urknall Gravitationswellen, die eine nur schwer nachweisbare »Verwirbelung« des kosmischen Strahlungshintergrunds hinterließen.
Lawrence M. Krauss

SCHLICHTING!

56 Der grüne Blitz

Für den Bruchteil einer Sekunde sendet die untergehende Sonne manchmal grünes Licht aus – warum?
H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

SERIE »EVOLUTION DES MENSCHEN« TEIL 3

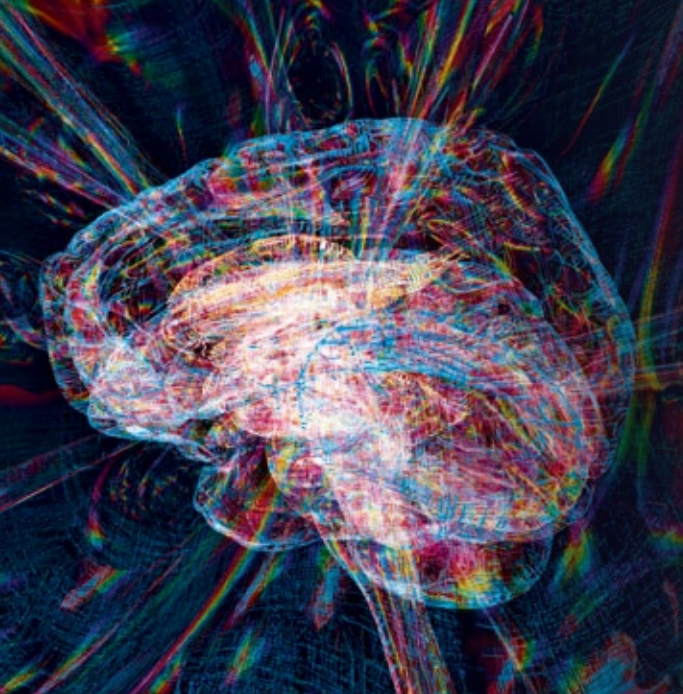
58 Gewinner der Evolutionslotterie

Die Entwicklung zum modernen Menschen verlief nicht stetig, sondern meist sprunghaft in kleinen Populationen. Der *Homo sapiens* verdankt seine Existenz vielen Zufällen.
Ian Tattersall

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

66 Rechtswidrige Primzahlen und das Urheberrecht an Pi

Kann man Eigentümer einer Zahl werden? Theoretisch schon – aber meist macht man sich dann lächerlich.
Christoph Pöppe



► TITELTHEMA

22 Ein neues Kapitel der Hirnforschung

Rafael Yuste und George Church

Mit innovativen Methoden soll es endlich gelingen, große Neuronennetze im Detail zu studieren.

30 Die genetische Kartierung des menschlichen Gehirns

Ed Lein und Michael J. Hawrylycz

Die ersten hochauflösenden Karten der Genaktivität in unserem Gehirn widerlegen etablierte Vorstellungen von der Arbeitsweise der Großhirnrinde.

70



DREAMSTIME / JERLYN

► 70 Wer regierte Teotihuacán?

Die gewaltigen Tempelanlagen ließen schon die Azteken staunen. Herrschte dort ein Monarch oder eine gut organisierte Oligarchie?

Eric Vance

ERDE & UMWELT

78 Permafrost – die große Unbekannte im Klimawandel

Wird das Tauen dauerhaft gefrorener Böden in der Arktis die Erderwärmung katastrophal beschleunigen? Nach neuesten genauen Untersuchungen scheint der Effekt nicht so dramatisch wie befürchtet.

Gert Lange

TECHNIK & COMPUTER

► 90 Rechnen mit dem Spin

Die seltsame Quanteneigenschaft der Elektronen taugt nicht nur zum Speichern von Daten.

Jon Cartwright

78



KONSTANZE PIEL, ALFRED-WEGENER-INSTITUT

21 Wissenschaft im Rückblick

Vom Amphibienauto zur Radiologie

97 Rezensionen

Martin Neukamm (Hg.): Darwin heute • Richard Elwes: Das Chaos im Karpfenteich • Bruno P. Kremer: Kiwi, Kaffee, Kardamom u. a.

102 Leserbrief/Impressum

104 Futur III

Emily Eckart: Gib mir deine Hand

106 Vorschau

Titelmotiv: Bryan Christie
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

ÖKOLOGIE

Klärgrube als Goldgrube?

Beim Reinigen von Abwässern bleibt so genannter Klärschlamm zurück, eine Mischung aus Fest- und Flüssigstoffen. Er kann sehr einträglich sein: Eine Tonne dieses Restmaterials enthält Metalle im Wert von durchschnittlich 280 US-Dollar, berechneten Paul Westerhoff von der Arizona State University (USA) und seine Kollegen.

Die Forscher haben Klärschlammproben aus Arizona mit Methoden der Massenspektrometrie sowie der Elektronenmikroskopie untersucht. Dabei stellten sie eine starke Anreicherung von Platinmetallen fest, zu denen neben Platin auch Ruthenium, Rhodium und Palladium zählen. Zudem enthielt der Klärschlamm Gold und Silber in relativ großen Mengen. Offenbar, so schreiben die Autoren der Studie, würden diese Metalle durch menschliche Einflüsse im Abwasser angereichert.

Sie stammten sowohl aus Industriebetrieben als auch aus kleinen Unternehmen (etwa Goldschmieden) und privaten Haushalten.

Die begehrten Stoffe liegen großteils in Form mikroskopisch kleiner Partikel vor, so genannter Kolloide. Bislang ist keine kostengünstige Methode bekannt, um sie dem Klärschlamm zu entziehen und zu reinigen. Nur in Extremfällen erweist sich der Schlamm als Goldgrube. So be-

richtete die Fachzeitschrift »Science« kürzlich über einen japanischen Kläranlagenbetreiber in der Provinz Nagano, der die Abwässer mehrerer Hersteller von Präzisionsinstrumenten aufbereitet. Aus jeder Tonne Asche, die er beim Verbrennen des Klärschlammes enthält, gewinnt er rund zwei Kilogramm Gold – ein Gehalt, der höher ist als im Erz mancher Goldmine.

Environ. Sci. & Technol. 10.1021/es505329q, 2015



DORSET AGARR. UND UMWELTECHNIK GMBH

Klärschlamm ist nicht besonders schön anzusehen, aber oft wertvoll. Insbesondere Platinmetalle enthält er in hoher Konzentration.



Mehr Aktualität!

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

MEDIZIN

Medikament hilft gegen schwere Strahlenschäden

EinTeam um Gábor Tigyí von der University of Tennessee (USA) hat einen neuen Wirkstoff entwickelt, der die schädlichen Folgen ionisierender Strahlung mildert. Die Substanz namens DBIBB erhöht deutlich die Überlebensrate von radioaktiv bestrahlten Mäusen. Erhielten die Nager eine Gammastrahlendosis von rund 16 Gray, starben binnen 15 Tagen rund 90 Prozent von ihnen. Spritzten die Forscher den Mäusen jedoch nach der Bestrahlung die Substanz DBIBB unter die Haut, konnten sie den Anteil verendeter Tiere auf unter 20 Prozent vermindern. Der Effekt war dosisabhängig: Bei einem Milligramm DBIBB pro Kilogramm Körpergewicht überlebten deutlich weniger Mäuse als beim Zehnfachen dieser Dosis. Die Substanz

wirkte auch, wenn sie erst drei Tage nach Bestrahlung verabreicht wurde.

DBIBB imitiert die Wirkung eines körpereigenen Rezeptors für Lysophosphatidsäure. Er sitzt in der Membran der Zelle und leitet Signale in ihr Inneres weiter. In bestrahlten Zellen unterdrückt er den programmierten Zelltod, kurbelt DNA-Reparaturmechanismen an und unterstützt die zelluläre Regeneration. DBIBB wirkt offenbar ähnlich, verhindert so den Untergang körpereigener Stamm- und Vorläuferzellen und hilft die Immunfunktion aufrechtzuerhalten.

Künftige Versuche müssen zeigen, ob das Präparat auch beim Menschen vergleichbare Wirkung zeigt und als Arznei für Strahlenopfer dienen kann.

Chem. Biol. 22, S. 1–11, 2015

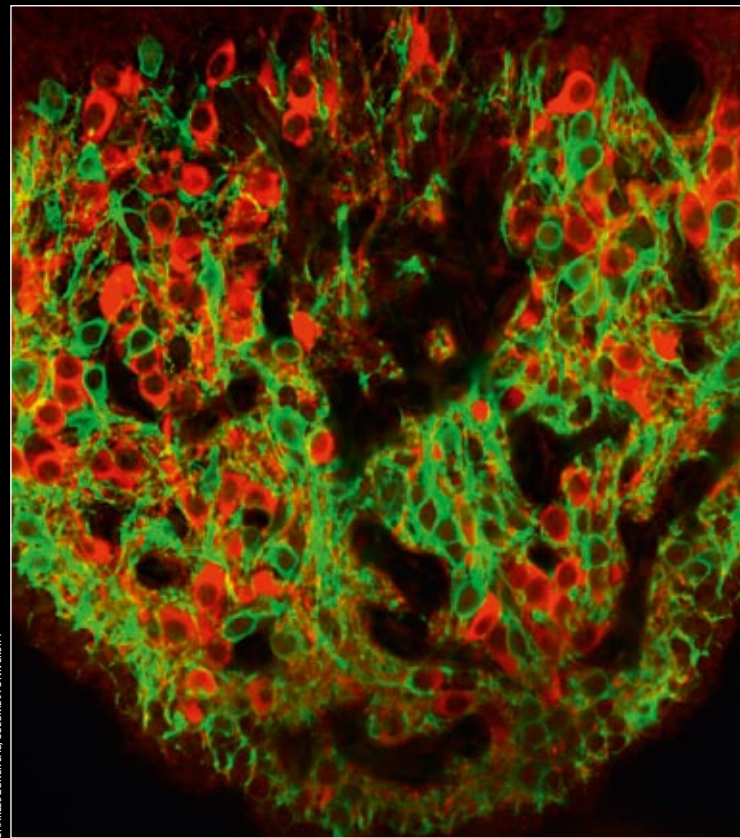
Durstschalter im Gehirn

Woher der Durst rührt, haben nun Wissenschaftler um Yuki Oka von der Columbia University (US-Bundesstaat New York) zumindest bei Mäusen aufgeklärt. Im Gehirn der Tiere wiesen sie zwei verschiedene Untergruppen von Nervenzellen nach, die das Verlangen nach Wasser steuern.

Die Forscher schleusten ein Genkonstrukt in eine bestimmte Hirnregion der Nager ein, in das so genannte Subfornikalorgan, das an der Steuerung des Wasser- und Salzhaushalts im Körper mitwirkt. Infolge des genetischen Eingriffs ließen sich die Nervenzellen in dieser Region gezielt mit Laserlicht stimulieren. Aktivierten die Forscher eine bestimmte Untergruppe der dortigen Zellen, die so genannten CAMKII-positiven Neuronen, begannen die Mäuse augenblicklich zu trinken – selbst wenn sie zuvor ausreichend Flüssigkeit bekommen hatten. Bei anhaltender Laserstimulation tranken die Tiere immer weiter und nahmen dabei bis zu acht Prozent ihres Körpergewichts an Wasser zu sich. Stimulierten Oka und seine Kollegen hingegen eine andere Zellgruppe im Subfornikalorgan der Tiere, die VGAT-positiven Neuronen, stellten die Nager schlagartig das Trinken ein – sogar wenn sie unmittelbar vorher noch durstig gewesen waren.

Schon lange vermuten Wissenschaftler den Sitz des Durstempfindens im Subfornikalorgan, doch die elektrische Erregung dieser Hirnregion in Tierversuchen erbrachte bislang widersprüchliche Ergebnisse. Die neuen Ergebnisse von Oka und seinem Team können diese Diskrepanz erklären: Stimuliert man das Subfornikalorgan zu unspezifisch, aktiviert man dort mehrere Neuronengruppen gleichzeitig, was zu kaum vorhersagbaren Verhaltensänderungen bei den Tieren führt.

Nature 10.1038/nature14108, 2015



CHARLESZUKER LAB, COLUMBIA UNIVERSITY

Angefärbte Neurone im Subfornikalorgan von Mäusen. Werden die roten Zellen stimuliert, fangen die Tiere sofort an zu trinken, nicht aber bei Reizung der grünen.

Planeten sind ein altes Phänomen

Schon sehr früh in der Geschichte des Universums hat es Planeten gegeben. Das belegen die Ergebnisse eines internationalen Forscherteams um Tiago Campante von der University of Birmingham (England). Die Wissenschaftler haben im Sternbild Leier einen uralten Stern entdeckt, den fünf Planeten umkreisen. Der Himmelskörper mit der Bezeichnung Kepler-444 ist vor 11,2 Milliarden Jahren entstanden und dürfte zur ersten Sterneneration der Milchstraße gehören.

Kepler-444 befindet sich 117 Lichtjahre entfernt und ist etwas kleiner als unsere Sonne. Seine Planeten umkreisen ihn auf engen Bahnen: Für einen Umlauf benötigen sie allesamt weniger als zehn Tage. Seit vier Jahren beobachten die Astronomen das ferne System mit Hilfe des Weltraumteleskops Kepler der NASA.

Den Daten zufolge handelt es sich bei allen fünf Trabanten um Gesteinsplaneten, deren Größen zwischen jenen des Merkurs und der Venus

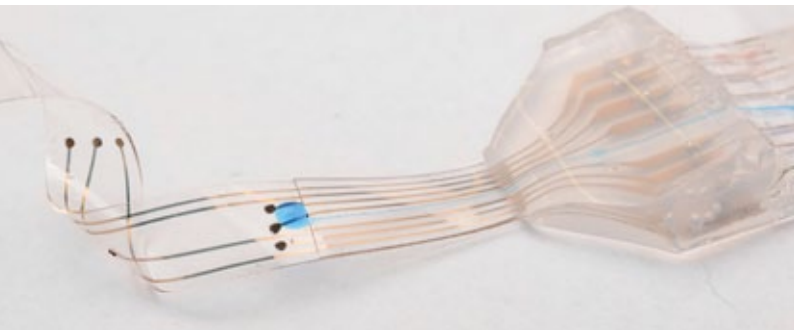
liegen. Auf Grund ihrer Nähe zum Zentralstern müssen auf ihnen extreme Temperaturen herrschen, ähnlich wie auf dem Merkur. Ein Kandidat für eine belebte Welt ist deshalb keiner von ihnen. Jedoch zeigt die Entdeckung, dass die Bildung erdähnlicher Planeten schon vor sehr langer Zeit möglich war: Kepler-444 ist mehr als doppelt so alt wie die Erde; das Gleiche gilt höchstwahrscheinlich für seine Begleiter.

arXiv:1501.06227v1, 2015

MEDIZINTECHNIK

Weiche Neuroimplantate

Innovative Neuroimplantate verhelfen rückenmarksverletzten Ratten wieder zum Laufen und sind dabei deutlich verträglicher als bisher eingesetzte Produkte. Sie bestehen aus ähnlich weichem und dehnbarem Material wie die äußerste Hirnhaut (Dura mater), die Rückenmark und Gehirn umkleidet. Die meisten konventionellen Implantate dagegen, die zur Behandlung von Hirn- und Rückenmarkschäden eingesetzt werden, sind vergleichsweise starr. Während sich die Körpergewebe gegeneinander bewegen, reiben sie an diesen, was Entzündungen auslösen kann.



ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL), 2015

Dehnbare Drähte, verformbare Elektroden und winzige Flüssigkeitskanäle enthält dieses Weichimplantat auf Basis von Silikon.

Stéphanie Lacour von der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Schweiz) und ihre Kollegen verwenden transparentes Silikon als Trägermaterial für dehnbare Golddrähte, Elektroden aus weichem Material sowie verformbare Mikrokanäle, die Flüssigkeiten leiten. Derart konstruierte Implantate erlauben es, Arzneistoffe sehr präzise dosiert ins Gewebe zu verabreichen und Nervenzellen elektrisch anzuregen. Damit kann man beispielsweise nach Rückenmarksverletzungen das beschädigte Nervengewebe stimulieren, um dessen Regeneration zu unterstützen und so eventuell verloren gegangene Körperfunktionen wiederherzustellen.

Ratten, denen das Rückenmark nahezu vollständig durchtrennt worden war, gewannen im Tierversuch durch eine Therapie mit den neuen Implantaten ihr Laufvermögen weit gehend zurück. Auch sechs Wochen nach dem Einsetzen der Geräte wurden diese vom Körper noch gut toleriert. Stife Implantate dagegen provozierten in dieser Zeit massive Entzündungsreaktionen an der verletzten Stelle. Durch Weiterentwicklung weicher Implantate ließe sich wohl die Behandlung von Patienten mit Nervengewebsschäden verbessern.

Science 347, S. 159–163, 2015

ARCHÄOLOGIE

Röntgentechnik entziffert antike verkohlte Schriftrollen

Als im Jahr 79 der Vesuv ausbrach, begrub er im antiken Herculaneum eine Bibliothek mit hunderten handbeschriebenen Papyrusrollen. Zwar sind diese bei dem Ereignis fast vollständig verkohlt, enthalten aber immer noch entzifferbare Texte. Seit 260 Jahren versuchen Archäologen, die Schrift zu lesen – ein extrem schwieriges Unterfangen, denn der Papyrus zerbröselt, sobald man ihn zu entrollen versucht. Und auch Durchleuchtungstechniken wie die Röntgentomografie stoßen an Grenzen, denn die Röntgendichten der antiken Tinte und des Papyrus unterscheiden sich zu wenig, um sie klar voneinander trennen zu können.

Forscher um Vito Mocella vom Consiglio Nazionale delle Ricerche in Neapel (Italien) stellen nun eine verbesserte Durchleuchtungsmethode vor: die Röntgenphasenkontrasttechnik. Sie nutzt aus, dass ein Röntgenstrahl seine Phase verändert, wenn er ein Medium durchläuft. In den verkohlten Rollen liegt die Tinte auf dem

Papyrus auf und erhebt sich um wenige Mikrometer über ihn. Röntgenstrahlen, die ein Schriftzeichen durchdrungen haben, besitzen deshalb eine geringfügig andere Phase als Strahlen, die durch unbeschrifteten Papyrus getreten sind. Dieser Unterschied lässt sich im Röntgenbild darstellen.

Die Wissenschaftler tasteten zusammengerollte und verkohlte Papyrusdokumente mit Röntgenstrahlen fester Wellenlänge ab. Dabei erfassten sie unter anderem die Lage und Dicke der einzelnen Schichten. Diese berücksichtigend, konnten sie aus den Röntgen- daten tatsächlich einzelne griechische Lettern herauslesen. Deren Schriftbild lässt vermuten, dass sie von dem antiken Schreiber Philodemus stammen, dem bereits mehrere andere Dokumente der Herculaneum-Bibliothek zugeordnet werden.

Nat. Commun. 6:5895, 2015

EMMANUEL LEBRUN



Beinahe völlig verkohlt: Die Schriftrollen aus Herculaneum sind schwer mitgenommen. Lassen sie sich trotzdem lesen?

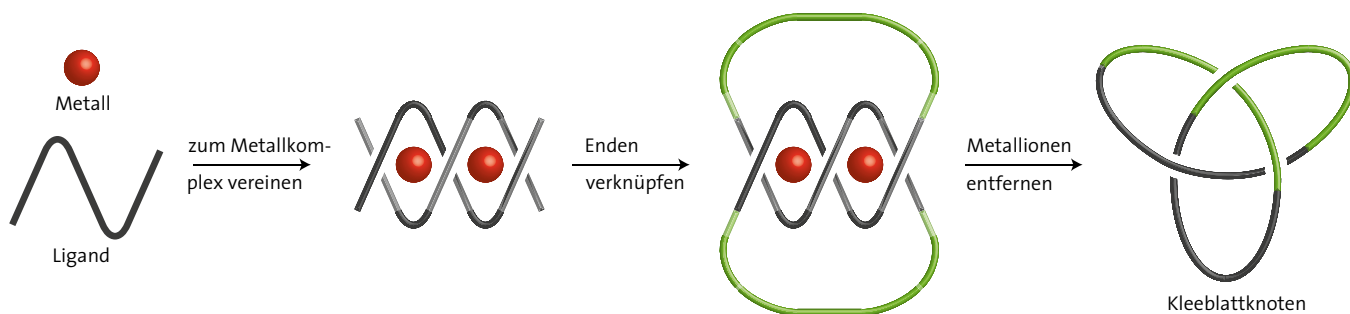
NEUER BLICK AUF DIE SÄULEN DER SCHÖPFUNG

Zu den bekanntesten Fotos des Weltraumteleskops Hubble gehört ein Teil des Adlernebels, den es 1995 erstmals ablichtete. Anlässlich des 25-jährigen Jubiläums der 1990 gestarteten Mission blickten die Astronomen nun erneut auf die Region. Sie fertigten diese bislang schärfste Aufnahme der Säulen aus Gas und Staub an, die mehrere Lichtjahre lang sind. Als die Forscher beide Fotos verglichen, stellten sie fest, dass sich einige Gasströme mit etwa 200 Kilometern pro Sekunde bewegen – beschleunigt von den gewaltigen Prozessen, bei denen in dieser Region neue Sterne entstehen.

Molekularer Drudenfuß und Davidstern

Verschlungene und verwobene organische Moleküle mit fünf beziehungsweise sechs Kreuzungspunkten bereichern neuerdings das chemische Kuriositätenkabinett. Moleküle zu verknoten, bleibt eine große Herausforderung – der Schritt vom dreifach gekreuzten Kleeblattknoten zum Drudenfuß ließ mehr als 20 Jahre auf sich warten.

VON MICHAEL GROSS



Vor rund einem halben Jahrhundert waren miteinander verkettete Ringmoleküle eine spektakuläre Neuigkeit. Damals verließ man sich allein auf die Statistik: Schwimmen genügend fadenförmige Moleküle zusammen mit ringförmigen in einem Gefäß herum, dann fädeln sich manche zufällig durch die Ringe, und wenn der Experimentator nun zuschlägt und die Fadenenden verknüpft, erhält er zwei verbundene Ringe – wenn auch nur in sehr bescheidener Ausbeute. Dass die Bindung zwischen ihnen nicht chemisch, sondern rein mechanisch ist, gab Anlass zu – letztlich müßigen – philosophischen Diskussionen darüber, ob es sich bei dem Produkt um ein Molekül handle oder um zwei.

Seit den 1980er Jahren und den mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Arbeiten von Jean-Marie Lehn in Straßburg gehen Chemiker bei der Herstellung solcher Catenane, wie sie inzwischen genannt werden, etwas systematischer vor: Sie benutzen die relativ lockeren Bindungen zwischen Metallionen und organischen Molekülen als »Liganden«, um die Bausteine so anzuordnen, dass ein gezieltes Verweben möglich ist (Spektrum der Wissenschaft 8/1996, S. 62).

Auf diese Weise gelang es, molekulare Abbilder der olympischen Ringe und

Die Synthese der chemischen Version eines Kleeblattknotens gelang schon 1990. Das Verfahren besteht darin, zwei schraubenförmige organische Moleküle derart um zwei Metallionen anzuordnen, dass sie sich an drei Stellen überkreuzen. Dann muss man sie nur noch jeweils oben und unten miteinander verbinden und die Metallionen entfernen.

des Kleeblattknotens herzustellen. Die Synthese dieses einfachsten nicht auflösbaren Knotens mit drei Kreuzungen beschrieb die Arbeitsgruppe von Jean-Pierre Sauvage an der Universität de Strasbourg 1990, also vor einem Vierteljahrhundert. Die Vorgehensweise war bestechend einfach: Sauvage drapierte zwei Exemplare eines schraubenartig gewundenen Moleküls derart um zwei Metallionen herum, dass sich die Stränge dreimal kreuzten (Zeichnung oben). Dann verband er jeweils die beiden oberen und unteren Enden miteinander. Nun musste er nur noch die Metalle herausnehmen und das Molekül ein wenig zurechtzupfen: Fertig war der Kleeblattknoten.

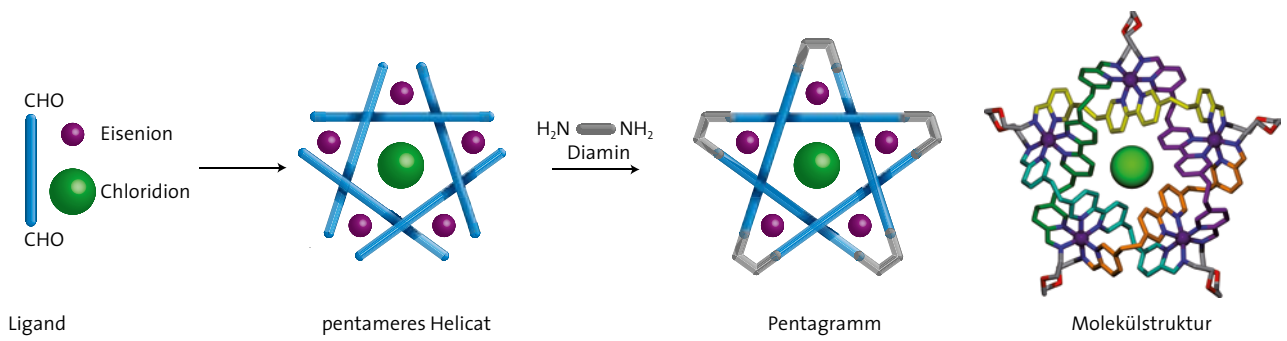
Vom Kleeblattknoten zum Pentagramm

Dieselbe Vorgehensweise mit längeren Schrauben und vier Metallzentren sollte im Prinzip den nächsthöheren Knoten mit fünf Kreuzungen ergeben, der topologisch dem Pentagramm oder Drudenfuß entspricht. Allein, die Moleküle spielen nicht mit, und bis heute ist

es niemandem gelungen, Sauvages Methode auf höhere Knoten auszuweiten.

Erst 2012 glückte der Arbeitsgruppe von David A. Leigh an der University of Manchester die Synthese einer chemischen Version des Pentagramms (*Nature Chemistry* 4, S. 15–20, 2012). Statt wie Sauvage mit der Doppelhelix eine topologisch äquivalente Form als Startpunkt zu wählen, visierte der Forscher das Molekül direkt an und konstruierte es aus fünf geraden Stangen auf dieselbe Weise, wie man fünf Streichhölzer zu einem Stern anordnen kann, wenn jedes nur mit einem Ende den Tisch berühren darf (Zeichnung rechts oben).

Die geniale Idee, die den Durchbruch ermöglichte, war die Erkenntnis, dass die Hölzchen in jeder der fünf Spitzen des Pentagramms die Symmetrie einer Dreifachhelix aufweisen. In der supramolekularen Chemie gab es aber bereits einen Weg, solche Helicate herzustellen: Man bindet Bipyridin-Gruppen $[(C_5H_5N)_2]$, die aus zwei über-eck verknüpften Sechsringen bestehen, als Liganden an ein Eisen- oder Nickelion – ein Trick, der wiederum aus dem



HARDE, M. J.; ONE-POI FENANOT.
IN: NATURE CHEMISTRY 4, 2012, S. 7-8, FIG. 1B [M]

Labor von Lehn stammt. Die betreffenden Metallkomplexe sehen aus wie Propeller mit drei Flügeln.

Zunächst bastelte Leighs Arbeitsgruppe auf diese Weise das molekulare Gegenstück unseres Streichholzmodells, ohne die Enden miteinander zu verbinden. Per Magnetresonanzspektroskopie und mit anderen analytischen Methoden konnten die Chemiker hier bereits nachweisen, dass die Idee im Grundsatz funktioniert. Dabei gelang ihnen sogar ein besonderes Kunststück. Der an den Ecken offene Drudenfuß ist ein chirales (händiges) Molekül. Wie Handschuhe kommt er nämlich in zwei spiegelbildlichen Versionen vor, die sich wegen der Asymmetrie der Schraubenwindungen nicht zur Deckung bringen lassen. Beide Enantiomere würden normalerweise als Mischung entstehen. Leigh und seine Mit-

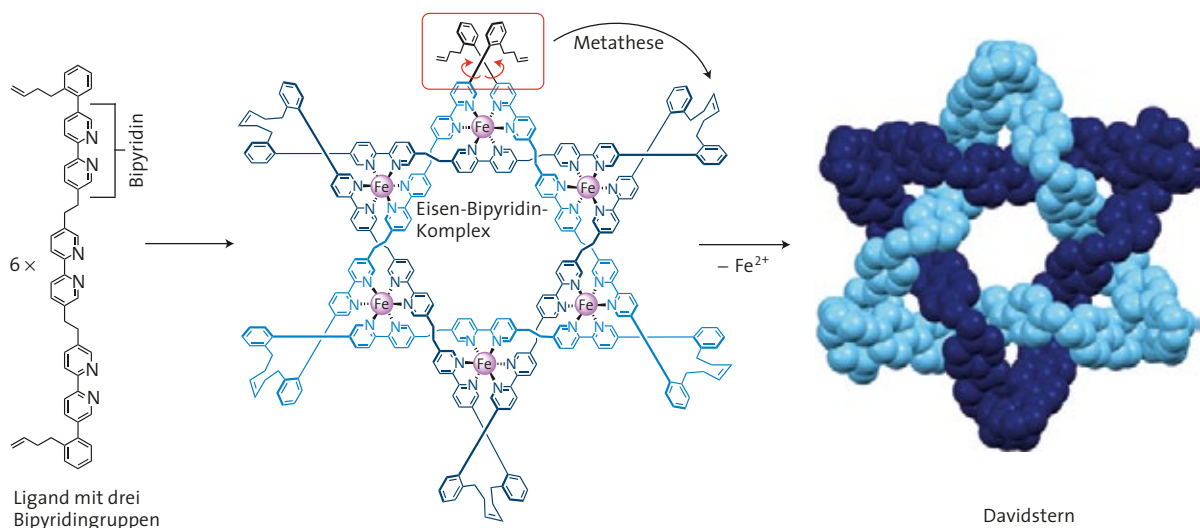
Zum Basteln eines nanoskopischen Pentagramms bildeten Chemiker aus fünf Stäbchenmolekülen zunächst ein Fünfeck mit überstehenden Kanten. Dabei nutzten sie aus, dass Eisenionen mit Bipyridinliganden Komplexe bilden, welche die erforderliche »helicale«, propellerartige Geometrie an den Kreuzungspunkten der Stäbchen aufweisen (siehe Zeichnung unten). Deren Enden, die mit Aldehydgruppen (-CHO) versehen waren, wurden anschließend mit Diaminen unter Abspaltung von Wasser verknüpft.

arbeiter konnten sie jedoch getrennt erzeugen, indem sie die Enden, die für die spätere Verknüpfung Aldehydgruppen (-CHO) trugen, mit anderen chiralen Molekülbausteinen koppelten. Als solche dienten Amine (RNH_2) mit einem asymmetrischen Kohlenstoffatom im organischen Substituenten (R).

Um die Enden schließlich miteinander zu verbinden und so das gewünschte verknotete Molekül mit fünf Überkreuzungen zu erhalten, mussten die Forscher sie stattdessen mit Diaminen ($\text{H}_2\text{N}-\text{R}-\text{NH}_2$) koppeln. Das erforderte

zwar eine leichte Abwandlung der Synthesebedingungen, klappte sonst aber planmäßig. Damit ein reines Knotenmolekül vorlag, hätten nun noch die fünf Metallionen in den Ecken entfernt werden müssen. Doch dieser Schritt scheiterte an der verwendeten Koppelschemie: Die dabei entstehenden Iminbindungen waren zu schwach, um ohne die Metallatome stabil zu bleiben.

Mit derselben Vorgehensweise gelang Leighs Arbeitsgruppe vor Kurzem auch der Schritt von fünf auf sechs Kreuzungen, also zum Davidstern, der



CLEVER, G. H.; STAR-CROSSED SELF-ASSEMBLY IN NATURE CHEMISTRY 6, 2014, S. 950-952, FIG. 1

Nach demselben Muster wie das Pentagramm ließ sich auch ein molekularer Davidstern herstellen. Allerdings mussten die Stäbchen auf andere Art an ihren Enden miteinander verbunden werden. Das geschah in diesem Fall mit Alkylgruppen über ein

Olefin-Metathese genanntes Verfahren. Die dabei gebildete sehr feste Verknüpfung erlaubte es sogar, am Schluss die Eisenionen zu entfernen, ohne dass das verschlungene Gebilde dadurch instabil geworden wäre.

topologisch allerdings kein Knoten ist, sondern ein Catenan aus zwei ineinander verschlungenen Dreiecken (Zeichnung S. 11 unten). Die Grundidee, nämlich die Verwendung von geraden Stangen und der Aufbau von Helicaten in den dreieckigen Spitzen des Sterns, blieb dieselbe, doch die chemische Reaktion, die den Ringschluss beim Drudenfuß ermöglicht hatte, funktionierte in diesem Fall nicht. Die Forscher mussten sich deshalb etwas Neues ausdenken, und so versahen sie die Enden der Stäbe mit Alkengruppen, die sie über eine so genannte Olefin-Metathese koppelten (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/1997, S. 89, und 12/2005, S. 22).

Unter diesen Umständen funktionierte auch das Entfernen der Metallzentren fast ohne Probleme (*Nature Chemistry* 6, S. 978–982, 2014). Allerdings gab es einen unerwarteten Effekt: Bei rund einem Fünftel der Sterne

brachten es die Ringe fertig, sich aus ihrer Verschlingung zu lösen. Die Forscher machen dafür Spuren des für die Olefin-Metathese verwendeten Katalysators verantwortlich, die in dem Produkt verblieben waren und offenbar dafür sorgten, dass sich gelegentlich einer der beiden 114-gliedrigen Ringe an einer Stelle öffnete, den anderen freigab und sich wieder schloss.

Mögliche Anwendungen in der Nanotechnologie

Nachträglich hat Leighs Arbeitsgruppe die beim Davidstern angewandte Kopplung per Metathese auch auf den Drudenfuß übertragen. Damit war es dort ebenfalls möglich, die Metallionen am Schluss zu entfernen.

Genau wie beim Drudenfuß existieren vom Davidstern zwei spiegelbildliche Formen, die sich in diesem Fall allerdings nicht gesondert herstellen ließen.

Sie entstanden bei der Reaktion zu gleichen Teilen und treten in den Kristallen der Verbindung jeweils paarweise auf.

Abgesehen von der intellektuellen Herausforderung, topologische Ideen mit den Mitteln der Chemie greifbare Gestalt annehmen zu lassen, könnten verknotete und verwobene Moleküle durchaus auch praktischen Nutzen bringen. Das hohe Maß an Kontrolle über die mechanischen Eigenschaften, das ihre Synthese erfordert, kann vielleicht in der Nanotechnologie zur Konstruktion von molekularen Schaltern oder Aktuatoren dienen. Auch in der Natur kommen solche Verbindungen übrigens keineswegs so selten vor, wie man denken könnte. Zum Beispiel bestehen die Proteinhüllen mancher Viren aus verketteten Proteinen.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

KOSMOLOGIE

Die Sterne schießen zurück

Nur ein überraschend kleiner Teil des kosmischen Baumaterials steckt in Sternen. Eine besonders kompakte und aktive Galaxie, aus der immense Gasmengen strömen, könnte dies erklären.

VON PHILIP F. HOPKINS

Im Lauf der letzten Jahrzehnte bekamen die Astronomen eine immer klarere Vorstellung von der Entwicklung unseres Universums. Das so genannte Standardmodell erwies sich als enorm erfolgreich und erlaubte, viele kosmologische Beobachtungen zu beschreiben. Was sich jedoch auf vergleichsweise kleinen astronomischen Skalen abspielt, bringt Physiker oft noch in Erklärungsnot. Den einfachsten Modellen zufolge sollte so gut wie alle baryonische Materie – solche Teilchen, die Atome und Moleküle formen – als Baumaterial von Sternen in Galaxien vorliegen. Doch dort befindet sich nur etwa ein Zehntel der erwarteten Menge. Ein Team um den britischen Wissenschaftler James E. Geach entdeckte einen Mechanismus, der entscheidend

zur intergalaktischen Materie beigetragen haben könnte. Die Forscher fanden eine Galaxie, die gewaltige Gasmengen in den offenen Weltraum ausstößt (*Nature* 516, S. 68–70, 2014).

Das Problem ist unter Astronomen lange bekannt (und hat nichts mit der so genannten »Dunklen Materie« zu tun). Einfachen Annahmen nach würde man erwarten, dass das Gas im frühen Universum im Lauf der Zeit den Gesetzen der Gravitation folgte und so allmählich immer dichtere Objekte und schließlich Galaxien mit Sternen bildete. Das hätte unweigerlich dazu geführt, dass inzwischen fast alle baryonische Materie in Form von Sternen vorliegen sollte. Doch tatsächlich ist das nur bei einem kleinen Teil so, wie Astronomen aus vielen unabhängigen Beobachtun-

gen wissen. In Galaxien wie der Milchstraße befinden sich heute nur 10 bis 20 Prozent von der Materie, welche die Gravitation inzwischen eigentlich dort hineingesogen haben sollte. Der Rest ist wahrscheinlich irgendwo außerhalb, im diffusen intergalaktischen Medium.

Wie konnte es dazu kommen? Theoretiker vermuten schon länger, dass so genannte Rückkopplungsmechanismen mithelfen, das Gas wieder ins All zu treiben (»galaktischer Wind«). Sterne sind alles andere als statisch. Wenn sich sehr massereiche Exemplare bilden, explodieren sie vergleichsweise bald als Supernova und geben ungeheure Mengen Energie an das umliegende Gas ab. Diese Energie ist viel größer als diejenige der Gravitation, welche das Gas an die galaktischen Strukturen bindet. Damit kön-



nen kleine Galaxien schon durch eine geringe Zahl solcher Sterne einen großen Teil ihrer normalen Materie verlieren. Allerdings reicht bei Galaxien, die größer sind als unsere Milchstraße, diese Energiequelle nicht mehr aus, um genügend Gas hinauszubefördern. Eine Theorie geht davon aus, dass die Rückkopplung in solchen Systemen von Materie herrühren könnte, die in supermassereiche Schwarze Löcher stürzt. Solche liegen im Zentrum derartiger Galaxien und können mehrere Milliarden Mal so massereich sein wie unsere Sonne. Diese schwarzen Löcher leuchten als aktive Galaxienkerne – besonders hell etwa im Fall der Quasare, die zu den energiereichsten Phänomenen im Universum gehören.

Das Team um Geach wollte verstehen, wie sich Rückkopplungsmechanismen auf die Galaxien auswirken. Aber das ist eine schwierige Aufgabe. Zwar geht aus vielen Beobachtungen hervor, dass Galaxien häufig Materie ausstoßen, während sich in ihnen Sterne bilden. Doch es war stets schwierig, die Masse dieser Ströme zu messen. Damit blieb auch unklar, welche Energie nötig ist, um sie auszulösen. Der galaktische Wind zwischen Beobachter und Galaxie absorbiert einen Teil ihres Lichts, so dass

Aus der Galaxie Messier 82 strömt senkrecht zu beiden Seiten der leuchtenden galaktischen Scheibe (blau) heißes ionisiertes Gas (rot). Supernova-Explosionen schleudern es hinaus. In Galaxien, die noch extremer sind als diese, treibt offenbar zusätzlich bereits der Druck des intensiven Sternenlichts große Mengen kalter Materie ins All.

vor allem spektroskopische Signaturen gut zugänglich sind. Diese Daten in absolute Massen umzurechnen, erfordert jedoch genaues Wissen darüber, wie die Strömung verläuft und welcher Anteil der enthaltenen Atome und Moleküle sich in den Energiezuständen befindet, die man spektroskopisch gemessen hat.

Selbsterstörerische Gewalt

Geach und seine Kollegen beobachteten nun einen solchen galaktischen Materiestrom bei der Galaxie SDSS J0905+57. Sie ist so weit entfernt, dass sie das heute bei uns eintreffende Licht aussandte, als das Universum gerade einmal halb so alt war wie heute. Dabei gelang ihnen ein viel unmittelbarer Einblick, indem sie die Emission von Kohlenmonoxid vermaßen. Von diesem Molekül ist bekannt, dass es zuverlässig die Gesamtmasse des dichten molekularen Gases anzeigt, von dem es ein Teil ist. Bei seinen Messungen stellte das Team fest, dass sich der Großteil der Materie

regelrecht versteckte – das meiste Gas war nicht das warme und ionisierte, das Physiker normalerweise beobachten, sondern relativ kalt. Doch die Forscher fanden noch etwas viel Erstaunlicheres heraus: SDSS J0905+57 stößt das Gas mit unglaublicher Stärke aus. Das Material fliegt mit etwa 2500 Kilometern in der Sekunde aus der Galaxie – üblich sind eher 200 bis 500 Kilometer pro Sekunde. Jedes Jahr strömen so rund 100 Sonnenmassen ins All. Wenn dieser ungeheure Massenauswurf weitergeht, könnten die Gasvorräte in zehn Millionen Jahren erschöpft sein. Die Geschwindigkeit dieses galaktischen Winds gehört zu den extremsten, die Astronomen kennen.

Was treibt diesen Auswurf an? Die Forscher konnten keinen aktiven Galaxienkern entdecken, und er lässt sich auch nicht mit der Energie von Supernova-Explosionen erklären. Die Antwort könnte sich in einer anderen außergewöhnlichen Eigenschaft der Gala-

xie verbergen. SDSS J0905+57 ist enorm kompakt. Sie bildet im Jahr etwa 100-mal mehr Sternmasse als die Milchstraße. Doch die Hälfte dieser auf Hochtour laufenden Sternentstehung spielt sich in einer Region ab, die weniger als ein halbes Prozent unserer eigenen Galaxis durchmisst. Mit so viel Licht aus einem so kleinen Bereich wird der Impuls bedeutend, den das Sternenlicht selbst auf das umliegende Gas überträgt. Die Astronomen rechnen vor, dass dieser Strahlungsdruck tatsächlich im Stande wäre, den galaktischen Wind auf derart hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen. Das wäre zudem ein gleichmäßigerer Mechanismus als die Beschleunigung durch Supernovae, die enorme Druckwellen auslösen. Im Gegensatz dazu bricht der sanfte Strahlungsdruck die molekularen Bindungen im Gas nicht auf. Ein ganz ähnlicher Vorgang beschränkt auch die maximale Helligkeit eines Sterns. Oberhalb dieser so genannten Eddington-

Grenze drückt sein Licht weiteres einfallendes Material wieder nach außen. Was die Forscher hier also beobachteten, war gewissermaßen eine ganze Galaxie an ihrer Eddington-Grenze.

Ein solcher von Strahlungsdruck getriebener Rückkopplungsmechanismus ist ein aufregendes und ungewöhnliches Phänomen. Zwar gab es schon Theorien, die derartige Prozesse als möglichen Beitrag zum Materiefluss hinzuzogen. Entsprechende Modelle stehen jedoch erst am Anfang, und untermauernde Beobachtungen gab es noch keine. Das könnte sich nun ändern. Zwar bleiben Unsicherheiten – etwa, ob nicht vielleicht doch ein aktives Schwarzes Loch im Kern von SDSS J0905+57 den Vorgang antreibt. Der Galaxienkern hätte vor einigen Millionen Jahren aufblenden und die Winde anstoßen können. Anschließend wäre er wieder erloschen, so dass wir seine direkte Aktivität heute nicht mehr beobachten würden. Allerdings spricht dagegen »Ockhams Ra-

siermesser«. Dieses von Forschern häufig genutzte heuristische Prinzip gebietet, Vorgänge stets mit der geringsten Zahl an notwendigen Hypothesen zu erklären. Da wir die Winde bereits mit dem beobachtbaren Sternenlicht begründen können, sollten wir auch nichts anderes als das heranziehen. Weitere, ähnliche Funde könnten die Theorie in Zukunft statistisch untermauern.

Jedenfalls steht dieses System schon jetzt für eine faszinierende neue Klasse von Objekten, die dem Zwang der Gravitation enorme Kräfte entgegenhalten, dichtes molekulares Gas mit Gewalt ins All schleudern und so zur rätselhaften intergalaktischen Materie beitragen.

Philip F. Hopkins ist theoretischer Astrophysiker am California Institute of Technology.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 516, S. 44–45, 4. Dezember 2014

EPIGENETIK

Genregulation durch RNA-Schnipsel

RNA-Moleküle können Gene abschalten, etwa mittels »RNA-Interferenz«, und so auch ohne Mutation Resistenzen oder Verhaltensänderungen bewirken. Solche Vorgänge gelten meist als epigenetisch – aber nicht unbedingt zu Recht.

VON STEFANIE REINBERGER

Wenn Infektionserreger gegen Medikamente resistent werden, schrillen bei Ärzten die Alarmglocken – und erst recht, wenn ein neuer Mechanismus dahintersteckt. Die große Sorge: Medizinische Waffen gegen gefährliche Keime könnten stumpf werden. Einen solchen neuen Resistenzmechanismus entdeckte kürzlich ein Wissenschaftlerteam aus den USA und Spanien (*Nature* 513, S. 555–558, 2014): Der Köpfcenschimmel *Mucor circinelloides*, der in seltenen Fällen tödliche Infektionen auslösen kann, entkommt der Wirkung des antimykotisch wirkenden Stoffs Tacrolimus mit Hilfe der so genannten RNA-Interferenz (RNAi).

Der Begriff fasst eine Gruppe natürlich vorkommender Mechanismen zum Abschalten von Genen zusammen, bei denen spezielle RNA-Moleküle die normale Genexpression stören. Diese produziert zunächst eine Boten-RNA genannte Abschrift des Gens, die dann ihrerseits als Bauanleitung zur Proteinherstellung dient. RNA-Interferenz kann an verschiedenen Punkten dieses Ablaufs ansetzen, wobei das Resultat dasselbe ist: Es entsteht kein oder nur noch wenig Protein.

Die Forscher behandelten den Pilz mit Tacrolimus und entdeckten daraufhin einige resistente Zellen. Ein Großteil davon enthielt Mutationen, also

Veränderungen der DNA-Sequenz, unter anderem in einem Gen namens *fkba*. Dieses liefert den Bauplan für das Protein FKBP12, an dem Tacrolimus angreift. Bei rund einem Drittel der untersuchten Pilzzellen ließ sich jedoch keine derartige Modifikation des Erbguts ausmachen. Stattdessen entdeckten die Wissenschaftler kleine RNA-Stücke, die in der Lage waren, das *fkba*-Gen – und nur dieses – per RNA-Interferenz stillzulegen.

»Dieser Mechanismus gibt dem Organismus mehr Flexibilität«, erklärt der Studienleiter Joseph Heitman von der Duke University School of Medicine in Durham, North Carolina. »Wenn sich

die Bedingungen ändern, ist es einfacher, wieder zum Ausgangszustand zurückzukehren.« Tatsächlich verschwanden die RNA-Schnipsel ebenso wieder wie die Resistenz, sobald die Pilzzellen in eine Nährlösung ohne den Wirkstoff überführt wurden. Die RNA-Interferenz scheint demnach auch definitiv für die Tacrolimusresistenz verantwortlich zu sein. Mit einem solchen Mechanismus könnte der Pilz sehr schnell auf das Gift reagieren – ohne den Preis zu bezahlen, den eine dauerhafte Anpassung mit sich bringt: Mutationen im Genom bleiben erhalten und können zudem Nachteile für den Organismus bedeuten, etwa eine geringere Stoffwechselrate oder schlechtere Bedingungen für die Vermehrung.

Den neu entdeckten Effekt betrachten die Studienautoren als epigenetisch, da er die DNA-Sequenz des Erbguts nicht verändert, und betiteln ihn entsprechend als Epimutation. Aber handelt es sich bei dieser Resistenz

wirklich um einen epigenetischen Vorgang? »Diese Frage spaltet die Forschungsgemeinde in zwei Lager«, sagt Marc Bühler vom Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research in Basel. »Manche benutzen den Begriff Epigenetik immer dann, wenn ein Gen ohne Veränderung der DNA-Sequenz stillgelegt oder aktiviert wird.« Das beinhaltet auch so genannte posttranskriptionelle Regulationsmechanismen: Sie kommen zum Tragen, wenn das betreffende Gen bereits abgelesen ist, und funktionieren etwa über den Abbau der Boten-RNA.

Was gehört alles zur Epigenetik?

Bühler selbst zählt sich zum zweiten Lager, das die Definition enger steckt. Demnach beinhaltet Epigenetik nur solche Vorgänge, bei denen die veränderte Genaktivität auch nach Wegfall des ursprünglichen Auslösers erhalten bleibt und unter Umständen sogar vererbt werden kann. In dieser Sichtweise

wäre die RNAi-Tacrolimusresistenz kein echtes epigenetisches Phänomen – war der Effekt doch mit Weglassen des Wirkstoffs schnell verpufft.

»Nicht alles, was RNAi ist, ist auch Epigenetik«, bekräftigt Michael Wasenegger, der im AlPlanta-Institut der RLP AgroScience GmbH in Neustadt an der Weinstraße an epigenetischen Mechanismen bei Pflanzen forscht. »Aber«, so ergänzt er, »RNA kann epigenetische Veränderungen steuern.« Das hat der Molekularbiologe bereits 1994 bei Pflanzen entdeckt. Laut seinen Beobachtungen sorgten RNA-Moleküle dafür, dass ins Pflanzengenom integriertes Erbgut des Kartoffel-Spindelknollen-Viroids (potato spindle tuber viroid, PSTVd) zusätzliche Methylgruppen verpasst bekamen. Dabei handelt es sich um den bekanntesten epigenetischen Mechanismus: Kleine Molekülanhänger an der DNA, besagte Methylgruppen, können die Aktivität eines Gens reduzieren oder es sogar ganz stilllegen.



ALLES ÜBER IHRE GRAUEN ZELLEN. SCHWARZ AUF WEISS.

In **Gehirn und Geist** informieren renommierte Wissenschaftler und Fachjournalisten über die Erforschung von Ich und Bewusstsein, Intelligenz, Emotionen und Sprache.

Ab Ausgabe 03/2015 mit dreiteiliger Serie
»Die Welt der schönen Dinge«

Teil 1 – 03/2015: Die Macht der Marken

Teil 2 – 04/2015: Die Vermessung des Schönen

Teil 3 – 05/2015: Auge isst mit

*Drei aktuelle Ausgaben für nur € 5,10 je Heft (statt € 7,90 im Einzelkauf).

So können Sie bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

www.gehirn-und-geist.de/miniabo

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



Nachruf auf meine Privatsphäre

In der Internetära wird Datenschutz zum frommen Wunsch.

Im Prinzip ist der Schutz meiner Privatsphäre gesetzlich garantiert. Er genießt in Deutschland Verfassungsrang, insbesondere durch die Unverletzlichkeit der Wohnung (Grundgesetz, Artikel 13) sowie durch das Post- und Fernmeldegeheimnis (Artikel 10). Ausnahmen von diesem Schutzprinzip sind als »Lauschangriffe« gesetzlich geregelt und setzen »Gefahr im Verzug« voraus.

Doch die technische Entwicklung hebt derlei Vorschriften zunehmend aus. Smartphones, Computer und Navigationsgeräte erzeugen Unmengen privater Daten, die in elektronischen Netzen durch im Detail unbekannte Algorithmen verarbeitet werden; deren Funktionsweise ist das Betriebsgeheimnis des jeweiligen Betreibers, ob er nun Google, Facebook oder Amazon heißt. Der Nutzer kann nicht verfolgen, welchen Weg seine Daten nehmen und wo sie schließlich landen.

Spätestens seit den Enthüllungen des früheren US-Geheimdienst-Mitarbeiters Edward Snowden wissen wir, dass von effektivem Datenschutz im Internet keine Rede sein kann. Ich habe nicht die leiseste Ahnung, was mit meinen Daten in den sozialen Netzwerken geschieht – aber dafür können private Firmen und staatliche Geheimdienste darin lesen wie in einer öffentlichen Bibliothek.

Kürzlich führte ein Team um den Informatiker Yves-Alexandre de Montjoye vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge vor, dass eine Schnüffelinstanz es nicht einmal nötig hat, sich die privaten Klardaten einer Person zu verschaffen, um so gut wie alles über deren Verhalten zu erfahren: Schon die anonymisierten »Metadaten« reichen dafür aus. Man braucht also Namen, Anschrift, Telefon- und Kreditkartennummer gar nicht zu kennen und kann dennoch aus der Kombination einiger bargeldloser Einkäufe mit hoher Trefferquote die Identität des Kunden erraten (*Science* 347, S. 536–539, 2015).

Das Wissenschaftsmagazin »Science« nahm den beunruhigenden Befund zum Anlass, in mehreren Artikeln generell vor dem Ende der Privatsphäre zu warnen (*Science* 347, S. 490–514, 2015). Demnach sind die Möglichkeiten, mit Computerhilfe Menschen auszuschnüffeln, in den letzten Jahren ungeheuer gewachsen. Gesichter und Stimmen lassen sich immer besser vollautomatisch identifizieren. Nicht nur Kreditkarte und Handy sind verräterisch, auch medizinische Geräte wie Herzschrittmacher und Insulinpumpe geben heutzutage ihre Daten im Netz preis.

Spätestens an diesem Punkt wird man freilich zögern, das elektronische Datensammeln in Bausch und Bogen zu verteufeln. Nicht nur bei der Bekämpfung von tödlichen ansteckenden Krankheiten wie Aids oder Ebola wird man kaum aus Datenschutzgründen auf im Internet zugängliche Informationen verzichten wollen. Überhaupt erweisen sich soziale Netzwerke für medizinische, psychologische und soziologische Forschungen als wahre Fundgrube. Hier stellt sich das Datenschutzproblem insbesondere bei der Anonymisierung von Testpersonen. Angesichts der zitierten Studie reicht es offenbar nicht aus, Namen und Adressen wegzulassen, um eine unerwünschte Identifizierung zu verhindern.

Zwar widerstrebt mir die schwarzmalerische Aussage, der unaufhaltsame, allgemeine und komplette Verlust der Privatsphäre sei eine ausgemachte Tatsache. Aber eines steht immerhin fest: Während die technischen Möglichkeiten der Überwachung und Kontrolle in einem nie da gewesenen Ausmaß wachsen, stecken die technischen Mittel, sich davor zu schützen, noch in den Kinderschuhen. Mein Grundrecht auf »informationelle Selbstbestimmung« bleibt vorderhand ein frommer Wunsch.



Michael Springer

Das Anheften neuer Methylgruppen erfolgt mit Hilfe von Enzymen, den DNA-Methylasen. Wassenegger hat damals erkannt, dass manche RNA-Moleküle in der Lage sind, die DNA-Methylasen zu bestimmten Orten im Genom zu führen, die abgeschaltet werden sollen. »Die RNA-Moleküle heften sich an die entsprechenden Gensequenzen im Erbgut und dirigieren die Enzyme so an Ort und Stelle.« Dadurch wurde in dem von Wassenegger untersuchten Beispiel ausschließlich das eingebaute Viroidgenom methyliert, nicht jedoch die eigentliche Pflanzen-DNA.

Die Behauptung, dass RNA mit DNA in dieser Weise interagieren kann, war revolutionär und wurde in der Forschungsgemeinde entsprechend kritisch beäugt. »Bei meinem ersten Vortrag, bei dem ich das Prinzip der »RNA-directed DNA-methylation« vorstellte, wurde ich hingestellt, als ob ich sie nicht alle auf der Reihe hätte«, flachst Wassenegger. Erst einige Jahre später, 1998, wurde die RNA-Interferenz erstmals beschrieben. Der Begriff kam in der Folgezeit regelrecht in Mode – ebenso wie das Forschungsfeld der Epigenetik.

Stillgelegte Genabschnitte

Heute weiß man, dass RNA-Moleküle auch bei Pilzen epigenetische Veränderungen hervorrufen können. Bühler untersucht dies bei der Spaltheife *Schizosaccharomyces pombe*. »Hier können RNAi-Mechanismen an bestimmten Positionen im Genom dazu führen, dass so genanntes Heterochromatin gebildet wird«, erläutert er.

Das heißt: Der Chromatin genannte Komplex aus DNA und Eiweißmolekülen, in dem das Erbgut im Zellkern organisiert ist, wird dort dichter zusammengepackt, so dass es nicht abgelesen werden kann. Genabschnitte in diesem Bereich sind daher stillgelegt. Ist das Heterochromatin erst einmal gebildet, bleibt es unter Umständen auch ohne weitere RNA-Interferenz erhalten – ein epigenetischer Vorgang also, der auch der strengeren Definition standhält.

Ähnliche RNAi-abhängige Mechanismen haben Forscher in jüngster Zeit bei einfachen Tieren entdeckt, etwa beim

Fadenwurm *Caenorhabditis elegans*. »Ob dieses Phänomen auch bei höheren Eukaryoten wie Säugetieren existiert, ist noch nicht endgültig geklärt«, schränkt Bühler ein.

Aktuelle Hinweise darauf, dass auch hier RNA-Moleküle epigenetisch agieren könnten, kommen aus dem Labor von Isabelle Mansuy in Zürich (*Nature Neuroscience* 17, S. 667–669, 2014). Sie hatte mit ihrem Team beobachtet, dass sich Stress bei neugeborenen Mäusen auf nachfolgende Generationen überträgt. Verantwortlich machten die Forscher kleine RNA-Schnipsel, genannt »small noncoding RNAs« (kurz: sncRNAs), die sich in ungewöhnlich hoher Anzahl im Sperma von traumatisierten Tieren tummelten. Unter den Molekülen fanden sich einige, die der natürlichen Stressantwort in die Quere kommen.

In Mansuys Experiment genügte es, RNA aus dem Sperma traumatisierter Tiere in befruchtete Eizellen normaler

Mäuse zu spritzen, um bei den Nachkommen Stressverhalten auszulösen. Sauberer wäre die Beweisführung jedoch, wenn es gelänge, den Effekt auf ganz spezifische sncRNAs zurückzuführen. Unklar ist zudem, weshalb die Generation der Urenkel ebenfalls Stressverhalten an den Tag legt, obwohl diese keine auffälligen RNA-Muster zeigen. »Vermutlich spielen weitere epigenetische Mechanismen eine Rolle, die wir aber noch identifizieren müssen«, meint Mansuy.

Zufällig entstandener Resistenzmechanismus

Beim Köpfcenschimmel *Mucor circinelloides* glauben die Forscher um Heitman offensichtlich nicht daran, dass andere epigenetische Mechanismen mitwirken. Eine ungewöhnliche Methylierung konnten sie nicht nachweisen, weshalb der Resistenzeffekt ihrer Überzeugung nach allein auf RNAi zurückgeht. Nach Abweichungen im Aufbau

des Chromatins hatten sie allerdings nicht gesucht. »Wenn sich das bestätigt, wäre das eine der wenigen Arbeiten, die zeigt, dass sich durch Einfluss von außen – in diesem Fall durch die Droge – eine solche Veränderung tatsächlich hervorrufen lässt«, gibt Bühler zu. Dass es sich dabei aber um einen gezielten Resistenzmechanismus handelt, bezweifelt er stark: »In einem Organismus werden laufend kleine interferierende RNA-Moleküle gegen irgendetwas gebildet. Allerdings merkt man davon normalerweise nichts.« Bühler vermutet daher, dass die resistenten Zellen gar nicht aktiv per RNAi auf den antimykotischen Wirkstoff reagieren. Stattdessen hätten einige Pilzzellen die RNA-Moleküle zufällig produziert, was erst in Anwesenheit des Wirkstoffs und durch den so entstandenen Selektionsdruck aufgefallen sei.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Köln.

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 der Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« und »Das Interview« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg

Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«; Preis: € 139,- pro Person; Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-

Spektrum-Workshop »Das Interview«; Preis: € 179,- pro Person; Sonderpreis für Abonnenten: € 159,-

Weitere Informationen und Anmelde­möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen.



Ronan Stephan
Leiter der Abteilung Innovation
der Alstom-Gruppe



Robert Plana
Verantwortlicher für Hochschulkooperationen der Abteilung Forschung
und Entwicklung der Alstom-Gruppe

ENERGIE, TRANSPORT UND VERKEHR Paradigmenwechsel in der Innovation

Von Ronan Stephan & Robert Plana

DIE TECHNOLOGISCHEN ENTWICKLUNGEN DES 21. JAHRHUNDERTS STEHEN IM ZEICHEN AKTUELLER globaler Herausforderungen. Gefragt sind neue, komplexe oder sogar systemische Lösungen, bei denen immer stärker der Mensch in den Fokus rückt. Daraus ergeben sich neue Ansätze für die Forschung und deren Umsetzung, neue Entwicklungsmethoden und Innovationen, die durch ihren weltweiten Blick auf das Ganze bewusst interdisziplinär angelegt sind und weithin die Informationstechnologie als Inspirationsquelle nutzen.

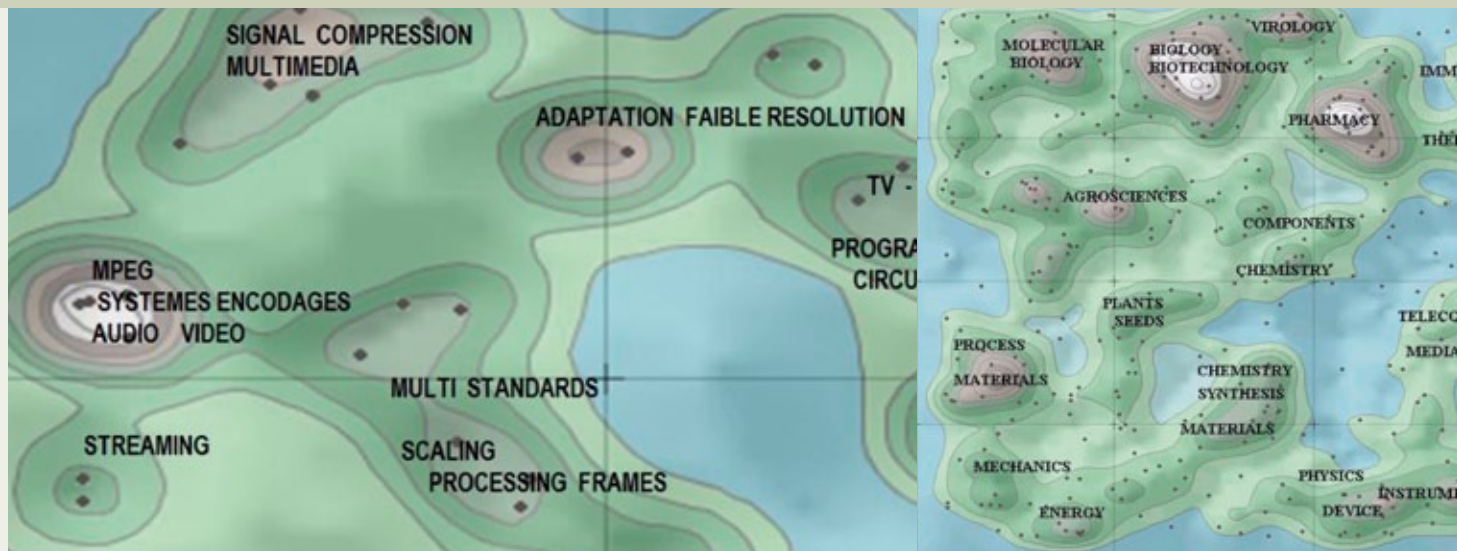
Wie in vielen anderen Wissenschaftsbereichen kommt man in den Disziplinen, die sich mit den Problemstellungen von Energie, Transport und Verkehr auseinandersetzen, heute nicht mehr umhin, sich auch mit globalen Fragen der Urbanisierung, Klimaänderung oder der Verknappung natürlicher Ressourcen zu befassen. Da es sich hierbei um globale Herausforderungen handelt, die von wechselseitigen Abhängigkeiten geprägt sind, müssen systemische Antworten gefunden werden. Der wachsende Einsatz erneuerbarer Energien verlangt nach neuen Lösungen in den Bereichen Energieübertragung, Energiespeicherung und Verbrauchsmanagement. Dies führt zu neuen, komplexeren Architekturen (Smart Grids genannte intelligente Stromnetze, multimodale Mobilitätssysteme und so weiter), die Systemcharakter haben, weshalb ihre Leistung als Ganzes und nicht nur anhand ihrer einzelnen Komponenten optimiert werden muss.

Die neue Komplexität lässt sich mit den Strukturen von Lebewesen vergleichen. Analogien zur Biologie werden geweckt, wo es stets um ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Systemen geht. Betrachtet man die neuen wissenschaftlichen Fragestellungen im Licht verschiedener Disziplinen, so scheinen zuweilen Interpretationsmöglichkeiten und bislang unbekannte

Lösungen auf, um die neuen Architekturen in Modelle zu übertragen und ihr Verhalten vorherzusagen. Dabei kommt es besonders darauf an, jene »schwachen Signale« wahrnehmen zu können, die als paradoxe Beobachtungen das Denken und die Intuition anregen: »Dabei muss ich an ... denken.« Hier liegt der Schlüssel der Analogiebildung: Zum einen beginnt man so, Erkenntnisse zu erlangen und Phänomene zu beherrschen, zum anderen lassen sich auf diese Weise ganz neue Verbindungen herstellen, um ein Problem aus einem völlig anderen Blickwinkel zu betrachten. So kann uns beispielsweise unser Wissen über unser Immunsystem als Inspirationsquelle dafür dienen, die Signalübertragung und vor allem die Sicherheit von Datennetzen zu verbessern.

NEUE DENKMUSTER BEI DER SYSTEMENTWICKLUNG

Solche Systeme verkörpern immer mehr eine Technologie, die dem Menschen dient: Bei ihrer Konzeption stehen Nutzung, Ergonomie und die Wahrnehmung und Erwartungen des Nutzers im Mittelpunkt. Dies bringt einen Paradigmenwechsel mit sich: Als Hauptdeterminanten spielen nicht mehr ausschließlich technische, sondern auch soziale und kognitive Faktoren eine Rolle. Das System muss infolgedessen an den jewei-



Diese Mapping-Technologie hilft Unternehmen, ihre Patente im Wettbewerb einzuordnen und zu vergleichen. Sie zeigt ebenfalls dynamische Bereiche für Chancen und Risiken.

ligen Kontext angepasst werden: kulturell, geopolitisch, ökologisch – es gibt nicht mehr DIE EINE universelle Lösung, sondern VIELE maßgeschneiderte Lösungen, die je nach Land beziehungsweise Hauptenergiequelle unterschiedlichen Anforderungen genügen müssen, und zwar ohne dass die Nutzungsgewohnheiten, die ebenfalls von Ort zu Ort unterschiedlich sind, formal festgelegt wären.

In den Bereichen Energie, Transport und Verkehr prägt dieser erzwungene Paradigmenwechsel die Art und Weise, wie fortan Forschung, Entwicklung und Innovation betrieben werden. Die neuen Schlagworte heißen flexible, rekonfigurierbare Lösungen (beispielsweise über eine dynamische Preisgestaltung), Echtzeit-Steuerungssysteme (zum Aufladen von Elektrofahrzeugen), dynamische Geräteüberwachung und Systemmonitoring (in der Luftfahrt), dynamische Überwachung der Servicequalität (per Internet), Echtzeit-Optimierung der Energieerzeugung und -speicherung (durch »systemisch handelnde« Systeme für den Betrieb der Smart Grids).

DIGITALE REVOLUTION

Etablierte Bezugsrahmen werden in solchen Zeiten großer Veränderungen über Bord geworfen – selbst in den so genannten »traditionellen« Industrien. An die Stelle der klassischen Werkzeuge treten intelligentere, gemeinsam genutzte, verteilte, kooperative und kontinuierlich verbesserte Tools. Vorangetrieben durch den digitalen Wandel ist diese Revolution ebenso einschneidend wie die Online-Revolution, die das Internet vor zwanzig Jahren ausgelöst hat. Die Potenziale der neuen Tools wurden bereits umfassend in den »Open Innovation«-Netzwerken beschrieben; sie begründen ein neues Verhältnis zur Produktion (mit Hilfe von Robotern), eine neue Art, den Austausch von Gütern und Dienstleistungen zu regeln, wie auch eine neue soziale Handhabbarkeit (über kooperative soziale Netzwerke) sowie neue Analyse- und Überwachungsprozesse (mit Hilfe des Data-Mining). Durch diese Tools haben sich nicht nur die Organisation der Unternehmen und ihre Marktbeziehungen zu verändern begonnen. Sie sind zudem auch in der

Lage, aufschlussreiche Informationen über das Unternehmensumfeld und seine mögliche künftige Entwicklung zu liefern. Damit vervollständigen sie das bereits genutzte Arsenal an Hilfsmitteln, um die oben beschriebenen »schwachen Signale« zu erkennen und die aus ihnen abzuleitenden Schlüsse in Szenarien umzusetzen beziehungsweise daraus Strategien zu entwickeln.

Heutzutage werden diese Signale auf ganz unterschiedliche Weise gesammelt beziehungsweise empfangen: analog, digital oder durch Nutzung der so genannten kollektiven Intelligenz.

Die analoge Methode besteht darin, offene Partnerschaften mit Hochschulen, Forschungseinrichtungen und ganz allgemein mit sämtlichen Akteuren der großen Innovations-Ökosysteme auf- und auszubauen. Solche Plattformen, über die Konzepte zwischen Forschern und Industriekonzernen ausgetauscht und diskutiert werden, regen die wissenschaftliche Forschung an und zeigen unabhängig von der Ausgereiftheit der jeweiligen Technologie klar die Problemstellungen einer industriellen Nutzung auf. Verschiedene Sichtweisen aus unterschiedlichsten Perspektiven und ein auf Dauer angelegter Dialog nähren das Miteinander und bringen neue Ideen hervor, wodurch sich manchmal bereits in einem sehr frühen Stadium neue Betätigungsfelder für die wissenschaftliche Forschung ergeben.

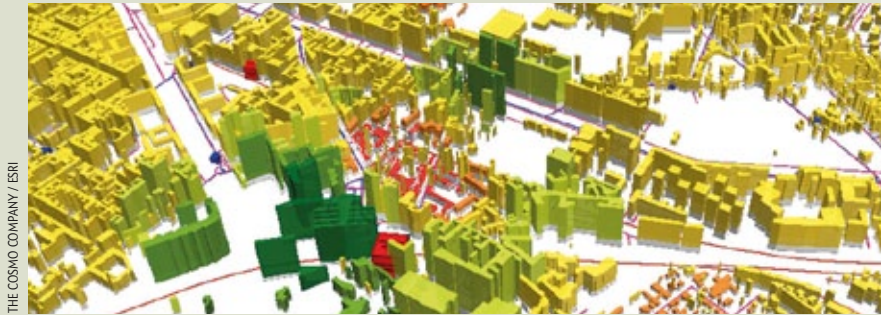
Bei der digitalen Methode werden mit Hilfe schneller, geeigneter Verfahren die enormen Datenmengen (über Benutzer, ihre Nutzungsgewohnheiten, ihre Hardware und so weiter) durchforstet, die heutzutage verfügbar sind. Dabei werden relevante Informationen zu neuartigen Fragestellungen extrahiert. Diese zweite Methode ebnet neuen Ansätzen im Bereich der wirtschaftlichen Informationsbeschaffung den Weg, damit Unternehmen in der strategischen Analyse und in ihren Entscheidungsprozessen künftig schneller reagieren können.

Die dritte Methode macht sich die kollektive Intelligenz zu Nutze. Als Hybridform der beiden erstgenannten kombiniert sie deren Stärken. Sie fördert die Bildung physischer Gemeinschaften zu strategischen Themen und »füttert« sie mit digitalen Inhalten. Alstom setzt dieses neue Konzept beispielsweise

Modellierung einer Stadt

The CoSMo Company ist ein französisches Start-up-Unternehmen mit Sitz in Lyon und San Francisco, das 2010 gegründet wurde. Es bietet multiskalige, dynamische und heterogen anwendbare Tools zur Modellierung und Simulation komplexer Systeme an. CoSMo entwickelt Softwarelösungen für Problemstellungen im Bereich Energie und Stadtentwicklung. Im Oktober 2013 erstellte das Unternehmen ein evolutives Modell der Stadt Versailles, in dem gleichzeitig die Aspekte Transport und Verkehr, Grund- und Bodennutzung sowie die Erschließung von Immobilienpro-

jekten dargestellt wurden. Ziel war, die Auswirkungen politischer Infrastrukturentscheidungen auf die Lebensqualität in der Stadt und die Attraktivität der unterschiedlichen Stadtviertel über einen Zeitraum von 20 Jahren vorherzusagen. Das eigentlich für Versailles entworfene Tool konnte im Dezember 2013 auch für San Francisco eingesetzt werden. Mit dem gleichen Typ von überaus heterogenen Daten konnten so für ein Stadtviertel verschiedene Szenarien stadtpolitischer Entscheidungen zur selben Fragestellung durchgespielt werden.



THE COSMO COMPANY / ESRI

Auswirkungen von politischen Entscheidungen auf die Entwicklung der Lebensqualität in Versailles über einen Zeitraum von 20 Jahren. Die Veränderungen treten nicht immer dort auf, wo man sie erwartet hätte (negativ: rot; positiv: grün).

im Rahmen eines neuartigen Projekts ein, das sich auf ein soziales Innovationsnetzwerk von Unternehmen stützt: Dabei werden in virtuellen Gemeinschaften reale Benutzer mit rekonfigurierbaren virtuellen Benutzern zusammengeführt. Diese Avatare sind fähig, für die Gemeinschaft relevante Themen zu analysieren und daraus Datenabfragen abzuleiten, deren Resultate wieder in den Gedankenaustausch eingebracht werden. Daraus entstehen neuartige, dynamische Sammlungen von Erkenntnissen, die einerseits eine vorläufige Darstellung der erwähnten schwachen Signale beinhalten und es andererseits möglich machen, originelle Szenarien zu entwickeln, um Lösungen für strategische Herausforderungen zu finden

NEUE FERTIGKEITEN FÜR DIE KONZEPTION NEUER LÖSUNGEN

Die Art und Weise, wie wir mit den künftigen Herausforderungen in den Bereichen Energie, Transport und Verkehr umgehen, hängt nicht nur von den technologischen Entwicklungen ab, sondern auch von der Erlangung und Beherrschung neuer Fertigkeiten, um künftige Architekturen (das heißt Systeme von Systemen) zu analysieren, vorherzusagen und dabei gleich von der Konzeptionsphase an eine Komplexität zu berücksichtigen, die sich um soziologische und organisatorische Dimensionen erhöht.

In einem solchen Kontext wird der Simulation komplexer Systeme (vergleiche das in der Infobox oben dargestellte Beispiel von The CoSMo Company) und der Nutzung so genannter »Serious Games« eine Schlüsselrolle bei der Definition künftiger Produkte zukommen. Bei der Produktentwicklung werden neue, plastischere Marketingmethoden zum Tra-

gen kommen, die die Nutzererwartungen zu einem früheren Zeitpunkt in den Entwicklungsprozess einfließen lassen. Solche neuen, bewusst unscharf gehaltenen Systeme müssen ausreichend adaptierbar und modifizierbar sein, damit die Kunden sich mit ihnen identifizieren können. Dann nämlich erhält man Produkte, an deren Entwicklung die Kunden mitgewirkt haben (Customer-Co-Development). Dies ist der allgemeine Trend, der unter anderem vom Ansatz des »Design Thinking« geleitet ist: Man lässt sich von den Wünschen der Nutzer inspirieren, um sie durch Abstraktion in das Design neuer Produkte einfließen zu lassen. »Design Thinking« ist somit ein neuartiger co-kreativer Prozess.

INFORMATIONSVERRARBEITUNG ALS WETTBEWERBSVORTEIL

Damit wird zu guter Letzt deutlich, dass die digitale Revolution neue Herausforderungen mit sich bringt, die auch vor den Unternehmen nicht Halt machen. Intern verändern sich grundlegend die Prozesse und der Austausch der Akteure untereinander – insbesondere durch den Zugang zu Informationen.

Außerhalb der Unternehmen gilt indes, dass nicht mehr Produkte, sondern Lösungen nachgefragt werden. Die dafür eingesetzten Rohstoffe stammen aus den großen Datensammlungen (Big Data), und es wird derjenige einen Wettbewerbsvorteil haben, der fähig ist, sie effizient zu verarbeiten. Diese neue, essenziell gewordene Ressource ruft wiederum die Akteure der digitalen Welt auf den Plan, die wie viele andere Mitbewerber nun in Märkte eindringen, die bisher den traditionelleren Branchen vorbehalten waren. ■

1915

Markante Fossilien

»Mesosauridenreste aus dem grauen Tonschiefer bei Keetmanshoop werden im Centralblatt für Mineralien und Geologie beschrieben (*Meso-*

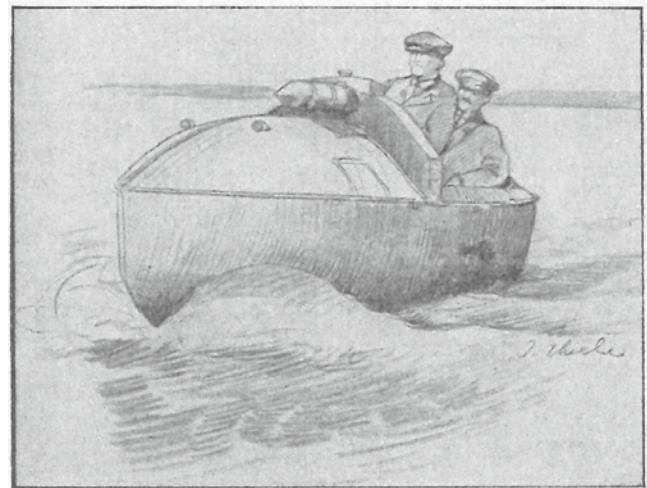
saurus war ein im Wasser lebendes Reptil des Perm; Keetmanshoop liegt heute in Namibia. *Anm. d. Red.*). Durch die Fossilreste ist die Gleichaltrigkeit der Schiefer mit den permischen des übrigen Südafrikas und Südbrasilien erwiesen. Deutsch-Südwestafrika ist fossilreich und daher für vergleichende Stratigraphie besonders wichtig.« *Prometheus* 1323, S. 368, 1915

Freie Fahrt zum Sieg

»Das Wasser-Automobil oder Land-Motorboot – man ist im Zweifel, wie man es taufen soll – haben wir dem Wiener Ingenieur L. Zeiner zu verdanken. Zum Antrieb dient ein Vierzylindermotor von 16 PS, der ihm zu Lande eine Stunden-geschwindigkeit von 75 km verleiht, die sich im Wasser auf etwa 20 km verringert. Das Zuwassergehen des Fahrzeugs gestaltet sich einfach, da es selbst über steile Böschungen laufen kann. Im Augenblick des Eintritts in das Wasser wird die Schraube eingeschaltet, am anderen Ufer schaltet man das Getriebe auf die Räder um. Wie es heißt, ist das Fahrzeug so gebaut, daß es auch Schlamm und Sumpf gut durchzieht. In seichten Gewässern werden neben der Schraube noch die Räder zuhulfe genommen. Die neue Erfindung scheint vor allem vom militärischen Standpunkt aus bemerkenswert, hören die Gewässer doch damit auf, Hindernisse für die Kriegführung zu bilden.« *Technische Monatshefte* 3, S. 94/95, 1915

Kristalle im Röntgenlicht

»Die Natur der Röntgenstrahlen ist durch die Untersuchungen von Laue geklärt worden. Sie sind als Lichtstrahlen außerordentlich kleiner Wellenlänge festgestellt worden. Laue ging davon aus, daß der Bau der Moleküle in Kristallen ein Gitter darstellen müsse von molekularer Feinheit und ließ durch ein in entsprechender Weise zur Achse geschnittenes Plättchen von Zinkblende einen Strahl von Röntgenstrahlen auf eine Trockenplatte fallen, und siehe da, um den dunklen Punkt, den die Röntgenstrahlen erzeugten, bildeten sich die bekannten Interferenzpunkte ab, womit der Beweis geliefert war, daß die Röntgenstrahlen Lichtstrahlen sind.« *Die Welt der Technik* 6, S. 94, 1915



Dem Äußeren nach ein Rennwagen – das Zeinersche Amphibienfahrzeug.

Raffiniertes Protein

»Chemiker einer französischen Erdölgesellschaft haben ein neues Raffinationsverfahren für Petroleum entwickelt. Dabei werden zwei Fliegen mit einer Klappe geschlagen: Einerseits führen Mikroorganismen, die sich gern in Rohöl ansiedeln und vor allem von dessen paraffinartigen Bestandteilen leben, einen Raffinierungsprozess durch, dessen Ergebnisse überlegen sein sollen. Andererseits entstehen dabei reine

und vitaminreiche Eiweissstoffe, und zwar 500mal schneller und auch sehr viel billiger als auf dem ›Umweg‹ über tierisches Fleisch. Versuche mit Ratten und Hühnern, die mit solchem Eiweiss seit zwei Jahren ernährt worden sind, sollen zufriedenstellend verlaufen sein.« *Neuheiten und Erfindungen* 347, S. 31, 1965

1965



Isotope im Untersuchungszimmer

»Nuclear Enterprises LTD. entwickelte ein klinisches Szintillations-Spektrometer in zwei Varianten. Das Instrument ermöglicht Schilddrüsenuntersuchungen und Nierenfunktionsanalysen mit Radioisotopen. Dem Patienten wird ein Präparat ver-

abreicht, das in geringen Mengen radioaktive Stoffe enthält. Für Schilddrüsenuntersuchungen verwendet man z.B. das Jod-Isotop ^{131}I . Die vom Präparat ausgehende Strahlung läßt sich sodann auf ihrem Weg durch das Körperorgan mit dem Szintil-

lations-Meßkopf verfolgen. Beim Auftreffen der Strahlung auf den Meßkopf werden Spannungsimpulse erzeugt. Aus den angezeigten Werten kann der Arzt Rückschlüsse auf die Funktion des betreffenden Organs ziehen.« *Elektronik* 3, S. 93/94, 1965

Ein neues Kapitel der Hirnforschung

Mit den aufwändigsten Programmen ihrer Geschichte wollen Neuroforscher ergründen, wie das hochkomplexe Organ in unserem Kopf Gefühle und Gedanken hervorbringt. Dazu müssen sie auch völlig neue Methoden entwickeln.

Von Rafael Yuste und George Church

Seit mehr als einem Jahrhundert studieren sie es intensiv – und doch wissen die Hirnforscher noch immer nicht, wie die etwa 1300 Gramm Gewebe funktionieren, aus denen unser Bewusstsein und all unsere Aktivitäten hervorgehen. Viele versuchten, es sich einfacher zu machen, indem sie zunächst Nervensysteme weniger komplexer Organismen untersuchten: Schon 1986 kartierten Biologen sämtliche Verbindungen der 302 Nervenzellen des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*. Doch dieses Diagramm der neuronalen Verknüpfungen erklärt nicht, wie das Zusammenspiel beispielsweise Futteraufnahme und Fortpflanzung bewirkt. Die Forscher scheiterten bisher daran, die Aktivität seiner Neurone mit einem bestimmten Verhalten zu verbinden.

Noch viel aussichtsloser ist es, beim Menschen von neurobiologischen Prozessen auf Handlungen zu schließen. In den Medien kursieren immer wieder Bilder von Hirnscans, bei denen bestimmte Regionen aufleuchten, wenn sich Menschen etwa zurückgewiesen fühlen oder eine Fremdsprache sprechen. Diese Berichte erwecken den Eindruck, moderne Technologien erlaubten tiefe Einblicke in die Arbeitsweise des Gehirns. Doch das täuscht.

Ein bemerkenswertes Beispiel für das Missverhältnis von Erkenntnissen und Verständnis ist eine viel diskutierte Studie, bei der einzelne Hirnzellen nur dann aktiv wurden, wenn der Proband ein bestimmtes bekanntes Gesicht sah, in diesem Fall das der Schauspielerin Jennifer Aniston («Wie das Gehirn die Großmutter erkennt», *SdW* 3/13, S. 28). Die Nachricht von so extrem spezialisierten Neuronen glich einem Signal von Außerirdischen, das zwar die Existenz intelligenten Lebens im Universum beweist, dessen Inhalt jedoch völlig unverständlich bleibt. Hirnforscher wissen nach wie vor nicht, wie die elektrische Aktivität dieses Neurons damit zusammenhängt, dass wir Jennifer

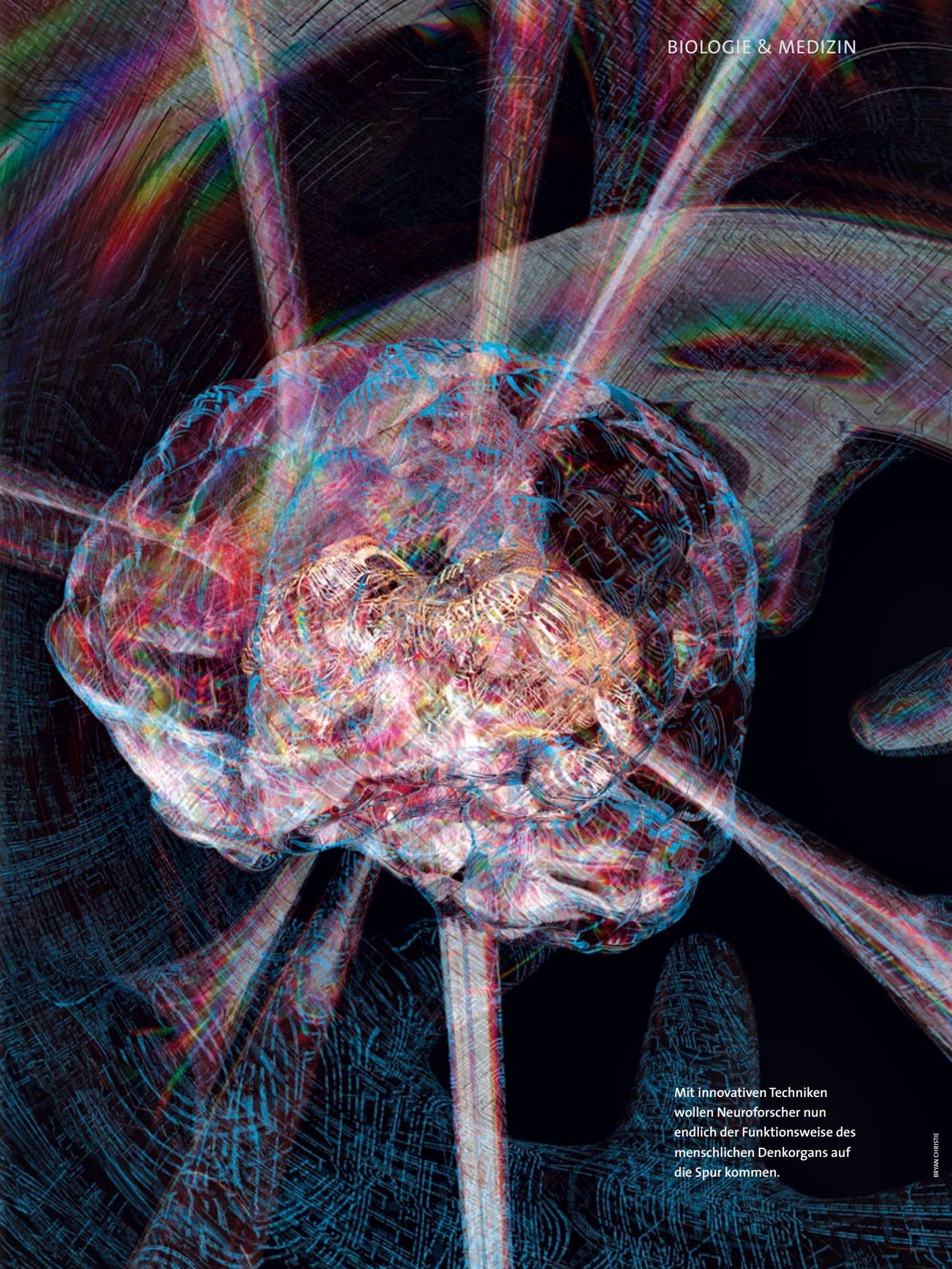
Anistons Gesicht erkennen und es einem Ausschnitt aus der Fernsehserie »Friends« zuordnen können. Für diese Aufgabe nutzt unser Gehirn wahrscheinlich ein großes Ensemble von Hirnzellen, die über einen noch unbekannt neuronalen Kode miteinander kommunizieren.

Dieser Fund steht beispielhaft dafür, dass die Neurowissenschaften an einem Scheideweg angekommen sind. Wissenschaftler verfügen bereits über Techniken, mit denen sie am lebenden Menschen die Aktivität einzelner Nervenzellen beobachten. Doch wenn sie ihr Forschungsfeld weiterbringen wollen, brauchen sie neue Methoden, um die elektrische Aktivität von Tausenden oder Millionen von Neuronen aufzuzeichnen und sogar zu beeinflussen. Erst solche Technologien würden »den Dschungel durchdringen, in dem sich viele Forscher verlaufen haben«, wie es bereits der spanische Pionier der Neuroanatomie Santiago Ramón y Cajal (1852 – 1934) formulierte.

Solche bahnbrechenden Methoden verknüpfen dann vielleicht endlich die einzelnen feuernden Neurone mit Kognition: mit Wahrnehmungen, Gefühlen, Entscheidungen und letztlich dem Bewusstsein selbst. Gelingt es, die Muster zu entschlüsseln, die dem Denken und Verhalten zu Grunde liegen, werden auch die fehlerhaften Verschaltungen zugänglich, die bei psychiatrischen oder neurologischen Erkrankungen auftreten – etwa Schizophrenie, Autismus, Alzheimerdemenz oder der Parkinsonkrankheit.

Den Ruf nach einem Technologiesprung in der Hirnforschung vernehmen inzwischen auch Verantwortliche außerhalb der Labore. So kündigte die US-amerikanische Regierung 2013 ein Großforschungsprojekt an: die BRAIN-Initiative (Brain Research for Advancing Innovative Neurotechnologies).

Das Projekt ging im Jahr 2014 bereits mit einem Startkapital von mehr als 100 Millionen US-Dollar ins Rennen.



Mit innovativen Techniken wollen Neuroforscher nun endlich der Funktionsweise des menschlichen Denkgorgans auf die Spur kommen.

Damit sollen Neurowissenschaftler Technologien entwickeln, um die Signale einer großen Zahl einzelner Neurone und letztendlich ganzer Hirnareale aufzuzeichnen. Zu BRAIN gesellen sich neurowissenschaftliche Großprojekte außerhalb der USA. Die Europäische Union finanziert zum Beispiel das auf zehn Jahre ausgelegte Human Brain Project mit 1,2 Milliarden Euro. Ziel ist nicht weniger als ein Computermodell des gesamten menschlichen Gehirns. Auch China, Japan und Israel legen ambitionierte neurowissenschaftliche Forschungsprogramme auf. Die weltweite Einhelligkeit, mit der zurzeit in die Hirnforschung investiert wird, weckt Erinnerungen an Wissenschafts- und Technologiewettläufe der Nachkriegszeit, die sich Feldern dringlicher nationaler Interessen widmeten: Nuklearenergie, Atomwaffen, Weltraumforschung, Computertechnik, alternative Energien und Genomsequenzierung. Nun liegt also eine neue Ära der Hirnforschung vor uns.

Es scheint derzeit unüberwindbar schwierig nachzuvollziehen, wie aus einzelnen Zellsignalen abstrakte Konzepte entstehen: etwa die Vorstellung von der Person Jennifer Aniston oder von etwas vergleichbar Komplexem, dem wir mit unseren subjektiven Erfahrungen und Empfindungen begegnen. Dazu müssen Hirnforscher über die Aktivitätsmessungen einzelner Neurone hinausgehen und herausfinden, wie Ensembles vieler Zellen gemeinsam das Wahrgenommene hervorbringen. Wissenschaftler sprechen dabei von emergenten Eigenschaften. So entsteht etwa die Temperatur oder die Festigkeit eines Materials oder der Magnetismus eines Metalls, indem eine Vielzahl von Molekülen oder Atomen wechselwirken. Zum Beispiel: Je nachdem, wie Kohlenstoffatome sich zusammenlagern, bildet sich ein ultrahartes Material wie Diamant oder ein ganz weiches wie Graphit, das so leicht abschilfert, dass wir damit auf Papier schreiben können. Welche dieser beiden emergenten Eigenschaften auftritt, hängt nicht von den einzelnen Atomen ab, sondern von der Art ihrer Interaktion.

Sicher besitzt auch das Gehirn vielfältige emergente Eigenschaften, die Forscher nicht erkennen, wenn sie nur einzelne Neurone oder kleine Gruppen von ihnen beobachten. Wie es die Wahrnehmung einer Blume oder die Erinnerung an ein Kindheitserlebnis erzeugt, werden die Neurowissen-

schaftler vermutlich nur aufklären, wenn sie die elektrische Aktivität komplexer Netze hunderter oder tausender Zellen verfolgen. Das ist den Forschern zwar schon länger bewusst, doch es fehlen ihnen nach wie vor die Werkzeuge dafür.

Als Ausweg aus diesem methodischen Engpass begannen Wissenschaftler, die Anschlussstellen zwischen den Nervenzellen, die Synapsen, zu kartieren. Dieser Ansatz nennt sich Konnektomik. Im Rahmen des Human Connectome Project wollen US-Forscher ein Diagramm der Netzwerkstrukturen der Neurone im menschlichen Gehirn erstellen. Doch genau wie beim Fadenwurm ist die Kartierung nur ein erster Schritt. Denn die veränderlichen Muster elektrischer Impulse in diesem Netzwerk kann sie nicht erfassen.

Um solche Messungen anzustellen, sind grundlegend neue Techniken nötig. Denn mit herkömmlichen Methoden entsteht entweder ein genaues Bild der elektrischen Aktivität kleinster Neuronengruppen oder aber ein Überblick über größere Hirnbereiche, dann aber in derart schlechter Auflösung, dass Rückschlüsse auf einzelne Schaltkreise unmöglich werden.

Das Gesamtnetzwerk begreifen – und die Einzelteile im Blick behalten

Konventionelle Methoden messen die Aktivität einzelner Nervenzellen mit feinen Elektroden, die wie eine Nadel in das Hirn geführt werden. Sie registrieren die elektrischen Impulse, die eine Nervenzelle beim Empfang eines chemischen Signals benachbarter Neurone erzeugt. Wird ein Neuron nämlich ausreichend stimuliert, strömen über Ionenkanäle in der Zellmembran Natrium oder andere positiv geladene Ionen ein. Das wiederum ändert das elektrische Potenzial an seiner Membran und löst eine Spannungsspitze aus, die sich entlang des langen Zellfortsatzes, des Axons, bis zu einer Synapse fortpflanzt. An dieser Verbindungsstelle gibt die Zelle eigene chemische Signale an ein anderes Neuron ab und leitet so das Signal weiter. Nur eine Hirnzelle in dieser Kette zu beobachten, wäre vergleichbar damit, nur einen Bildpunkt eines Kinofilms zu verfolgen und daraus die Handlung ableiten zu wollen. Zudem kann diese Art, das Hirn anzupapfen, Hirngewebe verletzen.

Auf der anderen Seite des methodischen Spektrums sind auch diejenigen Techniken unzureichend, mit denen Forscher ausgedehnte Hirnareale beobachten. Bei der Elektroenzephalografie (EEG), die der deutsche Neurologe Hans Berger schon in den 1920er Jahren entwickelte, liegen Elektroden auf der Kopfhaut und messen die kombinierte Aktivität von hunderttausenden Nervenzellen im darunterliegenden Hirngewebe. Das EEG zeichnet mit raschen Ausschlägen Wellen auf, die sich im Bereich von Millisekunden verändern können. Jedoch sind Aussagen über die Aktivität irgendeines bestimmten Neurons unmöglich. Auch die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) – mit den bekannten Bildern eingefärbter aktiver Hirnareale – erfordert keinen Eingriff in das Gehirn. Doch ihre räumliche und zeitliche Auflösung ist sehr begrenzt. Jedes dreidimensionale Bildelement,

AUF EINEN BLICK

INS DUNKEL DER DENKFABRIK

1 Wie das menschliche Gehirn **Bewusstsein** ermöglicht, ist eines der größten Rätsel der Wissenschaft.

2 Nur **einzelne Zellen** zu untersuchen oder **große Hirnbereiche** in schlechter Auflösung, hat die Neurobiologen bisher nicht weit gebracht.

3 Mit neuen Technologien und interdisziplinären Großprogrammen soll es gelingen, **Neurone in ausgedehnten Netzwerken** detailliert zu beobachten und zu manipulieren und so die Funktionsweise des Hirns zu entschlüsseln.

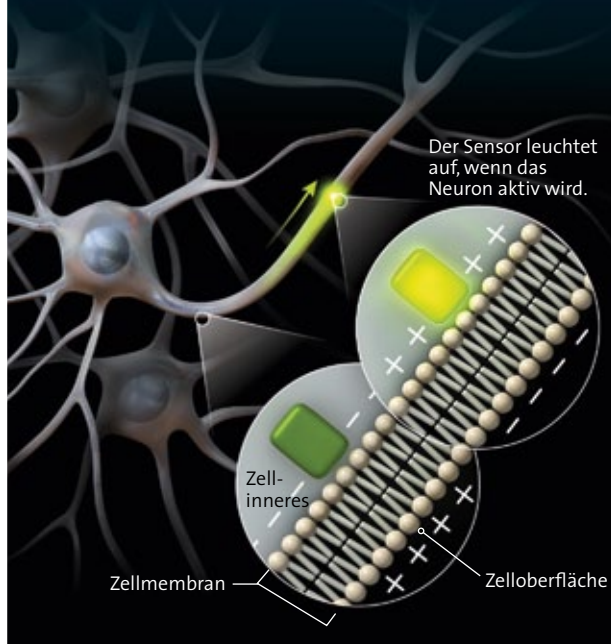
Lauschen an Millionen Neuronen

Neurowissenschaftler benötigen wirkungsvollere und gewebschonendere Methoden, um zu beobachten, wie Neurone elektrische Signale austauschen. Mit einer Reihe von Technologien – einige bereits erprobt, andere noch bloße Ideen – könnten For-

scher künftig die Aktivität von Tausenden oder gar Millionen Zellen gleichzeitig aufzeichnen. Sie werden die heutigen langsamen und ungenauen Methoden ersetzen, die zudem häufig implantierte Elektroden erfordern.

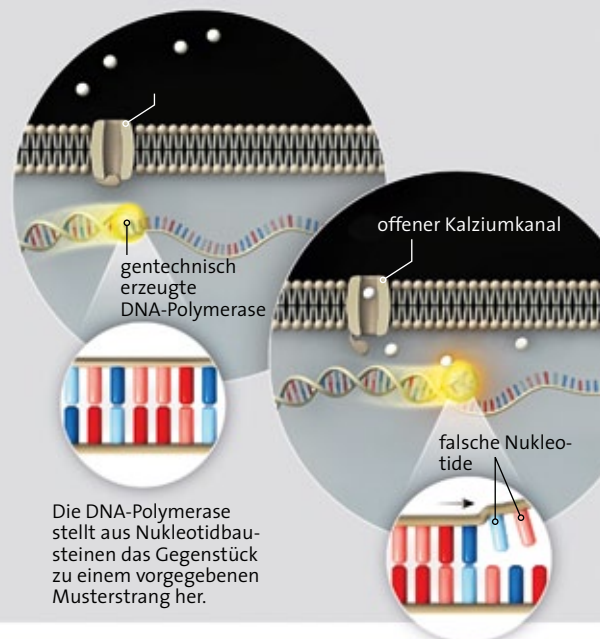
POTENZIOMETRISCHE FARBSTOFFE

Ein spannungsempfindlicher Farbstoff an der Oberfläche des langen Nervenzellfortsatzes, des Axons, fluoresziert, sobald sich das elektrische Potenzial an der Zellmembran ändert. Das geschieht immer, wenn ein Signal die Zelle durchläuft. Mit einem Detektor (hier nicht gezeigt) ließe sich dieses Ereignis erfassen – und gleichzeitig auch die Aktivität vieler anderer Neurone.



DNA-LOCHSTREIFEN

Ein DNA-Einzelstrang mit einer bekannten Nukleotidsequenz wird im Inneren eines Neurons, jedoch nahe seiner Oberfläche platziert. Das Enzym DNA-Polymerase synthetisiert das zu diesem Musterstrang passende Gegenstück, so dass sich ein Doppelstrangmolekül bildet (links). Wird das Neuron aktiv, strömen Kalziumionen in die Zelle. Unter ihrem Einfluss macht die DNA-Polymerase jedoch Fehler und baut falsche Nukleotide ein (rechts). Diese Fehler lassen sich später an dem Erbgutstrang ablesen.



oder Voxel, enthält viele Zehntausende Neurone. Darüber hinaus wird im fMRT die neuronale Aktivität nicht direkt sichtbar, sondern nur in Form des veränderten Blutflusses innerhalb der einzelnen Voxel.

Um die Signale Tausender von Zellen individuell und gleichzeitig zu erfassen, helfen vielleicht Nanotechnologien mit ihren Strukturen in der Größenordnung einzelner Moleküle. Erste Prototypen bestehen aus mehr als 100 000 feinsten Elektroden auf einem Siliziumchip. Solche Elektrodenarrays könnten zum Beispiel dazu dienen, die elektrische Aktivität Zehntausender Neurone in der Netzhaut aufzuzeichnen. In der weiteren Entwicklung versuchen die Forscher, solche Arrays zu dreidimensionalen Strukturen zu stapeln. Die Elektroden sollen außerdem noch dünner werden, um das Hirngewebe nicht zu schädigen – und noch länger, um tiefer in die Hirnrinde vorzudringen. Dann würde es womöglich gelingen, auch dort die Aktivität vieler zehntausend

Neurone gleichzeitig aufzuzeichnen – und dabei die elektrischen Impulse jeder beteiligten Zelle einzeln zu erfassen.

Elektroden sind nur eine Möglichkeit, um die Aktivität von Hirnzellen zu messen. Allmählich halten neue Techniken Einzug in die Labors, die ohne derartige Sensoren auskommen. Neue Methoden aus der Physik, der Chemie und der Genetik ermöglichen es Biologen, die Neurone von Tieren während deren normalem Tagesablauf zu beobachten.

Einen Vorgeschmack auf das, was möglich werden könnte, gab 2013 Misha Ahrens vom Howard Hughes Medical Institute in Virginia. Ihm gelang es, das gesamte Gehirn eines Zebrafährblings mikroskopisch abzubilden. Der Fisch gehört zu den beliebtesten Versuchstieren der Neurobiologen, da die Tiere bis ins Larvenstadium hinein durchsichtig sind und sich so ihr Innenleben einschließlich des Gehirns ganz einfach verfolgen lässt. Die Forscher hatten den Zebrafährbling für das Experiment gentechnisch derart manipuliert, dass

Ein Lichtschalter im Hirn

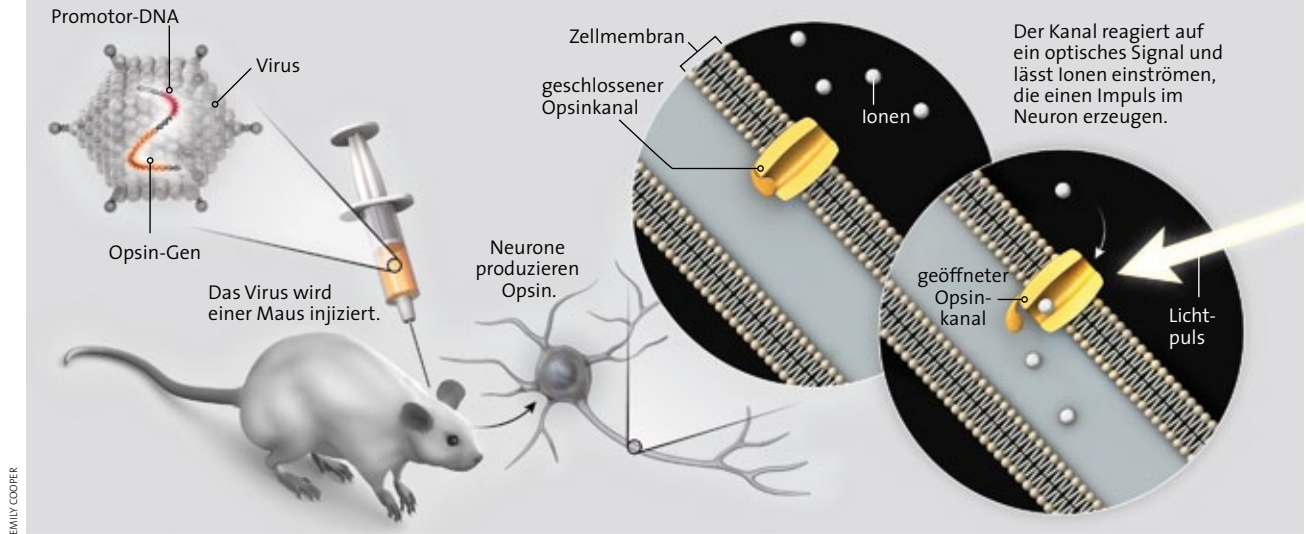
Neurowissenschaftler wollen die neuronalen Schaltkreise nicht nur beobachten, sondern auch gezielt ein- und ausschalten.

So könnten sie herausfinden, wie bestimmte Hirnaktivitäten entstehen und sich eventuell sogar steuern lassen. Diese neu

DAS PRINZIP DER OPTOGENETIK

Der Name deutet schon darauf hin: Forscher kombinieren optische Signale und Gentechnik, um Schaltkreise im Gehirn zu aktivieren. Zuerst wird in ein Virus ein Gen eingebaut. Dieses kodiert für ein lichtempfindliches Membranprotein namens Opsin. Das Virus wird einem Versuchstier injiziert und schleust seine Genfracht in be-

stimmte Neurone ein (diese Auswahl treffen die Gentechniker über zusätzlich eingebaute so genannte Promotor-DNA). Die Zellen bauen dann Opsinkanäle in ihre Membran ein. Gelangen über Glasfaserkabel Lichtsignale in das Hirn der Maus, öffnen sich die Kanäle, und Ionen strömen ins Zellinnere. Das löst einen elektrischen Impuls aus.



seine Neurone fluoreszierten, sobald nach deren Aktivierung Kalziumionen ins Zellinnere einströmten. Ein neuartiges Mikroskop beleuchtete mikrometerdünne Schichten des gesamten Fischgehirns, während eine Kamera im Sekunden-takt die darin aufleuchtenden Neurone fotografierte.

Rätselhafte Aktivitätsmuster

Mit der dabei eingesetzten Technik des Kalzium-Imagings, das einer von uns beiden (Yuste) mit entwickelt hat, ließ sich die Aktivität von 80 Prozent der rund 100000 einzelnen Neurone des Fischembryos erfassen. Dabei stellte sich etwa heraus, dass selbst beim ruhenden Tier viele Regionen des Nervensystems in rätselhaften Mustern aufleuchten und erlöschen. Seit der Erfindung der Elektroenzephalografie wissen wir: Das Hirn ist ständig aktiv. Das Experiment mit dem Zebraquerschnitt lässt hoffen, dass Neurowissenschaftler mit neuen bildgebenden Verfahren endlich eine ihrer wichtigsten Fragen beantworten und verstehen werden, was es mit dieser unaufhörlichen, spontanen Aktivität großer Neuronengruppen auf sich hat.

Doch auch dieses Experiment ist wieder nur ein Anfang, denn die Hirnforscher benötigen noch leistungsfähigere Methoden, um herauszufinden, wie Gehirnaktivität und Verhalten zusammenhängen. Zum Beispiel bedarf es neuartiger

Mikroskope, um die Aktivität vieler Neurone in allen Raumebenen simultan zu erfassen. Zudem reagiert das Kalzium-Imaging zu langsam, als dass man mit ihm die hochfrequente Abfolge neuronaler Impulse vollständig aufzeichnen könnte. Und es erfasst auch nicht hemmende Signale, welche die elektrische Zellaktivität dämpfen.

Innovative optische Techniken sollen stattdessen direkt die Potenzialänderungen der Zellmembran zugänglich machen. Farbstoffe, deren optische Eigenschaften von der Spannung abhängen, werden entweder von außen auf die Zelle aufgebracht oder mittels Gentechnik in die Zellmembran eingebaut. Solch eine Bildgebung würde es Forschern eines Tages ermöglichen, die elektrische Aktivität jeder Zelle in einem weitläufigen Neuronennetz aufzuzeichnen.

Diese Technik steckt erst in den Kinderschuhen. Die Chemiker müssen noch dafür sorgen, dass die Farbstoffe besser auf die Neuronenaktivität reagieren. Zugleich dürfen sie die Zelle selbst nicht schädigen. Dennoch verankern Molekularbiologen bereits erste derartige Spannungssensoren im Genom von Versuchsmäusen.

Wie bereits bei den Hirnelektroden werden möglicherweise auch hier nanotechnologische Erfindungen helfen. Statt aus biologisch erzeugten Farbstoffen könnte ein neuer Typ von Spannungssensoren aus Quantenpunkten beste-

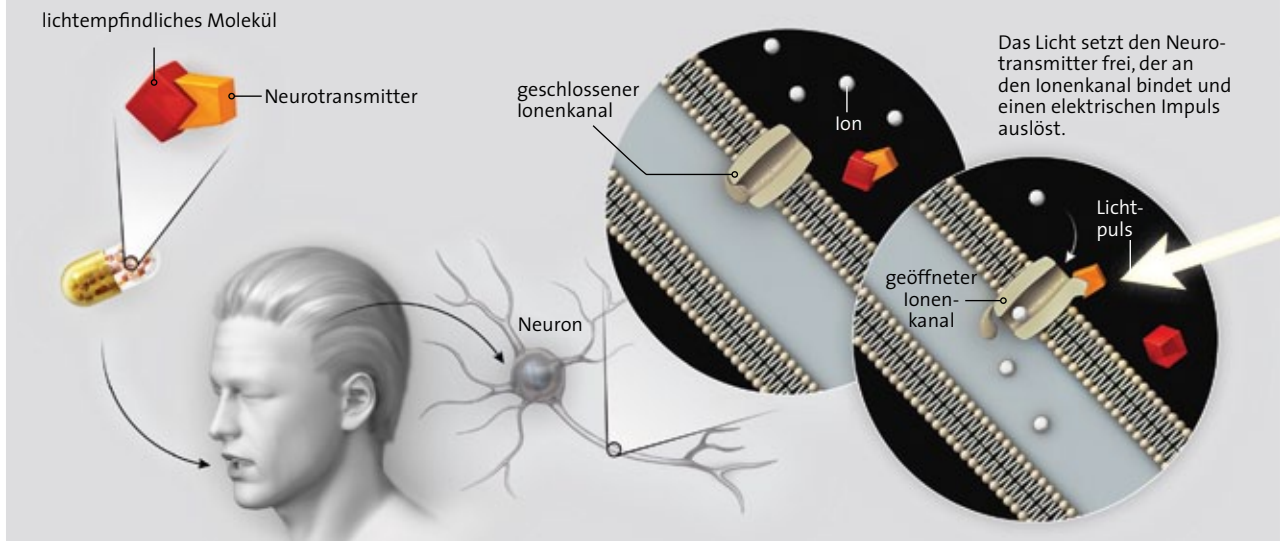
aufkommenden Technologien – die zwei hier dargestellten arbeiten mit optischen Signalen – würden es Medizinern ermöglichen,

eines Tages auch epileptische Anfälle oder die Symptome der Parkinsonkrankheit zu unterdrücken.

DAS PRINZIP DER OPTOCHEMIE

Eine alternative Technik kommt ohne aufwändige gentechnische Verfahren aus. Bei der Optochemie werden dem Patienten – etwa in Form einer Kapsel – lichtempfindliche Moleküle zugeführt, an die ein Neuro-

transmitter gekoppelt ist. Nachdem dieser Komplex das Gehirn erreicht hat, genügt ein Lichtblitz, um den Neurotransmitter davon abzukoppeln. Dieser öffnet dann einen Ionenkanal in der Zellmembran.



hen. Das sind Halbleiterpartikel im Nanomaßstab, deren optische Eigenschaften, wie etwa die Farbe des ausgesandten Lichts, maßgeschneidert werden. Ein weiteres Material aus der Quantenoptik sind Nanodiamanten. Sie zeigen sich hochempfindlich gegenüber Änderungen elektrischer Felder, die innerhalb von Neuronen auftreten. Nanopartikel könnten auch gemeinsam mit herkömmlichen oder gentechnisch erzeugten Farbstoffen eingesetzt werden, etwa um deren schwaches Signal wie eine Antenne aufzunehmen und zu verstärken.

20 000 Mikrometer unter der Hirnrinde

Eine weitere technische Herausforderung besteht darin, die neuronale Aktivität in der Tiefe des Gehirns sichtbar zu machen. Um hier weiterzukommen, arbeiten die Entwickler mit Materialwissenschaftlern oder Medizinern zusammen, die ebenfalls immer wieder durch intransparente Objekte hindurchsehen müssen, sei es die Haut, der Schädelknochen oder ein Computerchip. Von dem Licht, das ein festes Objekt durchquert, wird ein Teil gestreut. Diese gestreuten Anteile benutzen Forscher, um Details des Inneren sichtbar zu machen.

Drückt man beispielsweise eine starke Taschenlampe auf die Handfläche, so tritt ein Teil des Lichts auf dem Hand-

rücken als diffuses Leuchten aus, ohne dass die Lage der Knochen oder der Blutgefäße unter der Haut erkennbar wären. Doch die Information über den Weg, den das Licht durch das Gewebe genommen hat, ist nicht ganz verloren, denn die gestreuten Lichtwellen wechselwirken miteinander. Die so entstehenden Muster lassen sich mit einer Kamera erfassen und von Computern in ein Bild des Körperinneren umrechnen. Diese Technik verwendeten Rafael Piestun und sein Team von der University of Colorado in Boulder, um durch undurchsichtige Materialien hindurchzusehen. Sie ließe sich mit anderen optischen Verfahren kombinieren, unter anderem solchen, die Astronomen nutzen, um die Verzerrungen von Sternenlicht in der Erdatmosphäre zu korrigieren. Mit solcher rechnergestützten Optik könnten Biologen die Fluoreszenz von Neuronen aus tiefer liegenden Schichten des Hirngewebes darstellen.

Einige der neuen optischen Techniken setzten Forscher bereits bei Tieren und Menschen ein. Nachdem sie ein Stück des Schädelknochens entfernt hatten, blickten sie etwas mehr als einen Millimeter tief in die Hirnrinde. Mit zusätzlichen Verbesserungen könnte es schließlich sogar gelingen, durch den Schädelknochen zu sehen. Allerdings reichen selbst die raffiniertesten optischen Methoden nicht aus für Strukturen weiter innen im Hirngewebe. Aber auch hier er-

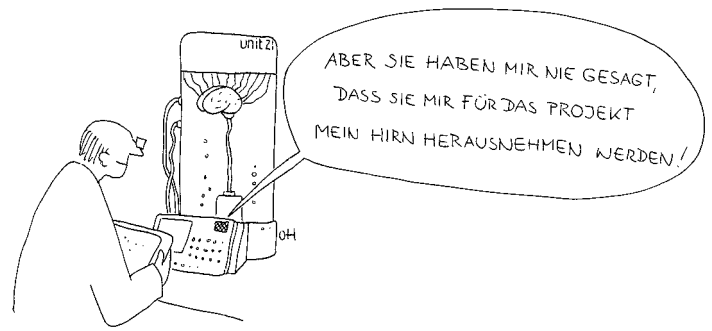
proben Forscher bereits neue Tricks. Bei der Mikroendoskopie schieben Neuroradiologen Lichtleiter in einer dünnen, flexiblen Sonde die Schenkelarterie hoch, manövrieren sie durch die Blutgefäße und blicken in verschiedene Teile des Körpers, unter anderem ins Gehirn. Ein Team des Karolinska-Instituts in Stockholm stellte 2010 eine »Extroducer« getaufte Vorrichtung vor. Damit kann der Kopf des Endoskops gefahrlos die Arterienwand durchdringen. So werden nicht nur die Hirngefäße für die verschiedenen optischen oder elektrischen Messverfahren zugänglich, sondern auch andere Bereiche des Gehirns.

Wenn Zellen Telegrafieren lernen

Zwar ist es naheliegend, die Hirnaktivität mit Hilfe von Elektronen und Photonen aufzuzeichnen, doch es gibt noch andere Möglichkeiten. So kommt vielleicht dem Erbgut dabei noch eine entscheidende Rolle zu. Einer der Autoren (Church) ließ sich von der synthetischen Biologie inspirieren, bei der Forscher biologische Elemente wie Maschinenteile einsetzen. Genetisch modifizierte Labortiere stellen dann beispielsweise eine Art molekularen Lochstreifen her – Moleküle, die sich in eindeutig ablesbarer Weise verändern, wenn ein Neuron aktiv wird.

In einem denkbaren Szenario würde das Enzym DNA-Polymerase einen solchen Molekülstreifen synthetisieren, indem es aus einzelnen DNA-Bausteinen (Nukleotiden) die komplementäre Sequenz zu einem vorgegebenen DNA-Einzelstrang zusammensetzt. Wenn ein Neuron aktiv wird und Ionen ins Zellinnere strömen, würde das dazu führen, dass die Polymerase beim Ablesen des Musterstrangs Fehler macht und eine abweichende Nukleotidsequenz produziert. Der entstandene DNA-Doppelstrang eines jeden Neurons im Gehirn des Versuchstiers würde dann mit neuen leistungsfähigen Methoden – wie der so genannten Fluoreszenz-in-situ-Sequenzierung – direkt im Gewebe ausgelesen. Die Muster der Fehler würden mit der Intensität oder den Zeitpunkten der Neuronenaktivität übereinstimmen. Im Jahr 2012 demonstrierte das Team von George Church, dass diese Methode im Prinzip funktioniert. Die Wissenschaftler erzeugten Erbgutstreifen, die auf Magnesium-, Mangan- und Kalziumionen reagierten.

In Zukunft, so hoffen die Vertreter der synthetischen Biologie, patrouillieren künstliche Zellen als lebende Sonden im



menschlichen Körper. Sie würden als winzige biologische Elektroden dienen, sich in der Nähe von Neuronen platzieren und diese überwachen. Integrierte Nanoschaltkreise in der Zelle könnten die Signale direkt aus dem Körper funken. Die Energie dafür würden sie gleichermaßen drahtlos von außen erhalten oder selbst aus Glukose oder anderen körpereigenen Molekülen gewinnen.

Es braucht jedoch mehr als nur Momentaufnahmen, um zu verstehen, was in den weit verzweigten neuronalen Schaltkreisen vorgeht. Damit sie erkennen, was ausgewählte Neuronengruppen eigentlich tun, müssen Forscher sie gezielt an- und ausschalten. Dazu setzen Neurowissenschaftler zunehmend die so genannte Optogenetik ein (siehe »Lichtschalter im Gehirn«, SdW 2/11, S. 22). Dabei arbeiten sie mit gentechnisch veränderten Versuchstieren, deren Neurone lichtempfindliche Proteine produzieren. Sobald diese Licht einer bestimmten Wellenlänge empfangen, aktivieren oder hemmen sie die Nervenzellen. Bisher setzen Forscher die Technik ein, um mit Hilfe von Glasfasern gezielt neuronale Schaltkreise zu aktivieren, die etwa mit dem Belohnungssystem zusammenhängen oder mit Störungen im Bewegungsablauf bei der Parkinsonkrankheit. Optogenetische Methoden wurden sogar schon dazu genutzt, Mäusen regelrecht falsche Erinnerungen einzugeben.

Weil dafür gentechnische Manipulationen nötig sind, müssten optogenetische Techniken langwierige Genehmungsverfahren durchlaufen, bevor sie an Menschen erprobt werden könnten. Eine praktikablere Alternative stellen Moleküle dar, welche die Aktivität der Nervenzellen regulieren. Forscher sperren diese Neurotransmitter für so genannte optochemische Verfahren in eine Art lichtempfindlichen chemischen Käfig. Er bricht bei Lichteinfall auf und setzt die enthaltenen Moleküle frei. Wie Steven Rothman von der University of Minnesota 2012 demonstrierte, ist dieser Ansatz viel versprechend. Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe um Yuste verwendete er Käfige aus Ruthenium, die den hemmenden Neurotransmitter GABA enthielten. Rothman brachte diese winzigen Kapseln auf der frei gelegten Hirnrinde von Mäusen auf, die medikamentös eingeleitete epilepsieähnliche Anfälle hatten. Als er die Hirnoberfläche mit blauem Licht bestrahlte, setzte das den Neurotransmitter frei: Die Anfälle ließen nach. Ähnliche optochemische Ver-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/hirnforschung



FOTOLIA / GORDANO AITA

fahren wenden Forscher bereits an, um die Funktion verschiedener neuronaler Schaltkreise zu überprüfen.

Noch ist der Weg von der Grundlagenforschung zum Einsatz im menschlichen Gehirn weit. Jede neue Idee, unseren Denkapparat im großen Maßstab zu beobachten, muss sich zunächst bei Fruchtfliegen, Fadenwürmern und Nagetieren beweisen. Unter großem Aufwand gelänge es vielleicht im Lauf von fünf Jahren, die Aktivität der etwa 100 000 Neurone im Gehirn der Fruchtfliege zu beobachten und zu kontrollieren. Und es kann leicht eine Dekade dauern, das Gleiche bei einer wachen Maus zu schaffen. Einige Techniken, wie etwa Mikroelektroden, werden eventuell schon bald in die medizinische Praxis einziehen, wohingegen andere frühestens in einem Jahrzehnt therapeutisch einsetzbar sein werden.

Da die Neurotechnologien immer raffinierter werden, benötigen die Forscher auch immer bessere Verfahren, die immensen Datenmengen zu verarbeiten, die bis dahin anfallen. Innerhalb einer Stunde könnten sich 300 Terabyte anhäufen, wollte man Bilder aller Neurone in der Hirnrinde der Maus aufzeichnen. Doch das ist weder ein neues noch ein unlösbares Problem. Hochmoderne Großforschungsanlagen wie etwa astronomische Observatorien, Genlabore und Teilchenbeschleuniger sind hier Vorbilder. Ähnlich wie das Humangenomprojekt in den 1990er Jahren die Bioinformatik erblühen ließ, werden sich auch die computergestützten Neurowissenschaften rasch entwickeln.

Licht in den Dschungel

Der Umgang mit Petabyte an Daten führt vielleicht zu bahnbrechenden neuen Theorien, die erklären, wie die scheinbare Kakophonie feuernender Neurone Wahrnehmung und Gedächtnis hervorbringt. Die Auswertungen dürften auch Theorien bestätigen oder widerlegen, die sich bisher nicht testen lassen. Eine davon postuliert etwa, dass die Zellen in einem Netzwerk mit der Zeit wiederkehrende Aktivitätsmuster zeigen, die man als Attraktoren bezeichnet. Sie könnten für emergente Zustände des Gehirns stehen – für einen Gedanken, eine Erinnerung oder eine Entscheidung. In einer Studie musste eine Maus etwa entscheiden, welchen Bereich eines virtuellen Labyrinths auf einem Bildschirm sie betreten und welchen sie meiden wollte. Dabei zeigten Dutzende ihrer Neurone attraktorartiges Verhalten.

Sobald Wissenschaftler die Funktionsweise neuronaler Netze besser verstehen, werden auch Krankheiten von der Alzheimerdemenz bis zum Autismus leichter zu diagnostizieren und ihre Ursachen klarer zu erkennen sein. Statt Diagnosen und Therapien allein auf die Symptome zu stützen, könnten Mediziner die spezifischen Veränderungen im Hirn nachvollziehen und versuchen, wieder eine normale Funktion herzustellen. Wie beim Humangenomprojekt gilt es, ethische und rechtliche Gesichtspunkte zu bedenken – hier insbesondere, wenn diese Forschung es möglich macht, den Geisteszustand eines Menschen zu ermitteln und zu manipulieren.

Damit die Forschungsvorhaben überhaupt Erfolgchancen haben, müssen sich die Wissenschaftler und ihre Geld-

geber auf das Kernziel konzentrieren. Dieses besteht darin, die Netzwerke im Hirn darzustellen und zu manipulieren. Das BRAIN-Projekt ging aus einer Idee hervor, die im Juni 2012 in der Zeitschrift »Neuron« erschien. In diesem Artikel regten wir gemeinsam mit Kollegen eine langfristige Zusammenarbeit von Physikern, Chemikern, Nanotechnologen, Molekularbiologen und Neurowissenschaftlern an, um mittels neuer Technologien eine Aktivitätskarte des Gehirns zu erstellen.

BRAIN wird sich fortentwickeln, doch unser ursprünglicher Gedanke, vor allem neue Werkzeuge zu schaffen, sollte erhalten bleiben. Die Hirnforschung ist ein weites Feld. Eine Forschungsinitiative kann hier leicht zu einem schier endlosen Wunschzettel verkommen, der die breit gefächerten Interessen der vielen Teilgebiete bedienen soll. Dann würde sie lediglich bereits existierende Forschung zusätzlich fördern. Fortschritte wären ungesteuert und zufällig, und die großen technischen Herausforderungen wären vielleicht gar nicht zu bewältigen. Messinstrumente für die gleichzeitige elektrische Aktivität von Millionen von Nervenzellen über ausgedehnte Hirnregionen zu konstruieren – das gelingt wohl nur einem großen interdisziplinären Forscherteam. Auf eine solche Technologie greift die neurowissenschaftliche Gemeinschaft dann vielleicht in ähnlicher Weise zu, wie es heute beispielsweise bei Astronomen an Observatorien der Fall ist. Ohne diese grundlegend neuen Methoden hingegen wird die Neurowissenschaft nicht vorankommen und die emergenten Eigenschaften des Gehirns, die der unendlichen Vielfalt unserer Verhaltensweisen zu Grunde liegen, nicht aufdecken. Wenn wir aber erst einmal die Sprache der Neurone verstehen und anwenden können, werden wir damit endlich die Frage beantworten, wie die komplexeste Maschine des Universums funktioniert. ~

DIE AUTOREN



Rafael Yuste (links) ist Wissenschaftler am Howard Hughes Medical Institute, Professor für Neurowissenschaften an der Columbia University sowie einer der Direktoren des Kavli Institute for Brain Science. **George**

Church ist Professor für Genetik an der Harvard University und Leiter des Personal Genome Project, das eine öffentlich zugängliche Datenbank individueller menschlicher Genome mit den jeweils zugehörigen medizinischen, körperlichen und psychologischen Daten aufbaut.

QUELLEN

Alvisatorres, A. P. et al.: The Brain Activity Map and the Challenge of Functional Genomics. In: Neuron 74, S. 970–974, 2012
Insel, T. R. et al.: The NIH BRAIN Initiative. In: Science 340, S. 687–688, 2013

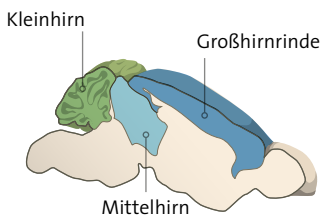
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327768

Die genetische Kartierung

Jetzt gibt es die ersten hochauflösenden Karten von der Genaktivität, die uns von Mäusen unterscheiden – und widerlegen eine

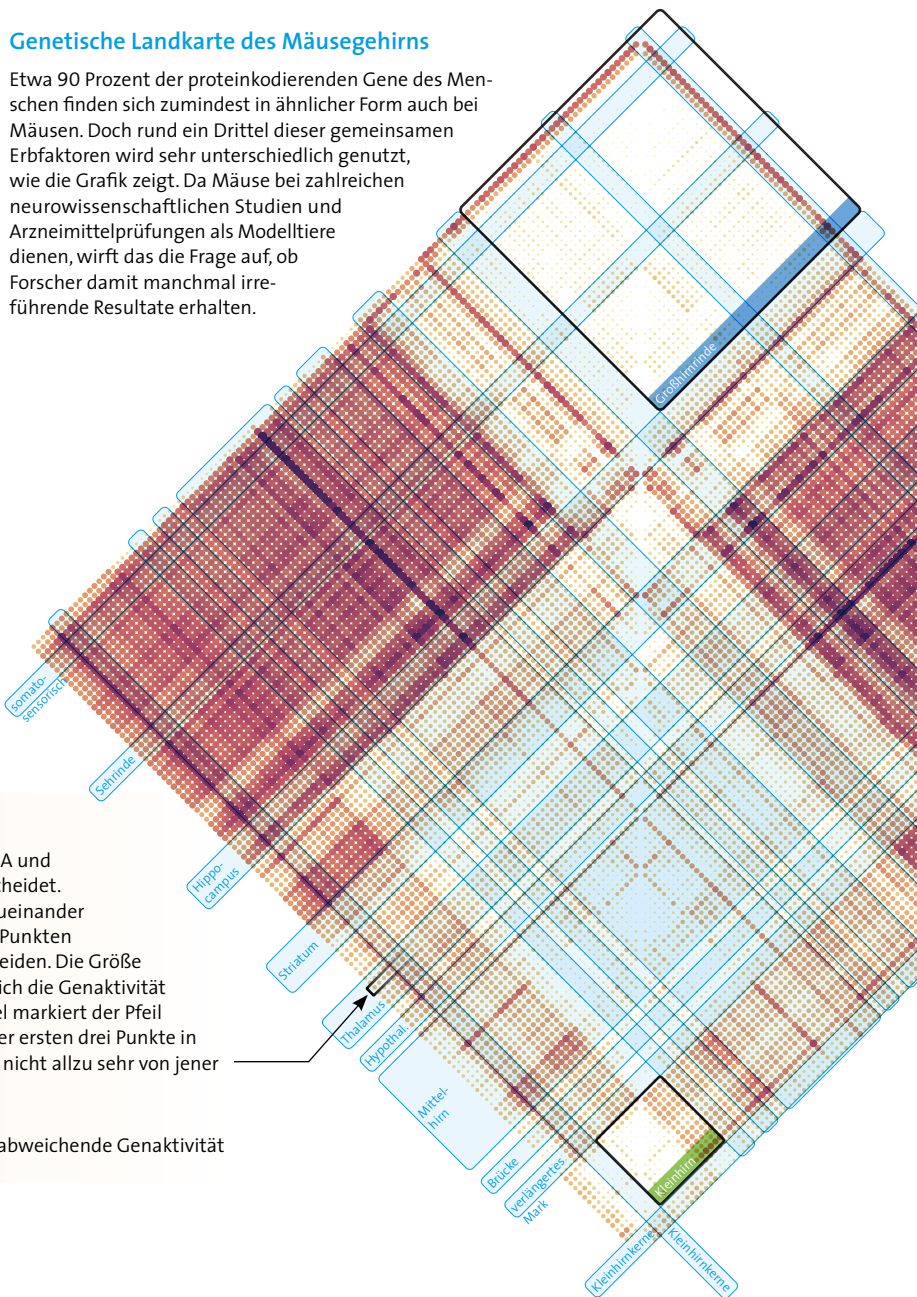
Von Ed Lein und Michael J. Hawrylycz

Das Muster der Genaktivität im Gehirn unterscheidet sich bei Mäusen deutlich von jenem bei Menschen. Zwischen erwachsenen Männern und Frauen sowie Vertretern verschiedener Ethnien fanden sich hingegen kaum Abweichungen. Die hier dargestellten Genexpressionskarten zeigen die Unterschiede an über 100 spezifischen Orten im Gehirn (siehe »Wie man die Grafik liest«, unten).



Genetische Landkarte des Mäusegehirns

Etwa 90 Prozent der proteinkodierenden Gene des Menschen finden sich zumindest in ähnlicher Form auch bei Mäusen. Doch rund ein Drittel dieser gemeinsamen Erbfaktoren wird sehr unterschiedlich genutzt, wie die Grafik zeigt. Da Mäuse bei zahlreichen neurowissenschaftlichen Studien und Arzneimittelprüfungen als Modelltiere dienen, wirft das die Frage auf, ob Forscher damit manchmal irreführende Resultate erhalten.



Wie man die Grafik liest

Die einzelnen Punkte geben an, wie stark sich die Genaktivität – also die Umsetzung der Erbinformation in RNA und Proteine – an zwei bestimmten Orten im Gehirn unterscheidet. Jede untersuchte Stelle ist in Form von zwei senkrecht zueinander stehenden Punktreihen eingetragen, wobei sich in den Punkten jeweils zwei solche (Orte repräsentierende) Reihen schneiden. Die Größe und Farbintensität des Schnittpunkts gibt an, wie sehr sich die Genaktivität zwischen diesen beiden Orten unterscheidet. Als Beispiel markiert der Pfeil eine bestimmte Stelle im Thalamus. Die helle Färbung der ersten drei Punkte in dieser Reihe weist darauf hin, dass die Genaktivität dort nicht allzu sehr von jener in den Kleinhirnkernen abweicht.

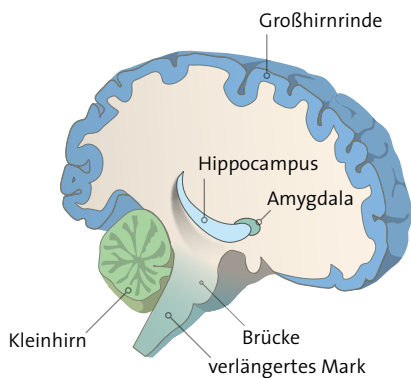
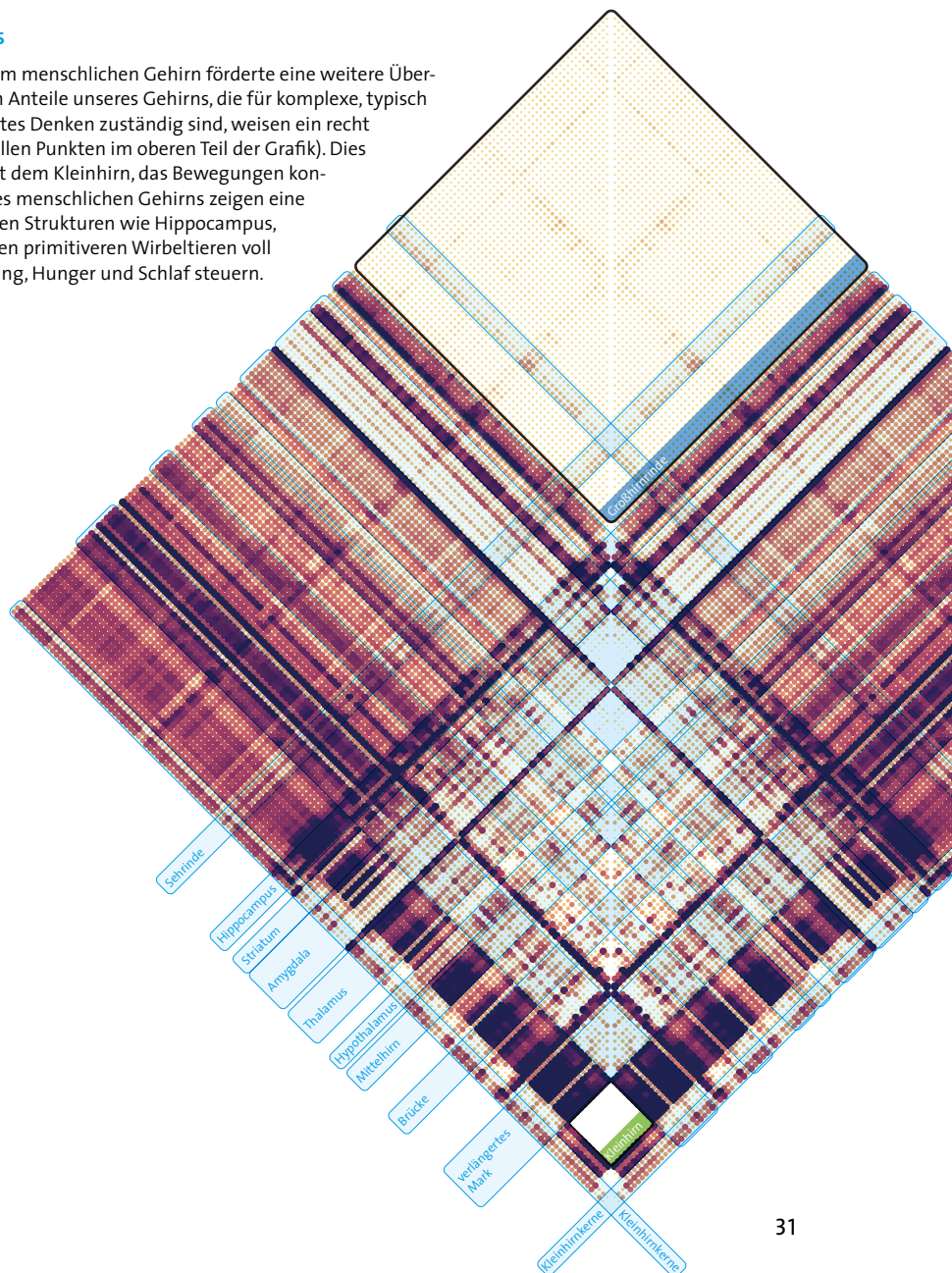
Genaktivität fast identisch stark abweichende Genaktivität

des menschlichen Gehirns

viät in unserem Gehirn. Sie demonstrieren unter anderem, wie sehr verbreitete Vorstellung über die Funktionsweise der Großhirnrinde.

Genetische Landkarte des menschlichen Gehirns

Die detaillierte Untersuchung von Genaktivitätsmustern im menschlichen Gehirn förderte eine weitere Überraschung zu Tage. Die entwicklungsgeschichtlich jüngsten Anteile unseres Gehirns, die für komplexe, typisch menschliche Fähigkeiten wie Lesen, Sprechen und abstraktes Denken zuständig sind, weisen ein recht einheitliches Aktivitätsmuster auf (verdeutlicht an den hellen Punkten im oberen Teil der Grafik). Dies betrifft etwa die Großhirnrinde. Ähnlich verhält es sich mit dem Kleinhirn, das Bewegungen kontrolliert (unten in der Grafik). Die meisten anderen Teile des menschlichen Gehirns zeigen eine viel größere Variationsbreite der Genaktivität. Dazu gehören Strukturen wie Hippocampus, Brücke und Hirnstamm, die schon bei Reptilien und anderen primitiveren Wirbeltieren voll ausgebildet sind und grundlegende Funktionen wie Atmung, Hunger und Schlaf steuern.



GEHIRN-LANDKARTE: JAN VILLEM TULIP NACH: M. J. HAWRYLYCZ, GEHIRN: JEN CHRISTIANSEN

Während Sie diese Worte lesen, tasten Sie mit den Augen die Seite ab und registrieren Muster, denen Ihr Verstand eine Bedeutung zuordnet. Gleichzeitig kontrahiert und entspannt sich Ihr Herzmuskel regelmäßig, Ihr Zwerchfell hebt und senkt sich beim Atmen, und Ihre Rückenmuskeln regulieren die Körperhaltung. Hinzu kommen tausende bewusste oder unbewusste grundlegende Vorgänge, gesteuert von den ungefähr knapp 100 Milliarden Neuronen sowie einer vergleichbaren Anzahl Hilfszellen im Gehirn.

Für Hirnforscher stellt eine scheinbar selbstverständliche Tätigkeit wie das Lesen einer Zeitschrift eine höchst erstaunliche Leistung des Nervensystems dar, aber auch ein Beispiel für das vielleicht schwierigste aktuelle wissenschaftliche Problem: Wir können nach wie vor nicht genau erklären, wie das menschliche Gehirn arbeitet und weshalb etwa das eines Affen nicht die gleichen kognitiven Leistungen erbringen kann wie unseres. Zwar untersuchen Neurowissenschaftler schon seit über einem Jahrhundert intensiv die Funktionsweise des Gehirns. Dennoch fühlen sie sich auch heute oft noch wie Entdecker, die an der Küste eines unbekanntes Kontinents gelandet sind und diesen erst einmal kartieren müssen.

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts legte der deutsche Mediziner Korbinian Brodmann (1868–1918) Schnitte menschlichen Hirngewebes unter sein Mikroskop, um den Aufbau der Großhirnrinde, des so genannten Kortex, zu untersuchen. Diese äußere Schicht »grauer Substanz« ist für den überwiegenden Teil unseres Wahrnehmens, Denkens und Erinnerns zuständig. Brodmann unterteilte die Hirnrinde in mehrere Dutzend Areale, wobei er sich an ihrer Gestalt orientierte sowie daran, wie die Zellen in den verschiedenen Regionen nach Anfärben mit unterschiedlichen Farbstoffen aussahen.

Allmählich etablierte sich daraufhin die Ansicht, dass jedes einzelne dieser Areale, jede Gruppe von Zellen einer bestimmten Sorte auch jeweils spezifische Funktionen erfüllt.

AUF EINEN BLICK

GEOGRAFIE DER GENAKTIVITÄT

1 Forscher haben einen detaillierten **Atlas der Genaktivität des menschlichen Gehirns** erstellt. Dazu kartierten sie die Expression aller Gene in den Gehirnen von sechs gesunden Erwachsenen.

2 Der Atlas deckt tief greifende Unterschiede zwischen den Gehirnen von Mäusen und Menschen auf. Damit stellt sich die Frage, inwieweit Daten aus **Studien mit Mäusen in der Hirnforschung** überhaupt auf den Menschen übertragbar sind. Die Genaktivität von **Affengehirnen** scheint dagegen nur wenig von der menschlichen abzuweichen.

3 Die Genaktivität in beiden **Hirnhälften** ähnelt sich sehr; ebenso die der einzelnen untersuchten sechs Gehirne, unabhängig von Alter, Geschlecht und Rasse. Verschiedene **Zelltypen** weisen unterschiedliche Genaktivität auf, zwischen brodmannschen **Hirnrindenarealen** finden sich jedoch kaum Abweichungen.

Einige Neuroforscher bezweifelten zwar die These, wonach Aufgaben an konkrete Stellen im Gehirn gebunden seien. Aber dieses Parzellierungsmodell gewann später stark an Attraktivität, als sich technische bildgebende Untersuchungsmethoden durchsetzten, allen voran die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT). Solche Bilder zeigen, welche Hirnareale Sauerstoff verbrauchen, wenn Menschen beispielsweise lesen, träumen oder lügen, und welche nicht. Mit Hilfe dieser Technik erstellten Forscher Karten, die menschliche Verhaltensweisen bestimmten Hirnregionen zuordnen.

Wie erfasst man die 100 Billionen neuronalen Verknüpfungen im menschlichen Gehirn?

Einer neueren Sichtweise zufolge arbeitet das Gehirn jedoch eher wie eine Art zwangloses soziales Netzwerk statt in streng abgegrenzten Abteilungen. Nach dieser Vorstellung hängt das Feuern einer Nervenzelle mehr von ihren Verbindungen mit anderen Neuronen ab und weniger von ihrem genauen Ort im Gehirn. Auch beeinflussen sowohl die gesammelten Erfahrungen des Individuums als auch seine aktuelle Situation das Verhalten einer Hirnregion stark. Diese Hypothese zu überprüfen, erscheint jedoch als eine höchst anspruchsvolle Aufgabe: Die Milliarden Neurone sind über schätzungsweise 100 Billionen Synapsen miteinander verknüpft, wobei es methodisch ohnehin noch schwierig ist, neuronale Verschaltungen im menschlichen Gehirn zu verfolgen. Allerdings entstehen derzeit im Rahmen mehrerer Großprojekte (etwa des Human Connectome Project; <http://humanconnectome.org>) neue Werkzeuge hierfür.

Als die Wissenschaftler des Humangenomprojekts 2003 die Abfolge der DNA-Kode-Buchstaben im menschlichen Erbgut veröffentlichten, sahen wir und unsere Kollegen vom Allen Institute for Brain Science in Seattle eine Chance, uns der Arbeitsweise des menschlichen Gehirns aus einer neuen Perspektive zu nähern: mit Hilfe des nun erstellten Katalogs von rund 20000 menschlichen Genen und der sich rapide weiterentwickelnden Genanalysetechniken. Durch Kombination von genetischen Methoden mit solchen der klassischen Neurowissenschaft studierten wir die Geografie des noch recht unerforschten Kontinents »Gehirn«, indem wir kartierten, wo genau dort welche Teile des Genoms aktiv sind und welche stumm. Wir erwarteten zum Beispiel, dass sich in dem Teil des Gehirns, der das Hören vermittelt, ganz andere Kombinationen von Genen betätigen als in den Arealen, die Tastwahrnehmung, Bewegung oder logisches Denken steuern.

Nach fast zehn Jahren harter Arbeit erreichten wir schließlich unser Ziel: dreidimensionale Atlanten, die uns zeigen, wo die einzelnen Gene in den Gehirnen von gesunden Menschen aktiv sind – und zum Vergleich auch in denen von Mäusen. Zurzeit arbeiten wir an einem entsprechenden Atlas für Affen. Solche molekularen Karten liefern wertvolle Vergleichsdaten für typische Genaktivitätsmuster. Sie spielen also eine ähnliche Rolle wie die Referenzsequenz der menschlichen DNA aus dem Humangenomprojekt. Wir erwarten,



dass unsere Genaktivitätskarten den Erkenntnisgewinn in der Neurowissenschaft wie auch die Entwicklung neuer Medikamente beschleunigen.

Doch schon jetzt ergaben sich einige überraschende Erkenntnisse. So gleichen sich die Muster der Genaktivität in verschiedenen menschlichen Gehirnen erstaunlich – trotz der Einzigartigkeit eines jeden Individuums und der beträchtlichen Diversität der Menschen. Zudem entdeckten wir keine wesentlichen Unterschiede zwischen der linken und der rechten Hälfte ein und desselben Organs – auf Genebene gibt es also kein »rechtes« und »linkes Gehirn«. Darüber hinaus zeigen unsere Daten beträchtliche Abweichungen zwischen Mensch und Maus. Das stellt aber wiederum die gängige Verwendung der Nagetiere in Studien – etwa zum Verständnis der Neurobiologie des menschlichen Gehirns sowie in frühen Testphasen von Medikamenten gegen neurologische Erkrankungen – grundsätzlich in Frage.

Da noch nie zuvor jemand eine vollständige Karte der Genaktivitäten im Gehirn eines Säugetiers erstellt hatte, begannen wir bescheiden mit dem einer Maus, um die damit verbundenen Detailprobleme kennen zu lernen und zu lösen. Mäuse haben etwa gleich viele Gene wie der Mensch; ihr Gehirn wiegt jedoch 3000-mal weniger als unseres. Binnen drei Jahren bearbeiteten wir mehr als eine Million hauchdünne Scheiben von Mäusegehirnen. Zu jedem solchen Gewebeschnitt gaben wir Markierungsstoffe, die sich überall dort anheften, wo das entsprechende Gen aktiv ist, und damit diese »Genexpression« sichtbar machen. In deren erstem Schritt entstehen Kopien der Gen-DNA in Form von RNA-Strängen. Diese so genannten Transkripte sind Zwischenschritte auf dem Weg zum eigentlichen Genprodukt. Meist dienen sie als Bauplan für ein Protein, das als Enzym eine biochemische Reaktion ermöglicht oder eine andere

Rolle in der Zelle spielt. Neben unzähligen proteinkodierenden RNAs hatten wir aber auch etwa 1000 nichtkodierende RNAs auf dem Radar, die ihre Aufgaben erfüllen, ohne in Proteine übersetzt zu werden.

Im Rahmen des Mausprojekts verfeinerten wir nicht nur unsere Methoden, wir stießen auch auf eine erste große Überraschung. Bekanntlich beinhaltet jede Zelle einer Maus – genau wie jede menschliche Zelle – einen kompletten Chromosomensatz und folglich mindestens eine Kopie eines jeden Gens in ihrem Erbgut. In reifen Zellen ist zu jedem Zeitpunkt jeweils ein großer Teil der Gene stillgelegt; sie werden nicht in RNA transkribiert. Als wir jedoch 2006 den Hirnatlas der Maus fertig stellten, entdeckten wir, dass die überwiegende Mehrheit der Gene – mehr als 80 Prozent – im Augenblick des Todes irgendwo im Gehirn aktiv gewesen war. Als wir darangingen, eine Genexpressionskarte des menschlichen Gehirns zu erstellen, fragten wir uns daher, ob es wohl ein ähnlich hohes genetisches Aktivitätsniveau aufweist wie das der Maus, und wichtiger noch: ob sich die Aktivitätsmuster in beiden Spezies ähneln.

Rasches Handeln ist entscheidend

Das erste menschliche Gehirn erhielten wir im Sommer 2009; es war das eines 24-jährigen Afroamerikaners, dessen Familie es nach seinem Unfalltod für die Forschung zur Verfügung gestellt hatte. Radiologen erstellten zunächst mittels Kernspintomografie ein dreidimensionales Abbild des intakten Organs, danach wurde es tiefgefroren – alles innerhalb von 23 Stunden nach dem Tod. Das ist schnell genug, um die normalen RNA-Muster zu erhalten. Der Organspender hatte an Asthma gelitten, war aber sonst gesund gewesen.

Um das im Vergleich zur Maus 3000-mal größere menschliche Gehirn kartieren zu können, erfassten wir die Genex-

pression mit einer abgewandelten Methode. Wieder schnitten wir das tiefgefrorene Hirngewebe in hauchdünne Scheiben, färbten sie an und fotografierten sie mit einer hochauflösenden Kamera. Unsere Anatomen holten dann mit einem Laser mikroskopisch kleine Gewebeprobe aus etwa 900 zuvor festgelegten Strukturen im gesamten Gehirn. Die Molekularbiologen im Team untersuchten daraufhin jede Probe in einem so genannten DNA-Microarray, das die vorliegende Menge an RNA für sämtliche proteinkodierenden Gene im menschlichen Erbgut gleichzeitig bestimmt.

Auf diese Weise gewannen wir umfangreiche Daten, die in eine Computerdatenbank einfließen. Darin konnten wir nun für jedes einzelne Gen nachsehen, wie viel RNA davon in jeder der 900 untersuchten Strukturen vorkam – und damit auch, wie aktiv das Gen dort kurz vor dem Tod des Spenders gewesen war. Nacheinander betrachteten wir die Verteilung für zahlreiche Gene und waren begeistert, welche unterschiedlichen Muster sich zeigten. Jetzt konnte die eigentliche Entdeckerarbeit beginnen.

Kein Unterschied zwischen den Hirnhälften

Schon bald erkannten wir bei der Detailanalyse der Daten, dass sich die Expressionsmuster der linken Gehirnhälfte fast exakt mit denen der rechten Hemisphäre deckten. Einer populären Ansicht zufolge ist die linke Gehirnhälfte auf bestimmte Funktionen wie Mathematik und Sprache spezialisiert, während die rechte eher dem künstlerischen und kreativen Schaffen dient. Die Genaktivitätsmuster in dem untersuchten Gehirn widersprechen dem jedoch. Auch die Analyse eines zweiten menschlichen Denkkorgans ergab keine auffälligen Unterschiede zwischen rechter und linker Hemisphäre. Die Daten stimmten sogar so genau überein, dass wir bei den nächsten vier Gehirnen nur noch je eine Hälfte untersuchten, was die Erstellung unseres Atlanten um mindestens ein Jahr beschleunigte.

Genau wie bei den Mäusen war auch in den sechs untersuchten menschlichen Gehirnen die Mehrzahl der Gene aktiv; insgesamt fanden wir 84 Prozent der überhaupt möglichen verschiedenen RNA-Transkripte. Das Organ erfüllt enorm vielfältige Aufgaben, und der Genexpressionsatlas zeigt deutlich, dass in den einzelnen Arealen des Gehirns jeweils unterschiedliche Genkombinationen aktiv sind, was die spezifischen lokalen Funktionen ermöglicht.

Die untersuchten Gehirne stammten von Männern und Frauen, von jungen und alten Menschen, von Afroamerikanern, Lateinamerikanern und Weißen. Manche waren größer, andere kleiner. Und trotz dieser vielen Unterschiede zeigten alle sechs sehr ähnliche Genaktivitätsmuster: Wenn ein bestimmter Erbfaktor in einer Region eines Gehirns besonders aktiv war, produzierte die gleiche Stelle fast immer auch in der Mehrheit der anderen Gehirne große Mengen der entsprechenden RNA.

In der Genexpressionskarte des Kortex gibt es kaum klar definierte Grenzen

Nun begannen wir zu analysieren, welche Gengruppen in den verschiedenen Teilbereichen des Gehirns dominieren. Wir verglichen beispielsweise jene Erbfaktoren, die das entwicklungs geschichtlich alte Mittelhirn – das bereits bei Reptilien voll ausgebildet ist – am stärksten nutzt, mit den besonders aktiven Genen im Kortex. Schon lange ist bekannt, dass sich in den primitiveren Hirnregionen wie Hypothalamus, Hippocampus und Brücke (verantwortlich unter anderem für die Steuerung der Körpertemperatur, des Appetits, des räumlichen Gedächtnisses und des Schlafs) Nervenzellen zu so genannten Kernen zusammenfinden, die jeweils unterschiedliche Aufgaben bewältigen. Laut unseren Ergebnissen aktivieren viele dieser Kerngebiete ganz spezifische Kombinationen von Genen.

Die Großhirnrinde unterscheidet sich von diesen älteren Teilen des Gehirns sowohl in ihrem Gewebeaufbau als auch in den Genexpressionsmustern. Sie besteht aus einer sechslagigen Schicht grauer Substanz und enthält viele verschiedene Zelltypen. Entwicklungsgeschichtlich stellt der Kortex den jüngsten Teil des Gehirns dar. Beim Menschen ist er überaus stark entwickelt im Vergleich zu den übrigen Tieren; er ermöglicht die einzigartige Komplexität des menschlichen Verhaltens und unserer individuellen Persönlichkeit. Da lag die Frage auf der Hand: Entsteht dies womöglich dadurch, dass in den verschiedenen Rindenteilen sehr unterschiedliche Gene dominieren? Brodmann hatte damals den Kortex in Dutzende klar definierter Areale eingeteilt. Vielleicht beruht ja die Rolle einer jeden Parzelle beim menschlichen Verhalten auf der jeweiligen Konstellation aktiver Gene?

Doch unser Genexpressionsatlas widerspricht dieser Vorstellung: Zwar besitzt jeder Zelltyp eine charakteristische genetische Signatur, die einzelnen Zelltypen weisen aber überall im Kortex jeweils bemerkenswert homogene Aktivitätsmuster auf, von der Stirn bis zum Hinterkopf. In der Genexpressionslandkarte der Hirnrinde gibt es kaum klar definierte Grenzen – mit einer bemerkenswerten Ausnahme: der Sehrinde im Hinterhauptsappen, welche die neuronalen Signale aus der Netzhaut der Augen verarbeitet. Das Kleinhirn, das sich ebenfalls erst vor evolutionär kurzer Zeit stark vergrößert hat, zeigt übrigens ähnlich homogene Genaktivitätsmuster wie die Großhirnrinde.

Diese Entdeckungen passen nur schlecht zu der von Brodmann inspirierten Vorstellung vom Kortex als einer Landschaft aus Bereichen, die jeweils für bestimmte Funktionen zuständig sind und deren Verhalten von den dort aktiven Genen abhängt. Hingegen stützt die Auswertung des Expressionsatlas eine andere Theorie: Die Genaktivität definiert demnach zum einen die einzelnen Zelltypen und zum anderen den Bauplan der so genannten kortikalen Säulen. Diese ziehen sich überall senkrecht durch die Großhirnrinde und weisen eine festgelegte Abfolge der verschiedenen Zelltypen

auf. Letztlich besteht die Hirnrinde aus zahllosen solchen, dicht nebeneinander angeordneten kortikalen Einheitssäulen. Ihre Funktion scheint also stärker von der spezifischen Vernetzung der Neurone in Schaltkreisen abzuhängen – und den Reizen, denen sie ausgesetzt waren – als von Unterschieden in der genetischen Aktivität zwischen den brodmannschen Arealen.

Als wir die Aktivitätsmuster von etwa 1000 Genen im Kortex von Mäusen und Menschen verglichen, erlebten wir die nächste Überraschung: Einige dieser Erbfaktoren sind in der einen Spezies völlig stumm, aber nicht in der anderen; und viele weitere nutzen Maus und Mensch zumindest in stark voneinander abweichendem Maß. Insgesamt wird fast ein Drittel der Gene ganz unterschiedlich exprimiert.

Für Medizinforscher ist diese Diskrepanz bedeutsam, da sie praktisch alle neurologischen Experimente und Medikamententests zunächst an Mäusen durchführen. Nagetiere wachsen schnell heran und lassen sich kostengünstig halten, einfach beobachten und untersuchen. Doch erfahrungsgemäß eignen sich Therapien, die bei Mäusen gut wirken, nur selten direkt zum effektiven Behandeln menschlicher Patienten. Die erheblichen Unterschiede in den Genexpressionsmustern zwischen den beiden Arten könnten diesen Umstand erklären.

Welche neurologischen Fragen lassen sich überhaupt noch an Mäusen klären?

Ganz anders als bei der Maus ist die Situation beim Rhesusaffen: Laut den bisher vorliegenden Daten sind hier weniger als fünf Prozent der Gene im Gehirn signifikant anders als beim Menschen aktiv. Unsere Arbeiten an einem Genexpressionsatlas dieses Affen sind allerdings noch nicht abgeschlossen, so dass sich der genaue Wert mit zunehmender Datenmenge verändern könnte. Dennoch dürfte dieses Ergebnis die These untermauern, dass die spezifische Vernetzung der Neurone – und nicht etwa ihre Genaktivität – unsere besonderen menschlichen Verhaltensmerkmale bedingt. Und klar ist auch: Medizinforscher und pharmazeutische Unternehmen brauchen noch mehr detaillierte Informationen über das menschliche Gehirn, um entscheiden zu können, welche therapeutischen Angriffspunkte sich bei der Maus als Modelltier untersuchen lassen und welche an Spezies studiert werden müssen, die mit uns Menschen näher verwandt sind.

Seit wir 2007 den Gehirnatlas der Maus veröffentlicht haben, griffen mehr als 1000 wissenschaftliche Studien auf ihn zurück. Die Karte des Menschen ist seit 2010 öffentlich zugänglich. Hier geht es nun darum, die Auflösung zu verbessern. Inzwischen ist uns klar, dass wir die Bedeutung der Genaktivität für die Hirnfunktion nicht vollständig verstehen werden, bis wir die Expressionsmuster auf Einzelzellenebene nachvollziehen können. Bei einem so komplexen und großen Organ wie dem Gehirn des Menschen ist dies ein enormes Unterfangen. Doch neu entwickelte Techniken ermöglichen es jetzt Neurogenetikern, proteinkodierende

RNAs in einzelnen Zellen zu messen. Daneben lässt sich auch die Gesamtheit der vorkommenden RNA-Stränge erfassen. Damit können die Forscher untersuchen, ob RNAs, die nicht der Proteinsynthese dienen und wegen ihrer noch weithin unklaren Aufgaben manchmal auch als »Dunkle Materie des Genoms« bezeichnet werden, eine wichtige Rolle für die Hirnfunktion spielen.

2014 erstellten wir eine Genexpressionskarte des sich entwickelnden menschlichen Gehirns während einer kritischen Phase der Schwangerschaft, den BrainSpan-Atlas. Dieser lieferte bereits erste Hinweise auf die Aktivität von Erbfaktoren, die an angeborenen Hirnfunktionsstörungen wie Autismus beteiligt sind. Außerdem veröffentlichten wir zeitgleich eine detaillierte Karte aller neuronalen Verbindungen (des Konnektoms) im Mäusehirn.

Damit Wissenschaftler, die Hirnerkrankungen wie Autismus, Alzheimerdemenz oder Morbus Parkinson erforschen, den Atlas leichter nutzen können, hat das Allen Institute die gesamten Daten kostenfrei online unter <http://human.brain-map.org> zugänglich gemacht. Wir hoffen, dass dies ihnen den Weg zu neuen Erkenntnissen ebnet. ~

DIE AUTOREN



Ed Lein (links) ist Neurobiologe und **Michael J. Hawrylycz** Mathematiker am Allen Institute for Brain Science in Seattle. Beide waren bei der Erstellung und Analyse von Genexpressionskarten der Gehirne von Mäusen, Rhesusaffen und Menschen wesentlich beteiligt.

QUELLEN

- Bernard, A. et al.:** Transcriptional Architecture of the Primate Neocortex. In: Neuron 73, S. 1083–1099, 2012
Hawrylycz, M.J. et al.: An Anatomically Comprehensive Atlas of the Adult Human Brain Transcriptome. In: Nature 489, S. 391–399, 2012
Miller, J.A. et al.: Transcriptional Landscape of the Prenatal Human Brain. In: Nature 508, S. 199–206, 2014

LITERTURTIPPS

- Jones, A., Overly, C.:** Gen-Inventur im Gehirn. In: Gehirn und Geist 1-2/2011, S. 58–63
Der Direktor des Allen Institute beschreibt das Projekt der Genlandkarten und die zur Erstellung verwendete Methode.
Markram, H.: Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2012, S. 82–90
Der Koordinator des europäischen Human Brain Project stellt seinen Ansatz vor, ein Gehirn im Computer zu erschaffen.

WEBLINKS

<http://human.brain-map.org/static/brainexplorer>
Die Daten des Allen Brain Atlas und das dazugehörige Programm Brain Explorer sind hier online zugänglich.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327769

Die vielen Wege zur Antibiotikaresistenz

Krankheitserreger werden zunehmend unempfindlich gegenüber Antibiotika. Ein wichtiger Faktor dabei ist der Genaustausch zwischen gefährlichen und harmlosen Bakterien. Ihn besser zu verstehen, könnte Erkenntnisse liefern, wie man die Verbreitung antibiotikaresistenter Bakterienstämme eindämmen kann.

Von Gautam Dantas und Morten O.A. Sommer

Vor nicht allzu langer Zeit galt der Kampf gegen Infektionskrankheiten als so gut wie gewonnen. Das im Jahr 1929 entdeckte Antibiotikum Penizillin war die erste scharfe Waffe, die Ärzte etwa gegen Lungenentzündung, Gonorrhö und rheumatisches Fieber einsetzen konnten. In den folgenden Jahrzehnten entdeckten Forscher mehr als 150 weitere Antibiotika. Die vielfach als »Wundermittel« gepriesenen Medikamente waren so erfolgreich, dass der damalige US-Generaloberstabsarzt William Stewart 1967 proklamierte, die Zeit sei gekommen, das Kapitel der Infektionskrankheiten zu schließen.

Stewart und die meisten seiner Zeitgenossen hatten jedoch gründlich die Fähigkeit bakterieller Krankheits-

erreger unterschätzt, gegen Antibiotika unempfindlich zu werden. Fast zeitgleich mit dem ersten klinischen Einsatz von Penizillin tauchten die ersten resistenten Keime auf. Solange die Entwicklung von Antibiotika in den 1940er bis 1960er Jahren auf Hochtouren lief, ließ sich die Ausbreitung resistenter Bakterienstämme mit der Einführung immer neuer Wirkstoffe kompensieren. Doch mit dem Ende der 1960er Jahre schwanden das Interesse und die Fähigkeiten der pharmazeutischen Industrie, weitere Medikamente dieser Art zu entwickeln. Es folgten fast 40 Jahre, in denen so gut wie keine weitere Klasse breitenwirksamer Antibiotika auf den Markt kam. Stattdessen konzentrierten sich die Unternehmen darauf, das chemische Grundgerüst bereits eingeführter Medikamente zu modifizieren, um neue Wirkstoffe zu kreieren.

Während dieser Innovationslücke stand die Evolution der Bakterien jedoch nicht still. Infolgedessen verloren Substanzen, die früher ein breites Spektrum von Mikroben bekämpft hatten, nach und nach ihre Wirkung. Einige *Escherichia coli*- und *Klebsiella pneumoniae*-Stämme sind inzwischen gegen alle wichtigen Antibiotika resistent. Sie erweisen sich selbst gegen Carbapeneme als unempfindlich – das sind Arzneistoffe, die lange als Reserveantibiotika für schwer zu behandelnde Infektionen galten, etwa für bakterielle Lungenentzündungen. Und in dem Maß, in dem die Therapieoptionen schwinden, steigt die Sterblichkeitsrate bei solchen Infektionen. Tatsächlich leben wir, was einige Infektionskrankheiten anbelangt, bereits im postantibiotischen Zeitalter.

Nach Angaben der amerikanischen Centers for Disease Control and Prevention (CDC, deutsch: Zentren für Krankheitskontrolle und Prävention) sterben pro Jahr

AUF EINEN BLICK

AUSTAUSCHFREUDIGE MIKROBEN

1 Wenn ein neues Antibiotikum zugelassen wird, dauert es meist nicht lange, bis dagegen **resistente Bakterien** auftauchen. Da in den zurückliegenden Jahren kaum neue Medikamente auf den Markt kamen, stehen die Ärzte bakteriellen Infektionen zunehmend machtlos gegenüber.

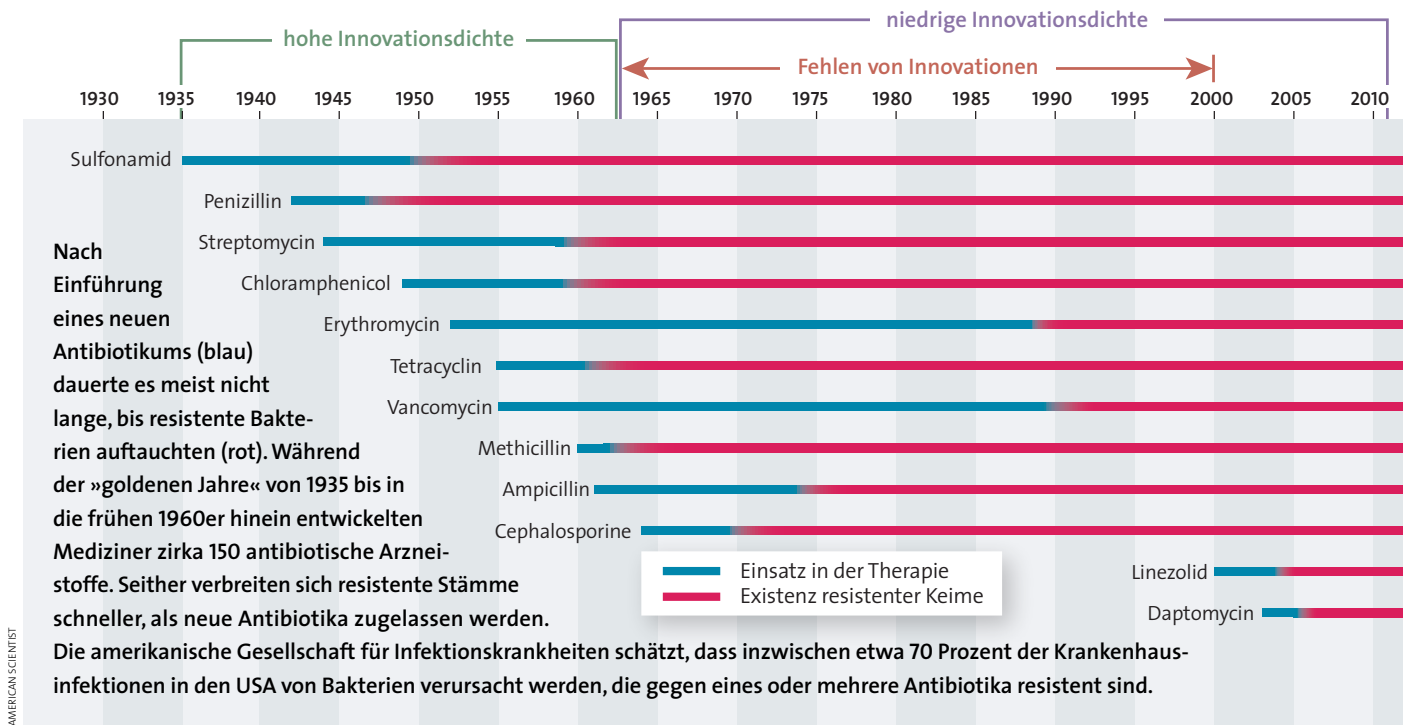
2 Forscher suchen daher händierend nach neuen Möglichkeiten, **mikrobielle Keime** zu bekämpfen. Anregungen hierzu könnten aus der **Resistomforschung** kommen, also der Untersuchung sämtlicher resistenzvermittelnder Erbanlagen eines Lebensraums.

3 Die bisherigen Studien zeigen ein schier unerschöpfliches Reservoir an **Resistenzgenen** insbesondere bei **Bodenbakterien**. Diese können durch **Gentransfer** auf humanpathogene Keime übergehen. Somit kommt der Land- und Gewässerwirtschaft eine wesentliche Rolle bei der Verbreitung resistenter Erreger zu.



Das Bakterium *Clostridium difficile* verursacht lebensbedrohliche Durchfallerkrankungen. Im Jahr 2000 tauchte ein multiresistenter Stamm auf, der gegenüber Ciprofloxacin, Levofloxacin und anderen Antibiotika unempfindlich war. Er verursachte in den USA einen Anstieg der tödlichen *C.-difficile*-Infektionen um das Vierfache im Zeitraum von 2000 bis 2007.

CDC / MELISSA BROWER



mindestens 23 000 Amerikaner infolge von Infektionen – in vielen Fällen verursacht von multiresistenten Keimen, etwa bestimmten *Staphylococcus-aureus*-Stämmen. Auch in Deutschland geben die Zahlen Grund zur Sorge: Laut Bundesgesundheitsministerium infizieren sich jedes Jahr 400 000 bis 600 000 Menschen im Rahmen einer medizinischen Behandlung; schätzungsweise 10 000 bis 15 000 sterben daran. Schuld sind auch hier häufig multiresistente Bakterien. Manche Experten, etwa von der Deutschen Gesellschaft für Krankenhaushygiene, vermuten in deutschen Krankenhäusern sogar bis zu 30 000 Todesfälle jährlich, an denen Infektionen maßgeblich beteiligt sind.

Im ewigen Wettlauf zwischen Mensch und Mikrobe

Behördliche Initiativen, welche die Entwicklung neuer Antibiotika forcieren, zeigen bisher kaum Wirkung. So ließ die US-amerikanische Arzneimittelbehörde FDA in den Jahren von 2008 bis 2012 nur einen einzigen neuen Wirkstoff zu. Von 1983 bis 1987 waren es noch 16 gewesen. Der Direktor der CDC, Tom Frieden, warnte kürzlich: »Wenn wir jetzt nicht handeln, wird unser Medikamentenschrank bald leer sein.« Allerdings reicht die Entwicklung neuer Antibiotika allein nicht aus, um das Problem in den Griff zu bekommen. Denn auch gegen neue Substanzen entwickeln Bakterien meist schon recht bald Resistenzen (siehe Grafik oben).

Es ist daher dringend notwendig, dass Forscher mehr über die Anpassungsmechanismen von Bakterien herausfinden. Die Erforschung des Resistoms – also der Gesamtheit aller Erbanlagen eines bestimmten Lebensraums, die für Resistenzmechanismen kodieren – könnte Schwachstellen von

unempfindlichen Keimen offenlegen. Bisher hatten Untersuchungen zur Antibiotikaresistenz meist krankheitserregende (pathogene) Bakterien im Blick. Doch einige Wissenschaftler, darunter wir, befassen sich seit Kurzem auch mit dem Resistom nichtpathogener Mikroben. Die enormen Fortschritte in der Sequenzierung kompletter Genome ermöglichen es uns, sowohl krank machende als auch nicht-pathogene Bakterien aus verschiedenen Lebensräumen zu untersuchen. Dabei gewinnen wir aufschlussreiche Erkenntnisse darüber, wie Resistenzen entstehen und zwischen verschiedenen Bakterien und Habitaten übertragen werden.

Wir sind heute weit entfernt von Stewarts proklamiertem Sieg über die Infektionskrankheiten. Aber die neuen Forschungsergebnisse helfen uns, Strategien zu entwickeln, die darüber hinausgehen, resistente Bakterien mit immer neuen Antibiotika zu bekämpfen, wie wir es seit Jahrzehnten tun. Zu verstehen, wie Resistome evolvieren und sich verbreiten, könnte uns dabei helfen, die verfügbaren Antibiotika effektiver zu nutzen und Infektionskrankheiten wirksamer zu behandeln.

Krankheitserreger erwerben Antibiotikaresistenzen auf zwei verschiedene Arten: vertikal, indem Mutationen im Genom an die Tochterzellen vererbt werden; und horizontal, indem ein Bakterium Resistenzgene an ein anderes weitergibt (siehe Kasten rechts). Der vertikale Transfer beruht wesentlich darauf, dass bei der Vervielfältigung (Replikation) des Erbguts im Rahmen der Zellteilung manchmal Fehler auftreten, die nicht korrigiert und somit an die Tochterzellen weitergegeben werden, so dass sich diese genetisch von den Vorläuferzellen unterscheiden. Die Fehlerrate bei der Genomreplikation ist recht gering: Typischerweise erwirbt nur eines

von 1000 teilungsaktiven Bakterien eine bleibende Mutation. Bei Weitem nicht alle dieser genetischen Änderungen sind vorteilhaft, doch etwa jede milliardste bringt eine Zellvariante hervor, die sich rascher vermehrt oder höhere Antibiotikakonzentrationen toleriert als ihre Vorgänger. Setzt man nun eine Bakterienpopulation unter Stress, indem man sie mit Antibiotika behandelt, so vermehren sich bevorzugt die Zellen mit resistenzvermittelnden Mutationen, bis sie schließlich die gesamte Population ausmachen. Und folgen mehrere solcher Zyklen von Mutationsbildung und Selektion aufeinander, entsteht am Ende eine hochgradig resistente Population.

Erbanlagen, die Antibiotika-Unempfindlichkeit vermitteln, können sodann über horizontalen Gentransfer auf andere Bakterienstämme übertragen werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser Mechanismus die zunehmende Verbreitung von Antibiotikaresistenzen maßgeblich vorantreibt. Bakterien geben ihre Resistenzgene über mobile genetische Elemente an andere Zellen weiter. Bei diesen handelt es sich um fadenähnliche oder ringförmig geschlossene DNA-Stücke – so genannte Plasmide, die zusammen mit dem übrigen Genom des Bakteriums vervielfältigt werden.

Plasmide können auf unterschiedlichem Weg in neue Zellen übertreten: über Transformation, Transduktion oder Konjugation. Bei der Transformation nehmen Bakterien die DNA-Bruchstücke abgestorbener Mikroben auf und bauen sie in ihr eigenes Genom ein. Bei der Transduktion übertragen Bakteriophagen (Viren, die Bakterien infizieren) das Genmaterial. Die Viren schleusen ihre DNA ins Genom der Wirtszelle ein, wo sie unter Umständen viele Zellgenerationen

überdauert, bis der Phage erneut aktiv wird und die Zelle dazu missbraucht, frische Viruspartikel herzustellen, die dann ihrerseits weitere Bakterien infizieren. Dabei kann es passieren, dass ein Teil des bakteriellen Genoms ins virale Erbgut übernommen wird, so dass die Phagen es wie einen blinden Passagier in die neu infizierten Zellen mitnehmen.

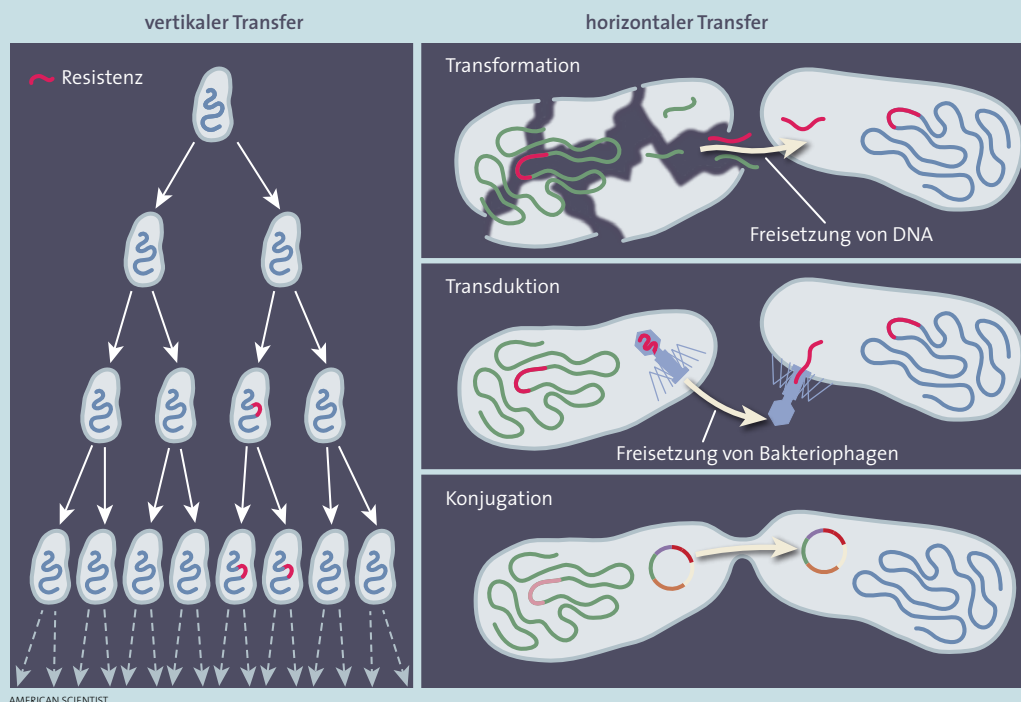
Kontaktaufnahme zwischen Einzellern

Eine weitere Variante des horizontalen Transfers ist die Konjugation – auch als bakterieller Sex bezeichnet. Für die Entdeckung dieses Mechanismus, des mutmaßlich wichtigsten beim horizontalen Gentransfer, erhielt der US-Molekularbiologe Joshua Lederberg 1958 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Während der Konjugation bildet die Spenderzelle schlauchähnliche Fortsätze, so genannte Pili, und koppelt damit an die Membran der Empfängerzelle. Anschließend entsteht eine Brücke aus Zellplasma zwischen beiden Bakterien, über die Plasmide weitergegeben werden. Viele der gefürchteten »Krankenhauskeime« tauschen große Plasmide untereinander aus, die dutzende Resistenzgene enthalten und ihre Wirtszellen gegen nahezu alle Antibiotika unempfindlich machen.

Forscher vom Wellcome Trust Sanger Institute (Großbritannien), vom Massachusetts Institute of Technology und von der Harvard University (beide USA) haben kürzlich in groß angelegten Sequenzierprogrammen die Genome zahlreicher pathogener Bakterien entziffert. Die Ergebnisse sind beunruhigend, denn sie lassen folgenden Schluss zu: Gene, die Antibiotikaresistenzen vermitteln, können mittels horizontalem Gentransfer zwischen völlig verschiedenen Mi-

Bakterien können eine Antibiotikaresistenz grundsätzlich auf zweierlei Weise erwerben. Beim **vertikalen Transfer** werden resistenz-erzeugende Mutationen im bakteriellen Erbgut (rot) an die folgenden Generationen vererbt. Beim **horizontalen Transfer** dagegen gibt ein Bakterium Resistenzgene an ein anderes weiter.

Der horizontale Transfer untergliedert sich seinerseits in drei verschiedene Mechanismen. Während der **Transformation** nehmen lebende Bakterien resistenzvermittelndes Erbmaterial aus toten Zellen auf und integrieren es ins eigene Genom. Im Zuge der **Transduktion** übertragen bestimmte Viren, die so genannten Bakteriophagen, Resistenzgene zwischen den Bakterien. Bei der **Konjugation** geben Bakterien ihre Resistenzgene direkt an andere Mikroben weiter, und zwar über schlauchförmige Fortsätze, so genannte Pili.



krobenpopulationen ausgetauscht werden – etwa solchen in Krankenhausumgebungen, im Boden, in Abwässern oder in Fleisch. Das wirft ein ganz neues Licht auf die Resistenzbildung bei pathogenen Bakterien.

Ebenso wie Bakterien über verschiedene Möglichkeiten verfügen, sich Antibiotikaresistenzgene anzueignen, können auch die Gene selbst unterschiedliche Resistenzfunktionen vermitteln. Resistenzgene lassen sich grob in vier Gruppen einteilen. Jede davon verleiht der Wirtszelle einen spezifischen Schutzmechanismus (siehe Grafik rechts).

Es gibt viele Taktiken, um Arzneistoffen zu trotzen

Bakterien der ersten Gruppe sind unempfindlich gegenüber dem jeweiligen Antibiotikum, weil ihre Membran den Wirkstoff nicht passieren lässt. Die Mikroben der zweiten Gruppe haben Mutationen erworben, welche die Zielstruktur verändern, an der das Antibiotikum normalerweise angreift. Infolgedessen wirkt der Arzneistoff nicht mehr so gut. Fluorchinolone beispielsweise stören die Funktion bestimmter Proteine, die das Bakterium benötigt, um sein DNA-Molekül während der Zellteilung zu entwinden. Wenn diese Proteine auf Grund von Mutationen eine veränderte Struktur aufweisen, binden die Fluorchinolone nicht mehr so gut an sie und wirken dementsprechend weniger stark, so dass man sie in höherer Konzentration einsetzen muss, um den gleichen klinischen Effekt zu erzielen.

Beim dritten Resistenzmechanismus kodiert das Resistenzgen für ein Enzym, das die Antibiotikamoleküle abbaut oder inaktiviert, bevor sie die Bakterienzelle abtöten können. Diese Taktik setzen Bakterien häufig gegen beta-Lactam-Antibiotika ein, eine mannigfaltige Klasse von oft eingesetzten Substanzen, zu der auch die Penizilline gehören. Penizilline hemmen Enzyme, die für das Zellwachstum unabdingbar sind. Resistenzen gegen diese Antibiotika werden oft von beta-Lactamasen vermittelt – Enzymen, die das Penizillinmolekül spalten, so dass es nicht mehr wirkt.

Zudem können Resistenzgene für so genannte Effluxproteine kodieren, die Antibiotikamoleküle aktiv aus der Zelle hinaus pumpen, so dass deren Konzentration im Zellinnern niedrig bleibt. Diesen Resistenzmechanismus erwerben Bakterien häufig unter dem Selektionsdruck von Antibiotika, die auf Strukturen im Zellinnern abzielen. Oft können solche

Effluxpumpen sogar mehrere verschiedene Wirkstoffe ausschleusen. Ein Beispiel hierfür sind Tetracyclinresistenzgene: Sie erlauben ihren Wirtszellen die Herstellung membranständiger Pumpen, die Tetracycline (eine häufig eingesetzte Klasse von antibiotisch wirksamen Arzneistoffen) aus der Zelle befördern.

Die Sache wird noch komplizierter durch den Umstand, dass Antibiotikaresistenzen meist über mehr als einen Mechanismus vermittelt werden. So beruht die Unempfindlichkeit gegenüber Tetracyclinen häufig auf drei Phänomenen gleichzeitig: veränderte Zielstrukturen in der Zelle, enzymatische Inaktivierung der Arzneistoffe und Pumpwirkung von Effluxproteinen.

Zwar ist der Begriff des Antibiotikaresistoms erst seit fünf Jahren gebräuchlich, aber im Grunde das Ergebnis jahrzehntelanger Forschung über die Evolution von Resistenzgenen und deren Weitergabe zwischen verschiedenen Mikroorganismen und Lebensräumen (Habitaten). Derzeit ist er definiert als Gesamtheit aller resistenzvermittelnden Erbanlagen in der jeweils betrachteten Probe. Dabei kann die Probe eine Einzelzelle umfassen, eine Gruppe von Zellen, eine Zellpopulation oder eine Vielzahl von Populationen. Dieses Konzept erlaubt es beispielsweise, das Resistom eines bestimmten Lebensraums daraufhin zu untersuchen, wie intensiv es Resistenzgene mit dem eines anderen Lebensraums austauscht.

Es mehren sich die Indizien, dass praktisch alle mikrobiell besiedelten Lebensräume Antibiotikaresistome aufweisen; dass sowohl natürliche als auch anthropogene Einflüsse deren gegenseitigen Austausch beeinflussen; und dass unterschiedliche Resistome über komplexe Netzwerke miteinander verbunden sind. Zwei der für uns wichtigsten Resistome sind die der Bodenmikroben und der Körperflora (siehe Abbildung S. 43). Wahrscheinlich verfügen die Mikroben des Erdreichs über das umfangreichste Resistom aller mikrobiell besiedelten Habitate. Die meisten klinisch genutzten Antibiotika waren ursprünglich Stoffwechselprodukte – oder davon abgeleitete Substanzen – bodenlebener Bakterien, vor allem der Gattung *Streptomyces*.

1973 formulierten Forscher um Julian Davies, heute an der University of British Columbia (Kanada), erstmals das Konzept des Resistoms. Davies argumentierte: Bakterien der Ordnung Actinomycetales, von denen die Pharmaindustrie die meisten antimikrobiellen Wirkstoffe gewinnt, müssen über Antibiotikaresistenzgene verfügen, um sich vor den selbst produzierten antibiotischen Substanzen zu schützen. Da diese Mikroben wahrscheinlich schon seit hunderten Millionen Jahren antibiotische Wirkstoffe synthetisieren und im evolutionären Überlebenskampf gegen Konkurrenten einsetzen, sind die entsprechenden Resistenzgene wohl genauso alt. Wenn also pathogene Bakterien heute zunehmend resistent gegenüber Antibiotika sind, dann haben sie die dafür verantwortlichen Erbanlagen womöglich von nichtpathogenen Mikroben übernommen – etwa von Produzenten antimikrobieller Substanzen im Erdreich oder von

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

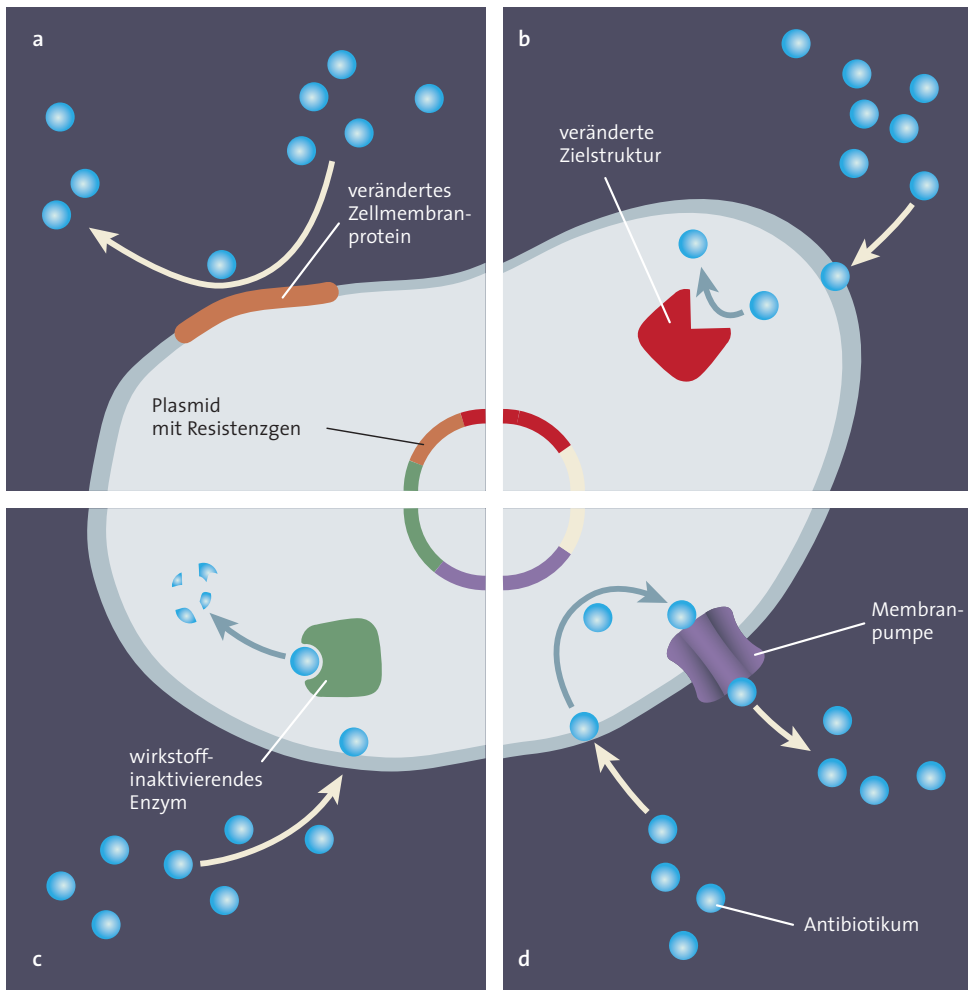
Unser Online-Dossier zum Thema »Antibiotikaresistenzen« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/antibiotikaresistenzen



CGC/JANICE HANEY/CARR



Vier Mechanismen, wie Resistenzgene ihre Wirtsbakterien unempfindlich gegenüber Antibiotika machen können:

- Die Zusammensetzung der bakteriellen Zellmembran ist verändert, so dass diese sich als undurchlässig für den Wirkstoff erweist und die Aufnahme des Antibiotikums (blau) blockiert (a).
- Die Zielstruktur des Antibiotikums, etwa ein Protein, ist modifiziert, so dass der Wirkstoff nicht binden kann (b).
- Das betroffene Bakterium stellt Enzyme her, die das Antibiotikum inaktivieren (c).
- Das betroffene Bakterium produziert Membranpumpen, die den antibiotischen Wirkstoff aus der Bakterienzelle hinaus befördern (d).

anderen bodenbewohnenden Bakterien. Tatsächlich fanden Davies und sein Team vereinzelte Belege hierfür. So stellen einige nicht krank machende Vertreter der Gattung *Streptomyces* Enzyme her, die Aminoglykosid-Antibiotika inaktivieren. Die gleichen Enzyme machen auch krankheitserregende Bakterien resistent gegenüber solchen Wirkstoffen.

Riesiges Arsenal an Abwehrmethoden

Seither wurden zahlreiche Studien durchgeführt, um Davies' These zu prüfen. Eine der wichtigsten stammt von dem Mikrobiologen Gerry Wright und seinen Kollegen von der McMaster University (Kanada). Sie wiesen eine Mehrfachresistenz gegenüber klinisch eingesetzten Antibiotika bei zirka 400 bodenlebenden, nichtpathogenen *Streptomyces*-Stämmen nach. Jeder Stamm reagierte im Durchschnitt auf sieben bis acht Antibiotika unempfindlich, einer sogar auf 15 Substanzen – darunter Antibiotika, die ausschließlich synthetisch hergestellt und gerade erst zugelassen worden waren. Ein erschreckender Befund, denn eine solche Verbreitung von Vielfachresistenzen war bei krankheitserregenden Mikroben bis dahin nicht beobachtet worden.

Wir selbst haben im Jahr 2008 etwa 600 bodenlebende Bakterienarten beschrieben, die sich von Antibiotika sogar ernähren und sie für ihr Wachstum nutzen können. Dazu ge-

hören Vertreter der Proteobacteria, der Bacteroidetes und der Actinobacteria. Im Mittel erwiesen sich diese Mikroben als gegen 17 klinisch relevante Antibiotika resistent. Weitere Untersuchungen an kultivierten Bodenbakterien haben bestätigt, dass diese sehr häufig über Vielfachresistenzen verfügen.

Das Resistom bodenlebender Bakterien muss demzufolge riesig sein. Genetische Untersuchungen erhärten diese Annahme. Analysen auf Grundlage der Polymerase-Kettenreaktion (PCR) – einer Technik, die DNA-Sequenzen vervielfältigt – haben gezeigt, dass resistenzvermittelnde Erbanlagen in praktisch allen Bodenproben vorkommen und sich, wahrscheinlich durch menschliche Aktivität bedingt, stark anreichern. Der Umwelttechniker David Graham und seine Kollegen von der Newcastle University (England) haben Bodenproben, die zwischen 1940 und 2008 in den Niederlanden entnommen worden waren, auf die Anwesenheit bestimmter Resistenzgene untersucht. Sie stellten eine dramatische Zunahme in der Häufigkeit von Erbanlagen fest, die Resistenzen gegen beta-Lactam-Antibiotika, Makrolide und Tetracycline vermitteln. Die Altersspanne der Bodenproben überdeckt dabei ziemlich genau den Zeitraum, in dem Antibiotika in großen Mengen für den klinischen Einsatz produziert wurden.

Allerdings existiert das Bodenresistom laut Studien bereits seit Urzeiten und wurde durch menschliche Einflüsse lediglich weiter angereichert. So analysierten Gerry Wright und seine Mitarbeiter im Jahr 2011 das Resistom in 30000 Jahre altem Permafrostboden. Das Team wies darin DNA-Sequenzen nach, die ihre Wirtszellen unempfindlicher gegenüber beta-Lactam-Antibiotika, Tetracyclinen und Vancomycin machen und evolutionär verwandt sind mit Resistenzgenen heutiger krankheitserrgender Bakterien.

Vermittler zwischen Krankheits- und Bodenkeimen

Angeichts dieser Befunde liegt die Vermutung nahe, zwischen dem Resistom des Erdreichs und dem der krank machenden Bakterien habe es bis in die jüngste Vergangenheit einen umfassenden Austausch von Genen gegeben. Dem scheint aber nicht so zu sein: Obwohl Sequenzen im Bodenresistom mitunter den Resistenzgenen heutiger pathogener Mikroben stark ähneln, ist die Übereinstimmung in den meisten Fällen nicht sehr groß, wie Studien belegen. Wir postulierten daher, der Austausch von genetischem Material laufe nicht auf »breiter Front«, sondern im Wesentlichen über eine einzelne Untergruppe der Bodenbakterien. Diese vermuteten wir in den häufig multiresistenten Proteobacteria. Denn Krankheitserreger aus dieser Abteilung verursachen aktuell die

Die vielfältigen Beziehungen zwischen Menschen, Tieren und der Umwelt machen es antibiotikaresistenten Bakterien manchmal leicht, von einer Wirtsspezies auf eine andere zu wechseln. Zum Beispiel könnte ein im Erdreich lebender, resistenter Bakterienstamm in Trinkwasserreservoirs oder in Badeseen eingeschwemmt werden, von wo aus er Menschen infiziert. Die zahlreichen Möglichkeiten des Mikrogen- und Genaustauschs zwischen verschiedenen Habitaten fördern die Verbreitung resistenter Bakterien.

größten Probleme in Krankenhäusern – bei ihnen ist es daher am wahrscheinlichsten, dass sie mit ihren nahen Verwandten im Erdreich jüngst genetisches Material ausgetauscht haben.

Wir überprüften diese Hypothese, indem wir zirka 100 multiresistente, bodenlebende Bakterienstämme untersuchten, bei denen es sich vorwiegend um Proteobacteria handelte. Deren Resistome analysierten wir mit hochmodernen Sequenzierungsmethoden. In Bodenproben, die in den USA entnommen worden waren, entdeckten wir neun verschiedene Antibiotikaresistenzgene, die genetisch identisch waren mit Erbanlagen in weltweit verbreiteten bakteriellen Krankheitserregern. Damit hatten wir den Beweis erbracht, dass zumindest eine Teilmenge der harmlosen Bodenmikro-

Erforschung von Resistenzen außerhalb der Petrischale

Während der ersten Jahrzehnte nach der Entdeckung antibiotischer Wirkstoffe erforschten Wissenschaftler die Resistenzbildung, indem sie die betreffenden Bakterien im Labor kultivierten und dort auch den Wirkstoffen aussetzten. Das Verfahren geht zurück auf Robert Koch (1843–1910), den Begründer der modernen Mikrobiologie, der die Arbeit an Bakterien-»Reinkulturen« zum Goldstandard in der klinischen Mikrobiologie erhob. Heute wissen wir aber, dass die Untersuchung einzelner Erreger in Reinkultur kaum Erkenntnisse über die wachsende Zahl von Krankheiten liefert, die von mehreren Bakterienarten gemeinsam verur-

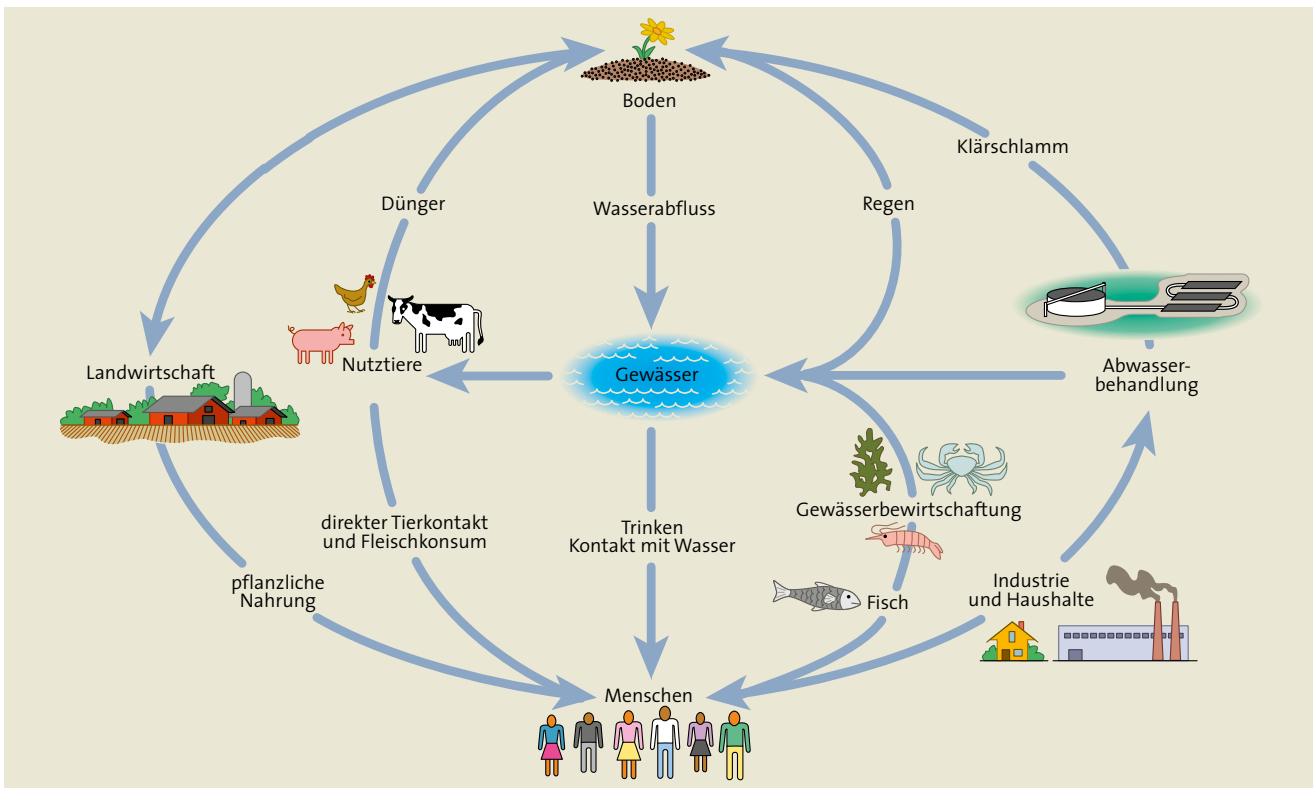
sacht werden. Zudem lassen sich die meisten aus der natürlichen Umwelt stammenden Bakterien nicht ohne Weiteres im Labor züchten. Technologische Durchbrüche in der jüngeren Vergangenheit haben zu neuen, kulturunabhängigen Verfahren geführt, die nicht auf Reinkulturen angewiesen sind und mit denen sich Antibiotikaresistenzen viel umfassender untersuchen lassen – sowohl bei pathogenen als auch bei harmlosen Bakterien. Amerikanische und deutsche Forscher haben mit Hilfe eines solchen Verfahrens kürzlich einen neuen Wirkstoff entdeckt, das Antibiotikum Teixobactin (*Nature* 10.1038/nature14098, 2015).

Mit Hilfe der **Polymerase-Kettenreaktion (PCR)** lassen sich gezielt bestimmte Resistenzgene in komplexen mikrobiellen Lebensgemeinschaften vervielfältigen, so dass sie gängigen Nachweismethoden zugänglich werden. Die PCR eignet sich gut, um die Häufigkeit von bekannten Erbanlagen zu bestimmen, ist jedoch untauglich, um unbekannte (Resistenz-)Gene zu entdecken.

Um Antibiotikaresistenzen in verschiedenen Bakterienpopulationen zu untersuchen, waren Wissenschaftler früher darauf angewiesen, die Mikroben im Labor zu kultivieren (meist in Petrischalen, wie auf dem Bild links gezeigt). Das ist heute nicht mehr unbedingt nötig. Neue, kulturunabhängige Untersuchungsmethoden erfassen auch jene 99 Prozent aller Bakterienarten, die sich nicht in Reinkultur züchten lassen.



CDC/RICHARD R. BACALAMA



Eine **Metagenomsequenzierung** entziffert die gesamte Erbinformation in einem bestimmten Lebensraum (Habitat) – unabhängig davon, welchem Organismus sie jeweils entstammt. Dabei entstehen zunächst Sequenzfragmente, welche die Wissenschaftler mit Computerunterstützung zu längeren Abschnitten zusammensetzen. Diese durchsuchen sie dann nach unbekanntem Erbanlagen, die bekannten Resistenzgenen ähneln.

Die funktionelle Metagenomselektion kombiniert ältere Zellkulturverfahren mit neuen, kulturunabhängigen Techniken. In das Erbgut eines Wirtsorganismus, der normalerweise auf Antibiotika empfindlich reagiert, werden verschiedene DNA-Fragmente aus der interessierenden bakteriellen Lebensgemeinschaft eingeschleust. Anschließend behandelt man den Wirtsorganismus mit Antibiotika. Es überleben nur jene Wirte, die im ersten Schritt ein Resistenzgen erhielten. Diese werden untersucht, um das entsprechende Gen zu identifizieren.

Ein weiterer Forschungsansatz stammt von den Autoren dieses Artikels. Sie bezeichnen ihr Verfahren als **PARFuMS**, für Parallel Annotation and Reassembly of Functional Metagenomic Selections. Hierbei stützen sie sich auf kulturunabhängige, funktionelle Metagenomselektionsverfahren, auf neueste DNA-Sequenzierungstechniken sowie auf computergestützte Methoden, um Sequenzbruchstücke zusammenzusetzen und Resistome zu charakterisieren.

ben in genetischem Austausch mit humanpathogenen Bakterien steht.

Wir wissen inzwischen einiges über Bodenresistome – und trotzdem steht ihre Erforschung noch ganz am Anfang. Ein Gramm Boden enthält im Durchschnitt etwa eine Milliarde Bakterien. Kein gegenwärtig verfügbares Messverfahren kann die unglaubliche Diversität dieser mikrobiellen Lebensgemeinschaften auch nur entfernt erfassen. Rund die Hälfte aller mutmaßlich 60 Bakterien-Phyla lässt sich nicht kultivieren – und selbst diejenigen, bei denen das geht, sind noch lange nicht vollständig charakterisiert. Zum Glück haben sich die methodischen Möglichkeiten so weit verbessert, dass Wissenschaftler heute die DNA einzelner Bakterien sequenzieren können, ohne die Einzeller zuvor kultivieren zu müssen. Dementsprechend schließen sich allmählich die Informationslücken.

Das Resistom des Erdreichs ist zweifellos das umfangreichste Reservoir an Resistenzgenen. Doch die Mikroben, die auf und in unserem Körper leben und unter dem Begriff »Mikrobiom« zusammengefasst werden, enthalten dasjenige Resistom, welches für menschliche Krankheitserreger am leichtesten zugänglich ist. Das Mikrobiom umfasst zehnmal so viele Zellen wie unser Körper, und in seiner Gesamtheit besitzt es 100-mal so viele Gene wie das menschliche Genom. Spezialisierte und relativ stabile Lebensgemeinschaften dieser Mikroben bewohnen verschiedene Bereiche des Organismus. Die zahlenmäßig bedeutendste und vielfältigste Gemeinschaft findet sich im Darm. An praktisch allen Aspekten menschlicher Gesundheit und Krankheit wirkt das Mikrobiom mit.

Auf den Spuren anderer Resistome

Neben den Mikroorganismen des Erdreichs und des menschlichen Darms sind es Bakterien aus Land- und Gewässerwirtschaft, die mutmaßlich stark zur Verbreitung von Resistenzgenen beitragen. Sowohl in den USA als auch in Europa setzen Beschäftigte der Nahrungsmittelindustrie viermal so viele Antibiotika ein wie Ärzte in der Humanmedizin. Frank Aarestrup von Dänemarks Technischer Universität hat nachgewiesen, dass dies bei den Darmbakterien der Nutztiere zu einer starken Verbreitung von Resistenzen führt. Und Genomanalysen belegen: Darmmikroben von Nutztieren tauschen häufig Resistenzgene mit Vertretern der menschlichen Mikroflora. Auch in der Gewässerwirtschaft steigt der Antibiotikaverbrauch alarmierend, denn Fische und Meeresfrüchte werden in immer größeren Mengen in Aquakultur erzeugt. Felipe Cabello vom New York Medical College und seine Kollegen haben gezeigt, dass dies mit mehr Antibiotikaresistenzen bei Fischen einhergeht.

Die bakteriellen Resistome in der Land- und Gewässerwirtschaft sind vermutlich Zwischenstationen, die es krankmachenden Mikroben in weit gehend unberührten Lebensräumen erlauben, in Austausch mit der Mikroflora des Menschen zu treten. Dabei findet wohl in beiden Richtungen ein Transfer von Resistenzgenen statt. Antibiotikaresistente Bakterien von landwirtschaftlichen Nutztieren werden beim Düngen und Pflügen der Äcker im Erdreich verteilt, wo sie Resistenzen an Bodenbakterien weitergeben. Die Nutztiere wiederum kommen häufig in Kontakt mit Erdreich, so dass Bodenbakterien ihre Erbanlagen an die Mikroflora der Tiere zurückgeben. Obwohl im Einzelfall kaum zu ermitteln ist, woher ein Resistenzgen ursprünglich stammt, ist es unstrittig, dass der exzessive Gebrauch von Antibiotika in der Nahrungsmittelproduktion die Zunahme von Antibiotikaresistenzen fördert.



PIXABAY / HANS BRAXMEIER / CC0 (CREATIVECOMMONS.ORG/PUBLICDOMAIN/ZERO/1.0/LEGALCODE)

Ein Großteil aller vertriebenen Antibiotika dient dazu, Schweine, Kühe, Hühner, Puten und andere Schlacht-tiere vor Krankheiten zu bewahren und ihr Wachstum zu beschleunigen.

Eine der wichtigsten Aufgaben der Darmflora ist es, Krankheitserreger an der Besiedelung des Verdauungsorgans zu hindern. Weil sie den Lebensraum Darm besetzen, kann dieser nicht mehr ohne Weiteres von bakteriellen Neuankömmlingen erobert werden. Allerdings kommen mikrobielle Eindringlinge recht intensiv mit dem Mikrobiom in Kontakt. Dabei tauschen beider Resistome genetisches Material aus, unter anderem resistenzvermittelnde Erbanlagen. Der häufige Einsatz von Antibiotika übt auf das Mikrobiom einen Selektionsdruck aus: Er führt dazu, dass die körperbesiedelnden Bakterien Resistenzgene erwerben – die sie an Pathogene weitergeben.

In den 1990er Jahren ergaben Studien an symbiontischen Darmbakterien der Gattung *Bacteroides*, dass diese mit krank machenden Vertretern ihrer Gattung Erbanlagen austauschen, die Tetracyclin- und Makrolidresistenzen vermitteln. Als die Forscher sodann eingelagerte *Bacteroides*-Proben analysierten, stellten sie fest, dass die Häufigkeit solcher Resistenzgene über den Untersuchungszeitraum von zwei Jahrzehnten stetig zugenommen hatte.

Keime behalten Abwehrmechanismus bei, auch wenn sie ihn nicht mehr brauchen

Offenkundig führt der Einsatz von Antibiotika zu mehr Resistenzen – eine Schlussfolgerung, die Studien an weiteren Vertretern des Mikrobioms bestätigten. Martin Blaser und seine Kollegen von der New York University (USA) beobachteten, dass die medizinische Bekämpfung des Erregers *Helicobacter pylori*, der Magengeschwüre verursacht, oft einen Kollateralschaden zur Folge hat: Sie bewirkt bei körperbesiedelnden Enterokokken eine größere Resistenz gegenüber Makrolid-Antibiotika – und diese rufen bisweilen Harnwegsinfektionen und Hirnhautentzündungen hervor. Die Forscher berichteten zudem, diese erhöhte Resistenz habe noch Jahre nach Beendigung der Therapie bestanden. Das stellt die übliche Annahme in Frage, wonach die Aufrechterhaltung einer Antibiotikaresistenz für die betroffenen Bakterien eine Belastung darstellt und daher in Abwesenheit des Antibiotikums verschwindet, indem nichtresistente Mikroben ihre resistenten Konkurrenten verdrängen.

Nicht nur die Untersuchung der Darmflora hat unerwartete Ergebnisse zu Tage gefördert. Auch in den Nasenöffnungen von Patienten, die Antibiotika erhalten hatten, wurden dauerhaft resistente *Staphylococcus-epidermis*-Bakterien nachgewiesen, die zu den wichtigsten Erregern der gefürchteten Krankenhausinfektionen zählen. Eine Vielzahl von Studien an Tieren und mit Menschen zeigen, dass das Mikrobiom intensiv genetisches Material mit anderen Resistomen austauscht. Anette Hammerum und ihr Team vom Statens-Serum-Institut in Dänemark beschrieben kürzlich die Weitergabe von Vancomycinresistenzgenen von menschenbesiedelnden Mikroben an das Mikrobiom von Schweinen.

All diese Studien belegen: Die Behandlung mit Antibiotika verschafft resistenten Bakterien einen Selektionsvorteil – und haben sich deren Resistenzen erst einmal in der Population

durchgesetzt, können sie viele Jahre lang Bestand haben. Resistenzgene werden darüber hinaus zwischen dem Mikrobiom und bakteriellen Krankheitserregern ausgetauscht. Und dies wohl in weit größerem Maß als bisher angenommen.

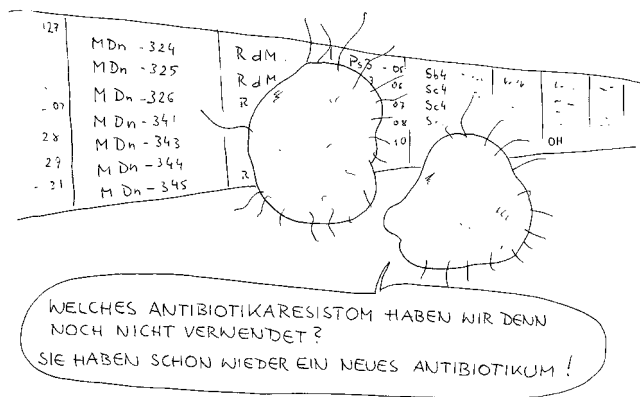
Im Jahr 2009 untersuchten wir die Resistome zweier gesunder, nicht verwandter Personen, die seit mindestens einem Jahr keine Antibiotika zu sich genommen hatten. Wir erfassten dabei sowohl Bakterien aus Stuhlproben, die wir in Zellkultur vervielfältigten, als auch nicht kultivierbare Bakterien der Darmflora. Das Resistom der ersten Gruppe setzte sich großteils aus Genen zusammen, die in öffentlich zugänglichen Datenbanken verzeichnet sind. Die meisten dieser Erbanlagen waren identisch mit Resistenzgenen häufiger Krankheitserreger, was darauf schließen lässt, dass die entsprechenden Darmmikroben bis in die jüngste Vergangenheit einen intensiven genetischen Austausch mit pathogenen Bakterien betrieben haben.

Im Gegensatz hierzu waren die meisten Resistenzgene der nicht kultivierbaren Bakterien weit gehend unbekannt – sie zeigten nur wenige Übereinstimmungen mit in Datenbanken hinterlegten Sequenzen. Jedes dieser neuen Gene verlieh dem Modellbakterium *Escherichia coli* eine (Teil-)Resistenz gegenüber therapeutisch wichtigen Antibiotika. Daraus folgt: Das Resistom der bisher kaum charakterisierten, nicht kultivierbaren Darmmikroben enthält voll funktionstüchtige Resistenzgene und muss in einschlägigen Studien berücksichtigt werden.

Unser Ergebnis unterstreicht einmal mehr, dass wir bisher nur einen kleinen Teil des Gesamtbilds erfassen. Wir müssen die Resistome von wesentlich mehr Probanden analysieren, und das viel umfassender als bisher, um einen vollständigeren Eindruck zu gewinnen. Kürzlich untersuchten Forscher um Peer Bork vom Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg sowie um Baoli Zhu von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking die Darmflora-Resistome von hunderten Probanden verschiedener Nationalitäten und aus unterschiedlichen Kulturkreisen. Zusammengenommen belegen ihre Ergebnisse die Existenz tausender Resistenzgene. Deren jeweilige Häufigkeit korreliert mit der Intensität des Einsatzes entsprechender Antibiotika in Medizin und Landwirtschaft und mit der Zeit, die seit Markteinführung dieser Antibiotika verstrichen ist.

Langzeituntersuchungen von Mikrobengemeinschaften, die den Menschen besiedeln, werden es uns künftig ermöglichen, dynamische Entwicklungen in Resistomen zu verfolgen, statt nur Momentaufnahmen zu betrachten. Groß angelegte Untersuchungen wie das Earth Microbiome Project und das Hospital Microbiome Project zielen darauf ab, verschiedene Mikrobiome in unserer Umwelt vollständig zu sequenzieren, um detailliert nachverfolgen zu können, wie diese miteinander in Austausch treten. Innovative Methoden wie das Verfahren PARFuMS (siehe Kasten S. 42/43) werden uns dabei helfen, neue Resistenzmechanismen aufzudecken.

Resistomforschung kann dazu beitragen, die ökologischen und evolutionären Mechanismen der Antibiotikaresistenz



tenzbildung besser zu verstehen. Wir hoffen, mit dem dabei erworbenen Wissen die Ausbreitung multiresistenter Keime in Krankenhäusern eindämmen und Antibiotika wirksamer einsetzen zu können. Doch selbst mit der genauesten Kenntnis über Resistome werden wir im Kampf gegen Infektionskrankheiten niemals einen endgültigen Sieg davontragen. Wir können immer nur versuchen, den pathogenen Mikroben einen Schritt voraus zu sein. Was wir dabei am dringendsten benötigen, sind neue Antibiotika – und zwar so viele wie irgend möglich. Denn die wichtigste Lehre, die wir aus der Resistomforschung ziehen müssen, lautet, dass Bakterien über ein praktisch unerschöpfliches Reservoir an Resistenzgenen und -mechanismen verfügen. Damit wir das Rennen mit ihnen nicht verlieren, brauchen wir eine mehrgleisige Strategie für die Behandlung von Infektionskrankheiten, die auch den genetischen Austausch der Mikroben untereinander berücksichtigt. ~

DIE AUTOREN



Gautam Dantas (links) ist Dozent für Pathologie, Immunologie und Biomedizintechnik sowie Mitglied des Zentrums für Genomwissenschaften und Systembiologie an der Washington University in St. Louis (USA). **Morten O. A. Sommer** ist

Professor für Systembiologie an Dänemarks Technischer Universität.

QUELLEN

Dantas, G. et al.: Experimental Approaches for Defining Functional Roles of Microbes in the Human Gut. In: Annual Review of Microbiology 67, S. 459–475, 2013

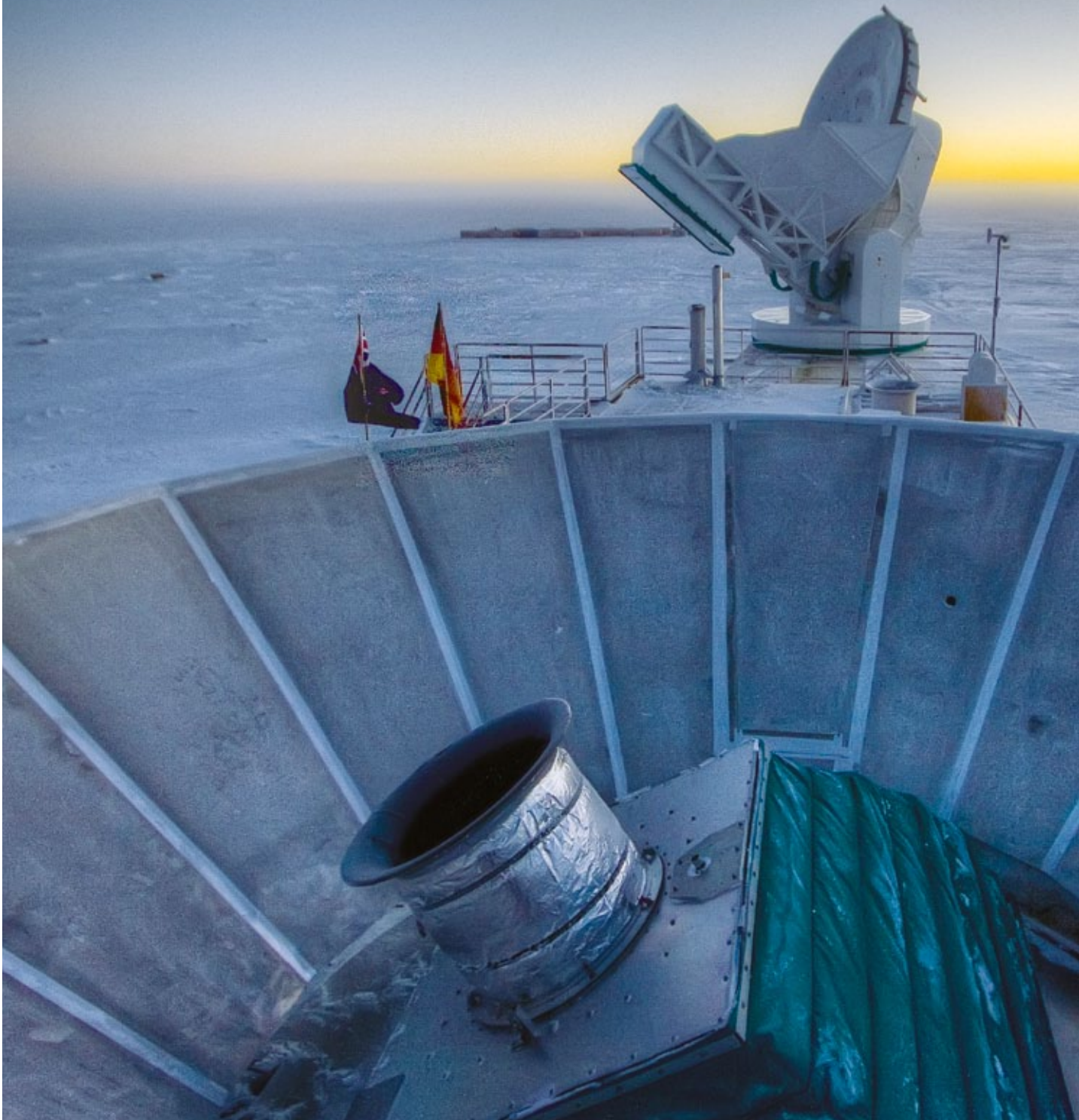
Imamovic, L., Sommer, M. O.: Use of Collateral Sensitivity Networks to Design Drug Cycling Protocols that Avoid Resistance Development. In: Science Translational Medicine 5, 204ra132, 2013

Moore, A. M. et al.: Pediatric Fecal Microbiota Harbor Diverse and Novel Antibiotic Resistance Genes. In: PLoS One 8, e78822, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327771

© American Scientist

Das BICEP2-Mikrowellenteleskop an der Amundsen-Scott-Südpolstation durchsuchte von Januar 2010 bis Dezember 2012 einen kleinen Himmelsausschnitt nach indirekten Spuren urtümlicher Gravitationswellen in der kosmischen Hintergrundstrahlung.



KOSMOLOGIE

Wellenschlag des Urknalls

Die unmittelbar auf den Urknall folgende Phase der kosmischen Inflation erzeugte Gravitationswellen, die im kosmischen Strahlungshintergrund feinste Spuren hinterließen. Die kürzlich beobachtete »Verwirbelung« der kosmischen Mikrowellenstrahlung wird allerdings größtenteils vom Staub in der Milchstraße erzeugt. Schon bald sollen präzisere Messungen aus den galaktischen Staubsignalen die Spur der kosmischen Inflation herausfiltern.

Von Lawrence M. Krauss

Im März 2014 sorgte die Pressekonferenz eines Teams von Astronomen für eine wissenschaftliche Sensation. Die Forscher behaupteten, mit ihrem am Südpol stationierten Mikrowellenteleskop hätten sie ein Signal beobachtet, das praktisch vom Anbeginn der Zeit stamme. Das von ihnen analysierte Polarisationsmuster der kosmischen Hintergrundstrahlung sei von Gravitationswellen bei der Entstehung des Universums verursacht worden – nur 10^{-36} Sekunden nach dem Urknall.

Hätte sich das Ergebnis bestätigt, könnten wir nun Ideen über den Ursprung des Alls empirisch testen, die bisher bloße Spekulation waren. Wir könnten unsere Theorien der subatomaren Quantenwelt mit den auf Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie beruhenden kosmologischen Modellen verbinden. Und vielleicht fänden wir sogar Indizien für die Existenz anderer Universen.

Allerdings meldeten sich schon bald nach der spektakulären Ankündigung skeptische Stimmen, die letztlich auch Recht behielten. Offenbar sind raffiniertere Experimente nötig, um solche Gravitationswellen definitiv nachzuweisen. Das wird vermutlich nicht lange dauern. Bis dahin herrscht unter Kosmologen gespannte Erwartung.

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

DIE GEBURT DES UNIVERSUMS

- | | | |
|--------|---|------------------|
| Teil 1 | ▶ Das Schwarze Loch am Beginn der Zeit
<i>Niyesh Afshordi, Robert B. Mann und Razieh Pourhasan</i> | Februar 2015 |
| Teil 2 | ▶ Wellenschlag des Urknalls
<i>Lawrence M. Krauss</i> | März 2015 |
| Teil 3 | ▶ Die ersten Sterne
<i>Michael D. Lemonick</i> | April 2015 |

STEFFEN RICHTER, HARVARD UNIVERSITY

Die Entdeckung von Inflationsspuren in der Hintergrundstrahlung würde zwei Paradoxien des frühen Universums auflösen. Das erste Problem betrifft die Geometrie des Alls im Großen und Ganzen. In den 13,8 Milliarden Jahren seit dem Urknall hat sich das Universum unentwegt ausgedehnt und ist dabei in seinen drei Dimensionen insgesamt fast völlig »flach« geblieben – das heißt, in ihm pflanzt sich das Licht im Durchschnitt geradlinig fort.

Allerdings stellt ein solches flaches All gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ein eher unwahrscheinliches Ergebnis der Entwicklung dar. Da Materie und Strahlung fast während der gesamten Geschichte des Universums die vorherrschenden Energieformen waren, muss ein nicht ganz ebenes All sich unter dem Einfluss der Gravitationsanziehung immer mehr vom flachen Gesamtzustand entfernen. Wäre das Universum jemals nur ein wenig krumm geworden, würde es heute einen sattelförmig gekrümmten Raum einnehmen – oder geschlossen wie eine Kugeloberfläche sein. Weil der Kosmos noch immer flach erscheint, müssen seine anfänglichen Eigenschaften ungeheuer fein abgestimmt gewesen sein.

Das zweite Paradoxon ist die Tatsache, dass das All in allen Richtungen gleich aussieht: Es ist »isotrop«. Das ist seltsam, denn das von der einen Seite des beobachtbaren Universums ausgehende Licht konnte erst vor Kurzem die andere Seite erreichen. Das bedeutet, dass weit entfernte Regionen früher nicht miteinander kommunizieren konnten – oder wie Physiker sagen: Sie standen nicht in kausaler Verbindung. Wie können sie sich dann derart gleich entwickelt haben?

1980 fand ein junger US-Physiker namens Alan Guth eine Lösung für diese Paradoxien: Er postulierte, das Universum habe sich sofort nach seiner Entstehung rapide ausgedehnt. Guth kam auf diese Idee, die er Inflation taufte, durch die so genannte spontane Symmetriebrechung. Dieser Grundbestandteil des Standardmodells der Teilchenphysik beschreibt, was geschieht, wenn ursprünglich vereinigte Kräfte sich trennen.

Offenbar hat eine spontane Symmetriebrechung bereits mindestens einmal im Universum stattgefunden. Gemäß der elektroschwachen Theorie wirken zwei Grundkräfte – der Elektromagnetismus und die für den radioaktiven Kernzerfall verantwortliche schwache Kraft – heutzutage unterschiedlich, obwohl sie einst eine einzige, vereinheitlichte



Kraft bildeten. Als das Universum sich rund 10^{-12} Sekunden nach seiner Entstehung abzukühlen begann, fand ein Phasenübergang statt – wie beim Übergang von flüssigem Wasser zu Eis –, der das Wesen des leeren Raums veränderte. Er füllte sich mit einem Hintergrundfeld, das entfernt dem elektrischen Feld ähnelt, aber viel schwerer zu entdecken ist.

Argumente für die kosmische Inflation

Dieses so genannte Higgs-Feld beeinflusst die Art, wie sich Teilchen durch den Raum bewegen. Solche, die mit dem Feld wechselwirken – beispielsweise die Quantenteilchen der schwachen Kraft –, erfahren einen Widerstand, durch den sie sich als massetragende Partikel verhalten. Teilchen, die nicht mit dem Feld interagieren – zum Beispiel das Photon, Träger der elektromagnetischen Kraft –, bleiben masselos. Deshalb begannen die schwache und die elektromagnetische Kraft sich unterschiedlich zu verhalten: Die Symmetrie, die sie zuvor vereint hatte, wurde gebrochen. Dieses zunächst rein hypothetische Bild hat sich bestätigt, als 2012 mit dem Large Hadron Collider (LHC) der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN bei Genf das Higgs-Boson nachgewiesen wurde.

Wie Guth annahm, fand noch früher eine ähnliche Symmetriebrechung statt. Vor diesem Ereignis waren demnach drei der vier Grundkräfte – mit Ausnahme der Gravitation – miteinander vereinigt: die elektromagnetische und die schwache Kraft sowie die starke Kraft, welche Protonen und Neutronen zusammenhält. Tatsächlich sprechen indirekte Indizien dafür, dass die Symmetrie dieser drei Kräfte rund 10^{-36} Sekunden nach dem Urknall gebrochen wurde. Wegen der Abkühlung des Universums könnte ein besonders früher Phasen-

AUF EINEN BLICK

EINE SPUR DER KOSMISCHEN INFLATION?

1 Im März 2014 meldeten Astrophysiker, sie hätten **Gravitationswellen** nachgewiesen, die in den ersten Augenblicken nach dem Urknall entstanden seien.

2 Obwohl diese Entdeckung sich nicht bestätigt hat, suchen Forscher weiter nach Spuren von Vorgängen am **Beginn der Zeit**, insbesondere aus der Phase der kosmischen Inflation.

3 Solche Gravitationswellen würden zudem indirekte Indizien für die **Existenz eines »Multiversums«** liefern, in dem unser All nur eines von vielen separaten Universen wäre.



NASA / ESA / GARTH ILLINGWORTH, DANIEL MAGEE & PASCAL OESCH, UC SANTA CRUZ / RYCHARD BOUWENS, LEIDEN UNIVERSITY / HUDF09 TEAM

Im Großen und Ganzen sieht das Universum in jeder Blickrichtung gleich aus – es ist isotrop: Die Dichte der Galaxien bietet in jedem Himmelsausschnitt ungefähr das gleiche Bild wie in dieser Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops. Die Isotropie des Weltalls lässt sich am besten durch eine Phase rapider Inflation erklären, die direkt auf den Urknall folgte.

übergang den Raum verändert und ein Hintergrundfeld erzeugt haben, unter dessen Einfluss sich die elektroschwache Kraft anders zu verhalten begann als die starke Kraft.

Wie im Fall des Higgs-Felds gehören auch zu diesem symmetriebrechenden Feld exotische und sehr massereiche Quantenteilchen – doch ihre Massen müssen noch viel größer sein. Um sie nachzuweisen, müsste man einen Beschleuniger bauen, der zehn Billionen Mal mehr Energie liefert als der LHC. Das hypothetische Modell heißt große vereinheitlichte Theorie oder GUT (grand unified theory), denn es vereinigt die drei Grundkräfte außer der Gravitation zu einer einzigen Kraft.

Guth erkannte, dass eine spontane Symmetriebrechung unmittelbar nach dem Urknall die erwähnten Paradoxien aufzulösen vermag, sofern das symmetriebrechende Feld wenigstens kurzfristig in einem »metastabilen« Zustand verharrt. Wasser gerät in einen metastabilen Zustand, wenn die Umgebungstemperatur schnell unter den Gefrierpunkt fällt. Sobald das unterkühlte Wasser endlich doch gefriert, setzt es Energie frei, so genannte latente Wärme. In ähnlicher Weise speicherte das für den GUT-Phasenübergang verantwortliche Feld für kurze Zeit enorm viel latente Energie im gesamten Raum. Während der kurzen Inflationsphase erzeugte diese Energie eine abstoßende Gravitationswirkung, die das All mit exponentiell wachsender Geschwindigkeit auseinandertrieb. Der Keim des heute beobachtbaren Universums nahm in weniger als 10^{-36} Sekunden um mehr als 25 Größenordnungen zu. Die extreme Expansion machte den Kosmos flach und isotrop wie einen stark aufgeblasenen Luftballon. Damit beseitigt die Inflation auf natürliche Weise die beiden Paradoxien der großräumigen Struktur des Universums.

Zwar ist die Inflation eine überzeugende Idee. Doch vorderhand fehlt uns eine fundamentale Theorie, aus der unter anderem die präzisen Energieniveaus hervorgehen, bei denen die vereinheitlichten Naturkräfte einst auseinanderbrachen. Die einfachsten Inflationstheorien erklären viele Eigenschaften des heutigen Kosmos, aber verschiedene Versionen der Inflation führen zu höchst unterschiedlichen Universen. Was uns fehlt, ist ein direkter Nachweis, dass die Inflation tatsächlich stattfand, sowie Aufschluss über die ihr zu Grunde liegende Physik. Gravitationswellen bieten die Möglichkeit dazu.

Gravitationswellen

Als Albert Einstein 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, erwähnte er, dass aus ihr ein faszinierendes neues Phänomen folge. Die Theorie beschreibt Gravitationsfelder als Verzerrungen der Raumzeit. Eine sich über die Zeit verändernde Energiequelle – ein um seine Sonne kreisender Planet oder ein Doppelsternsystem – erzeugt eine solche zeitlich schwankende Verzerrung, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Wenn derartige Gravitationswellen zwei Objekte in ihrer Nähe passieren, verändern sie deren Abstand zueinander geringfügig.

Da die Schwerkraft viel schwächer wirkt als der Elektromagnetismus, sind Gravitationswellen äußerst schwierig zu entdecken – oder, wie Einstein mutmaßte, überhaupt nicht. 100 Jahre später ist es uns zwar noch immer nicht gelungen, die von kollidierenden Schwarzen Löchern und anderen kosmischen Katastrophen ausgehenden Gravitationswellen direkt zu messen. Doch zum Glück gibt es eine viel stärkere Quelle: die fluktuierenden Quantenfelder unmittelbar nach dem Urknall.

Gravitationswellen und Hintergrundstrahlung

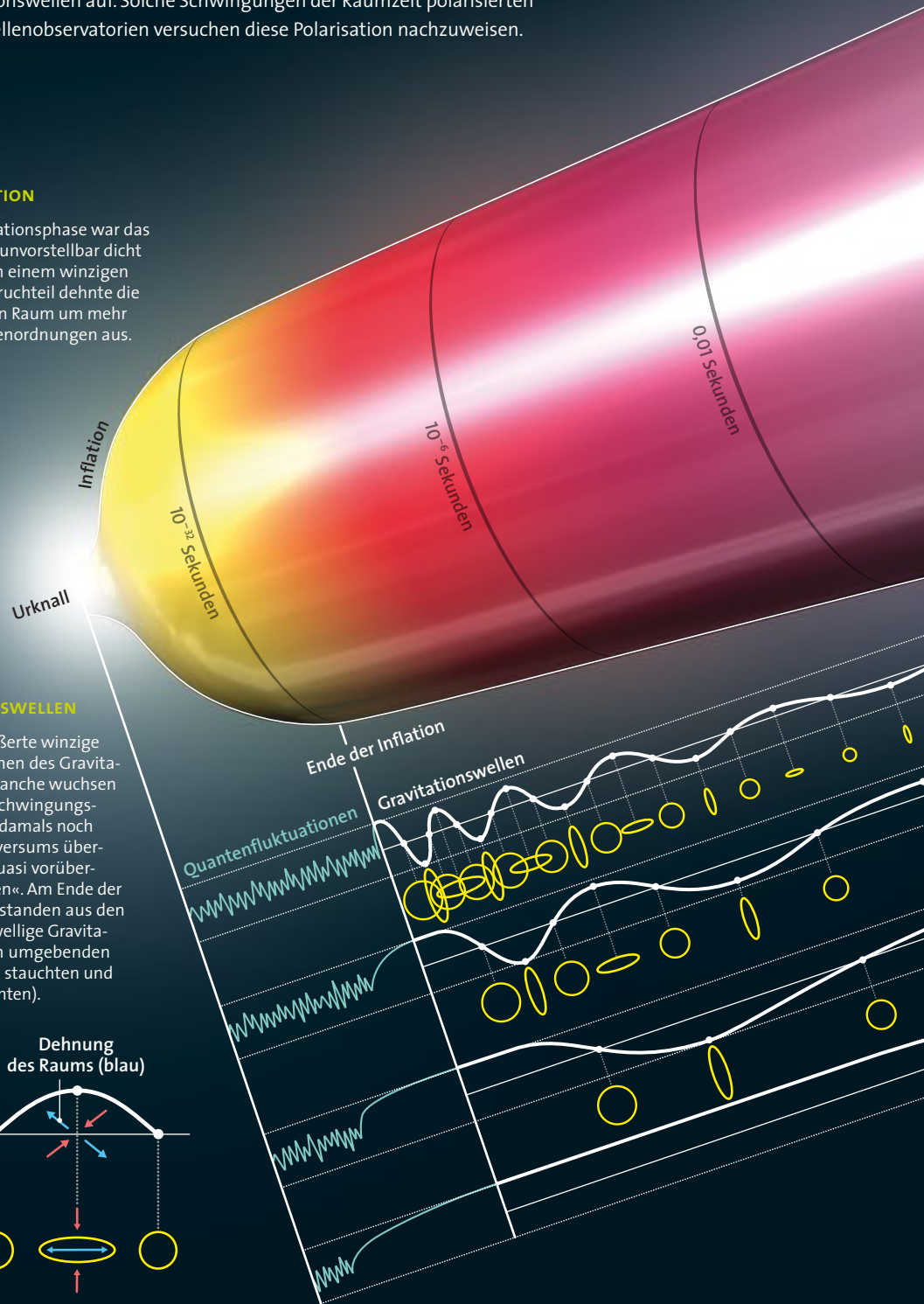
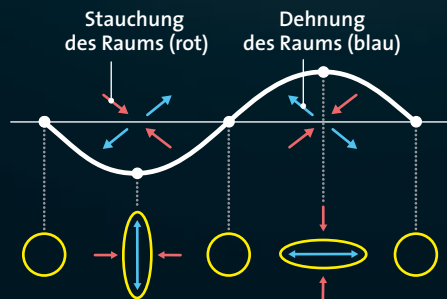
Nach gängiger Meinung hat die kosmische Inflation das Universum unmittelbar nach dem Urknall rapide ausgedehnt. Einen Beweis dafür kann der kosmische Strahlungshintergrund liefern, der 380 000 Jahre nach dem Urknall entstand. Die Inflation blähte Quantenfluktuationen des Schwerfelds zu makroskopischen Gravitationswellen auf. Solche Schwingungen der Raumzeit polarisierten die Hintergrundstrahlung. Mikrowellenobservatorien versuchen diese Polarisation nachzuweisen.

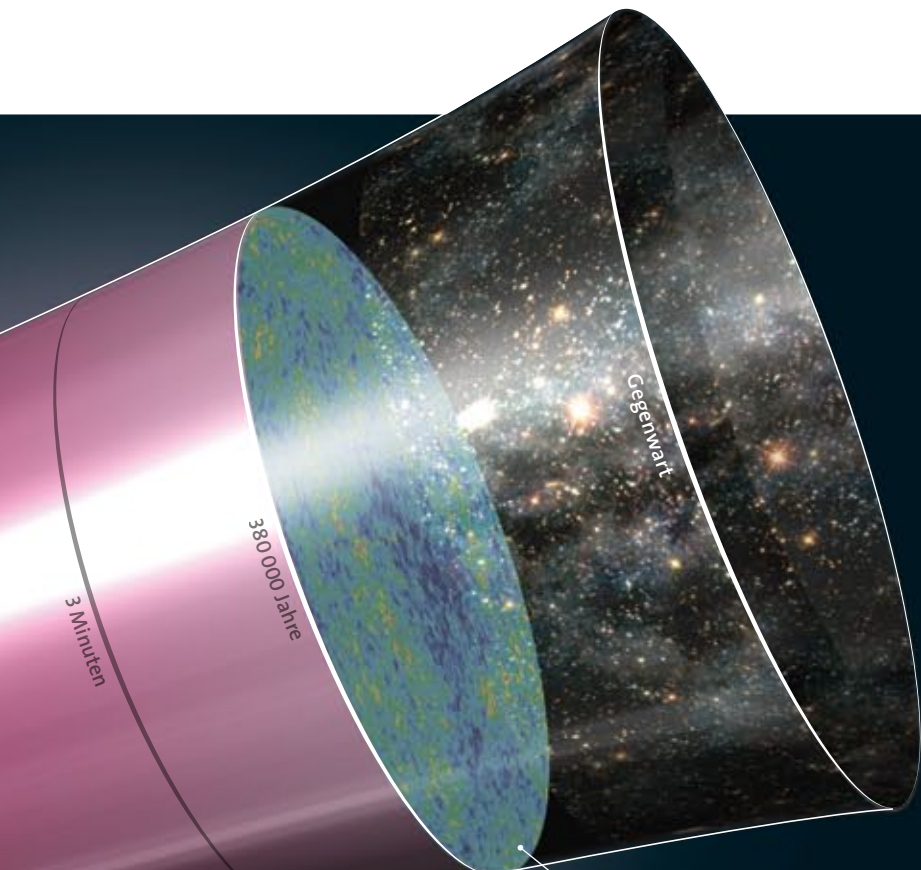
1 INFLATION

Vor der Inflationsphase war das Universum unvorstellbar dicht und klein. In einem winzigen Sekundenbruchteil dehnte die Inflation den Raum um mehr als 25 Größenordnungen aus.

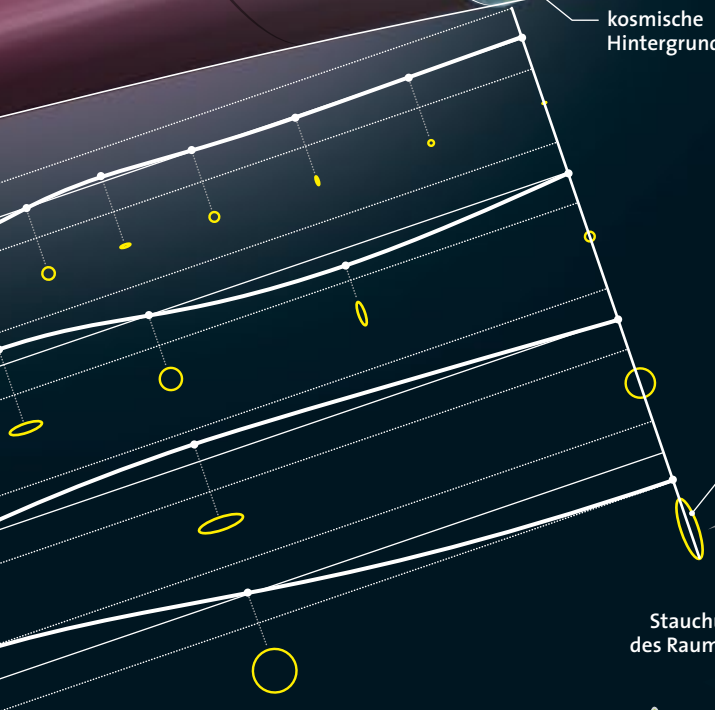
2 GRAVITATIONSWELLEN

Die Inflation vergrößerte winzige Quantenfluktuationen des Gravitationsfelds rapide. Manche wuchsen so stark, dass ihre Schwingungsdauer das Alter des damals noch extrem jungen Universums überstieg; sie wurden quasi vorübergehend »eingefroren«. Am Ende der Inflationsphase entstanden aus den Oszillationen langwellige Gravitationswellen, die den umgebenden Raum abwechselnd stauchten und dehnten (Ellipsen unten).

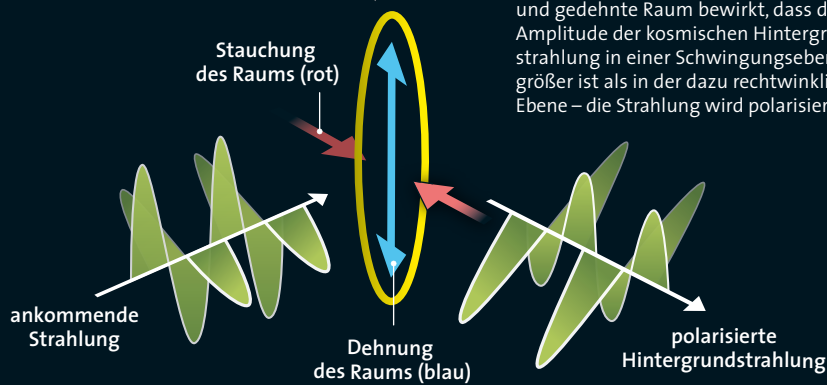




kosmische Hintergrundstrahlung

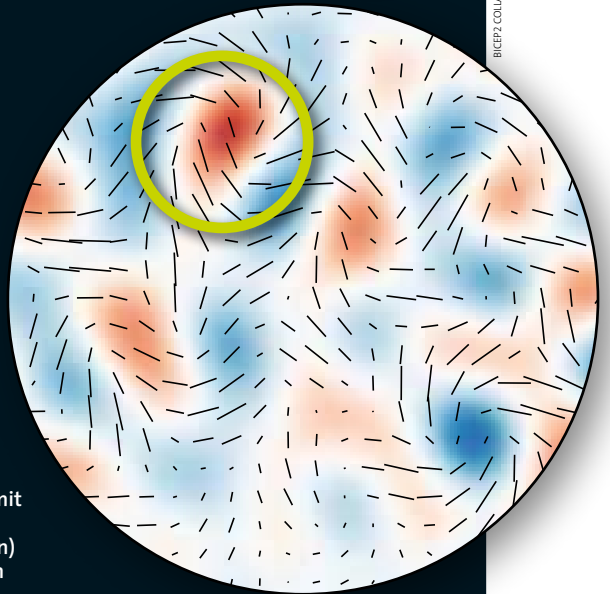
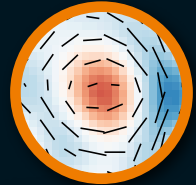


Die Gravitationswelle mit der größten Amplitude und Wellenlänge (unten) staucht und streckt den Raum am meisten.



4 WIRBELMUSTER

Normale Temperatur- und Dichteschwankungen erzeugen ein kreisförmiges Polarisationsmuster (oranjer Kreis). Hingegen produzieren Gravitationswellen ein auffallendes Wirbelmuster (unten). An den roten Stellen wurde der Raum mitsamt den Lichtquanten komprimiert, wodurch von dort »wärmere« – energiereichere – Strahlung ausgeht. Die blauen Gebiete sind kühler.



3 POLARISATION

Der durch Gravitationswellen gestauchte und gedehnte Raum bewirkt, dass die Amplitude der kosmischen Hintergrundstrahlung in einer Schwingungsebene größer ist als in der dazu rechtwinkligen Ebene – die Strahlung wird polarisiert.

BICEP2 COLLABORATION

UNIVERSUM/DON FOLEY, GRAFIKEN/DIAGRAMME/JEN CHRISTIANSEN

Vor der Inflationsphase war das Universum auf subatomare Größe zusammengepresst. Bei solch winzigen Größenordnungen regiert die Quantenmechanik. Andererseits lassen sich die in diesem fast punktförmigen Raum herrschenden extremen Energien nur relativistisch beschreiben. Darum benötigte Guth die Quantenfeldtheorie; sie vereinigt die Quantenmechanik mit der speziellen Relativitätstheorie, welche Bewegungen von Teilchen und Feldern in der Raumzeit beschreibt. Der Quantenfeldtheorie zufolge sind alle Felder bei sehr kleinen Größenordnungen wilden Schwankungen unterworfen. Auch die Gravitationsfelder müssen in der Inflationsphase heftig fluktuiert haben.

Im Lauf der Inflation blähte sich jede zunächst winzige Quantenfluktuation durch die exponentielle Expansion zu größeren Wellen auf. Bei genügend großer Wellenlänge übertraf die Schwingungszeit sogar das Alter des damaligen Universums. Die Quantenfluktuation wurde quasi eingefroren, bis das Universum alt genug war, wieder Oszillationen zu erlauben. Während der Inflation wuchsen die eingefrorenen Schwingungen, und die anfänglichen Quantenfluktuationen vergrößerten sich zu makroskopischen Gravitationswellen.

Ungefähr zu der Zeit, als Guth die Inflation postulierte, bemerkten die russischen Physiker Alexei A. Starobinski und Waleri A. Rubakow unabhängig voneinander, dass die Inflation stets einen Hintergrund von Gravitationswellen erzeugt und dass deren Intensität von der im Inflationsfeld gespeicherten Energie abhängt. Das heißt: Wenn wir die Gravitationswellen der Inflation entdecken können, gewinnen wir nicht nur eine direkte Bestätigung für das Inflationszenario, sondern auch einen Einblick in die Quantenprozesse, die ihm zu Grunde liegen.

Strahlende Spuren

Doch wie lassen sich solche zwar großräumigen, aber wegen der schwachen Schwerkraft ungemein geringfügigen Raumzeitschwingungen aufspüren? Da kommt der kosmische Mikrowellenstrahlungshintergrund ins Spiel. Diese Strahlung stammt aus einer Zeit, als das frühe Universum erstmals so weit abkühlte, dass Protonen Elektronen einfangen und neutrale Atome bilden konnten; dadurch wurde das All lichtdurchlässig. Somit ist der Mikrowellenhintergrund die älteste Strahlung, die uns erreicht. Wenn es 380 000 Jahre nach dem Urknall, als diese Strahlung entstand, großräumige Gra-

vitationswellen gab, dann können wir vielleicht deren Spuren im Strahlungshintergrund entdecken.

Damals schwebten die freien Elektronen in einem geringfügig anisotropen Strahlungsbad, denn die großräumigen Gravitationswellen stauchten den Raum in einer Richtung und streckten ihn in einer anderen. Dieser Effekt verzerrte den Strahlungshintergrund ein klein wenig – möglicherweise nachweisbar. Die räumliche Deformierung durch Gravitationswellen bewirkte, dass die Amplitude der Hintergrundstrahlung in einer Schwingungsebene größer war als in der dazu rechtwinkligen Ebene. Das heißt, die Hintergrundstrahlung wurde polarisiert.

Eine Polarisation des Strahlungshintergrunds ist allerdings noch kein Beweis für Gravitationswellen. Sie kann auch von Temperaturschwankungen im Strahlungshintergrund herrühren oder sogar von Quellen im Vordergrund, insbesondere von polarisiertem Staub in der Milchstraße. Erst eine genaue Analyse des räumlichen Polarisationsmusters am Himmel vermag die mögliche Wirkung urchtümlicher Gravitationswellen von anderen Effekten zu trennen.

Vor allem ein »verwirbeltes« Muster, der so genannte B-Polarisationsmodus, ist charakteristisch für Gravitationswellen, während ein nicht verwirbeltes Muster namens E-Modus von anderen Quellen stammt. Dieser 1997 entdeckte Zusammenhang bedeutet, dass eine Polarisationsmessung der Hintergrundstrahlung ein viel kleineres Gravitationswellensignal zu identifizieren vermag als eine bloße Messung der Temperaturschwankungen im Strahlungshintergrund, in denen der winzige von Gravitationswellen verursachte Anteil wahrscheinlich von anderen Fluktuationen überdeckt wird. Seither suchen zahlreiche irdische und satellitengestützte Experimente nach dem heiligen Gral der Inflation.

Die Forscher stellen ihre Messresultate als das Verhältnis r eines möglicherweise durch Gravitationswellen erzeugten Polarisationssignals zu der Größe der gemessenen Temperaturfluktuation dar. Bis 2014 wurden nur obere Grenzen für die Polarisation der Hintergrundstrahlung angegeben. Das heißt, wir wussten, die Polarisation konnte nicht größer sein, sonst hätten wir sie bemerkt. Den Messungen des Planck-Weltraumteleskops der europäischen Weltraumbehörde ESO zufolge konnte r irgendwo zwischen 0 – keinerlei Gravitationswellen – und 0,13 liegen. Darum war die Aufregung groß, als das BICEP2-Experiment (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2) im März 2014 meldete, es habe mit seinem genaueren Messinstrument ein größeres r von 0,2 gefunden und somit Gravitationswellen nachgewiesen; die Wahrscheinlichkeit, dass eine Hintergrundstörung das beobachtete Signal produziert habe, sei kleiner als eins zu einer Million. Die Art des Signals spreche deutlich für seine Herkunft aus dem Inflationsprozess.

Leider erwies sich die Behauptung als unbegründet. Auch andere astrophysikalische Prozesse können Effekte erzeugen, die ein Gravitationswellensignal der Inflation vortäuschen – insbesondere der polarisierte Staub in unserer Milchstraße. In letzter Zeit hat der Planck-Satellit neue Messungen geliefert,

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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

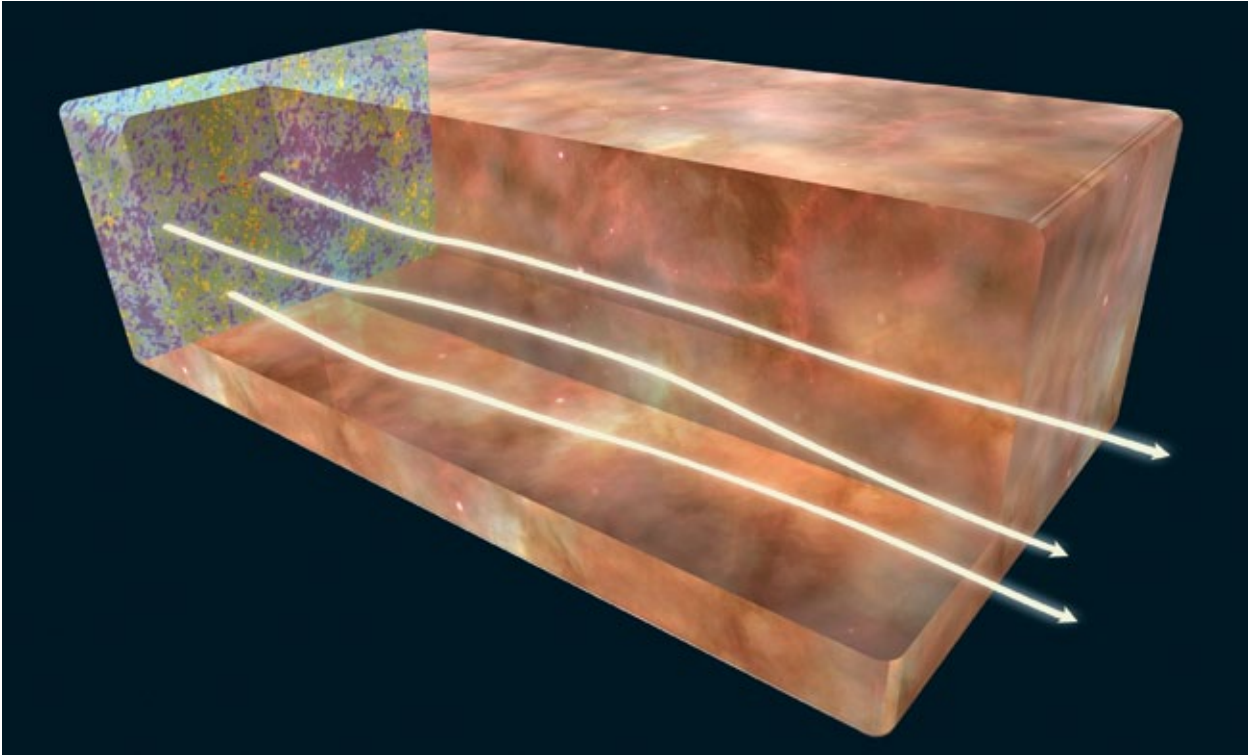
www.spektrum.de/t/kosmologie



Störende Effekte

Die 2014 entdeckte Polarisation des kosmischen Strahlungshintergrunds (blau marmorierter Bereich links) ist noch kein definitiver Beweis für Gravitationswellen, da auch andere Effekte im Spiel sind. Beispielsweise werden die Hintergrundstrahlen (weiß) unterwegs durch die Schwerkraft massereicher Galaxienhaufen gekrümmt; dieser Gravitationslinseneffekt polarisiert

die Strahlung. Außerdem senden Staubkörner in unserer Milchstraße ebenfalls polarisierte Strahlung aus, die nur schwer von Hintergrundstrahlung zu unterscheiden ist. Nach neueren Messungen des Planck-Weltraumteleskops ist galaktischer Staub häufiger als früher angenommen und produziert damit auch größere Mengen polarisierten Lichts.



denen zufolge die Milchstraße mehr Staub enthält, als das BICEP2-Team angenommen hatte. Mehrere Gruppen haben das BICEP2-Signal im Licht der neuen Daten analysiert und bessere Modelle für den galaktischen Staub angewandt. Demnach könnte der polarisierte Staub das BICEP2-Signal größtenteils oder sogar vollständig verantworten. Das BICEP2-Team steht dennoch zu seinen Resultaten: Die Form des beobachteten Spektrums passe auffallend gut zu einem Inflationssignal – jedenfalls besser als zu einem bloßen Staubeffekt. Doch geplante neue Experimente – unter anderem die Kollaboration BICEP3 – werden schon bald fortfahren, hinter dem galaktischen Staubschleier das feine Signal der Inflation aufzuspüren.

Die große Vereinigung

Falls ein Inflationssignal die Tests besteht, könnte dadurch unser empirisches Wissen über den Kosmos in nie gekannter Weise wachsen. Gravitationswellen interagieren so schwach mit Materie, dass sie praktisch ungehindert vom Beginn der Zeit zu uns gelangen. Sie würden uns ein direktes Signal vom physikalischen Zustand des nur 10^{-36} Sekunden alten Univer-

sums übermitteln – 49 Größenordnungen vor der Zeit, als der kosmische Strahlungshintergrund entstand.

Die mutmaßliche Stärke des Gravitationswellensignals besagt, dass die Energie der Inflation dem Energieniveau für die große Vereinigung der drei nichtgravitativen Naturkräfte entsprach – allerdings nur, falls die so genannte Supersymmetrie gilt. Diese hypothetische Natursymmetrie sagt wiederum zahlreiche neue Teilchen vorher, welche der LHC nachweisen könnte, wenn er mit voller Kraft in Betrieb geht. Das verdeutlicht den engen Zusammenhang zwischen Kosmologie und Teilchenphysik.

Da von der Inflation stammende Gravitationswellen entstehen, wenn sich urtümliche Quantenfluktuationen des Schwerfelds inflationär aufblähen, muss die Gravitation durch eine Quantentheorie beschrieben werden. Derzeit besitzen wir keine hieb- und stichfeste Theorie, welche die Schwerkraft nach den Regeln des Mikrokosmos beschreibt. Ein Kandidat wäre die Stringtheorie, doch sie bleibt vorderhand nur eine attraktive Hypothese. Wie Freeman Dyson vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey)

betont hat, gibt es keinen irdischen Apparat, der einzelne Gravitationsquanten zu entdecken vermag. Jeder derartige Detektor müsste so groß und dicht sein, dass er zu einem Schwarzen Loch kollabieren würde, bevor er eine Beobachtung vollenden könnte. Dyson vertritt daher den Standpunkt, wir könnten nie mit Sicherheit sagen, ob sich die Schwerkraft überhaupt durch eine Quantentheorie beschreiben lässt.

Doch falls sich Gravitationswellen der Inflation nachweisen lassen, erledigen sie Dysons Argument. Allerdings bleibt ein Schlupfloch übrig. Da die inflationären Gravitationswellen klassische – nicht quantentheoretische – Objekte sind, können wir ihren Ursprung zwar quantenmechanisch beschreiben, aber das gilt für jedes Resultat der klassischen Physik, etwa für die Bewegung einer Billardkugel. Der Anblick einer rollenden Billardkugel beweist nicht, dass Quantenmechanik dahintersteckt; die Bewegung würde genauso aussehen, wenn es keine Quantenmechanik gäbe. Wir müssen also eigens beweisen, dass die Gravitationswellen der Inflation, anders als Bewegungen einer Billardkugel, aus quantenmechanischen Prozessen hervorgehen.

Dieses Schlupfloch haben mein Kollege Frank Wilczek vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und ich kürzlich geschlossen. Mit der so genannten Dimensionsanalyse – sie untersucht physikalische Phänomene anhand der numerischen Einheiten für Masse, Raum und Zeit – konnten wir zeigen, dass ein nur durch Inflation erzeugter Gravitationswellenhintergrund nicht auftritt, wenn die plancksche Konstante gleich null gesetzt wird und somit alle Quanteneffekte verschwinden. Das bedeutet: Falls BICEP2 tatsächlich von der Inflation stammende Gravitationswellen gemessen hat, muss die Gravitation durch eine Quantentheorie beschrieben werden.

Das plausible Multiversum

Wie ist das Universum entstanden? Warum existiert es überhaupt? Auch zu fast metaphysisch anmutenden Fragen können die Gravitationswellen der Inflation etwas beitragen. Die Inflation wird von einem Feld angetrieben, das während eines Phasenübergangs riesige Energiemengen speichert und freisetzt. Zu den notwendigen Eigenschaften dieses Felds gehört, dass es niemals aufhören kann, das Universum aufzublähen. Doch wenn die Inflation endlos weitergeht, kann daraus nicht der uns vertraute Kosmos hervorgehen: Jede vorhandene Materie und Strahlung würde durch die Expansion unendlich verdünnt, und nur ein rasend expandierendes Vakuum bliebe übrig.

Der russische Kosmologe Andrei Linde von der Stanford University in Kalifornien fand einen Ausweg. Wie er zeigte, kann eine anfangs kleine Raumregion nach endlicher Expansion ihren Phasenübergang vollenden und unser ganzes heute beobachtbares Universum umfassen. Im übrigen Raum kann die Inflation ewig weitergehen, wobei sich hier und da kleine »Keime« bilden, in denen der Phasenübergang jeweils auch irgendwann zum Abschluss kommt. In jedem Keim entsteht durch heißen Urknall ein eigenes Universum.

In diesem Szenario der »ewigen Inflation« ist unser Kosmos bloß Teil einer viel größeren, vielleicht unendlich großen Struktur; sie enthält eine beliebige Anzahl separater Universen, die längst entstanden sind, gerade entstehen oder einmal entstehen werden. Da in jedem Keim ein anderer Phasenübergang die Inflation beendet, herrscht in jedem Universum eine eigene Physik. Demnach ist unser All nur eines von unermesslich vielen, physikalisch unterschiedlichen Universen. Möglicherweise haben die Naturkonstanten in unserer Welt nur zufällig ihre Werte. In einem Universum mit anderen Konstanten könnten sich Beobachter wie wir gar nicht entwickeln. Dieses so genannte anthropische Prinzip stößt viele ab; für sie zeigt es nur, wie weit sich die Grundlagenphysik von solider empirischer Methodik zu verabschieden droht.

Doch falls es uns mit BICEP3, LHC und anderen Experimenten gelänge, die Probleme der kosmischen Inflation und der großen Vereinigung zu lösen, könnten wir entscheiden, ob die Existenz unseres Universums Lindes ewige Inflation voraussetzt. Zwar würden wir andere Universen niemals direkt beobachten können, aber wir wären dann von ihrer Existenz ebenso felsenfest überzeugt, wie die meisten Physiker zu Beginn des 20. Jahrhunderts von der Existenz der – damals nicht direkt beobachtbaren – Atome überzeugt waren. Vielleicht wird eine Polarisationsanalyse der kosmischen Hintergrundstrahlung vom Typ des BICEP3-Experiments schon bald Erkenntnisse über die Entstehung des Alls liefern, gegen die sogar der Umsturz der Physik durch die Quantentheorie im 20. Jahrhundert verblasst. ∞

DER AUTOR



Lawrence M. Krauss ist theoretischer Physiker und Kosmologe sowie Mitbegründer und Direktor des Origins Project an der Arizona State University in Tempe.

QUELLEN

- Ade, P.A.R. et al.:** (BICEP2 Collaboration): Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2. In: Physical Review Letters 112, 241101, 2014
- Gibney, E.:** Gravitational-Waves Hunt Enters Next Phase. In: Nature 518, S. 16–17, 2015
- Krauss, L.M. et al.:** Primordial Gravitational Waves and Cosmology. In: Science 328, S. 989–992, 2010

LITERATURTIPPS

- Krauss, L.M.:** Ein Universum aus Nichts – und warum da trotzdem etwas ist. Knaus, München 2013
Eine populäre Darstellung des kosmologischen Wissensstands von einem Experten
- Lykken, J., Spiropulu, M.:** Supersymmetrie in der Krise. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2014, S. 36–43
Wenn der Large Hadron Collider am CERN nicht bald supersymmetrische Teilchen aufspürt, droht eine Krise der Grundlagenphysik.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327772



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

Der grüne Blitz

Für den Bruchteil einer Sekunde sendet das letzte Segment der untergehenden Sonne grünes Licht aus – wenn die atmosphärischen Bedingungen stimmen!

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»Bald verschwand die Sonne zur Hälfte hinter der Horizontlinie. Schließlich schwebte nur noch ein schmaler oberer Abschnitt der Scheibe über dem Meer. ›Das grüne Leuchten! Das grüne Leuchten!«, riefen die Brüder ... wie aus einem Munde, denn ihre Blicke hatten eine Viertelsekunde lang diesen unvergleichlichen reinen Jadeton erhascht ...«

In seinem Liebesroman »Der grüne Strahl«, aus dem diese Zeilen stammen, verschaffte Jules Verne (1828–1905) einem bis dahin weithin unbekanntem Naturphänomen erstmals einige Geltung. Doch selbst heute kennen es nur wenige. Der grüne Blitz, wie es auch manchmal genannt wird, tritt selten auf und ist schwierig zu beobachten. Eine Variante des Phänomens ist indessen leichter zugänglich: In meinem Wohnzimmer zeigen sich an manchen Sonnentagen Lichteffekte an der Wand, die mit dem Original verwandt erscheinen. Hervorgebracht werden sie durch ein im Fenster hängendes kleines Mobile in Form eines einzelnen Glasplättchens, das sich zu seinen Rändern hin keilförmig verjüngt. Dort, wo es dünner wird, bricht es das Sonnenlicht wie ein Prisma und spaltet es in seine Spektralfarben auf (kleines Foto rechts). Steigt nun die Sonne, sinkt ihr Bild von der hellen Tapete herab und trifft auf einen dunklen Tisch, auf dem nacheinander die Farben des Spektrums verschwinden, erst Rot und Gelb, dann Grün und ganz zum Schluss Blau.

Doch können wir diesen »Untergang« des Sonnenbilds wirklich als Modell für den grünen Strahl ansehen? Zum einen hängt im Himmel kein glä-

sernes Mobile, zum anderen suchen wir nach einem grünen und nicht nach einem blauen Abschiedsgruß der Sonne. Der erste Einwurf ist schnell widerlegt, denn natürlich bricht auch Luft das Licht. Die Atmosphäre, die vom luftleeren Weltraum zur Erdoberfläche hin immer dichter wird, wirkt wie ein Prisma mit kontinuierlich zunehmendem Brechungsindex. Sinkt die Sonne um ein bestimmtes Maß, verlängert sich der Weg, den ihr Licht durch die Atmosphäre nimmt, überproportional; entsprechend stärker wird es gebrochen. Und je ausgeprägter die Brechung, desto stärker wird das Licht aufgespalten und desto größer sind unsere Chancen, im weißlich gelben Sonnenspektrum einzelne Farben zu entdecken.

Allerdings gibt es auch einen gegenläufigen Effekt. Zu dem Zeitpunkt, da die Sonne für unsere Augen den Horizont zu berühren beginnt, ist sie geometrisch betrachtet gerade untergegangen (siehe Grafik unten). Die Brechung ihres Lichts ist jetzt so stark, dass

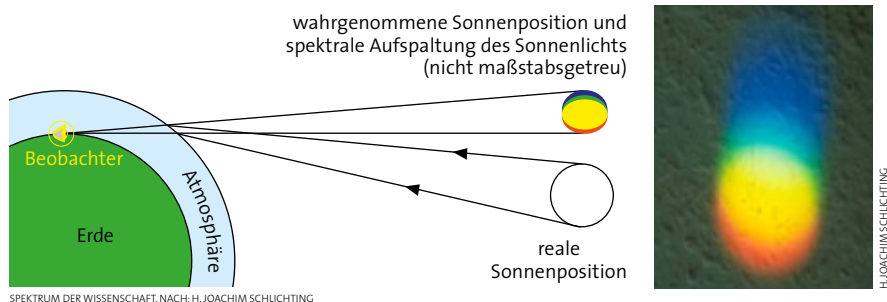
Strahlen von »tiefer« gelegenen Regionen der Sonnenoberfläche viel stärker umgelenkt werden als die von höheren und sie darum elliptisch verformt und vertikal gestaucht erscheint. So wird die Aufspaltung ihres Lichts zum Teil wieder zunichtegemacht.

Angenommen aber, wir können das letzte verschwindende Sonnensegment tatsächlich in einer der Spektralfarben sehen. Weshalb berichten Beobachter des Phänomens dann ausgerechnet von grünem Licht? Auch hier ist die Antwort einfach: Der blaue Strahl existiert ebenfalls, wird aber praktisch nie beobachtet. Denn blaues Licht wird beim Durchgang durch die Atmosphäre so stark gestreut, dass es sich gewissermaßen verliert. Dieser Effekt erklärt darüber hinaus, warum der Himmel blau ist (siehe »Sonnenaufgang in einem Opal«, SdW 8/2010, S. 32).

Warum aber hat dann selbst den grünen Strahl, der viel weniger gestreut wird als sein blaues Pendant, kaum jemand je zu Gesicht bekommen? Selbst

»Der grüne Strahl! Und schon ist er verschwunden. Wer ihn erblickt, steht an des Meeres Rand, von dem uns klingen ahndevolle Kunden.«

Gerhart Hauptmann (1862–1946)



Hat ein Beobachter den Eindruck, die Sonne stünde direkt über dem Horizont, ist sie tatsächlich gerade untergegangen (oben). Verantwortlich für diesen Effekt ist die Brechung des Lichts bei seinem Durchgang durch die Atmosphäre; sie sorgt gleichzeitig dafür, dass das Sonnenlicht in seine Spektralfarben aufgespalten erscheinen kann. Auch hinter einem sonnendurchschienenen Glasmobile, das als Prisma wirkt, sieht man einen in Spektralfarben zerlegten Lichtfleck (rechts). Dessen Farbfolge entspricht derjenigen, die beim Sonnenuntergang auftritt.



BEIDE FOTOS: PETER ANJOL

Das letzte Segment der untergehenden Sonne erscheint zuweilen grün (oben). Zum Teil erklären Lichtspiegelungen an warmen Luftschichten das seltene Phänomen. Ihr Einfluss ist auch an den Deformationen der Sonnenscheibe abzulesen (rechts).



das ist nicht verwunderlich. Der Brechungsindex von Luft ist recht klein; sie schafft es daher – anders als ein gläsernes Mobile – nicht besonders gut, das Licht in unterscheidbare Farbsegmente aufzuspalten. Direkt am Horizont beträgt der durch Luft hervorgerufene Aufspaltungswinkel nur etwa $1/3$ Bogenminute, das ist etwa $1/90$ des Sonnendurchmessers. Das Auflösungsvermögen unseres Auges erreicht aber höchstens 1 Bogenminute. Eigentlich müssten wir auch für das grüne Segment der Sonne schlicht blind sein.

Das Sonnenlicht kommt »doppelt« im Auge an

Es muss also ein weiterer Effekt hinzukommen. Grüne Strahlen, die von Beobachtern auf Meereshöhe entdeckt werden, verdanken sich in vielen Fällen so genannten unteren Luftspiegelungen, wie sie über warmen Gewässern auftreten. Ihr Einfluss ist für jeden sichtbar: Wir können ihn an den vielfältigen, aber natürlich nur scheinbaren Deformationen der Sonnenscheibe bei ihrem Untergang ablesen. Spiegelungen dieser Art kommen zu Stande, wenn

das von einem Objekt ausgehende Licht nicht nur direkt zum Betrachter gelangt, sondern gleichzeitig auch auf dem Umweg über die Reflexion an einer warmen Luftschicht. Die normalerweise nach unten verlaufenden Lichtstrahlen dringen in diese Schicht nicht ein, sondern werden von ihr zurückgeworfen; einige davon in unser Auge.

Allerdings verortet unser Wahrnehmungssystem das Objekt, von dem das Licht kommt, in geradliniger Verlängerung der Richtung, aus der die Strahlen eintreffen. Zusätzlich zum »echten« Gegenstand sehen wir also auch noch ein Spiegelbild, das wegen der unregelmäßigen Temperaturschichtungen in der Luft meist verzerrt erscheint und sich sogar mit dem Original überlagern kann. Trifft also das Licht der untergehenden Sonne auf die warmen Luftschichten über dem Wasser, erscheinen die verzerrten Sonnensegmente im Idealfall vertikal so stark aufgespreizt, dass sie einen ausreichend großen Teil unseres Sehfelds ausfüllen und wir sie wahrnehmen können.

So stellt sich der sagenumwobene grüne Strahl als atmosphärisches Phä-

nomen heraus, das sich Effekten der Dispersion, also der Wellenlängenabhängigkeit des Lichts, und der Spiegelung verdankt und das letztlich jeder selbst beobachten kann. Vom Meerstrand ist das ebenso möglich wie von den Bergen oder vom Flugzeug aus. Man sollte an einem Tag mit ruhigem Wetter ungehindert zum Horizont blicken können – ein Fernglas ist hilfreich – und sich darauf einstellen, dass der Strahl oft nur den Bruchteil einer Sekunde lang zu sehen ist. Erscheint die Sonne, während sie sich dem Horizont nähert, dann tatsächlich immer stärker verzerrt, steht der große Moment – vielleicht – schon kurz bevor. ~

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.

Dieser Artikel und Links im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1327774

Gewinner der Evolutionslotterie

Die Entwicklung zum modernen Menschen verlief nicht gleichmäßig und stetig. Entscheidende Sprünge fanden in kleinen, isolierten Populationen statt. Der Auftritt des *Homo sapiens* hing dabei von etlichen Zufällen ab.

Von Ian Tattersall

Der Mensch ist schon ein höchst sonderbarer Primat. Auf zwei ziemlich mickrigen Füßen balancieren wir senkrecht einen schweren Körper und einen übermäßig großen Kopf. Unser ausgesprochen kleines Gesicht und der dürtige Unterkiefer verstecken sich fast unter der aufgeblähten Hirnkapsel. Beispiellos an uns ist aber vor allem, wie wir mit Informationen aus der Welt um uns umgehen. Nach allem, was wir wissen, sind wir die einzigen Wesen, die ihre Umgebung und ihr inneres Erleben im Geist zergliedern und mit einem Vokabular aus abstrakten Symbolen erfassen, um diese im Kopf frei zu kombinieren und so neue Realitäten zu ersinnen. Kurz – wir

vermögen nicht nur zu beschreiben, was ist, sondern uns auch auszumalen, was sein könnte.

Unsere Vorfahren waren längst nicht so absonderlich. Die Fossilfunde zeigen ganz klar: Vor nicht viel mehr als sieben Millionen Jahren sahen sie noch wie Menschenaffen aus. Sie verteilten ihr Gewicht auf vier Beine und hielten sich im Wesentlichen auf Bäumen auf. Ihr Hirnschädel war bescheiden, dafür das große, vorspringende Gesicht und die kräftigen Kiefer umso markanter. Die kognitiven Leistungen entsprachen wahrscheinlich in etwa denen von Schimpansen. Die modernen Menschenaffen sind unbestreitbar piffig und schlau, geistig wendig und erfindungsreich. Sie können lernen, Symbole zuzuordnen, und diese sogar aus freien Stücken miteinander kombinieren. Aber anscheinend vermögen sie nicht im Geist beliebig damit zu spielen und sich so neue Realitäten auszudenken. Eine Menge evolutionäre Veränderungen mussten stattfinden, um von solchen Vorfahren zum *Homo sapiens* zu gelangen.


Sieben Millionen Jahre sind für eine derart große Umgestaltung sehr wenig. Man führe sich nur vor Augen, dass sich andere eng verwandte Primatenarten normalerweise im Körperbau und Verstand nicht besonders stark voneinander unterscheiden, zumal wenn sie derselben Gattung angehören. Mehr noch: Eine »normale« Säugetierart scheint im Mittel ungefähr drei bis vier Millionen Jahre lang zu bestehen, bis aus ihr die nächste Art hervorgeht. Demgegenüber dauerte die gesamte Evolution der Homininen bis zum *Homo sapiens* kaum doppelt so lang – und in dieser Zeit folgten etliche deutlich unterschiedliche Arten aufeinander. Demnach muss sich hier die Entwicklung dramatisch beschleunigt haben.

Wie lässt sich das erklären, und welcher Mechanismus war da am Werk? An Fossilien orientierte Paläoanthropologen haben sich mit der Frage erstaunlich wenig befasst. Für die Menschenevolution war mit Sicherheit bedeutsam, dass sich unsere Vorfahren den Herausforderungen dank ihrer materiellen Kultur zu stellen vermochten, wozu Dinge wie selbst gefertigte Steinwerkzeuge zählten, auch Kleidung, eigens kons-

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

EVOLUTIONSGESCHICHTE DES MENSCHEN

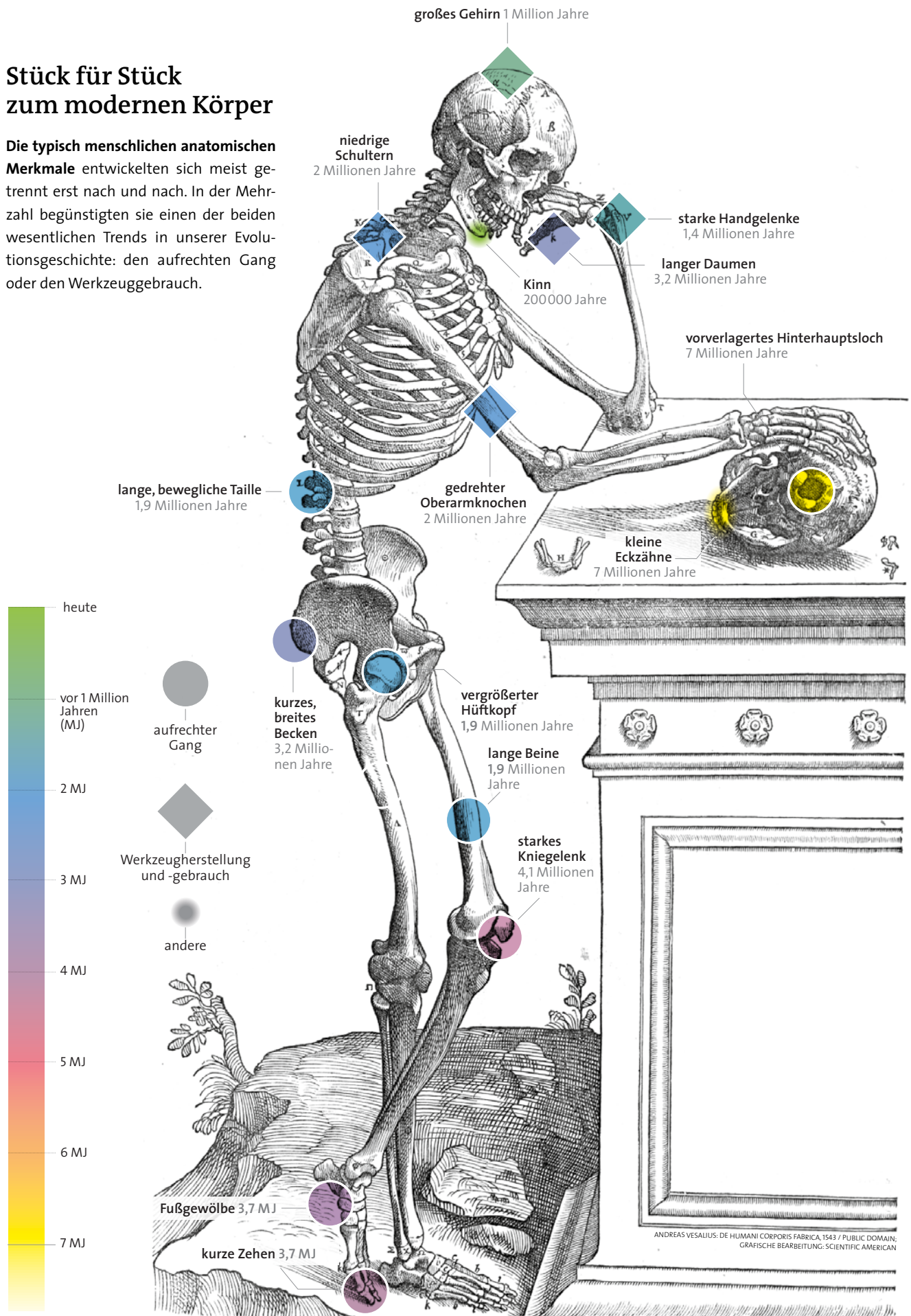
- | | | |
|---------------|---|------------------|
| Teil 1 | ► Menschwerdung in neuem Licht
<i>Kate Wong</i>
Unsere unübersichtliche Verwandtschaft
<i>Bernard Wood</i> | Januar 2015 |
| Teil 2 | ► Menschenevolution durch Klimaschwankungen
<i>Peter B. deMenocal</i> | Februar 2015 |
| Teil 3 | ► Gewinner der Evolutionslotterie
<i>Ian Tattersall</i> | März 2015 |
| Teil 4 | ► Der Vorteil der Paarbildung
<i>Blake Edgar</i>
Hilfsbereitschaft und Kooperation
<i>Frans de Waal</i> | April 2015 |
| Teil 5 | ► Aufgaben lösen dank Empathie
<i>Gary Stix</i> | Mai 2015 |
| Teil 6 | ► Die digitale Revolution
<i>Interview mit Sherry Turkle</i>
Warum unsere Evolution weitergeht
<i>John Hawks</i> | Juni 2015 |



Homo habilis, gestaltet von der französischen Künstlerin Élisabeth Daynès. Mit der Gattung *Homo* beschleunigte sich die menschliche Evolution stark.

Stück für Stück zum modernen Körper

Die typisch menschlichen anatomischen Merkmale entwickelten sich meist getrennt erst nach und nach. In der Mehrzahl begünstigten sie einen der beiden wesentlichen Trends in unserer Evolutionsgeschichte: den aufrechten Gang oder den Werkzeuggebrauch.



GEIST ALLEIN GENÜGTE NICHT

1 Die Menschenevolution lief in den letzten zwei Millionen Jahren **in rasantem Tempo** ab. Zu verdanken ist sie einem Zusammenspiel von kulturellen Fortschritten mit vielen eiszeitlich bedingten **Klimaereignissen**.

2 Klimawechsel zerstückelten immer wieder die Populationen der frühen Menschen. In den **kleinen, isolierten Gruppen** konnten sich **genetische und kulturelle Neuerungen** schnell verfestigen und damit die **Artbildung** vorantreiben. Auf diese Weise entstand in Afrika vor rund 200 000 Jahren der *Homo sapiens*, der frühe moderne Mensch.

3 Erst ungefähr 100 000 Jahre später erfand in Afrika eine isolierte Population des modernen Menschen Symbole. Höchstwahrscheinlich war das moderne **symbolische Denken** der Hintergrund dafür, dass alle anderen Homininen in kurzer Zeit verschwanden.

truierte Unterkünfte und nicht zuletzt die Beherrschung des Feuers. Daraus erwuchs die These, unter den frühen Menschen seien diejenigen von Selektionskräften begünstigt worden, die am besten darin waren, kulturelles Knowhow zu verbessern und weiterzugeben. Weil solche Individuen eher überlebten und mehr Kinder hatten, sich diese Eigenschaften somit zunehmend durchsetzten, machte die Menschheit stetig Fortschritte, so die herkömmliche Vorstellung.

Allerdings wäre die Menschwerdung allein auf diese Weise niemals dermaßen schnell abgelaufen. Inzwischen diskutieren die Forscher einen weiteren Einfluss: die wiederholten heftigen Klimaschwankungen in den letzten zwei Millionen Jahren. Nach neueren Daten handelte es sich um starke Fluktuationen, welche jedes Mal die Umweltbedingungen gravierend veränderten – und eben dadurch die Menschwerdung kräftig antrieben (SdW 2/2015, S. 20). Technologische Neuerungen mögen es den frühen Menschen zwar ermöglicht haben, sich neue Umwelten zu erschließen. Jedoch garantierten sie das Überleben im wiederholt schlechteren Klima auf die Dauer trotzdem nicht unbedingt. Verschwinden unter widrigen Umständen wichtige Lebensgrundlagen, kann es vorkommen, dass eine Population in wenige kleine, mehr oder weniger isolierte Restgruppen zerfällt. Und in kleinen Einheiten setzen sich genetische Mutationen unter einem entsprechenden Selektionsdruck manchmal rasch durch – jedenfalls viel leichter als in einer großen Population. Gleiches gilt für kulturelle Fortschritte. Dennoch gingen viele der Splittergruppen sicherlich völlig unter, und nur einige wenige von ihnen überlebten. Dass der *Homo sapiens* am Ende obsiegte, lag mindestens so stark an äußeren Zufällen wie an seinen Talenten.

Die für ihn so entscheidende materielle Kultur kam bei der Menschwerdung erst spät ins Spiel. Denn bevor unsere Vorfahren anfangen, sich intensiv mit Werkzeugen zu beschäftigen, ging es für sie zunächst mehr als vier Millionen Jahre lang darum, das Baumleben aufzugeben und am Boden zurechtzukommen. Einem Menschenaffen, dessen Füße

zum Klettern und Greifen eingerichtet waren, verlangte diese Umstellung einiges ab. Wahrscheinlich hielten jene Primaten ihren Rumpf schon vorher hauptsächlich aufrecht und verlagerten somit mehr von ihrem beträchtlichen Körpergewicht auf die Beine. Eine aufrechte Haltung ist in der Tat für mehrere fossile frühe Menschenaffen belegt.

Mit der Aufgabe des Baumlebens nahm die anatomische Umgestaltung zwar ihren Anfang, und auch spätere Anpassungen konnten hierauf zweifellos aufbauen. Doch dieser erste Schritt trieb das Evolutionstempo noch nicht an. Denn ungefähr fünf Millionen Jahre lang verlief die Entwicklung der Homininen in ähnlicher Weise wie bei anderen erfolgreichen Primaten. Das heißt, der Stammbaum der Menschenfamilie glich von Anfang an mehr einem Busch, umfasste somit zu jeder Zeit eine Anzahl Arten, und jeweils mehrere Linien erprobten gleichzeitig das Potenzial des Aufrechtgehens. Aber mit wirklichem Wandel hatte jenes Herumexperimentieren offenbar wenig gemein. Im Gegenteil wirken all die verschiedenen frühen Homininen hinsichtlich Lebensraum und Lebensweise eher wie Varianten derselben Grundthemen. Sie hielten sich zeitweise in lockeren Wäldern auf, jedoch auch in offenerem Gelände. Passend dazu blieben Gehirn- und Körpergröße bescheiden. Die Körperproportionen – kurze Beine und sehr bewegliche lange Arme – waren ebenfalls noch urtümlich.

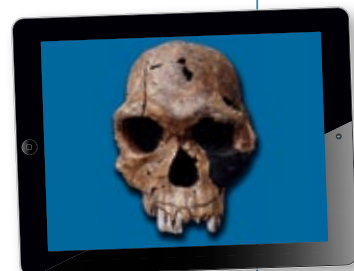
Ein Evolutionsmotor: Kultur

Die Evolutionsgeschwindigkeit nahm erst zu, nachdem vor rund zwei Millionen Jahren die Gattung *Homo* erschienen war. Schon mindestens eine halbe Million Jahre früher hatte die materielle Kultur in Form von selbst gefertigten Steinwerkzeugen ihren Anfang genommen – was wiederum stark für die These spricht, dass Kultur dazu beitrug, die Artbildungsrate anzuheizen. Primitive Steinwerkzeuge aus Ostafrika – kleine, flache, von faustgroßen Steinkernen abgeschlagene Splitter – werden auf ein Alter von 2,6 Millionen Jahren datiert. Noch älter scheinen Werkzeugspuren auf Tierknochen zu sein. Fast sicher stellten Homininen alten Typs, also noch mit langsamer Artbildungsrate, die Geräte her.

Jene ersten Werkzeugmacher sahen zwar noch altertümlich aus, doch mit ihren geistigen Fähigkeiten stachen sie die Menschenaffen bereits klar aus. Letzteren kann man auch mit viel Geduld einfach nicht beibringen, von einem Stein

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

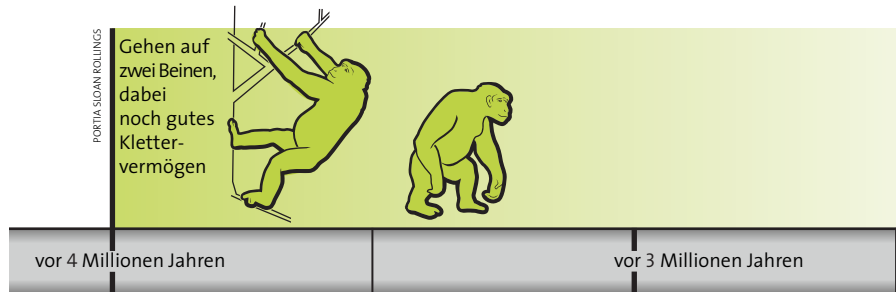
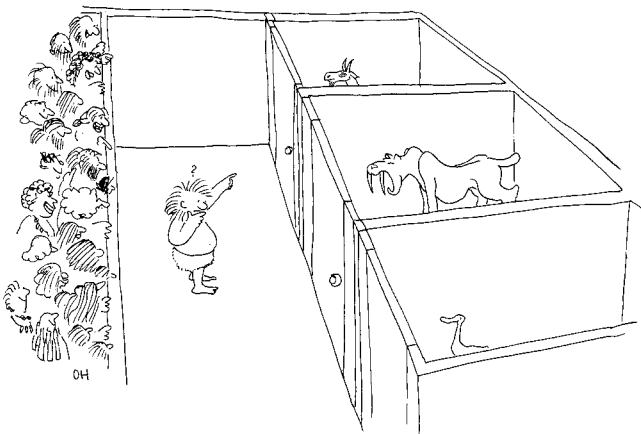
Unser Online-Dossier zum Thema »Evolution des Menschen« finden Sie unter www.spektrum.de/t/menschwerdung



mit einem zweiten in bestimmter Weise gezielt einen scharfkantigen Splitter abzuschlagen. Unsere Vorfahren verstanden sich darauf meisterhaft. Mit solchen Abschlägen zerlegten sie zum Beispiel Kadaver von Antilopen. Diese völlig neue Fertigkeit dürfte ihren Speiseplan bald beträchtlich erweitert haben. Bis dahin hatten sich die Homininen hauptsächlich pflanzlich ernährt. Jetzt gewann tierisches Fett und Protein an Bedeutung. Inwieweit jene späten Vormenschen Aas verwerteten oder schon selbst Tiere erlegten, wissen wir nicht. Aber die reichhaltigere Nahrung schuf Voraussetzungen, dank derer später in der Gattung *Homo* das energiehungrige Gehirn größer wurde.

Welchem Fossil der Rang des ersten Vertreters der menschlichen Gattung zukommt, ist noch völlig strittig. Einig sind sich die Forscher jedoch darin, dass die frühesten Menschen mit im Wesentlichen unseren Körperproportionen vor etwas weniger als zwei Millionen Jahren lebten. Ungefähr um diese Zeit gelangten auch die ersten Homininen von Afrika her in andere Teile der Alten Welt. Der Gang jener Frühmenschen glich schon unserem – sie hielten sich gerade und schritten weit aus. In Afrika lebten sie in der offenen Savanne, wo kein Wald sie schützte. Und fast sicher verzehrten sie viel tierische Nahrung. Die Hirnmasse wuchs bald gewaltig: Während die frühesten *Homo*-Angehörigen erst ein geringfügig größeres Gehirn besaßen als ihre zweibeinigen Homininenvorfahren, war es vor einer Million Jahren schon doppelt so groß geworden. Bis vor 200 000 Jahren hatte es sich nochmals fast verdoppelt.

Aber damit nicht genug. So bemerkenswert der schnelle Zuwachs der Hirngröße an sich schon ist – erstaunlicherweise geschah Gleiches in mindestens drei unabhängigen Linien der Gattung *Homo*: bei Vorfahren der Neandertaler, beim späten *Homo erectus* Asiens und in Afrika in unserer eigenen Linie. Der Überlebensvorteil durch ein großes Gehirn muss immens gewesen sein. Nicht nur das – die Parallelen sprechen dafür, dass das Potenzial für eine bedeutende Hirnzunahme in der gesamten Gattung vorhanden war, also nicht erst in unserer eigenen Entwicklungslinie aufkam. Und viel-



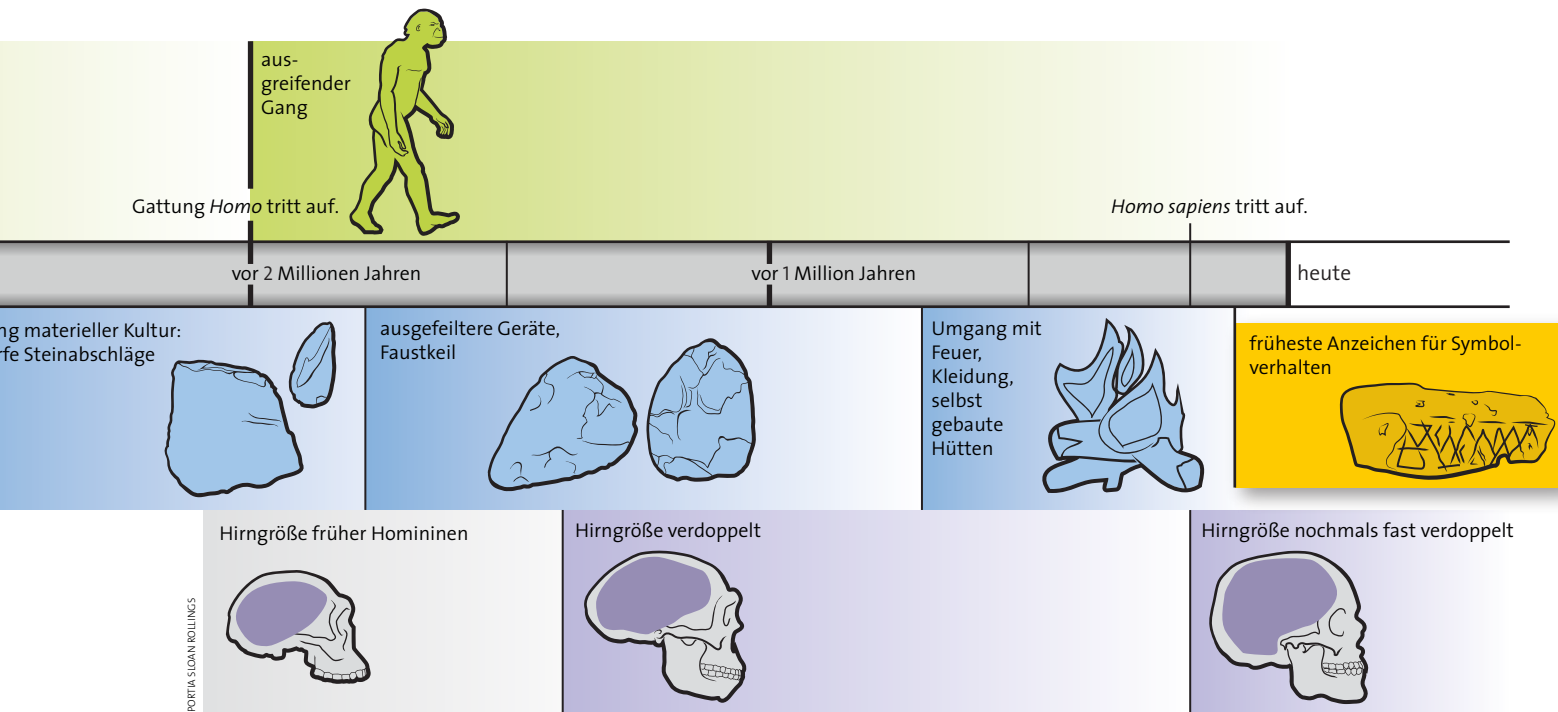
Wichtige Schritte der Menschenevolution

Den Anfang machte der aufrechte Gang. Erst vor knapp zwei Millionen Jahren war er perfektioniert. Zu der Zeit hatten die Homininen längst gelernt, scharfe Werkzeuge zu fertigen. Weil sie nun zunehmend Fleisch verzehrten, wuchs bald das viel Energie fordernde Gehirn. Biologische und kulturelle Fortschritte verstärkten sich gegenseitig, unterstützt von Klimawechseln – bis letztlich symbolisches Denken die Überlegenheit des *Homo sapiens* manifestierte.

leicht steckte dahinter jeweils sogar eine Art geistiges Wettrennen zwischen einzelnen Gruppen.

Manche Forscher, besonders Evolutionspsychologen, erklären die Hirnvergrößerung gern mit einer Koevolution von Genen und Kultur. Nach dieser Vorstellung herrschte die ganze Zeit über eine gleichmäßige, stetige natürliche Selektion, wobei sich biologische und kulturelle Fortschritte in starker positiver Rückkopplung gegenseitig bestärkten. Damit ist gemeint: Weil Individuen mit größeren Gehirnen im Vorteil waren, wurde die Population insgesamt von Generation zu Generation allmählich klüger. Und mit ihrer höheren Intelligenz schufen diese Homininen wiederum bessere Werkzeuge und fanden andere Neuerungen, durch die sie noch besser zurechtkamen. Folgt man diesem Modell, so machte das enge Wechselspiel zwischen Genen und Kultur die Menschenvorfahren fast zwangsläufig immer intelligenter und in ihrem Verhalten immer komplexer – alles in allem angeblich beste Voraussetzungen für einen sich beschleunigenden evolutionären Wandel.

Bei genauerem Nachdenken kann das allerdings nicht die ganze Wahrheit sein. Problematisch ist das Szenario schon deswegen, weil die natürliche Selektion – und somit der herrschende Anpassungsdruck – in ihm über lange Zeiträume gleichartig gewirkt haben müsste. Doch in Wirklichkeit erfolgte die Evolution in der Gattung *Homo* während einer langen Eiszeit mit abwechselnd kalten und wärmeren Phasen, die schon vor weit über zwei Millionen Jahren einsetzte. Wenn die Gletscher auf der Nordhalbkugel tief nach Süden vordrangen, herrschte in den heutigen Tropen extreme Trockenheit. In den Zwischeneiszeiten wurde das Klima dann wieder deutlich feuchter. Dermaßen instabile Verhältnisse können keinen einheitlichen, immer gleich gerichteten Selektionsdruck geboten haben. Und je mehr die Forscher über das frühere



Klima herausfinden, umso schärfer zeichnet sich ab, wie wechselhaft die Umwelt unserer Vorfahren tatsächlich war. Bohrkerne aus den heutigen Eiskappen und von Sedimenten des Meeresbodens lassen erkennen, dass der Unterschied zwischen wärmeren und wesentlich kälteren Abschnitten vor etwa 1,4 Millionen Jahren zunehmend ausgeprägter wurde. Wo immer Menschen seitdem lebten, mussten sie sich oft abrupt veränderten Lebensbedingungen stellen.

Auch die archäologische Fundlage deckt sich ganz und gar nicht mit einer kontinuierlichen Koevolution von Genen und Kultur. Im Verlauf der letzten zwei Jahrtausende ist die technologische Komplexität keineswegs stetig gewachsen. Vielmehr fällt auf, dass sie nur hin und wieder ein Stück vorankam, denn wirkliche technische Neuerungen erfolgten höchst sporadisch. Abgesehen von geringen Verbesserungen blieben die Geräte gewöhnlich Hunderttausende von Jahren, selbst eine Million Jahre lang im Grunde gleich, ohne dass zwischendurch etwas Neuartiges hinzugekommen wäre. Offenbar reagierten die Homininen in solchen Zeiträumen auf Umweltveränderungen, indem sie lediglich die gewohnten Werkzeugtypen an neue Verwendungszwecke anpassten.

Zweifel an der postulierten graduellen Evolution weckt überdies, dass bisher nichts auf eine stetige, gleichmäßige Zunahme geistiger Fähigkeiten hindeutet. Sogar neue Menschenarten mit größerem Gehirn pflegten die überkommenen Technologien und Lebensweisen gewöhnlich zunächst – und oft lange – beizubehalten. Neue Methoden und Verhaltensweisen machten sie sich typischerweise erst nach einiger Zeit zu eigen. Eine solche Diskrepanz fällt besonders beim Symbolgebrauch auf: Die ersten Anzeichen für modernes symbolisches Denken tauchen recht plötzlich und erstaunlich spät auf. Die ältesten eindeutig symbolischen Objekte – zwei geglättete Ockerbrocken mit eingeritzten geometri-

schon Mustern (siehe Bild S. 64) – fanden Forscher in der Blombos-Höhle in Südafrika. Moderne Menschen haben diese Stücke vor rund 77 000 Jahren hergestellt – dabei gibt es *Homo sapiens* laut Fossilien schon seit etwa 200 000 Jahren. Nach Ansicht von Anthropologen sind jene Ritzmuster zu regelmäßig, als dass sie zufällig zu Stande kamen. Folglich kodieren sie eine Information. Plötzliche Durchbrüche wie in diesem Fall verweisen nicht auf einen steten intellektuellen Fortschritt in kleinen Schritten mit jeder Generation.

Fortschritte durch Engpässe

Um die rasche Evolution der eiszeitlichen Homininen während der letzten gut zwei Millionen Jahre zu erklären, müssen wir daher mehr Aspekte einbeziehen als nur die Prozesse innerhalb einzelner Abstammungslinien. Umweltdruck und materielle Kultur dürften dabei zwar auf jeden Fall mitgespielt haben, also jene Faktoren, die Forscher für die Verschränkung von Genen und Kultur anführen. Diese wirkten jedoch anders als bisher angenommen. Für sich allein konnten sie die Beschleunigung nicht erbringen. Denn damit sich eine nennenswerte genetische oder kulturelle Neuerung durchsetzt, muss eine Population, wie gesagt, ziemlich klein sein. Große, dichte Bevölkerungen verhalten sich genetisch im Allgemeinen schlicht zu träge, als dass eine deutliche einheitliche Entwicklung zu Stande käme. Für kleine, isolierte Populationen gilt das Gegenteil. Sie differenzieren sich oft in verschiedene Richtungen.

Heute bilden die Menschen eine riesige, weltweite, zusammenhängende Population, die sich über alle bewohnbaren Regionen der Erde verteilt, und sie sind sesshaft. Doch noch vor vergleichsweise kurzer Zeit zogen die Homininen als Jäger und Sammler umher. Ihre kleinen, über die Alte Welt dünn verteilten Gruppen lebten von dem, was sie der



Dieses Ockerstück aus der Blombos-Höhle in Südafrika haben Menschen vor etwa 77 000 Jahren geglättet und mit Ritzungen versehen. Das regelmäßige Muster ist das bisher älteste bekannte Beispiel für symbolisches Denken.

Natur abtrotzen konnten. Immer wieder setzten Klimawechsel den winzigen lokalen Populationen zu. Mit den schwankenden Temperaturen und Niederschlägen, den bald steigenden, bald fallenden Wasserspiegeln von Meeren und Seen veränderten sich jedes Mal die gewohnten Ressourcen. Oft genug verschwanden die Beutetiere, wenn sich die Vegetation wandelte. Nicht selten wurden Lebensräume für Menschen dann sehr feindlich oder sogar unbewohnbar. Zu anderen Zeiten boten dieselben Orte wieder angenehmere Bedingungen.

Mit Kultur Grenzen sprengen

Allerdings verfügten die Homininen bald über eine Reihe von Technologien, mit deren Hilfe sie die für sie nutzbare Umwelt erweiterten, aber auch ihre körperlichen Grenzen sozusagen verschoben – Fertigkeiten von der Werkzeugherstellung über das Kochen bis zum Bau von Behausungen. Schon in der Zeit von vor einer bis vor einer halben Million Jahren vermochten sie damit die Natur effizienter auszunutzen und unter schwierigeren Bedingungen zu überleben als frühere Menschen. So konnten Populationen in günstigen Klimaphasen sicherlich wachsen und gelegentlich auch in manche vorher unwirtliche Gebiete vordringen. Aber wenn sich die Verhältnisse dann wieder verschlechterten, schützte das kulturelle Knowhow vermutlich nur begrenzt vor den Unbilden der Elemente. Jetzt schrumpften die Populationen und zerfielen in kleine, isolierte Einheiten.

Diese abgespaltenen kleinen Gruppen boten ideale Voraussetzungen dafür, dass sich in ihnen genetische und kulturelle Neuerungen fixierten, was wiederum die Entstehung einer neuen Art befördern kann. Und wenn sich die äußeren Umstände besserten, vermochten sich manche der veränderten Populationen erneut auszubreiten und bekamen wieder zu anderen Menschen Kontakt. Falls eine Gruppe dann schon eine eigene Art darstellte, ist vorstellbar, dass die Begegnung von Konkurrenz geprägt war – im Extremfall bis hin

zum Untergang der einen Seite. Andernfalls könnten die Gruppen mitsamt den genetischen Neuerungen ineinander aufgegangen sein. Wie auch immer: Solche Kontakte brachten Wandel mit sich.

Ähnliches dürfte sich in den unsteten eiszeitlichen Klimaverhältnissen viele Male rasch hintereinander abgespielt haben. Die zahlreichen schnellen Wechsel der äußeren Bedingungen trieben den evolutionären Wandel kräftig an, und schließlich trug auch die materielle Kultur eine Menge zur Beschleunigung bei. Am Ende des vielen Hin und Her stand der *Homo sapiens* allein da – als der eher zufällige Nutznießer von kognitiven Fortschritten, kulturellen Innovationen und klimatischen Umschwüngen. Sämtliche Konkurrenz hatte er überall in der Alten Welt in erstaunlich kurzer Zeit ausgestochen. Sein wesentlicher Vorteil war dabei sicherlich die einzigartige Weise seines symbolischen Denkens, das ihm systematisches Planen in noch nicht da gewesener Manier ermöglichte. Interessanterweise kam der Mensch hierzu erst relativ spät. Den entscheidenden Anstoß gab augenscheinlich ein kultureller Reiz. Meines Erachtens könnte das die Erfindung der Sprache gewesen sein (siehe meinen Artikel »Wie der Mensch das Denken lernte«, SdW 4/2002, S. 56), denn sie ist das Paradebeispiel für den Umgang mit Symbolik.

Dass wir unsere ungewöhnliche Existenz wesentlich einer raschen Abfolge von rein äußerlichen Zufällen verdanken sollen, die völlig unberührt von den Fähigkeiten unserer Vorfahren auftraten, mag wenig schmeichelhaft erscheinen. Die Erklärung passt aber, sieht man sich das Ergebnis genau an. Denn trotz seiner herausragenden Eigenschaften ist der Mensch alles andere als perfekt. Nicht nur Evolutionspsychologen haben zu dem Thema viele Bücher verfasst.

Den Menschen als Zufallsprodukt der Evolution zu sehen, impliziert noch etwas Entscheidendes: Dass wir nicht für bestimmte Zwecke genau zu unserer Umwelt passend maßgeschneidert wurden, gewährt uns einen freien Willen, der anderen Arten in dieser Form fehlt. Wir können über unser Verhalten entscheiden – was natürlich auch bedeutet: Wir tragen dafür Verantwortung. ~

DER AUTOR



Ian Tattersall ist Paläoanthropologe und emeritierter Kurator am American Museum of Natural History in New York. In seinen Forschungen befasst er sich insbesondere mit den Homininen und den Lemuren.

QUELLEN

Henke, W., Tattersall, I. (Hg.): Handbook of Palaeoanthropology. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2007; aktualisierte und erweiterte 2. Auflage 2015
Tattersall, I.: Masters of the Planet: The Search for Our Human Origins. Palgrave Macmillan, Basingstoke 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/132776

DAS GANZE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: UNSERE SPEZIALREIHEN



Alle Hefreihen auch im Handel erhältlich!

JETZT IM
ABO FÜR NUR
€ 7,40
PRO HEFT
BESTELLEN

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/spezialabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



JURISTISCHES

Rechtswidrige Primzahlen und das Urheberrecht an Pi

Kann eine Zahl Eigentum einer Person oder Firma sein? Im Prinzip ja – aber wenn sie nicht besonders groß ist, wird es schwierig.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Kann eine Primzahl Sünde sein? Oder genauer gesagt: Kann die schlichte Nennung einer Primzahl gegen das Gesetz verstoßen? Theoretisch ja – jedenfalls nach der Auffassung eines New Yorker Richters.

Die Geschichte beginnt um 1996 mit der Einführung eines Verschlüsselungssystems namens Content Scramble System (CSS, nicht zu verwechseln mit den ebenfalls mit CSS abgekürzten Cascading Style Sheets, die zur Programmierung von Webseiten dienen). Die Hersteller der damals neu eingeführten DVDs legten die Daten eines Films in verschlüsselter Form ab, um ein beliebiges Kopieren des Inhalts zu verhindern. Nur DVD-Spieler sollten in der Lage sein, den von der Scheibe abzulesenden Bitstrom in bewegte Bilder

Notwendige mit 434 Bytes in der Programmiersprache C auszudrücken.

Kaum war die erste Version eines DeCSS-Programms (descramble CSS) anonym über einen E-Mail-Verteiler verbreitet worden, brachte die DVD CCA ihre Anwälte in Stellung. In der Tat genießt die DVD-Verschlüsselung Schutz als Betriebsgeheimnis; also macht sich jeder strafbar, der das Entschlüsselungsprogramm zum Download bereithält – zumindest wenn der Server in den USA steht oder in einem Land, das mit diesen ein Copyright-Abkommen geschlossen hat.

Auf die erste Klagewelle reagierte die andere Seite, indem sie die verfassungsmäßig garantierten Freiheiten der Rede und der Wissenschaft für sich in Anspruch nahm. In anderen Urteilen war

bei einem derart kurzen Programm sehr schnell ins Lächerliche abdriftet. Ist es noch erlaubt, in der Vorlesung in Prosa über die Wirkungsweise eines Descramblers zu reden, wenn jeder Student, der gut aufpasst, daraufhin selbst einen schreiben kann? Macht sich der Dozent bereits strafbar, wenn er eine solche Umgehungstechnik zwar nicht ausdrücklich erwähnt, sie sich aber ohne Weiteres aus dem Stoff der Vorlesung herleiten lässt?

Irgendwann wird's albern. Das haben offensichtlich auch die Verfasser des amerikanischen Urheberrechtsgesetzes (Digital Millennium Copyright Act, DMCA) gemerkt. Zwar erklären sie in Section 1201 mit dem landesüblichen alles übergreifenden Wortschwall praktisch jede Aktivität für gesetzwidrig, die darauf gerichtet ist, technische Kopierschutzmaßnahmen zu umgehen. Aber damit es nicht ausufert, haben sie an entscheidender Stelle das Wort »vorrangig« (»primarily«) eingefügt.

Das wiederum eröffnete ein Schlupfloch. Und alsbald machten sich einige Verfechter der – wie auch immer zu verstehenden – Freiheit einen Spaß daraus, dieses zu nutzen. Offensichtlich ist der vorrangige Zweck eines T-Shirts, seinen Träger zu bekleiden. Aber wenn darauf der Text des DeCSS-Programms abgedruckt ist? Es half nichts, die Herstellerfirma musste das Textil aus dem Programm nehmen.

Also musste ein unanfechtbarer Primärzweck her. Phil Carmody, ein britischer Softwareentwickler, der nach vielen Stationen in Finnland arbeitet, entwickelte dazu zahlentheoretischen Ehrgeiz: Er wollte den Programmtext in eine Form bringen, die aus einem in

Es war strafbar, ein T-Shirt mit einem aufgedruckten Programmtext zu tragen

und Töne zurückzuverwandeln. Obendrein gaben die Hersteller ihren Produkten einen »Region Code« bei, um beispielsweise europäischen Konsumenten einen Film noch einige Monate nach der amerikanischen Erstveröffentlichung vorenthalten zu können.

Offensichtlich hatte sich das zuständige Konsortium, die DVD Copy Control Association (DVD CCA), beim Verschlüsseln nicht besonders geschickt angestellt. Jedenfalls gelang es bereits drei Jahre später, den Code zu brechen. Zu allem Überfluss war das Programm, mit dem man einen verschlüsselten Film in den echten umrechnen konnte, überraschend einfach. Nach einigem Probieren gelang es den Hackern, das

schon festgestellt worden, dass ausführbarer Programmcode ein intensiv genutztes Mittel zum Gedankenaustausch sei, vor allem unter Computerwissenschaftlern, und dass man sich selbstverständlich wissenschaftlich mit Ver- und Entschlüsselungstechniken auseinandersetzen dürfe.

Im Konflikt zwischen den beiden Rechtsgütern Betriebsgeheimnis und Freiheit der Rede zogen die Richter schließlich eine Grenzlinie zwischen einem (illegalen) DeCSS-Programm, das unmittelbar von einem Computer ausführbar ist, und einer (zulässigen) Darstellung desselben mit anderen Mitteln, zum Beispiel dem Abdruck auf Papier. Pech nur, dass diese Unterschei-

dieser selbst liegenden und von seiner Herkunft – legal, illegal, ... – unabhängigen Grund publikationswürdig (»intrinsically archivable«) war. Das ist Carmody gelungen, indem er den Text in eine Primzahl verpackte.

Komprimieren und verlängern

Der erste Schritt war noch ganz einfach: Carmody wandte das allgemein verbreitete Datenkompressionsprogramm »gunzip« auf den Originaltext des ursprünglichen Programms an. Damit macht man üblicherweise lange Dateien kürzer, zum Beispiel für den Versand per E-Mail; aber darauf kam es bei dem ohnehin kurzen Text gar nicht an. Wichtig war vielmehr, dass das Programm gunzip, das aus dem komprimierten Text den ursprünglichen wiederherstellt, ein Byte, das nur aus Nullen besteht, als Ende des komprimierten Textes auffasst und alles Nachfolgende ignoriert. Wenn man gunzip also den komprimierten Text, dann ein Byte aus lauter Nullen und dann noch irgendetwas Beliebigeres füttert, kommt der Originaltext des Programms heraus.

Der komprimierte Text seinerseits – nennen wir ihn b – ist nichts weiter als eine Folge von Nullen und Einsen und kann daher auch als (natürliche) Zahl im Binärsystem aufgefasst werden. Ein Computer stellt sowieso intern alle Zahlen in diesem Zahlensystem zur Basis 2 dar. Im Allgemeinen ist b keine Primzahl, aber das macht nichts. Man muss ohnehin noch acht binäre Nullen (das Nullbyte) anhängen, wodurch man b mit $2^8 = 256$ multipliziert; dann ist es sicher keine Primzahl mehr. Vielmehr galt es jetzt, hinter das Nullbyte noch weitere Ziffern zu schreiben, so dass sich dadurch eine Primzahl ergab.

Dieser Teil der Aufgabe ist alles andere als einfach, wenn es um Zahlen mit mehreren tausend (Dezimal-) Stellen geht. Wenn eine so große Zahl Produkt zweier annähernd gleich großer Zahlen ist, dann ist es praktisch unmöglich, diese Faktoren zu finden; darauf beruht die Sicherheit der gängigen kryptografischen Verfahren (Spektrum der Wissenschaft 5/2014, S. 20). Merkwürdigerweise ist der Nachweis, dass es

```
4856507896573978293098418946942861377074420873513579
2401965207366869851340104723744696879743992611751097
3777701027447528049058831384037549709987909653955227
0117121570259746669932402268345966196060348517424977
3584685188556745702571254749996482194184655710084119
0862597169479707991520048667099759235960613207259737
9799361886063169144735883002453369727818139147979555
1339994939488289984691783610018259789010316019618350
3434489568705384520853804584241565482488933380474758
7112833959896852232544608408971119771276941207958624
4054716132100500645982017696177180947811362200272344
8272249323259547234688002927776497906148129840428345
7201463489685471690823547378356619721862249694316227
1666393905543024156473292485524899122573946654862714
0482117138124388217717602984125524464744505583462814
4883356319027253195904392838737640739168912579240550
1562088978716337599910788708490815909754801928576845
1988596305323823490558092032999603234471140776019847
1635311617130785760848622363702835701049612595681846
7859653331007701799161467447254927283348691600064758
5917462781212690073518309241530106302893295665843662
0008004767789679843820907976198594936463093805863367
2146969597502796877120572499666698056145338207412031
5933770309949152746918356593762102220068126798273445
7609380203044791227749809179559383871210005887666892
5844870047077255249706044465212713040432118261010359
1186476662963858495087448497373476861420880529443
```

Die erste illegale Primzahl der Welt, gefunden im März 2001 von Phil Carmody. Spätestens seit einem Urteil von 2004 ist diese (ohnehin im Internet zugängliche) Zahl kein Betriebsgeheimnis mehr, so dass wir sie bedenkenlos abdrucken dürfen.

solche Faktoren nicht gibt, dass also die betreffende Zahl eine Primzahl ist, nicht ganz so schwierig, denn es gibt Tests, mit denen man das nachweisen kann, ohne alle denkbaren Faktoren durchzuprobieren.

Die einfachsten dieser Tests sortieren aus einer großen Menge von Kandidaten sehr schnell die meisten zusammengesetzten Zahlen heraus; aber einige bestehen eine solche Prüfung, ohne wirklich Primzahlen zu sein. Für jede dieser »Fastprimzahlen« kostet dann der endgültige Nachweis der Primzahleigenschaft – oder deren Widerlegung – einen sehr schnellen Computer immer noch einige Tage Rechenzeit und seinen Programmierer beträchtliche Mühe. Der muss nämlich zum Zweck des Nachweises eine algebraische Struktur namens »elliptische Kurve« definieren (Spektrum der Wissenschaft 1/2009, S. 62, nachgedruckt in »Die größten Rätsel der Mathematik«, Dossier 6/2009, S. 40).

Aus diesem Grund ist die Entdeckung einer sehr großen Primzahl mit Hilfe des Algorithmus ECPP (Elliptic Curve Primality Proving) nach wie vor ein bemerkenswertes Ereignis. Etliche

Mathematiker rechnen um die Wette, und jeder Erfolg findet seinen Platz auf der eigens dafür eingerichteten Website <https://primes.utm.edu/>.

Phil Carmody suchte sich also die erforderlichen Algorithmen im Internet zusammen, ließ rechnen und fand am Ende eine Primzahl mit 1401 Dezimalstellen, deren Binärdarstellung mit b und einem Nullbyte beginnt (Bild oben). Aber das reichte noch nicht für einen Platz unter den Top 20 der größten mit ECPP gefundenen Primzahlen. Immerhin steht sie bis heute als »erste illegale Primzahl« im Kuriositätenkabinett der Primzahlen-Website.

Daraufhin legte Carmody noch einmal nach, hängte 156 und mehr Nullbytes an und probierte weiter. Am Ende fand er, dass $b \cdot 256^{211} + 99$ eine Primzahl ist. Das war damals die zehntgrößte Primzahl, die mittels ECPP gefunden wurde, womit sie auf dem ihr zustehenden Platz in den Top 20 veröffentlicht wurde (inzwischen ist sie von neueren Rekorden verdrängt worden). Und wer wollte ernsthaft vor Gericht darlegen, dass Phil Carmody diese wissenschaftliche Anstrengung auch nur vorrangig zu dem Zweck unternommen hätte, ei-

nen CSS-Decrambler zu veröffentlichen und damit den DVD-Herstellern eine Nase zu drehen?

Die DVD Copy Control Association hat es gar nicht erst versucht. Schließlich musste sie sogar ganz offiziell den Kampf gegen die Hacker aufgeben, denn im Jahr 2004 urteilte ein kalifornisches Gericht, das CSS sei mittlerweile auf so vielen Websites weltweit verfügbar, dass man nicht mehr von einem Betriebsgeheimnis sprechen könne.

Auch der Entschlüsselungsalgorithmus selbst hat sich inzwischen erübrigt. Im Verlauf seiner Analyse stellte sich heraus, dass die ganze Verschlüsselung an einer Folge von 40 Bits hängt.

Was kommt heraus, wenn man eine Zufallsfolge einfach so in Musik umsetzt? Durchschnitt

Die steckt, ihrerseits verschlüsselt, im ersten Datenblock der DVD; aber wer sie dort nicht via DeCSS herausholt, kann einfach alle 40-Bit-Folgen der Reihe nach durchprobieren. Die etwas mehr als 10^{12} (eine Billion) Möglichkeiten spielt ein moderner Computerchip schneller durch, als der Nutzer braucht, um das Bier für den Filmabend aus dem Kühlschrank zu holen.

Pi-Musik

Dass eine schlichte Zahlenfolge zum Gegenstand juristischer oder gar politischer Auseinandersetzung wird, ist vielleicht nicht so überraschend; schließlich haben es die Beteiligten ja darauf angelegt. Aber unter anderen Umständen traf dieses Schicksal sogar die gänzlich unschuldige Ziffernfolge der Kreiszahl π .

Im Jahr 1894 legte der Amateurmathematiker Edward J. Goodwin dem Repräsentantenhaus des US-Bundesstaats Indiana einen Gesetzentwurf vor, der eine neue mathematische Wahrheit einführen und der kostenfreien Nutzung durch den Staat Indiana anheimgeben sollte. Die »neue Wahrheit« bestand in einer Methode zur Quadratur des Kreises und wäre, wenn sie korrekt gewesen wäre, auf den Zahlenwert 3,2 für π hinausgelaufen. Nach einiger Dis-

kussion verwies das Repräsentantenhaus das Vorhaben an den Ausschuss für Erziehung; nach dessen positiver Stellungnahme wurde die Vorlage ohne Gegenstimme angenommen. Just zu dieser Zeit traf – in einer ganz anderen Gelegenheit – der Mathematiker Clarence A. Waldo im Parlament ein und führte klärende Gespräche mit den Mitgliedern der zweiten Parlamentskammer, des Senats. Dennoch wäre dort der Gesetzentwurf fast durchgegangen; aber gerade noch rechtzeitig bemerkten die Senatoren, dass sie sich unsterblich lächerlich zu machen drohten, und vertagten die Beschlussfassung auf unbestimmte Zeit. Dem Ver-


nehmen nach ist die Angelegenheit bis heute nicht wieder auf die Tagesordnung gesetzt worden.

Damit ist zwar der Versuch, eine falsche Ziffernfolge für π unter gesetzlichen Schutz zu stellen, gescheitert; aber was ist mit der richtigen? Gegenwärtig sind reichlich 12 Billionen Dezimalstellen von π bekannt, davon die letzten zwei Billionen erst, seit Alexander Yee und Shigeru Kondo Ende 2013 ihren Computer 94 Tage laufen ließen. Könnten die Finder von jedem Nutzer der Ziffernfolge – zumindest der letzten zwei Billionen Ziffern – eine Lizenzgebühr fordern?

Für einen Mathematiker klingt die Idee vollkommen absurd; aber ein Künstler war sogar noch dreister. Lars Erickson hatte um 1992 eine »Pi Symphony« geschrieben, deren Melodien, Harmoniefolgen und andere Merkmale den Ziffern von π folgten. Als 20 Jahre später ein Mann namens Michael Blake auf dieselbe Idee kam, ließ Erickson Blakes Werk »What Pi Sounds Like« auf Youtube sperren. Blake klagte dagegen und hat es nun schriftlich vom Richter Michael H. Simon vom Bezirksgericht in Oregon: »Pi ist ein nicht durch Urheberrecht schützbare Faktum, und die Umsetzung von Pi in Musik ist eine nicht durch Urheberrecht schützbare

Idee«, ungeachtet der Tatsache, dass Erickson sein Werk 1992 beim U.S. Copyright Office hatte registrieren lassen.

Inzwischen sind beide Kompositionen wieder auf Youtube abrufbar – und beim Anhören stellt sich unweigerlich der Eindruck ein, dass Musik allenfalls in der Instrumentation oder anderen Zutaten steckt, aber nicht in der Ziffernfolge selbst. Das wird deutlich in der – nach meiner unmaßgeblichen Meinung – besten musikalischen Umsetzung der Idee. Die »Mathemusikerin« Vi Hart, die mit ihren rasend schnellen Mathematik-Sketchen auf Youtube Klickzahlen im Millionenbereich einfährt, singt Pi mit ihrer überaus hörenswerten Sopranstimme und einem selbst ausgedachten Rhythmus. Fast glaubt man, mit den letzten Tönen 534211 das dramatische Ende einer Geschichte zu vernehmen, aber nichts da: Vi Hart hat an dieser Stelle willkürlich abgebrochen, und eigentlich geht es noch unendlich weiter.

Unendlich langweilig, um genau zu sein. Nach allem, was die Mathematiker wissen, gibt es nichts, was die Ziffernfolge von π im Prinzip von einer gleichverteilten Zufallsfolge unterscheiden würde. Und was kommt heraus, wenn ein Komponist eine Zufallsfolge in Töne umsetzt und nichts Wesentliches hinzufügt? Durchschnitt. 

DER AUTOR



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

QUELLE

Ratliff, T.: Pi on Trial and Other Prime Suspects. In: Math Horizons 21-1, S. 18–19, 2013

WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327778

Science-Shop.de

Faszination Wissenschaft

www.Science-Shop.de
Gutscheincode: VZNE
Gutschein € 5,-

Über 1.000 Geschenkideen für kluge Köpfe:

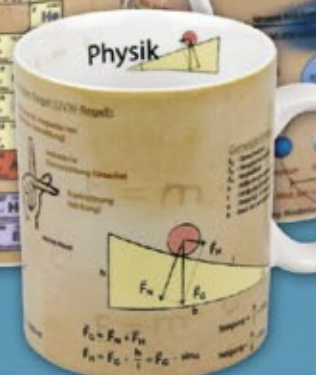
Nr 9-2612-5

Nr 9-3856-3

Nr 9-3668-9

Nr 9-3788-8

Nr 9-3788-7



Nr 9-3864-0

Nr 9-3086-4

Nr 9-3788-6

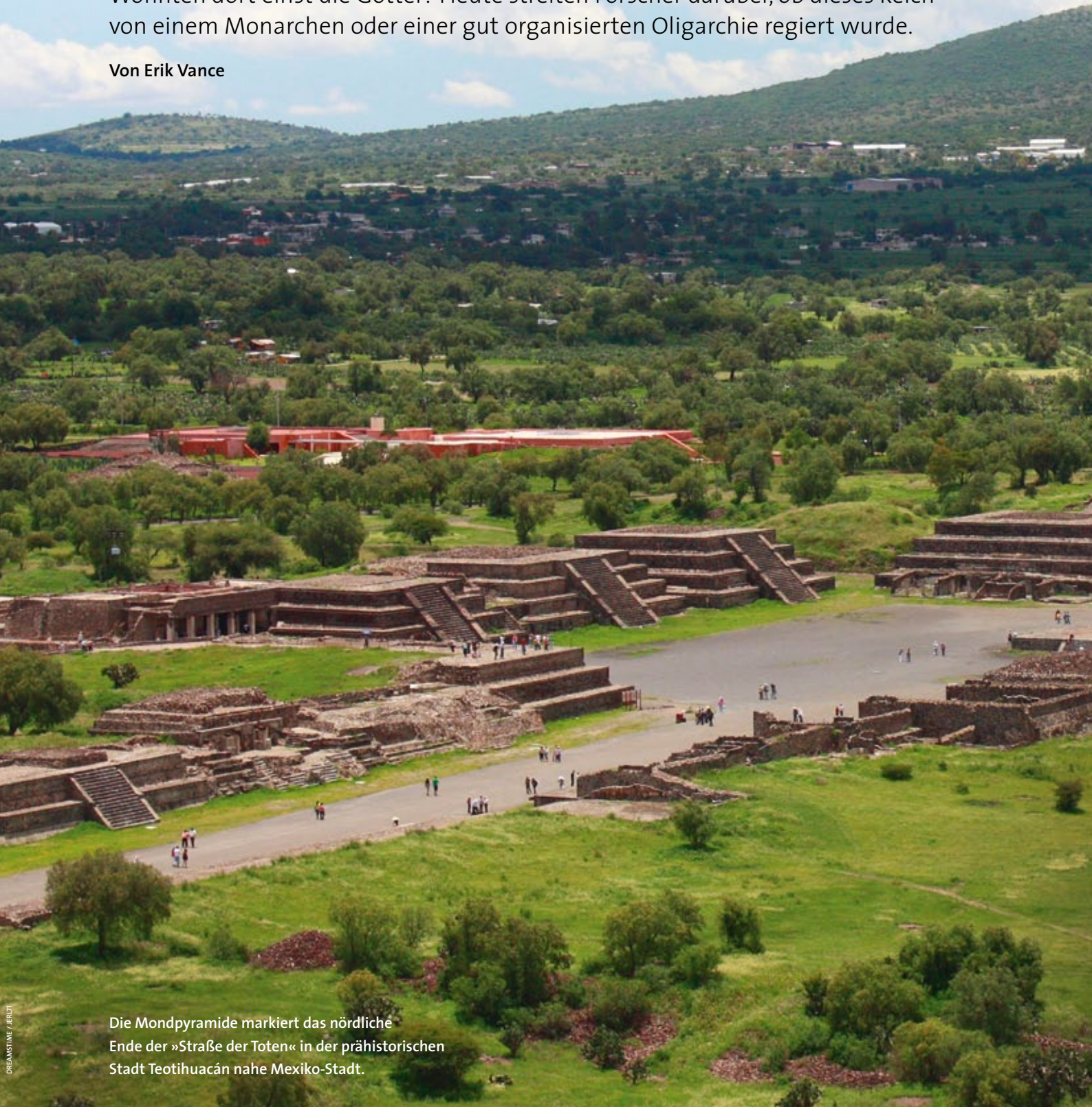
Der Gutschein über 5 Euro ist bis zum 30.06.2015 gültig. Einfach im Bestellprozess im Feld "Gutscheinnummer" den Code VZNE eingeben. Bei einer Bestellung von ausschließlich preisgebundenen Büchern ist der Gutschein nicht einlösbar.
Science-Shop by Mail:Order:Kaiser • Postfach 80791 München • Telefon: 0180 - 5 34 17 34*
(0,14 €/Min. aus dem Festnetz, Mobilfunk max. 0,42 €/Min.)



Wer regierte Teotihuacán?

Die gewaltigen Tempelruinen von Teotihuacán ließen schon die Azteken staunen. Wohnten dort einst die Götter? Heute streiten Forscher darüber, ob dieses Reich von einem Monarchen oder einer gut organisierten Oligarchie regiert wurde.

Von Erik Vance



Die Mondpyramide markiert das nördliche Ende der »Straße der Toten« in der prähistorischen Stadt Teotihuacán nahe Mexiko-Stadt.



Irgendwann im 14. Jahrhundert fanden die ersten »Mexica« ihren Weg in das Tal von Teotihuacán. Die Neuankömmlinge aus dem Norden, die schon bald das Hochland von Mexiko unter ihre Herrschaft bringen und das Reich der Azteken begründen sollten, folgten Berichten eines anderen Volks, der Tolteken, wonach in dieser Bergregion einst die Götter selbst gewohnt hätten. Was die wagemutigen Auswanderer entdeckten, war mehr als dazu angeht, diese Erzählungen zu bestätigen: Ruinen von gewaltigen Pyramiden säumten eine breite Straße. So weit das Auge reichte, erstreckten sich verfallene Tempel und Marktplätze – die Zeugnisse einer einst mächtigen Stadt, in der bis zu 125 000 Menschen gelebt hatten.

Nach ihrem Vorbild errichteten die Mexica gut 48 Kilometer entfernt Tenochtitlán, heute unter Mexiko-Stadt verborgen, während sich ihre Aristokraten in den heißen Sommermonaten in die Ruinenstätte zurückzogen, die sie in ihrer Sprache Teotihuacán nannten – den Ort, an dem Menschen zu Göttern wurden.

Etwa 200 Jahre später, im Jahr 1521, eroberten Konquistadoren das aztekische Reich, und Teotihuacán geriet in Vergessenheit, bis Archäologen Anfang des 20. Jahrhunderts dort die ersten Ausgrabungen durchführten. Wer diese Stadt erbaut haben sollte, war ihnen ein Rätsel. War sie ursprünglich eine kleine Siedlung gewesen, die von Invasoren eingenommen und ausgebaut worden war? Heute wissen die Alt-

amerikanisten, dass sie einst das Zentrum eines riesigen Reichs war, das schon vor den Mexika und Tolteken im Hochland von Mexiko erblühte und noch mehr als 1100 Kilometer entfernt Einfluss ausübte. Teotihuacán war den mächtigen Mayazentren in Guatemala und Honduras ebenbürtig – und dürfte sie archäologischen Funden nach sogar eine Zeit lang kontrolliert haben.

Im Stadtgebiet lebten Angehörige verschiedener Ethnien und Berufsgruppen, darunter Kaufleute, Händler und Künstler aus ganz Mexiko. All das lässt sich nur anhand archäologischer Befunde aufzeigen, denn offenbar hatte diese Zivilisation noch keine Schrift entwickelt. Mit Schächten und Tunneln arbeiteten sich die Forscher deshalb in die Monumentalbauten hinein und legten auch kleinere Anlagen frei.

Über das politische System dieses Reichs diskutieren sie aber nach wie vor. Einige glauben, dass die Stadt von einem König regiert wurde, der als unfehlbar galt und einen zentral durchorganisierten Staat mit eiserner Faust führte. Andere sehen Teotihuacán als Handelsstaat, in dem mehrere mächtige Familien um Einfluss rangen, keine aber die Kontrolle letztlich an sich reißen konnte, was sie zu vorsichtigem Taktieren und Intrigieren zwang.

Es ist keine leichte Aufgabe, das politische Leben einer vergangenen Kultur zu rekonstruieren. Würde ein Archäologe aus einer fremden Welt 1400 Jahre nach dem Untergang der Vereinigten Staaten in Washington landen, müsste er sich wohl fragen, ob seine Bewohner Abraham Lincoln als Gott verehrt haben, da ihm eine solch imposante Statue gewidmet ist. Welchen Ritualen diente der Obelisk, den wir als Washington Monument kennen? Saburo Sugiyama von der Aichi-Universität in Japan geht seit 35 Jahren solchen Fragen in Teotihuacán nach.

Drei große Bauwerke (siehe Grafik rechts) überragen die Fundstätte: Das größte nannten die Azteken »Sonnenpyramide«, gefolgt von der »Mondpyramide«, die sich am Ende der »Straße der Toten« erhebt. Das kleinste Bauwerk ist die Pyramide »Tempel der Federschlange«, oft auch »Quetzalcoatl« genannt, weil die dort dargestellte Gottheit diesem aztekischen Gott ähnelte und ihm vermutlich sogar als Vorlage

diente. Viele Forscher halten diese kleinste Pyramide für das bedeutendste Monument, das Könige oder Priester beherrschte. Es befindet sich nicht nur im Zentrum der Stadt, es wurde auch zweimal erweitert und war von gedrungenen Mauern umgeben.

Im Jahr 1989 entdeckten Sugiyama und der Archäologe Ruben Cabrera Castro von der mexikanischen Forschungseinrichtung Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) in der Nähe dieses Tempels die Überreste von 18 Personen, die rituell geopfert und aufgebahrt worden waren. Weitere Funde folgten, insbesondere dank eines Tunnels, den die beiden unter das Bauwerk trieben. Inzwischen sind es mehr als 100 Tote, überwiegend Männer, dem Anschein nach Krieger aus anderen Gebieten.

Wachstum in mehreren Phasen

Für Sugiyama waren dies klare Indizien für eine Monarchie, die mit harter Hand agierte. »Nur mit viel Macht kann man den Bau von Monumenten durchsetzen.« 1988 hatte er begonnen, einen Stollen unter die Mondpyramide zu treiben, um endlich ein Königsgrab oder einen anderen Beleg der Monarchie zu bergen.

Wie andere Städte Altamerikas war auch Teotihuacán in mehreren Bauphasen gewachsen. Anthropologen vermuten, dass sich um 150 v. Chr. verschiedene Gruppen der Region verbündeten und nach und nach diesen Ort für sich nutzten. Im Lauf der Zeit errichteten sie Monumente, mal hier, mal dort. Der Grabungsschacht lieferte Indizien dafür, dass die Mondpyramide 100 n. Chr. als eines der ersten erbaut wurde. Als die Mexica Teotihuacán erreichten und ihr den Namen gaben, bewunderten sie das Ergebnis von acht Bauphasen, die Sugiyama von 1998 bis 2004 in seinem Schacht nachvollziehen konnte. Wie bei den russischen Matroschkas steckte eine Pyramide in der anderen. Mit dem vierten Bau, der laut Radiokarbondatierung im frühen 3. Jahrhundert n. Chr. seine drei Vorgänger überdeckte, erfuhr sie allerdings eine deutliche Erweiterung. Damals befand sich die Stadt bereits im Aufschwung und vielleicht war es auch schon die Zeit, in der das Reich Gestalt annahm.

Ob dies nun unter dem Banner eines Königs geschah oder nicht – nach wie vor fehlen die Gräber solcher Herrscher –, das Einflussgebiet Teotihuacáns wuchs rasch, wie Los Horcones zeigt. Diese kleine Ruinenstadt liegt etwa 720 Kilometer südöstlich, im heutigen mexikanischen Bundesstaat Chiapas. Dort stellt die Ausgräberin Claudia Garcia-Des Lauriers von der California State Polytechnic University in Pomona eindeutige Bezüge zu Teotihuacán fest. »Die beiden Städte hatten ein sozusagen gemeinsames Layout. Auch in Los Horcones finden wir einen großen offenen Platz, der die gesamte Bevölkerung fasste, ebenso eine Art Hauptstraße in der Art der »Straße der Toten.«

Die gesamte Anlage wie auch der Stil der gefundenen Keramik lassen vermuten, dass Los Horcones zumindest ein enger Handelspartner von Teotihuacán gewesen ist, wenn nicht

AUF EINEN BLICK

EINE FRÜHE SUPERMACHT

1 Seit Jahrzehnten rätseln Archäologen über die Kultur der prähistorischen Stadt **Teotihuacán** in Mexiko, die schon zur Zeit der Azteken (»Mexika«) nur noch aus Ruinen bestand.

2 Um diese alte Kultur zu verstehen, treiben Archäologen **Stollen unter die alten Tempel** und graben in weit entfernten Stätten. Sie konnten bereits zeigen, dass Teotihuacán im frühen 3. Jahrhundert n. Chr. das **Zentrum eines gewaltigen Reichs** gewesen sein musste.

3 Über die Regierungsform herrscht jedoch Uneinigkeit: Manches spricht für einen allmächtigen **König**, anderes für die **Oligarchie** von vier bedeutenden Familien.

Stadt der Götter

Teotihuacán war im 3. Jahrhundert das Zentrum eines Reichs, dessen Einfluss bis nach Honduras reichte. Ausgrabungen unter beeindruckenden Monumenten wie auch in kleineren Anlagen, dar-

unter Wohnhäuser, lassen auf eine differenzierte Gemeinschaft schließen. Ihre Mitglieder stammten aus verschiedenen Regionen des Reichs – und lebten in ethnisch getrennten Stadtvierteln.



ILLUSTRATION MITTE: JOSE MIGUEL MARO; KLEINE KARTE: LINKS: XNR PRODUCTIONS NACH: MANZANILLA, L.R., "CORPORATE LIFE IN APARTMENT AND BARBO COMPOUNDS AT TEOTIHUACÁN, CENTRAL MEXICO IN DOMESTIC LIFE IN PREHISPANIC CAPITALS: A STUDY OF SPECIALIZATION, HIERARCHY, AND ETHNICITY", ED. MANZANILLA, L.R., CHARPÉLAINÉ, C., MEMOIRS OF THE MUSEUM OF ANTHROPOLOGY, UNIVERSITY OF MICHIGAN, 46, S. 21-42, 2009

XNR PRODUCTIONS, NACH: BENJAMIN MILLON UND NACH: CARBALLO, D.M., ET AL., "ORBS DIAN AND THE TEOTIHUACÁN STATE: WEAPONRY AND RITUAL PRODUCTION AT THE MOON PYRAMID", UNIVERSITY OF PITTSBURGH CENTER FOR COMPARATIVE ARCHAEOLOGY AND UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLÓGICAS, 2011

gar ein militärischer Außenposten der Metropole. Doch warum endet die Straße, die nach Meinung Garcia-Des Lauriers nach dem Vorbild der »Straße der Toten« angelegt wurde, abrupt an einem großen Felsblock? Die Forscherin vermutet, dass man lediglich eine kleinere Nachbildung der Mutterstadt im Sinn hatte: das miniaturisierte Abbild eines religiösen Zentrums.

In den letzten Jahren sind überall in Mexiko ähnliche Stadtanlagen gefunden worden. Die Wissenschaftler gehen mittlerweile davon aus, dass Teotihuacán nicht nur den größten Teil des heutigen Südmexikos kontrollierte, sondern bis in das Gebiet des modernen Honduras expandierte. Damit kamen Handelsgüter wie Kalk und Federn aus den fernsten Regionen Mittelamerikas. In den von den Maya beherrschten Dschungeln haben Forscher Hinweise auf eine geheimnisvolle Stadt in den Bergen im Westen gefunden. Viele gehen mittlerweile davon aus, dass Teotihuacán gemeint war, zu dessen Machtbereich offensichtlich auch die Maya-Metropole Tikal in Guatemala gehörte. Inschriften aus Copán nähren die These, dass Krieger aus Teotihuacán den dortigen Maya-König ermordet und die Herrschaft an sich gerissen hatten.

Für Sugiyama gilt es als sicher, dass solch ein Reich einen starken und charismatischen König benötigte. Ein Herrscher dieser Art lebte seiner Meinung nach um 219 n. Chr.; er überwachte damals die großen Bauvorhaben und gründete ein Reich, das 500 Jahre lang bestehen sollte.

Schließlich fand Sugiyama in dem vierten Vorgängerbau der Mondpyramide die Überreste von zwölf enthaupteten Menschen, wohl Gefangenen, und über 50 Wölfen, Jaguaren und Adlern, die als magische Tiere galten. Dazu entdeckte er in einem Kreis angeordnete Obsidianmesser, die an eine Sonnenuhr erinnern. Der Forscher deutet die gesamte Inszenierung als Darstellung eines Schöpfungsmythos. »Was es auch sein mag, das Layout dieser rituellen Bestattung war von Sinn erfüllt. Auch das ist ein starker Anhaltspunkte für einen zentral regierten Staat.«

Herrschaft der vier Häuser

Dennoch schmerzt die Lücke im Forschungsbefund: Während in den Maya-Städten fast jedes wichtige Gebäude unter der Fronttreppe oder im Inneren des Bauwerks das Grab eines Königs barg, kam in Teotihuacán bis zum heutigen Tag dergleichen nicht zum Vorschein.

Andere Forscher verwundert das nicht. »Ein Vielvölkerstaat kann nicht durch eine einzige Person regiert werden. Ihr Militärapparat wäre ständig damit befasst, Aufstände niederzuschlagen«, erklärt die Archäologin Linda Manzanilla von der Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). »Über Teotihuacán herrschte, anders als bei den Maya, eine Oligarchie.« Während Sugiyama das mittelamerikanische Reich mit dem pharaonischen Ägypten vergleicht, denkt Manzanilla eher an die Römische Republik, in der ein Komitee über die Staatsgeschäfte entschied. Das widerspricht zwar nicht der Existenz von Königen, doch sie wären nur Ga-



MARKEDONAN / CC-BY-SA-3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/DEGALCODE)



WOLFGANG SAUBER / CC-BY-SA-3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/DEGALCODE)

Möglicherweise regierten vier Herrscherhäuser die Stadt, von denen das im Zeichen der Federschlange (oben) und das des Jaguars (unten) die mächtigsten waren.

lionsfiguren gewesen, kontrolliert von vier mächtigen Häusern, deren Wahrzeichen in der Ikonografie von Teotihuacán auftauchen: Kojote, Federschlange, Jaguar und Adler. Jedes dieser Adelsgeschlechter herrschte über ein Viertel der Stadt, hatte einen eigenen Trakt im Regierungsgebäude und einen eigenen Bereich an der »Straße der Toten«. Federschlange und Jaguar waren dabei die größten Häuser, weshalb die prachtvollsten Tempel – die Sonnen- und die Federschlangenpyramide – entlang ihrer Straßenseite standen.

Damit sind die Positionen zweier Expertenlager umschrieben, die einander stark kritisieren und die Argumente der Gegenseite jeweils als haltlos bezeichnen. Wie aber kann es sein, dass Archäologen, die über Jahrzehnte hinweg dieselbe Fundstätte bearbeiten, zu so unterschiedlichen Ergebnissen kommen? Teilweise liegt es wohl daran, dass Sugiyama sie aus der »Washington-Monument-Perspektive« betrachtet, während sich Manzanilla den Wohnhäusern der Bevölkerung widmet. In den 1990er Jahren grub sie Oztoyalualco aus – ein Künstlerviertel im Nordwesten, das nach Manzanillas Ansicht vom Haus des Adlers verwaltet

wurde. Im Gegensatz zu Wohnanlagen der Mayas, die nur einen Schrein besaßen, hatte dieser Gebäudekomplex viele verschiedene. Darin sieht die Forscherin einen Ausdruck der multiethnischen Zusammensetzung. Teotihuacán habe sich sogar nur deshalb so enorm entwickeln können, weil sich viele Mächtige dort niederließen, die andernorts Handelswege und Waren kontrollierten. Mit den Steuereinnahmen aus den Provinzen hätten sie gemeinsam das Reich aufgebaut, wobei die Häuser mit den größten Einnahmen auch den stärksten Einfluss bei Entscheidungen gehabt haben dürften.

Eine solche oligarchische Machtteilung war im Altertum selten, kam aber vor. Rom war lange Zeit eine Republik; um 2000 v. Chr. teilten sich Mohenjo Daro und Harappa die Macht im Indus-Tal. Dennoch räumt selbst Manzanilla ein, dass die meisten alten Zivilisationen von Alleinherrschern regiert wurden. Normalerweise müsste man auch ihre Darstellungen finden, doch stattdessen gibt es überall in der Stadt nur das Bild einer vierblättrigen Blume – ein Symbol der vier Herrscherhäuser?

Als Teotihuacán und das Reich expandierten, gewannen auch diese an Einfluss. Die Stadt wurde immer prächtiger ausgebaut, mit gepflasterten Marktplätzen und Monumenten aus kostspieligem Kalkstein. Neue Bewohner kamen – und blieben in den Vierteln ihrer Ethnien, ihrer Adelshäuser.

So gab es in Teotihuacán offenbar Viertel für Menschen aus dem südlichen Oaxaca, für die Mayas und für diejenigen, die aus dem Verbindungskorridor zum Golf von Mexiko stammten. Seit gut zehn Jahren gräbt Manzanilla im Areal von Teopancazco, südlich des Tempels der Federschlange.

Dort lebten wohl Leute aus der Region entlang der Handelsroute zum heutigen Veracruz. Die Kontrolle über dieses lukrative Territorium würde den Reichtum erklären, der für das aufwändige Heiligtum erforderlich war.

Hier zeigt sich deutlich, dass die Stadt kein Schmelztiegel im herkömmlichen Sinn war, denn jede Kultur bewahrte ihre Identität und stand mit ihren Nachbarn in hartem Wettbewerb um Prestige und Macht. Dieses Flickwerk könnte eine Erklärung dafür sein, warum es keine einheitliche schriftliche Sprache oder Darstellungen von Königen wie bei den Mayas gab. Solch eine Repräsentation hätte die Waage zu weit in eine Richtung geneigt.

Fisch für die Elite

Manzanillas fand heraus, dass die Angehörigen der Oberschicht von Teopancazco zwölf verschiedene Fischarten aßen, die sowohl gesalzen als auch geräuchert aus ihrer 200 Kilometer entfernten Heimat am Golf von Mexiko importiert wurden. Von dort stammten auch die Muschelschalen, mit denen sie ihre Kleidung verzierten. Das Prinzip lautete: Je aufwändiger der Lebensstil, desto deutlicher bekundete er Macht und Einfluss. »Die Eliten der verschiedenen Volksgruppen wetteiferten miteinander um die besten Kosmetikartikel, Farbpigmente, Felle, Baumwollkleider, Gewänder und Kopfbedeckungen.«

Diese Konkurrenz spiegelte sich auch in den Bestattungsbräuchen. Seit 2005 hat Manzanilla mehrere Gräber untersucht, in denen Kinder aus der Oberschicht beigesezt worden waren. Die Leichname hatte man mit Zinnober, Grünstein und Glimmer aus dem ganzen Reich geschmückt, dazu

Tunnel zur Unterwelt

Die Freilegung eines Tunnels unter dem Tempel der Federschlange hat eine Reihe von Kammern zum Vorschein gebracht. Sie enthielten zeremonielle Opfergaben, von Masken und Waffen bis hin zu geheimnisvollen Spiegeln aus Pyrit. Die

Archäologen hoffen, in der letzten Kammer, die sich direkt unter dem Zentrum des Tempels befindet und seit 2014 Stück für Stück erschlossen wird, endlich ein Königsgrab zu entdecken. Viel versprechende Motivgaben kamen bereits zum Vorschein.





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



[www.spektrum.de/t/
hochkulturen-der-menschheit](http://www.spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit)

finden sich Werkstoffe aus ihrer jeweiligen Heimatregion. Paläste wurden errichtet und mit kostbaren Steinen, die von weit her stammten, ausgekleidet – die vier Häuser ließen es sich gut gehen. Im Jahre 350 n. Chr. aber war es anscheinend zumindest für die Federschlangen vorbei: 29 Angehörige dieser Eliteschicht wurden enthauptet und ihre Köpfe nach den Sitten der Veracruz-Region geschmückt. Manzanilla vermutet, dass dies im Rahmen eines Rituals der kulturellen Transformation stattfand. Denn zu dieser Zeit wurde der Pyramide der Federschlange eine andere vorgebaut, und diese gehörte wohl einem Klan der Jaguare. Die Federschlangen verschwanden weit gehend aus dem Stadtbild; in Teopancazco hatten nun andere das Sagen.

Revolte gegen die Reichen

Zwei Jahrhunderte später brannte ganz Teotihuacán. Niemand kennt die Ursache, Anzeichen für einen Überfall gibt es nicht. Eine Untersuchung der sterblichen Überreste aus dieser Zeit belegt aber eine drastische Kluft zwischen Arm und Reich. Letztere hatten Übergewicht, während die unteren Bevölkerungsschichten mangelernährt waren. Litten die Wohlhabenden unter Diabetes, machten den Arbeitern Rückenprobleme zu schaffen, wie sie das Tragen schwerer Lasten verursacht. Manche Krankheitsbilder deuten darauf hin, dass die Betroffenen nur selten das Tageslicht sahen und meist in Werkstätten schufteten mussten.

»Ich vermute, dass eine Mittelschicht gegen die herrschenden Eliten revoltiert hat«, meint Manzanilla. »Sie waren hochmotiviert und gut untereinander vernetzt, während ihre Gegner die Gefahr zu spät erkannten.« Um den Missständen abzuwehren, konzentrierten sich die neuen Führer auf den Bau von Wohnhäusern statt auf Tempel. Doch nach etwa einem weiteren Jahrhundert kam das endgültige Aus. Was zumindest für die Wohlhabenden letztlich keine Katastrophe bedeutete – sie kehrten in ihre Heimatgebiete zurück.

Was der Archäologe Sergio Gómez Chávez vom INAH Ende 2003 entdeckt hat, könnte das Pendel dennoch zu Gunsten von Sugiyama ausschlagen lassen. Heftige Regenfälle hatten an der von ihm geleiteten Ausgrabung am Tempel der Federschlangen ein Loch im Boden frei gelegt, das ungefähr 15 Meter hinabführte. Zu beiden Seiten des Schachts gab es lockeren Schutt, als habe man abgehende Tunnel versiegelt.

Die Archäologen legen seitdem diese Stollen frei. Einer führt zu einem zeremoniellen Eingang, der andere brachte sie in Richtung Tempel. Der senkrechte Schacht diente vielleicht der Luftzirkulation, dem Lichteinfall oder der Betrachtung der Sterne. Dank geophysikalischer Methoden kannte Chávez auch schon das Ziel: drei aufeinander folgende Kammern unter dem Zentrum der Pyramide. Ende 2014 hat er nach über 100 Metern Tunnel ein ganzes Stück weit in die Hauptkammer hineingegraben.

Schon der Stollen selbst barg Überraschungen. So nehmen die Archäologen an, dass der Grundwasserspiegel ursprünglich so hoch war, dass Wasser den Boden bedeckte – und der Ort die Unterwelt repräsentierte. Andererseits fanden sie Reste einer Lehmauskleidung, die glänzenden Pyrit enthielt. »Dies war auch ein Tempel, der an den Beginn einer mythischen Zeit erinnert«, glaubt Chávez. Insgesamt kamen bei den Ausgrabungen bislang gut 50000 Opfergaben zum Vorschein, unter anderem Masken, Waffen, Statuen und Edelsteine. Chávez hält diesen Ort für eine Kultstätte, welche Männer aufsuchten, um die irdische Welt zu verlassen und als Könige zurückzukehren. Liegt dort etwa ein Königsgrab?

Währenddessen ergräbt Manzanilla unweit der Sonnenpyramide eine Anlage mit fünf Bauten, die rautenförmig angeordnet waren – fast wie eine vierblättrige Blume mit einem Schrein in der Mitte. Sie glaubt, dass diese Anlage als Verwaltungszentrum diente, wohin jedes der vier Herrschaftshäuser seine Abgesandten schickte.

Wer hat also Recht? George Cowgill, ein emeritierter Professor von der Arizona State University, vertritt die Ansicht, dass sich Teotihuacán zwischen beiden Modellen bewegt haben könnte: Zumindest zeitweilig mochte ein klug agierender und mit entsprechenden Mitteln ausgestatteter Anführer die Häuser auf sich vereint und die Macht an sich gerissen haben. Allerdings mögen sich weder Manzanilla noch Sugiyama mit diesem Kompromiss anfreunden. ☞

DER AUTOR



Erik Vance ist Wissenschaftsjournalist und lebt in Mexiko-Stadt.

QUELLEN

Manzanilla, L. R.: Corporate Life in Apartment and Barrio Compounds at Teotihuacan, Central Mexico. In: Manzanilla, L. R. und Chapdelaine, C. (Hg.): Domestic Life in Prehispanic Capitals: A Study of Specialization, Hierarchy, and Ethnicity. University of Michigan Museum of Anthropology, 2009

Sugiyama, S.: Human Sacrifice, Militarism, and Rulership: Materialization of State Ideology at the Feathered Serpent Pyramid, Teotihuacan. Cambridge University Press, 2005

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327779

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO**



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





Das Mündungsdelta des Stroms Lena in Sibirien – hier ein Ausschnitt – ist eine der bekanntesten Permafrostregionen. Die stark verästelten Flussarme umschließen zahlreiche Inseln. Eine davon namens Samoylow – sie befindet sich in der Mitte dieser Satellitenaufnahme – beherbergt die neue deutsch-russische Forschungsstation, deren wichtigste Aufgabe darin besteht, die Auswirkungen der Erderwärmung auf den Permafrost zu untersuchen.

2 Kilometer

ESA/ESA/PROBA/CHRIS

Permafrost – die große Unbekannte im Klimawandel

Die Erderwärmung lässt dauerhaft gefrorene Böden in der Arktis tauen. Weil die dadurch freigesetzten Treibhausgase den Klimawandel beschleunigen, befürchteten manche Umweltschützer einen verhängnisvollen Teufelskreis. Genauere Untersuchungen in jüngster Zeit bestätigen zwar den Effekt, sprechen aber gegen eine drohende Katastrophe.

Von Gert Lange

Für die Permafrostexperten bei der Internationalen Klimakonferenz 2012 in Katar konnte der Kontrast zwischen dem Verhandlungsgegenstand und den Bedingungen vor Ort kaum krasser sein. Bei Temperaturen bis 30 Grad Celsius im Schatten debattierten sie über den Zustand der dauerhaft gefrorenen Böden in der Arktis und den Hochgebirgen. Das Abschlussdokument, ein Appendix des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP), appelliert an die Regierungen, die Permafrostgebiete und deren Wandel infolge der Erderwärmung stärker in die jeweilige Forschungs- und Umweltpolitik einzubeziehen.

Tatsächlich könnte, wenn bei steigenden Temperaturen die Permafrostböden weiträumig auftauen, der seit dem Beginn des Eiszeitalters darin gespeicherte Kohlenstoff durch Mikroben in die Treibhausgase Methan und Kohlendioxid umgewandelt werden. Dabei droht ein Teufelskreis, weil Emission und Erwärmung sich womöglich gegenseitig aufschaukeln.

Das sorgte in der Vergangenheit teils für dramatische Schlagzeilen in den Medien. Da war etwa von der »Methanbombe« die Rede, die hochzugehen drohe. Auch manche Wissenschaftler schürten derlei Ängste. So publizierten zwei Ökonomen und ein Meeresphysiker noch im Juli 2013 in der Fachzeitschrift »Nature« eine Abschätzung des wirtschaftlichen Schadens, der entstände, wenn das im submarinen Permafrost gespeicherte Methan entweichen würde. Dabei unterstellten sie einen Ausstoß von 50 Gigatonnen des Gases zwischen 2015 und 2025. In einer Stellungnahme bezeichneten 15 Experten der bedeutendsten mit Methanemissionen befassten Institute, einschließlich des U.S. Geological Survey, diesen Wert allerdings als unrealistisch hoch, weil er um zwei Zehnerpotenzen über dem durchschnittlichen Ausstoß von Methan seit dem Ende der Eiszeit liege.

Solche Übertreibungen kommen zu Stande, wenn lokale Ergebnisse unbesehen auf die gesamte Erde hochgerechnet

AUF EINEN BLICK

GEFAHR ÜBERSCHÄTZT?

- 1 Noch bis vor Kurzem geäußerte Warnungen vor einer drastischen Zunahme der **Erderwärmung** durch das **Tauen von Permafrostböden** beruhten auf qualitativen Überlegungen, groben Abschätzungen und punktuellen Beobachtungen.
- 2 Genauere Messungen aus den letzten Jahren, die insbesondere an einer **deutsch-russischen Forschungsstation in Sibirien** durchgeführt wurden, relativieren das Bild teils erheblich.
- 3 So sind weite Flächen der Permafrostböden seit dem Ende der letzten Eiszeit schon aufgetaut, und erhebliche Teile des enthaltenen **organischen Kohlenstoffs** wurden bereits bakteriell abgebaut und als Gas in die Atmosphäre freigesetzt.
- 4 Außerdem ist die sommerliche **Auftauschicht**, in der die Mikroben aktiv sind, trotz Erderwärmung nicht dicker geworden. Ob die Treibhausgasemissionen wesentlich zugenommen haben, erscheint deshalb fraglich.
- 5 Auch die bisherigen Versuche, diese **Emissionen** großräumig zu erfassen – was sehr schwierig ist –, ergaben keine dramatischen Steigerungen.

werden. Daher braucht es ein dichtes, weltweites Netz von Messstationen, die möglichst flächendeckend Daten liefern. Für verlässliche Aussagen über künftige Emissionen sind zudem die jeweiligen Bedingungen vor Ort zu berücksichtigen.

Zu den wenigen Kompetenzzentren, die sich seit Jahren mit der Dynamik des Permafrostes befassen, gehört die Forschungsstelle Potsdam des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) in Bremerhaven. Sie ist nicht nur Sitz des Internationalen Arktischen Wissenschaftsrats (IASC), sondern auch der Internationalen Permafrost-Gesellschaft (IPA). Mit Blick auf die Ergebnisse von Bohrungen, die das AWI gemeinsam mit dem St. Petersburger Institut für Arktis- und Antarktisforschung (AARI) auf dem sibirischen Schelf vorgenommen hat, wirft der Geowissenschaftler Paul Overduin den »Nature«-Auto-

ren vor, sie hätten ihrer Abschätzung die maximale Methanemission aus einem Gebiet zu Grunde gelegt, in dem submariner Permafrost gar nicht vorkommt. »Es gibt keine Anhaltspunkte für eine derart schnelle Veränderung«, versichert er. »Der marine Permafrost taut sehr langsam.«

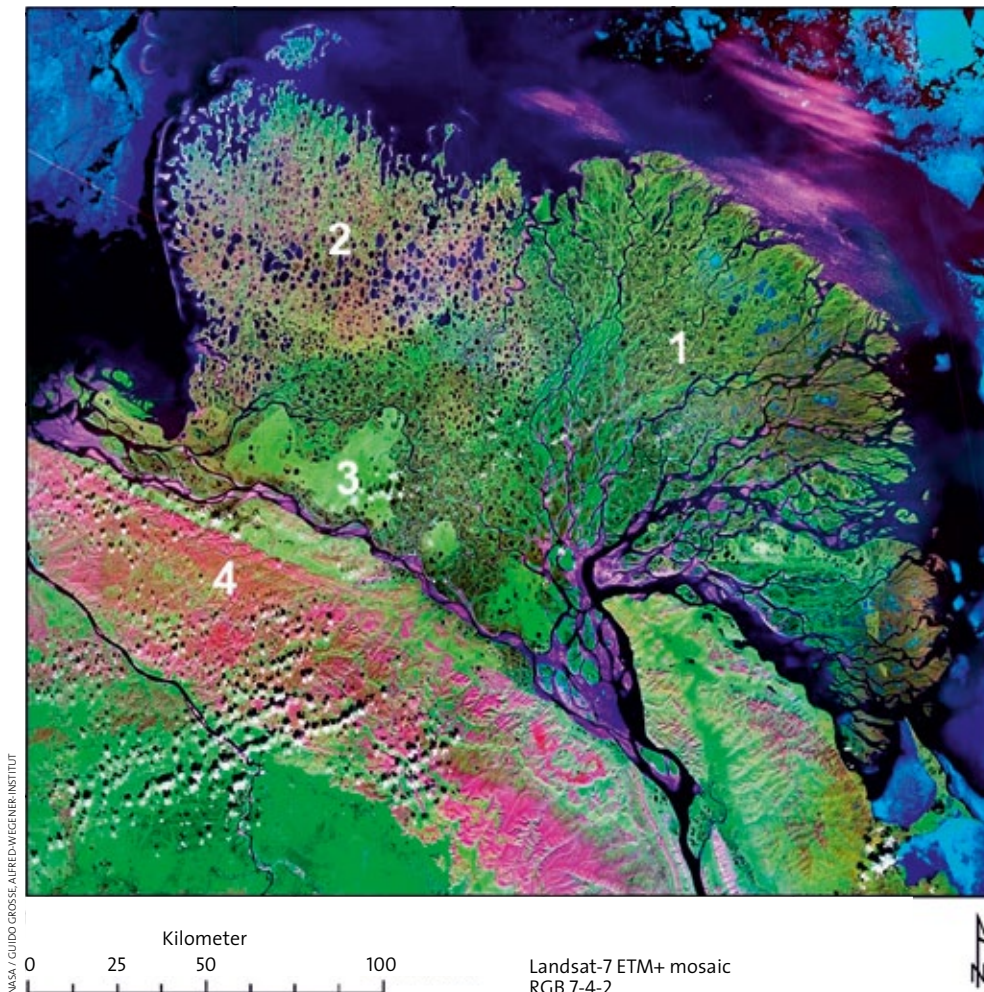
Eine neue Forschungsbasis

Die Potsdamer Wissenschaftler und ihre Kooperationspartner nutzten für ihre Untersuchungen ab dem Sommer 1997 eine deutsch-russische Station auf der Insel Samoylow im Lenadelta – damals ein bescheidenes Holzhaus, das zum Naturreservat Lenadelta mit Verwaltungszentrum in Tiksi gehörte (oberes Bild rechts). Doch die Unterkunft war schlecht beheizbar, so dass sie im Winter geschlossen blieb. Auch bot sie wenig Übernachtungsplätze, weshalb die Mehrzahl der Forscher in Zelten schlafen musste. 2005 bauten die Deutschen auf eigene Kosten einen Erweiterungstrakt an. Trotzdem ließen sich die Wechselbeziehungen zwischen Atmosphäre und Boden weiterhin nicht das ganze Jahr über verfolgen – zumal mitunter die Energieversorgung für die automatisch betriebenen Messzellen ausfiel, wenn ein Sturm die Windgeneratoren umwarf oder Lemminge Kabel durchgebissen hatten.

Im Jahr 2010 besuchte Wladimir Putin diese Station. Dabei bohrte das russische Staatsoberhaupt probeweise selbst ins

steinharte Erdreich und hatte nach eigener Aussage zum ersten Mal Permafrosteis in der Hand. Beeindruckt von der guten Zusammenarbeit des deutsch-russischen Teams versprach er damals, für bessere Expeditionsbedingungen zu sorgen. Tatsächlich genehmigte die Duma wenig später finanzielle Mittel für den Bau und die Ausstattung einer modernen Forschungsbasis. Auch die autonome Republik Jakutien unterstützte das Vorhaben. Die russischen Partner erbat eine Wunschliste der Geräte für die Ausstattung des Laboratoriums nach höchsten Standards. Ein halbes Jahr später legten zwei riesige Lastkähne an der Samoylow-Insel an, mit sämtlichen Raumsegmenten, Baumaterial, neuen Fahrzeugen, wissenschaftlichen Instrumenten und an die 100 Arbeitern an Bord. Im Frühjahr 2013 war die neue, moderne Station bezugsfertig (unteres Bild rechts).

In Sibirien befinden sich die größten zusammenhängenden Regionen mit Böden, die seit dem Beginn des Pleistozäns, des Eiszeitalters, vor etwa 2,5 Millionen Jahren nicht mehr aufgetaut sind. Sie bedecken 65 Prozent des russischen Territoriums und reichen bis in mittlere Breiten – sicher ein Grund für Putins Einsatz. Aber Permafrost ist ein globales Phänomen. Weltweit sind gut 22 Millionen Quadratkilometer Boden dauerhaft gefroren. Das entspricht etwa einem Viertel der Landoberfläche unseres Planeten.



Das Lenadelta gliedert sich in drei geomorphologisch unterscheidbare Terrassen. Der heutzutage aktive Ausflussfächer zur Laptewsee (1) ist eine bis zehn Meter hohe Sedimentationsebene, die sich vor etwa 9000 Jahren zu bilden begann. Im Nordwesten schließt sich die zwischen 10 und 30 Meter hohe sandige Arga-Ebene mit vielen Seen an (2), die beim Tauen des Permafrostbodens entstanden sind. Als Relikt einer spätpleistozänen Landschaft erreicht der kompakte Eiskomplex (3) Höhen bis zu 40 Meter über Normalnull. Der Olenjokskaja-Flussarm im Süden trennt das Lenadelta vom Czekanowski-Bergrücken (4).

Die alte deutsch-russische Forschungsstation im Lena-delta war nur ein bescheidenes Holzhaus. Trotz eines 2005 gebauten Erweiterungstrakts bot sie so wenig Übernachtungsplätze, dass ein Teil der dort tätigen Wissenschaftler in Zelten schlafen musste.



GÜNTER STODT/ALFRED-VEGNER-INSTITUT

Die 2013 fertig gestellte Forschungsbasis besteht aus drei sternförmig angelegten Bereichen für Wohnen, Laborarbeit, Lager und Technik. Im Zentralgebäude befinden sich Freizeiträume, ein Fitnesscenter und ein Konferenzzimmer.



HANS-WOLFGANG HUBBERTEN/ALFRED-VEGNER-INSTITUT

Das Lenadelta liegt in einem Kerngebiet des Permafrostes. Deshalb bietet es besonders gute Voraussetzungen, um sowohl die grundlegenden Vorgänge als auch die aktuellen Veränderungen zu erforschen. Aber es ist riesig; es entspricht etwa der Fläche Niedersachsens, wenn man das Weserbergland abzieht.

Die Deltaregion gliedert sich in drei Terrassen (Bild links) und ist von zahlreichen Flussarmen durchsetzt, die an die 1500 größere und kleinere Inseln einschließen. Auf einer davon befindet sich die Bleibe der Polarforscher (Bild S. 78). Die Samoylow-Insel (72°22'N; 126°28'E) misst nur 2,8 mal 2 Kilometer, liegt aber zentral, so dass sich von dort aus alle drei Terrassen und die Küstenregion erkunden lassen, wenn gleich mit großem logistischem Aufwand.

Zahlreiche Permafroststationen weltweit messen kontinuierlich, wie viel Treibhausgase freigesetzt werden. Das geschieht auch auf Samoylow. Doch die Wissenschaftler dort geben sich damit nicht zufrieden. »Es geht uns darum, die internen Prozesse zu verstehen«, erklärt Hans-Wolfgang Hubberten, Leiter der Forschungsstelle. »Wir wollen zum Beispiel nicht nur wissen, wie viel Methan entweicht oder wie viel Wärmeenergie der Boden aufnimmt, sondern auch, warum das so ist. Was sind die treibenden Kräfte? Wie beeinflussen sich die verschiedenen Faktoren?«

Dazu galt es zunächst, die besonderen Bedingungen im Lenadelta kennen zu lernen und den größten polaren Mündungsfächer der Welt überhaupt erst einmal geografisch zu erschließen. Allein das war schon eine abenteuerliche Herausforderung für die zumeist noch jungen Wissenschaftler.

Der Reiz, ein abgelegenes, wenig erforschtes Terrain zu erkunden, entschädigte für manche Entbehrungen und half, Temperaturen bis minus 30 Grad im Winter und die aufdringlichen Mückenschwärme im Sommer zu ertragen.

Das Paläoklimamodell – Grundlage für die Bewertung der aktuellen Situation

Typisch für Sibirien sind eingefrorene feinkörnige Ablagerungen, im Russischen Yedoma genannt. Sie bestehen bis zu 80 Prozent aus spätpleistozänem, also zwischen 10000 und 100000 Jahre altem Eis. An steilen Flussufern und Küstenkliffs kann man sehen, dass diese Eiskomplexe bis in Tiefen von 40 Metern reichen (Bild S. 82 oben). Sie enthalten viel organischen Kohlenstoff, der sich in so genannten Sedimentfenstern zwischen großen keilförmigen Eiskörpern konzentriert. Die Ausdehnung und Tiefe der Yedoma-Formationen ist daher entscheidend dafür, wie viel Treibhausgase die arktischen Permafrostböden beim Auftauen freisetzen können. Russische Forscher veranschlagten eine Gesamtfläche von rund einer Million Quadratkilometern bei einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 25 Metern und einem Kohlenstoffgehalt von knapp drei Prozent. Daraus errechneten sie, dass bis zu 500 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von Methan und Kohlendioxid ausgasen könnten, wenn sich die Erde weiter erwärmt.

Hinter dieser Kalkulation steht jedoch ein großes Fragezeichen, seit die Geoökologin Anne Morgenstern Böden untersucht hat, die nach dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 10000 Jahren bereits getaut und seither zum Teil wieder eingefroren sind. Die heute zu beobachtenden Veränderungen des



Die Abbruchkante eines Yedoma-Komplexes an der Laptevsee enthält Eiskeile (hellgrau) zwischen 30 000 und 40 000 Jahre altem eingefrorenem Sediment (dunkel).

FRANK KRIEMAST, SENCKENBERG MUSEUM

Permafrostbodens sind demnach nichts Neues. Solche Thermokarstprozesse haben auch früher schon stattgefunden und die Landschaft weiträumig geprägt. Dabei sind bereits erhebliche Anteile des organischen Kohlenstoffs in Kohlendioxid und Methan umgewandelt worden und in die Atmosphäre entwichen.

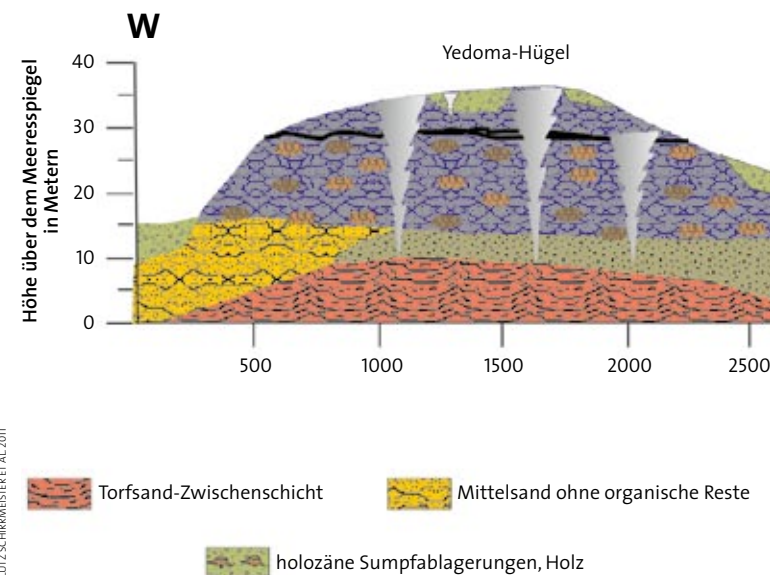
Als Lutz Schirrmeister, Guido Grosse und Jens Strauss von der Forschungsstelle Potsdam des AWI mehr als 600 Yedoma-Proben und 2000 Proben von Thermokarstlagen aus dem Lenadelta und anderen arktischen Regionen analysierten, fanden sie denn auch überraschend wenig Kohlenstoff. Zum einen war der Eisanteil der Schichten wesentlich höher und zum anderen ihre Lagerungsdichte und Mächtigkeit deutlich geringer als angenommen. Ferner erkannten die drei Forscher bei der Auswertung von Satellitenaufnahmen und geologischen Karten, dass rund 70 Prozent der in der Literatur als Yedoma geführten Regionen deutliche Zeichen von früherem Thermokarst aufweisen. Die verbliebenen ursprünglichen Eiskomplexe nehmen nur eine Fläche von rund 416 000 Quadratkilometern ein. Außerdem sind die überaus zahlreichen Seen und Flussläufe von der Bilanz abzuziehen.

Bei Berücksichtigung dieser Faktoren ergab sich ein Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff von 83 Gigatonnen für die Yedoma-Region und 128 Gigatonnen für die Thermo-

karstablagerungen. Die Summe von 211 Gigatonnen entspricht weniger als der Hälfte der zuvor vermuteten Menge.

Für verlässliche Aussagen über den derzeitigen Wandel und die künftige Entwicklung des Permafrostes reichen die kurzfristigen Beobachtungen der letzten 20 Jahre also nicht aus. Vielmehr ist die Entwicklung über längere Zeiträume zu betrachten. Im Lenadelta zeugt eine scharfe Schichtgrenze zwischen dem Yedoma-Eiskomplex und darunterliegenden Sanden von einem krassen Wandel des Ablagerungsmilieus in prähistorischen Zeiten (Bild unten). In den sandigen Horizonten, die vermutlich durch Sedimentation von Flüssen entstanden, finden sich auch viele Pflanzenreste. Wie ihre feine Schichtung verrät, führten einst relativ ruhige Wasserläufe über eine flache Ebene. Einige Bereiche waren zeitweise trockengefallen, so dass Eiskeile das Sediment aufspalten konnten. Andere Areale, vielleicht an abgeschnürten Tot-

Dieser Querschnitt der geologischen Lagen am Nordufer des Olenjokskaja-Flussarms zeigt Erhebungen aus intakten Yedoma-Eiskomplexen im Wechsel mit Thermokarstsenken, in denen der Permafrostboden schon vor Längerem großenteils getaut ist. Die scharfe Grenze zwischen dem Eiskomplex (blau) und den darunterliegenden feinen Sanden aus der frühen Weichsel-Eiszeit spricht für einen krassen Wandel der Umweltbedingungen vor etwa 50 000 Jahren.



armen, hinterließen Torfhorizonte. Daraus ergibt sich das Bild einer Auenlandschaft mit einem weiträumig mäandrierenden Flusssystem.

Mit Methoden der optisch stimulierten Lumineszenz an Quarz- und Feldspatkörnern ließen sich die Sande in die Frühweichsel-Eiszeit vor 100 000 bis 50 000 Jahren datieren. Sie stammen aus dem Hinterland des Lenadeltas. Die Meeresküste lag damals mehr als 100 Kilometer weiter nördlich.

Danach haben sich die Bedingungen in einem geologisch sehr kurzen Zeitraum drastisch verändert. Offenbar ist der Fluss nach Norden abgeschwenkt. Zurück blieb eine mehr oder weniger feuchte Ebene, auf der sich Frostmusterböden mit den typischen polygonalen Strukturen ausbreiten konnten (Bild S. 84). Zugleich änderte sich die mineralische Zusammensetzung der Sedimente. Sie wurden nun über kürzere Strecken aus dem Czekanowski-Gebirge herangetragen. Der Umschwung geschah vor rund 50 000 Jahren, und das extrem kalte Klima hielt bis vor etwa 12 000 Jahren an. In dieser Zeit entstanden die heutigen Yedoma-Eiskomplexe.

Der schnelle Wechsel der Landschaftsformen in der Vergangenheit zeigt zum einen, wie sensibel der Permafrost auf Umweltveränderungen reagiert, und zum anderen, dass nicht immer das Klima Auslöser eines Wandels ist. Deutliches Indiz für veränderte klimatische Verhältnisse ist das Verschwinden von Pflanzenarten oder das Auftreten neuer Spezies. In der Frühweichsel-Periode dominierten, wie Pollenanalysen ergaben, Zwergformen von Birke und Weide sowie Erle, Erika, Süß- und Sauergräser. Das änderte sich mit Beginn der interstadialen Mittelweichsel-Periode – einer gemäßigten Phase während der letzten Eiszeit – vor ungefähr 50 000 Jahren. Birke und Weide verschwanden. Aber die Gräser blieben als Nahrungsgrundlage für Mammutherden; deshalb findet man in den Eiskomplexen Stoßzähne und Knochen dieser ausgestorbenen Elefantenart sowie Skelettreste anderer eiszeitlicher Großsäuger. Außerdem kommen Ostrakoden (kleine Muschelkrebse) und Grünalgen vor, was für die Existenz vieler kleiner Gewässer in der eiszeitlichen Tundra-

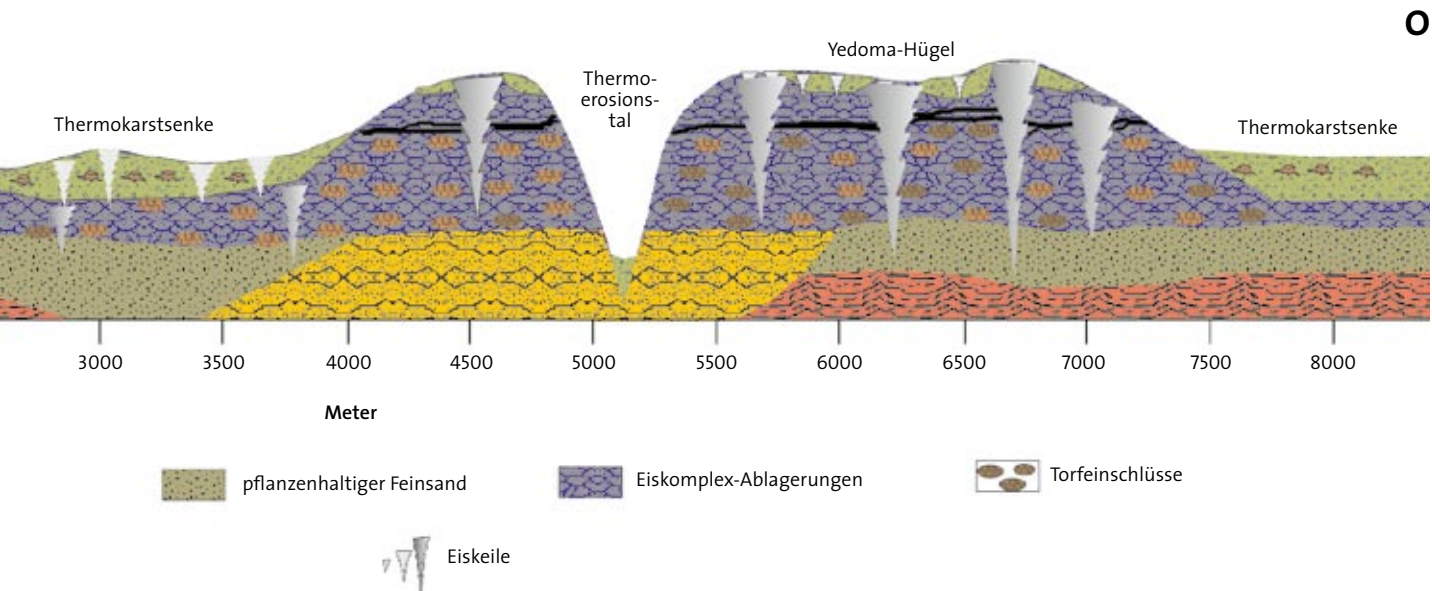
steppe spricht. Später verringerte sich die Biodiversität dann wieder, weil es kälter und trockener wurde.

Der nächste Klimaumschwung setzte mit der holozänen Warmzeit vor etwa 10 000 Jahren ein. Der Permafrost taute nun großflächig. Senken und Seen entstanden, in denen sich Wasser- und Sumpfpflanzen ausbreiteten. Die Erle kehrte zurück, und Birken erreichten sogar ihre normale Wuchshöhe. Im holozänen Klimaoptimum vor 9 000 bis 8 000 Jahren rückte die Baumgrenze bis ins Lenadelta vor. Dann kühlte die Region wieder ab, und die Landschaft nahm in etwa die heutige Gestalt an. Das ehemalige Flussdelta ist im östlichen Bereich weit auf den flachen Schelf der Laptewsee hinausgewachsen und besteht ausschließlich aus holozänen, inzwischen ebenfalls im Permafrost erstarrten Ablagerungen.

Langzeitmessungen an Frostmusterböden

Um die Energie- und Stoffflüsse in diesem sehr komplexen Bodensystem zu ergründen, haben Arbeitsgruppen um die Hydrologin Julia Boike vom AWI seit 1998 mehrere Messfelder installiert. Hauptziel ist, die Dynamik der sommerlichen Auftauschicht zu verstehen, die das Bindeglied zwischen der Atmosphäre und dem eigentlichen Permafrost darstellt. Bis in die 1990er Jahre gab es keine Studie zum saisonalen Wassertransport in dieser Schicht. Vor allem fehlten Untersuchungen über Flusswege, Verweilzeiten und Quellen des Wassers. Die unabhängig von befristeten Forschungsgeldern im Lenadelta ermöglichten Langzeitmessungen bieten die Chance, diese Lücke zu schließen.

Die globale Erwärmung macht sich in der Arktis besonders stark bemerkbar: Hier ist die Durchschnittstemperatur in den letzten 50 Jahren um 1,7 Grad Celsius gestiegen. Dadurch sollte sich, so die gängige Vorstellung, die Auftauschicht vertiefen und einer zunehmenden Anzahl von Mikroorganismen Gelegenheit zur Produktion von Treibhausgasen bieten. Aber die Dinge liegen offenbar komplizierter. Den Messungen im Lenadelta während der letzten 15 Jahre zufolge ist die Auftauschicht nämlich nicht dicker geworden.



O

LUTZ-SCHRÄMSTEDT ET AL. 2011

Ungeachtet gewisser zeitlicher und räumlicher Schwankungen reicht sie im Durchschnitt nach wie vor nur ungefähr 40 Zentimeter hinab.

Wie kann das sein? Die mittlere Lufttemperatur und die Nettoeinstrahlung haben sich im Verlauf der 15-jährigen Messungen kaum verändert, jedoch sind die Winter wärmer und kürzer geworden. Die Böden kühlen deshalb nicht mehr ganz so stark aus. Dadurch taut der Permafrost im Sommer tiefer auf. Aber weil das dabei geschmolzene Eis als Wasser abläuft, sinkt gleichzeitig die Landoberfläche insgesamt ab. Das könnte die gleich bleibende Dicke der Auftauschicht erklären. Allerdings fehlen bisher präzise Messungen der Höhe des Bodenniveaus, um zu prüfen, ob diese Vermutung stimmt.

Wegen seiner charakteristischen polygonalen Muster ist der Permafrostboden im Tiefland sehr heterogen (Bild unten), und die Forscher mussten ihre Messmethoden an diese kleinräumige Variabilität anpassen. Ein Messfeld erstreckt sich über ein solches Polygon, das typischerweise in der Mitte einen Tümpel hat, der von einem feuchten Randbereich und einem kleinen, trockenen Wall umgeben ist. Um die Sensoren einzubringen, heben die Forscher einen knapp zehn Meter langen und einen Meter tiefen Graben bis in den Frosthorizont durch alle drei Bereiche hindurch aus – eine schweißtreibende Arbeit. Sitten die Sensoren am vorgesehenen Ort, wird der ursprüngliche Boden vorsichtig wieder aufgefüllt (Bild S. 86). Die Messungen selbst erfolgen anschließend automatisch.

Registriert wird nicht nur die Temperatur. Inzwischen lässt sich auch der Wassergehalt der aufgetauten sowie der gefrorenen Schichten ermitteln. Dazu dient eine abgewandelte Form der so genannten Zeitbereichsreflektometrie, einer in gemäßigten Breiten oft angewandten Methode zur Bestimmung der Bodenfeuchte. Die Resultate sind interessant: Bei Minustemperaturen um 12 Grad Celsius sind je nach

Bodenbeschaffenheit noch bis zu neun Prozent des Wassers flüssig; selbst bei minus 20 Grad ist der Boden nicht komplett vereist, weil in porösen Medien der Gefrierpunkt tiefer liegt als normal. Dadurch können Mikroorganismen selbst unter Dauerfrostbedingungen überleben und einen gewissen Stoffwechsel aufrechterhalten.

Untergrund im Winter wärmer als im Sommer

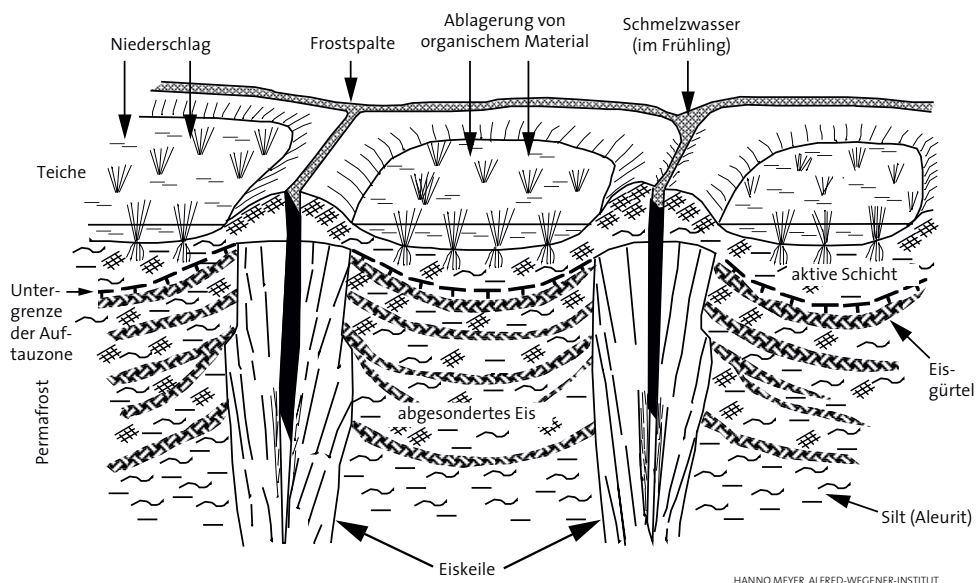
Auch wenn die Auftauschicht im Lenadelta nicht dicker wird, zeigt sich die Erderwärmung in den dauerhaft das gesamte Jahr hindurch gefrorenen Bodenbereichen: Deren Temperatur ist deutlich gestiegen. 2006 konnte auf Samoylow ein 27 Meter tiefes Bohrloch mit Messfühlern bestückt werden. Bis 2013 hat dort die Durchschnittstemperatur an der tiefsten Stelle um 0,2 und in zehn Meter Tiefe um knapp ein Grad Celsius zugenommen.

Wesentlich für den thermischen Zustand des Permafrosts ist die Schneedecke, die dem Auskühlen des Bodens entgegenwirkt. Untersuchungen dazu gab es bisher jedoch kaum. Um dem abzuwehren, nahm eine Mannschaft um den Geowissenschaftler Moritz Langer vom AWI und den Schneephysiker Martin Proksch vom Institut für Schnee- und Lawinenforschung in der Schweiz den Stationsneubau gegen alle Gepflogenheiten schon ein halbes Jahr vor der Einweihung in Dienst. Dadurch konnten die Forscher erstmals die Wärmeflüsse zwischen Atmosphäre, Schneedecke und Boden in der spätwinterlichen Tundra erkunden. Dabei bestätigte sich eine für Laien überraschende Tatsache: Der tiefe Permafrost ist im Winter wärmer als im Sommer.

Das liegt zum Teil an den schon lange bekannten isolierenden Eigenschaften von Schnee. Meist misst die Schneedecke im Lenadelta weniger als 30 Zentimeter. Dabei kann das Temperaturgefälle zwischen der relativ warmen Unterseite und dem kalten oberen Rand mehr als 20 Grad Celsius betra-



KONSTANZE PEL, ALFRED-WEGENER-INSTITUT

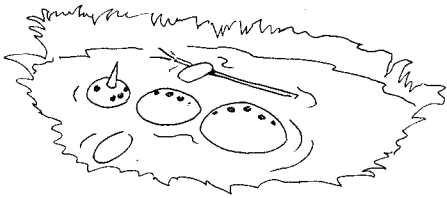


HANNO MEYER, ALFRED-WEGENER-INSTITUT

Typisch für Permafrostböden sind Polygonstrukturen mit einem Teich in der Mitte, der im Sommer auftaut. An den Rändern dieser

Strukturen befinden sich Frostspalten, an denen sich mächtige Eiskeile in die Tiefe erstrecken.

HOFFENTLICH NICHT SCHON
WIEDER EIN MAMMUT !



gen. Entsprechend steil nimmt der Wasserdampfdruck von oben nach unten zu. Von den sublimierenden Schneekristallen an der Unterseite steigt deshalb Wasserdampf auf und durchzieht den Schnee, wo er weiter oben wieder kondensiert. Als Folge davon bildet sich so genannter Tiefenreif mit zentimetergroßen »Becherkristallen«. Dazwischen sammelt sich verhältnismäßig viel Luft. Das erklärt die starke Isolationswirkung der Schneedecke, die verhindert, dass die winterliche Kälte aus der Atmosphäre in die Erde eindringt.

Hinzu kommt, dass Eis Wärme besser leitet als Wasser – und damit gefrorener Boden besser als nasser. Darum isoliert die Auftauschicht im Sommer die tieferen Bodenregionen thermisch von der aufgeheizten Atmosphäre. Was an Wärme eindringt, wird außerdem durch das Schmelzen von Eis verbraucht: Die Untergrenze der Auftauschicht behält konstant eine Temperatur von null Grad Celsius und verlagert sich nur tiefer, wenn Wärme von oben zugeführt wird. Im Winter gefriert der aufgetaute Bodenbereich wieder. Die

dabei freigesetzte Kristallisationswärme wird vor allem nach unten in den Permafrost geleitet.

Diese komplizierten Zusammenhänge zu kennen und zu berücksichtigen, ist unerlässlich für seriöse Prognosen der künftigen Freisetzung von Treibhausgasen durch tauenden Permafrost. »Wer die Schneedecke nicht versteht, hat keine Chance, etwas Gütiges über die Dynamik des Permafrostes auszusagen«, erklärt Langer. Er hat alle Faktoren, die sich auf die Energieflüsse zwischen Luft, Auftauschicht und Permafrost auswirken, in ein numerisches Wärmetransportmodell aufgenommen und damit die Entwicklung während der letzten zehn Jahre nachvollzogen. Wie gut sein Modell ist, zeigt sich etwa daran, dass die damit errechnete Temperaturkurve für den Permafrost in 2,5 und 11 Meter Tiefe fast exakt mit den im Bohrloch gemessenen Werten übereinstimmt (Diagramm S. 88). Bisherige Simulationen, die aus der Literatur entnommene Eingangsgrößen verwendeten, wie sie globalen Klimamodellen zu Grunde liegen, lieferten dagegen sehr viel ungenauere Resultate.

Mit Langers Modell ließen sich auch Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Terrassen des Lenadeltas und entlang der Flussläufe in einem Meter Tiefe ermitteln. Desgleichen ergaben sich mit einer Kombination von Satelliten- und Messdaten divergierende Werte für die jeweiligen Auftautiefen, die im Feld ja nur punktuell gemessen werden können.

Tümpel und Seen: Hotspots für Treibhausgase

In den letzten Jahren sind die unzähligen Tümpel und kleinen Seen stärker in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Sie waren bisher unzulänglich kartiert. Detaillierte Satellitenaufnahmen aus jüngster Zeit erlaubten es, das Ausmaß dieser wie Löcher im Käse über das Tiefland verteilten Wasserkörper zu erfassen. Demnach bedecken sie etwa 20 Pro-

Durch das Tauen des Permafrostes hat sich die Küstenerosion stark beschleunigt. Hier ist ein Erosionstal im eisreichen Permafrost an der Südküste der Großen Ljachow-Insel auf dem neusibirischen Archipel zu sehen.



zent des Lenadeltas. Entsprechend hoch dürfte ihr Anteil an der Energie- und Kohlenstoffbilanz sein.

Im Sommer kann man das Aufsteigen von Gasblasen im Wasser mit bloßem Auge sehen. 2011 hatte Anna Abnizova von der York University in Toronto (Kanada) bei ihren Untersuchungen im Lenadelta nachgewiesen, dass auch die kleinen Wasserkörper bedeutende Kohlendioxidquellen sind. Wie es sich mit dem Methan verhält, blieb dagegen weiter unklar. Da sich ab September auf den Tümpeln eine dicke Eisschicht zu bilden beginnt, war zu vermuten, dass die Methanproduktion über die Kälteperiode weit gehend zum Erliegen kommt. Doch jüngste Sondierungen ergaben etwas anderes. Die Analyse von Blockproben, die aus dem Eis herausgesägt wurden, ließ auf eine durchschnittliche Produktionsrate von 0,14 Gramm Methan pro Quadratmeter und Tag schließen.

Des Rätsels Lösung boten die Temperatursensoren. »Die meisten Seen gefrieren nicht bis zum Grund«, erklärt Boike, »weil aus dem Sediment Wärme ins Wasser übergeht.« In den nicht vereisten Ablagerungen am Seeboden können deshalb Mikroben unter anaeroben Bedingungen Methan produzieren. Das Gas sammelt sich während des Winters im Wasser oder diffundiert ins Eis und entweicht in die Luft, sobald der See auftaut. Während der gefrorene Boden kein Methan

mehr erzeugt, produzieren die Mikroben in den Tümpeln also weiter, und zwar fast so viel wie im Sommer. Die Seen bilden somit gleichsam Hotspots des Methanausstoßes.

Erosion und Küstenverfall

Außer dem Tauen des Permafrostes hat die Erderwärmung eine weitere bedeutende Auswirkung auf die Arktis: Sie verstärkt die durch Wasser bedingte Erosion (Bild S. 87). Dieser so genannten Thermoerosion wurde bisher kaum Beachtung geschenkt. Sie ist aber ein wichtiger Faktor für die Stoff- und Energiebilanz im Permafrost, schließlich gelangen große Mengen gebundenen Kohlenstoffs über die Erosionsrinnen in die Flüsse und ins Meer.

Diesem Aspekt widmete sich die zweite Expeditionsgruppe an der neuen Samoylow-Station unter Leitung von Anne Morgenstern. Bereits 2008 hatte das Team auf der Nachbarinsel Kurungnach eine Sturzflut gefilmt, die durch den Bruch eines Stauhindernisses ausgelöst worden war. Gewaltige Wasser- und Sedimentmassen trieben in einen Seitenarm der Lena. Das Erosionstal hat sich seither auf 30 Meter vertieft. Solche Ereignisse sind einerseits die Folge des weiträumigen Tausens von Permafrostböden, andererseits aber auch die Ursache weiterer Thermokarst- und -erosionsprozesse.

An den Küsten der Laptewsee hat sich das Tempo der Abspülung in den vergangenen 40 Jahren fast verdoppelt. Landverluste durch das Meer sind normal. Sie nehmen in Permafrostgebieten jedoch dramatische Ausmaße an, weil die Abbruchkanten nicht aus Gestein bestehen, sondern aus Sand, Ton und Schluff – Weichsubstraten, die nur im gefrorenen Zustand fest sind. Einst schützte das fast ganzjährig bis an den Ufersaum reichende Meereis die Küste. In den letzten drei Jahren zählten die Potsdamer Forscher im Schnitt aber schon 96 eisfreie Tage. Während der Herbststürme schlagen gischende Wellen gegen die 20 bis 40 Meter hohen Wände. Sie unterspülen den Sockel und graben tiefe Nischen in die Ablagerungen, worauf mächtige Sedimentpakete abstürzen.

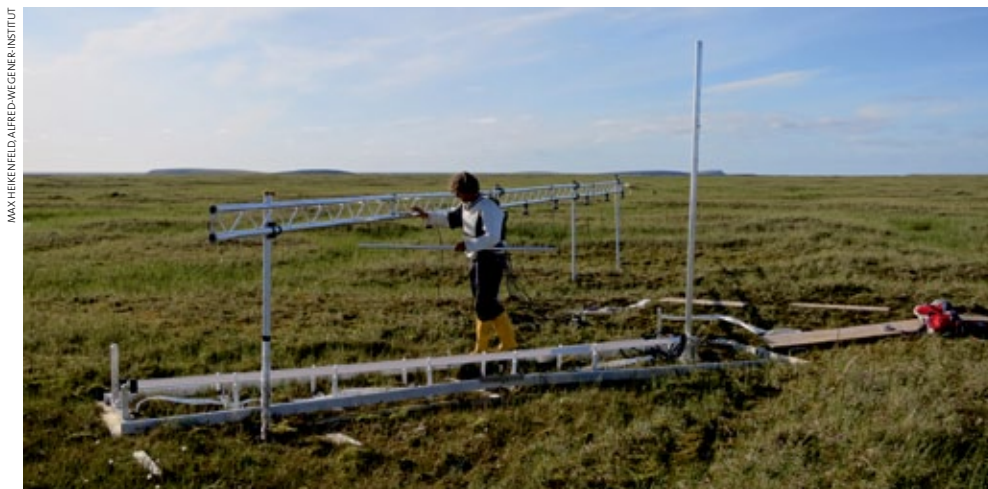
Geowissenschaftler Overduin und seine Kollegen haben 270 Kilometer der sibirischen Küste an der westlichen, zentralen und östlichen Laptewsee untersucht sowie alle verfügbaren Daten, Luft- und Satellitenaufnahmen aus den zurückliegenden 40 Jahren ausgewertet. »Während dieser Zeit zogen sich die Küstenabschnitte um 2,4 Meter pro Jahr zurück. Dieser Wert ist in den vergangenen vier Jahren um das 1,6-Fache, über große Strecken sogar um das 2,4-Fache auf dann 5,3 Meter pro Jahr gestiegen«, sagt Overduin.

Das liegt in erster Linie an der Klimaerwärmung. Vor allem die Sommer wurden immer milder. Als die Wissenschaftler im Jahr 2000 die Küstenerosion systematisch zu untersuchen begannen, stiegen die Temperaturen an 110 Tagen über null Grad Celsius, 2002 waren es schon 134 Tage. Aus den Beobachtungen ergibt sich eine lineare Korrelation zwischen Erwärmung und Küstenrückgang. Nimmt die sommerliche Durchschnittstemperatur in den arktischen Regionen um ein Grad Celsius zu, beschleunigt sich die Erosion um 1,2 Meter pro Jahr. Derzeit gelangen, abhängig vom Erosionstyp



MAX HEIKENFELD, ALFRED WEGENER-INSTITUT

An der Wand eines Grabens, der im Wall eines Polygons ausgehoben wurde, sind in verschiedenen Tiefen Sensoren angebracht, die Temperatur, Feuchte, Sauerstoffgehalt und Wärmefluss messen.



Für das Monitoring im Winter wurde ein 15 Meter langes Gerätesystem aufgebaut, das mit speziellen Sensoren Unterschiede in der Schneehöhe, Schneedichte und Temperatur in einzelnen Schichten erfasst.

und der jeweiligen Küstenstruktur, pro Jahr und Kilometer zwischen 88 und 800 Tonnen Kohlenstoff aus Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen ins Meer – Material, das zuvor im Permafrost eingeschlossen war. Bei seiner Zersetzung entsteht Kohlensäure, die zur Versauerung der Ozeane beiträgt.

Auch an den Flussläufen erodieren stabil erscheinende Hänge, wenn es im Sommer an einzelnen Tagen bis zu 25 Grad Celsius warm wird. Das konnten die Mikrobiologen selbst erleben – und davon profitieren. Als sie am Rand eines 40 Meter hohen Eiskliffs einen Sedimentkern aus dem Bohrloch ziehen wollten, riss die Bohrkronen ab: ein herber Verlust. Nach drei Wochen war das Kliff aber so weit getaut und abgebrochen, dass sich das kostbare Gerät aus dem Matsch bergen ließ.

Schwer fassbar: Der Methanausstoß

Über die Emission von Kohlendioxid (CO_2) wissen die Klimaforscher recht gut Bescheid, weil die Stoffflüsse dieses Treibhausgases seit den späten 1950er Jahren intensiv beobachtet werden. Die Extrapolation von Daten aus dem Lena-delta ergibt nach derzeitigem Stand, dass diese sehr kalte Permafrostregion zumindest im Sommer nach wie vor eine Kohlenstoffsänke ist. In der warmen Jahreszeit werden laut Messungen mit dem so genannten Eddy-Kovarianz-Verfahren durchschnittlich etwa 470 Gramm Kohlendioxid von Pflanzen durch Fotosynthese aus der Luft aufgenommen, doch nur rund 340 Gramm entweichen aus Boden und Vegetation in die Atmosphäre. Weil in der schneefreien Zeit lediglich um die 20 Milligramm Methan pro Quadratmeter und Tag ausgasen, ergibt sich insgesamt eine lokale Verringerung des Treibhauseffekts.

Wo der Permafrost weniger beständig ist als im Lena-delta, fallen die Bilanzen allerdings nicht so eindeutig aus. Für Alaska mit seinem etwas wärmeren Untergrund gibt es je nach Bodenart unterschiedliche Resultate. Unklar sind auch die Verhältnisse an den Rändern des sibirischen Permafrostes. Vermutlich entweicht dort zumindest aus Feuchtgebieten und Sümpfen mehr Kohlendioxid als in den Kernregionen, doch dafür wachsen Bäume und Sträucher, die größere Men-

gen CO_2 aufnehmen. Deshalb kann derzeit nicht eingeschätzt werden, wie die Gesamtbilanz ausfällt.

Beim Methan ist die Situation noch undurchsichtiger; denn weiträumige Emissionsmessungen sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Über viele Jahre wurde das Gas einfach mittels luftdicht abgeschlossener Hauben am Boden aufgefangen. Doch so erhält man nur punktuelle Ergebnisse. Die seit etwa zehn Jahren vermehrt eingesetzte Eddy-Kovarianz-Methode erfasst zwar Areale von mehreren Hektar, ist aber technisch sowie logistisch aufwändiger und aus globaler Sicht ebenfalls nur eine Punktmessung (Bild S. 89). »Die Methanfreisetzung aus Permafrostböden ist schlecht quantifizierbar«, konzediert einer der Autoren des aktuellen Berichts des Weltklimarats IPCC, Stefan Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Daher steht darüber auch nichts in dem Report.

Neue Einsichten erbrachte die Eddy-Kovarianz-Methode im Hinblick auf die zeitlichen Abläufe der Methanfreisetzung und die Umweltfaktoren, die diesen Vorgang beeinflussen. Wenn das Gas in den Ablagerungen aus biologischem Material entsteht, heißt das noch nicht, dass es sofort entweicht, wie einige Klimaszenarien unterstellen. Zunächst diffundiert es durch den Boden und wird dabei zum Teil oxidiert. So wandeln sich 95 Prozent des Methans in der Auftauschicht in CO_2 um. Auch kann das Gas über längere Zeit im Boden gespeichert bleiben. Wie viel letztlich freigesetzt wird, hängt dann unter anderem von den atmosphärischen Bedin-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/klimawandel



PIXABAY / GERD ALTMANN / CC0

gungen ab, was die starken Schwankungen im Methanausstoß von Tag zu Tag erklärt. »Wir mussten feststellen, dass Luftdruck und Windgeschwindigkeit an unserem Standort mit seinen zahlreichen Seen und Tümpeln im Winter eine maßgebliche Rolle spielen, und haben diese Parameter deshalb in unsere Modelle eingebaut«, sagt Torsten Sachs vom Geoforschungszentrum (GFZ) in Potsdam.

Einen kuriosen Transportweg bieten die Seggen. Die hohlen Stängel dieser Riedgräser, die in der Tundrasteppes weit verbreitet sind, führen Sauerstoff zu den Wurzeln. Im Gegenzug steigt Methan auf. Die Stängel wirken dadurch wie winzige Schornsteine für das Gas, das auf diesem Weg nicht oxidiert werden kann. Ein Team um den Mikrobiologen Dirk Wagner am GFZ stellte in Labor- und Freilandversuchen fest, dass auf bewachsenen Böden bis zu 70 Prozent des freigesetzten Methans auf diese Weise in die Atmosphäre gelangen.

Um Informationen über die großflächige Emission von Treibhausgasen in tauendem Permafrost zu erhalten, unternahm Sachs und seine Nachwuchsgruppe am GFZ Hubschrauberflüge mit einer am Seil schwebenden hochfrequent messenden Eddy-Kovarianz-Sonde über das westliche und nordwestliche Lenadelta. Dabei erfassten sie die Flüsse von CO₂, Methan und latenter Wärme. Die Daten werden derzeit noch ausgewertet. Eines aber zeigt sich schon jetzt: Der alte Eiskomplex in diesem Gebiet ist offenbar eine geringere CO₂-Senke als die jüngere holozäne Terrasse des Deltas. Ferner erwies sich, dass sich Ergebnisse von Eddy-Kovarianz-Messungen an einem ortsfesten Mast nicht ohne Weiteres auf ein größeres Gebiet übertragen lassen.

Wie im Einzelnen der organische Kohlenstoff im Permafrost in Kohlendioxid und Methan umgesetzt wird, liegt gleichfalls noch weitgehend im Dunkeln. Man kennt stam-

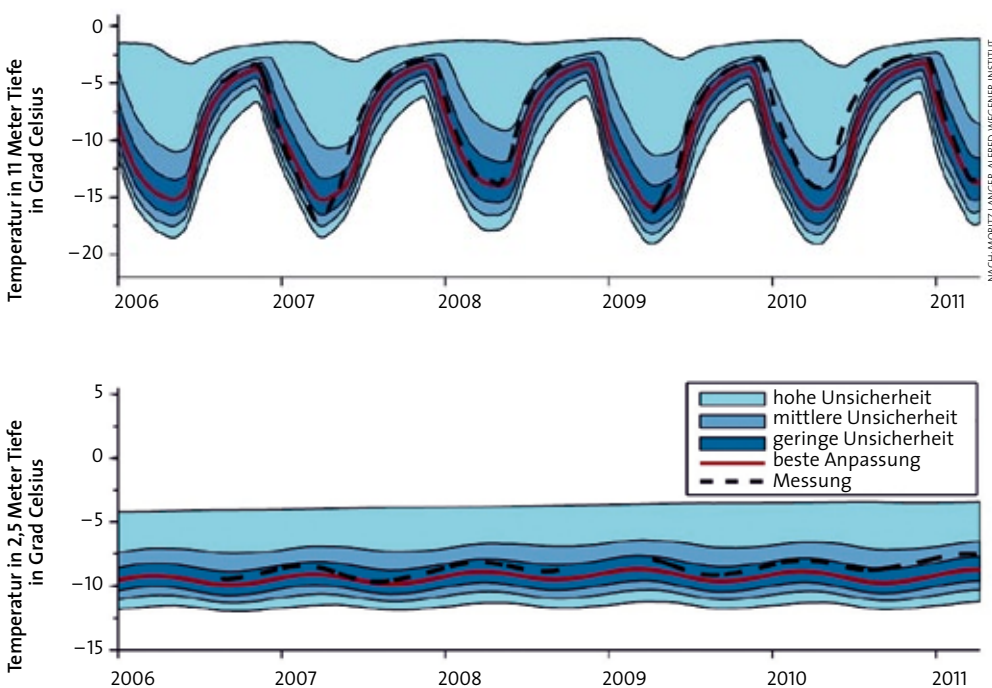
mesgeschichtlich sehr alte Lebensformen, so genannte Archaeen, die in sauerstofffreien Böden Methan produzieren und sich an die Permafrostbedingungen angepasst haben. Im gleichen Milieu leben aber auch Bakterien, die Methan zu CO₂ oxidieren. Welche das im Einzelnen sind, war bisher unklar.

Mikrobielle Superhelden

Eine Arbeitsgruppe um Wagner begann 2000 damit, das Habitat der Auftauschicht im Lenadelta zu analysieren, und stieß dann zu noch tieferen Sedimenten vor. Als Proben dienten Kerne aus einer 25-Meter-Bohrung in den Eiskomplex der Insel Kurungnach. Außerdem brachte eine Serie von Bohrungen längs einer Linie westlich des Lenadeltas bis zu 100 000 Jahre alte Ablagerungen aus einer Tiefe von 70 Metern ans Licht.

Durch DNA-Untersuchungen konnte das Team um Wagner die Arten und die Häufigkeit der Mikroorganismen in verschiedenen Klimaperioden bestimmen. So ließ sich erstmals vor Ort nachweisen, was bisher nur aus theoretischen Betrachtungen oder Laborversuchen gefolgert worden war: dass in warmfeuchten Epochen mehr Mikroben den Kohlenstoffkreislauf antreiben als in kalten. Das bestätigt die allgemeine Annahme, wonach mit dem Klimawandel die Emission von Treibhausgasen aus dem Permafrost zunehmen sollte.

Schon 2006 konnten norwegische Forscher das Methan abbauende Bakterium *Methylobacter tundripaludum* isolieren, das in der Arktis weit verbreitet ist. Wenig später identifizierte Wagner, der inzwischen am GFZ die neue Sektion Geomikrobiologie aufgebaut hatte, auch einen Produzenten von Methan und gab ihm den Namen *Methanosarcina soligelidi*, was so viel wie »im eiskalten Boden mit Methan im



Die nach einem numerischen Wärmetransportmodell des Alfred-Wegener-Instituts berechneten Temperaturen für den Permafrost in einer Tiefe von 2,5 und 11 Metern (rote Linie) stimmen sehr gut mit den Messwerten in einem Bohrloch (gestrichelte Linie) überein. Ein Vergleich mit gebräuchlichen globalen Modellen sowie mit globalen Modellen, die durch punktuelle Messungen präzisiert wurden (verschiedene Blautöne), lässt erkennen, wie die Unsicherheit eingeschränkt werden konnte.



Ein so genanntes Eddy-Kovarianz-System an einem zehn Meter hohen Turm bestimmt den Kohlendioxid- und Methanfluss im Umkreis von mehreren hundert Metern. Hier liest ein Wissenschaftler gerade die Daten aus.

Gepäck« bedeutet. Der Winzling ist unglaublich robust: Er verträgt Temperaturen zwischen minus 80 und plus 54 Grad Celsius, bildet noch im tiefsten Frost Methan, übersteht hohe Salzgehalte sowie Trockenperioden, ist weit gehend tolerant gegenüber ultravioletter oder ionisierender Strahlung und kann lange Zeit hungern. Das qualifiziert den »archaeellen Superhelden«, wie ihn die Forscher bewundernd nennen, auch als Modellorganismus für Leben auf dem Mars. Die Europäische Weltraumbehörde ESA hat deshalb ein Experiment auf der Internationalen Raumstation genehmigt, um seine Überlebenschancen unter definierten Weltraumbedingungen zu testen.

»Die Entdeckung von *Methanosarcina soligelidi* gestattet uns, die Anpassung und Interaktion von Methanbildnern und -oxidierern aus arktischen Böden zu untersuchen«, erläutert Wagner. »Darüber gab es bisher keine genauen Kenntnisse.« Wie er und sein Team festgestellt haben, existiert im Lenadelta eine große Vielfalt an Methan bildenden Organismen. Eine diverse Gemeinschaft kann aber flexibel auf Umweltveränderungen reagieren. Wenn es wärmer wird, sollte sie demnach in der Lage sein, sich an die höheren Temperaturen anzupassen. Dadurch bliebe die Methanproduktion annähernd gleich. Die Gegenspieler, die Methanoxidierer, treten dagegen nur mit wenigen Arten auf, weshalb diese Gemeinschaft nicht so flexibel ist. Bei einer generellen Erwärmung würde also vermutlich weniger von dem Gas oxidiert und somit insgesamt mehr Methan in die Atmosphäre abgegeben.

Das gilt allerdings nicht überall. In den derzeit schon wärmeren Permafrostregionen Nordamerikas fanden die Potsdamer Mikrobiologen ein Gleichgewicht der Kontrahenten vor, so dass hier die Methanemission bei weiterem Temperaturanstieg etwa auf dem heutigen Niveau verharren dürfte.

Mit einer Emissionsrate von durchschnittlich 30 Milligramm pro Quadratmeter und Tag ist das Lenadelta laut Wagner auch heute bereits eine beachtliche Methanquelle. Und im Zuge der vorhergesagten Erderwärmung wird der Methanausstoß Modellrechnungen zufolge in der Arktis insgesamt um 15 bis 25 Prozent ansteigen.

Gleichwohl ist manche früher formulierte Aussage angesichts der neueren Erkenntnisse nicht mehr haltbar – so etwa die Behauptung, wenn Permafrost auftaue, verwandle sich der enthaltene Kohlenstoff in ein, zwei Jahren in CO₂ oder Methan. Den Gegenbeweis liefert ein Langzeitexperiment, das Wagner gemeinsam mit Bodenkundlern der Universität Hamburg durchgeführt hat. Bei der Inkubation von alten, kohlenstoffreichen Permafrostablagerungen im Labor zeigte sich, dass unter anaeroben Bedingungen, bei denen das starke Treibhausgas Methan entsteht, auf 100 Jahre hochgerechnet nur 1,8 Prozent des organischen Kohlenstoffs freigesetzt werden. Unter aeroben Bedingungen, wenn sich also bei genügend Luftzutritt Kohlendioxid bildet, sind es etwa 15 Prozent. Der Kohlenstoffabbau im Permafrost bleibt in beiden Szenarien demnach ein langwieriger Prozess.

Als generelles Fazit der hier zusammengefassten aktuellen Untersuchungen lässt sich mithin festhalten, dass der tauende Permafrost die Erderwärmung zwar in der Tat beschleunigt. Aber Katastrophenszenarien entbehren einer soliden Grundlage. Den »Klimaschalter« Permafrost gibt es nicht. Nach allem, was wir wissen, vollziehen sich die Veränderungen allmählich und stetig. ~

DER AUTOR



Gert Lange ist Wissenschaftsjournalist in Berlin und hat sich auf Themen rund um die Polargebiete spezialisiert.

QUELLEN

Boike, J. et al.: Climate Permafrost and Land Cover in the Lena River Delta. In: Biogeosciences 10, S. 2105–2138, 2013

Schirrmeyer, L. et al.: Fossile Organic Matter Characteristics in Permafrost Deposits of the Northeast Siberian Arctic. In: Journal of Geophysical Research Biogeosciences 116, G00M02, 10.1029/2011JG001647, 2011

WEBLINKS

www.polarforschung.de/Inhalt/index.php?q=81
Sonderheft der Zeitschrift »Polarforschung« zum Thema Permafrost

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327780

Rechnen mit dem

In den Festplatten unserer Computer wird die merkwürdige Quanteneigenschaft der Elektronen bereits genutzt. Nun erobert sie auch seine übrigen Komponenten.

Von Jon Cartwright

An einem nebligen Tag Anfang Dezember 1943 erwachte ein Riese namens Colossus zum Leben. In Bletchley Park nordwestlich von London nahm einer der ersten Computer der Welt seine Arbeit auf – ein wahrhaft kolossales Gebilde aus zahllosen elektrischen Geräten mit Lochstreifenlesern und zugehöriger Verkabelung (Bild S. 92). Seine für damalige Verhältnisse gewaltige Rechenleistung hat Weltgeschichte geschrieben: Mit ihrer Hilfe konnten die Alliierten abgefangene Nachrichten aus dem Oberkommando der deutschen Wehrmacht in wenigen Stunden entziffern – was ihnen half, den Zweiten Weltkrieg zu gewinnen.

Wer mehr als 70 Jahre später den Nachbau der Maschine an historischer Stelle besichtigt – die Originale wurden nach dem Krieg aus Geheimhaltungsgründen zerstört –, hat größte Schwierigkeiten, in seinem Smartphone (Bild S. 93) einen Nachkommen von Colossus zu erkennen. Das Hosentaschengesetz ist nicht nur vergleichsweise winzig, sondern bringt auch die millionenfache Rechenleistung. Dennoch arbeiten beide Geräte tief in ihrem Inneren nach demselben Prinzip:

Sie verknüpfen Informationen, indem sie elektrische Ladungen bewegen – in aller Regel Elektronen.

Im Colossus hüpfen die kleinen Elementarteilchen innerhalb von tausenden Elektronenröhren immer wieder ein Stück durchs Vakuum oder wurden von anderen Elektronen daran gehindert. In modernen Computern übernehmen Abermillionen von winzigen Transistoren die Aufgabe, die Ladungsträger durchzulassen oder ihnen den Weg zu versperren.

Inzwischen wird es eng für sie – im Wortsinn. Mit zunehmender Miniaturisierung schrumpft jedes elementare Bauteil eines modernen Computerchips und damit auch die Anzahl der Ladungen, die hineinpassen. Viel weiter wird sich die Verkleinerung nicht treiben lassen, bis zufällige Schwankungen die Funktion der Transistoren beeinträchtigen (Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 90, aktualisiert in Spezial PMT 3/2013, S. 6). »Uns gehen einfach die Elektronen aus«, sagt Dan Hutcheson von VLSI Research, einer Firma, die den Technologiemarkt analysiert. Zu allem Überfluss erzeugen so viele Transistoren auf engstem Raum mehr Wärme, als man mit den besten Kühltechniken abführen kann. Hier stößt die Technologie an eine fundamentale Grenze.

AUF EINEN BLICK

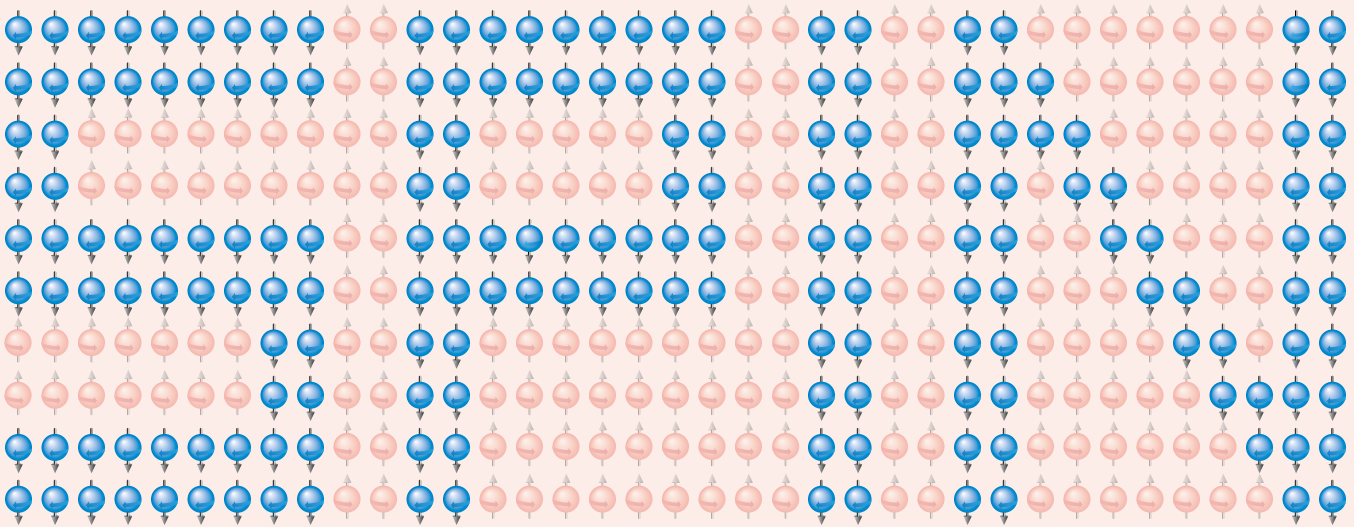
SPIN-COMPUTER

- 1 Der **Spin** ist eine quantenmechanische Eigenschaft von Elementarteilchen, insbesondere **des Elektrons**, die in der klassischen Physik einem **Eigendrehimpuls** entspricht.
- 2 Er nimmt einen von zwei Werten (**»Spin up«** und **»Spin down«**) an. Damit eignet er sich zur Realisierung eines Bits, der elementaren Einheit der Information.
- 3 **»Spin-Ventile«** lassen entsprechend diesem Wert einen Strom durch oder nicht. Sie eignen sich daher als elementare Bestandteile eines **Computerrechenwerks**.
- 4 Eine Weiterentwicklung des Spin-Ventils könnte wesentliche Eigenschaften **menschlicher Nervenzellen** nachbilden.

Pauli und das Ausschließungsprinzip

Es zeichnet sich allerdings ein Weg zur Überwindung dieser Barriere ab. Das Stichwort heißt »Spin«. Diese eigenartige Quanteneigenschaft nutzen bereits die Festplatten in neuen Computern. Nun beginnt sie, auch deren andere digitale Komponenten zu erobern, mit dem Effekt, dass die Rechner abermals kleiner, schneller und flexibler werden. Vielleicht ist die Spin-Technologie die größte Revolution der Computertechnik seit Colossus. Und möglicherweise gelingt es mit ihrer Hilfe sogar, die immer noch leistungsfähigste aller Rechenanlagen nachzubilden – das menschliche Gehirn.

Was Spin tatsächlich ist, lässt sich nicht so einfach beschreiben. Der österreichische Physiker Wolfgang Pauli



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

(1900–1958) postulierte ihn in den frühen 1920er Jahren als Quanteneigenschaft vieler Teilchen, darunter des Elektrons. Nach Paulis Ausschließungsprinzip können zwei Elementarteilchen, die sich in allen Eigenschaften (genauer: Quantenzahlen) gleichen, nicht auf engem Raum koexistieren. Da aber Elektronen mit gleichen bekannten Eigenschaften in der Hülle eines Atoms paarweise vorkommen, muss es eine weitere Eigenschaft geben, in der sie sich unterscheiden, eben den Spin.

Nicht zu verwechseln mit dem Pauli-Prinzip ist der Pauli-Effekt, nach dem die Person Wolfgang Pauli und ein funktionierendes physikalisches Experiment nicht auf engem Raum koexistieren können. Paulis Ungeschicklichkeit war berüchtigt und Gegenstand zahlreicher Anekdoten.

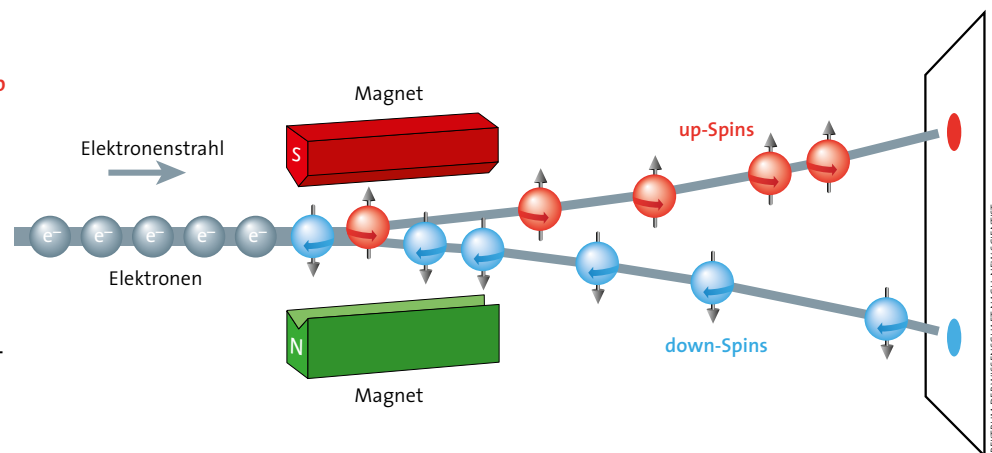
Die zunächst nur postulierte Eigenschaft ließ sich alsbald auch experimentell nachweisen (zumindest in Abwesenheit Paulis). Wenn ein Elektronenstrahl ein inhomogenes Magnetfeld durchquert, spaltet er sich auf (Bild unten). Anscheinend wird jedes einzelne Elektron nach dem Zufallsprinzip ein Stück weit in eine von zwei entgegengesetzten Richtungen abgelenkt. Da rotierenden Ladungen in einem inhomogenen

Magnetfeld genau das passiert, liegt es nahe zu vermuten, dass sich die Elektronen irgendwie um ihre eigene Achse drehen, die einen linksherum, die anderen rechts herum. Daher rührt der Name »Spin«, zu Deutsch »Drehung um sich selbst«.

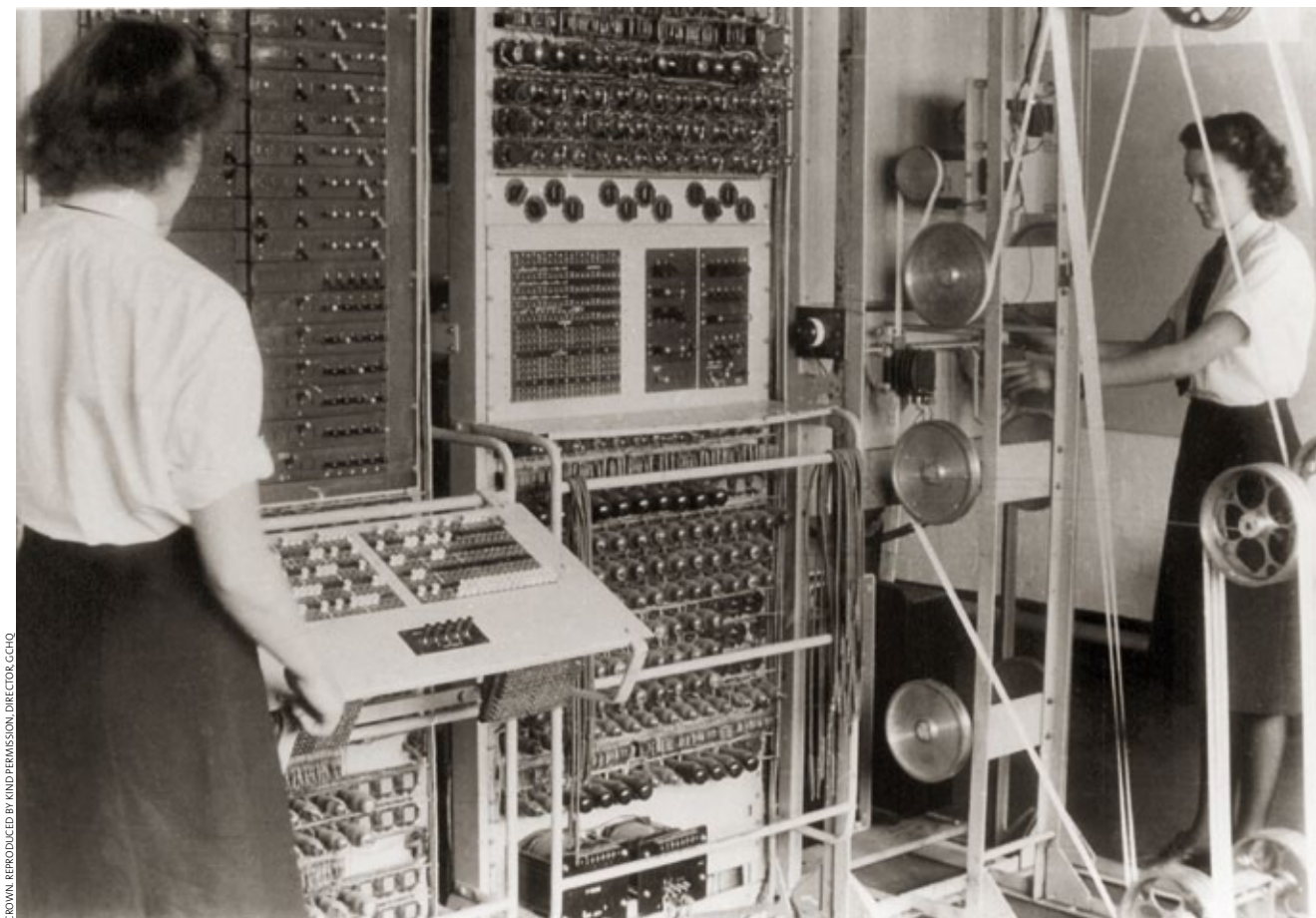
Diese Vorstellung ist hilfreich, aber auch irreführend. Eine Kugel kann sich nämlich beliebig schnell und um jede mögliche Achse drehen, während das Elektron nach Richtung wie Betrag auf die beiden Möglichkeiten eingeschränkt ist, die das Magnetfeld anzeigt. Man pflegt sie »up« und »down« zu nennen, weil die Rotationsachse des Elektrons nach einer Konvention aus der Elektrodynamik aufwärts- beziehungsweise abwärtsgerichtet zu zeichnen wäre – wenn man von einer Rotation sprechen könnte. Wäre das Elektron jedoch tatsächlich eine winzige rotierende Kugelladung, dann müsste sich seine Oberfläche mit einem Vielfachen der Lichtgeschwindigkeit bewegen, was Einsteins Relativitätstheorie widerspräche.

Wir wissen jedenfalls über den Spin, dass er sehr eng mit dem Magnetismus zusammenhängt. Ein Stück Eisen wird dadurch zu einem Permanentmagneten, dass viele seiner

Der Spin eines Elektrons ist eine quantenmechanische Eigenschaft, die zwei Werte namens **up** und **down** annehmen kann. Ein inhomogenes Magnetfeld lenkt Elektronen je nach ihrem Spin in eine von zwei Richtungen ab. Das klassische Experiment von Otto Stern und Walther Gerlach verwendete elektrisch neutrale Silberatome an Stelle der Elektronen, weil sonst die Ablenkung durch deren elektrische Ladung den Effekt überdeckt hätte.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NEW SCIENTIST



Der britische Computer »Colossus« von 1943 bezog seine Daten über Lochstreifen und verarbeitete sie mit Elektronenröhren.

Elektronen denselben Spin aufweisen und zudem an ihrem Ort fixiert sind. Setzt man das Eisenstück einem ausreichend starken entgegengesetzt ausgerichteten Magnetfeld aus, dann wechseln die Spins seiner Elektronen ihre Richtung – sie klappen um, wodurch sich der Nordpol des Magneten in einen Südpol verwandelt und umgekehrt.

Genau diese Eigenschaft macht man sich bereits heute in den Speichern unserer Computer zu Nutze. Eine Festplatte ist nichts anderes als eine rotierende Scheibe, die mit winzigen Magneten (»Bits«) bestückt ist. Die beiden unterschiedlichen Magnetisierungen entsprechen den binären Werten 0 und 1. Die in einem Bit gespeicherte Information lässt sich abrufen, indem ein »Lesekopf« darüber hinwegfährt. Dabei fällt oder steigt dessen elektrischer Widerstand je nach der Orientierung des Magnetfelds. Das löst einen Stromimpuls aus, den der Lesekopf an den Prozessor des Computers weiterleitet.

In der Frühzeit der Computertechnik war es einfach, die Kapazität eines Speichers zu erhöhen: Man mache die Bits immer kleiner, so dass entsprechend mehr von ihnen auf denselben Platz passen. Dieses Rezept geriet vor etwa zehn Jahren an seine Grenzen. Die Magnetfelder der miniatur-

sierten Bits waren so schwach geworden, dass der Lesekopf sie kaum noch zuverlässig messen konnte.

Im Jahr 1988 entdeckten Albert Fert an der Université Paris-Sud und Peter Grünberg am Forschungszentrum Jülich unabhängig voneinander einen Ausweg aus diesem Dilemma. Ein elektrischer Strom besteht aus Elektronen, die jedes für sich zufallsbestimmt den einen oder den anderen Spin tragen. Schickt man aber einen solchen Strom durch einen Magneten, dann bringt dieser die Elektronen »auf Linie«: Die Gesamtheit der Spin-Kräfte im Magneten zwingt die eintreffenden Elektronen, sich ihnen unterzuordnen, also deren Spin zu übernehmen.

Spin-Ventile

Was passiert nun, wenn der Strom durch einen Stapel aus zwei oder mehr magnetischen Schichten geleitet wird? Zunächst werden die Elektronen von der ersten Schicht ausgerichtet. Dabei verlieren diejenigen unter ihnen, die ihren Spin umkehren müssen, an Energie, was sich in einem entsprechend geringeren Strom auswirkt. Ist die zweite Schicht in derselben Richtung orientiert wie die erste, kommen die inzwischen gleichgeschalteten Elektronen dort verlustfrei durch. Hat das Magnetfeld aber die entgegengesetzte Richtung, dann zwingt es alle Elektronen, ihren Spin umzukehren, was sie sehr stark verlangsamt. Der elektrische Gesamtwiderstand des Stapels schnell also in die Höhe (Bild S. 94).



DREAMSTIME / ALEXEY BOLOIN (M)

Ein modernes Smartphone bringt ein Vielfaches der Leistung mit einem Bruchteil des Volumens. Aber das Arbeitsprinzip ist dasselbe: Die Bits der Information werden durch elektrische Ladungen realisiert.

(Spektrum der Wissenschaft 7/2009, S. 94). Aber alle diese schnellen Speichertechnologien reichen noch nicht aus für das Arbeitsgedächtnis des Computers: den RAM (random access memory, Direktzugriffsspeicher), in dem der Prozessor Informationen ablegt, die er gleich wiederverwenden will. Diese Bits bestehen aus Kondensatoren, die durch Stromimpulse ge- und entladen werden – was bis zu 200-mal so schnell abläuft wie der Zugriff auf eine Festplatte. Wie aber jeder bezeugen kann, der schon einmal beim Arbeiten am Computer durch einen Stromausfall überrascht wurde, sind alle Informationen weg, sowie der Strom abgeschaltet wird.

Traumziel ist ein Speichermedium mit der Dauerhaftigkeit einer Festplatte und der kurzen Zugriffszeit eines RAM. Und die Spin-Technik bringt uns der Erfüllung dieses Traums näher. Schon Mitte der 1990er Jahre kam die Idee vom magnetoresistiven RAM (MRAM) auf: Winzige Spin-Ventile sitzen nicht in den Leseköpfen einer Festplatte, sondern sind selbst die magnetischen Bits. Die Speicherzellen der frühen MRAMs wurden vom einen in den anderen Zustand versetzt, indem ein äußeres Magnetfeld die Spins in der untersten Schicht eines Spin-Ventils umklappte. Lesen konnte man diese Information, indem man einfach den elektrischen Widerstand des gesamten Ventils maß.

Umpolen durch Elektronenströme

Dieses Vorgehen bringt jedoch eine lästige Größenbeschränkung mit sich: Das zum Schreiben verwendete Magnetfeld lässt sich nicht auf weniger als eine gewisse Mindestbreite eingrenzen. Entsprechend können auch die Bits nicht beliebig klein werden, weil sonst das schreibende Magnetfeld auf die Nachbarbits überlappen würde. Die erste Idee zur Lösung dieses Problems kam im Jahr 1996 auf: Man verwendet zum Schreiben nicht einen Magneten, sondern einen elektrischen Strom. Den schickt man zunächst durch einen dicken Magneten, der die Spins aller frei beweglichen Elektronen auf Linie bringt. Ist dieser »spinpolarisierte« Strom stark genug, kann er die Spins in der ersten dünnen Schicht eines Spin-Ventils »überwältigen«, das heißt in die eigene Orientierung zwingen. Der Effekt heißt spin-transfer torque (Spin-Übertragungsdrehmoment), denn was einen Drehimpuls ändert, ist ein Drehmoment. Allerdings müssen die spinpolarisierten Ströme sehr stark sein – so stark, dass sie das durchflossene Material zu schmelzen drohen.

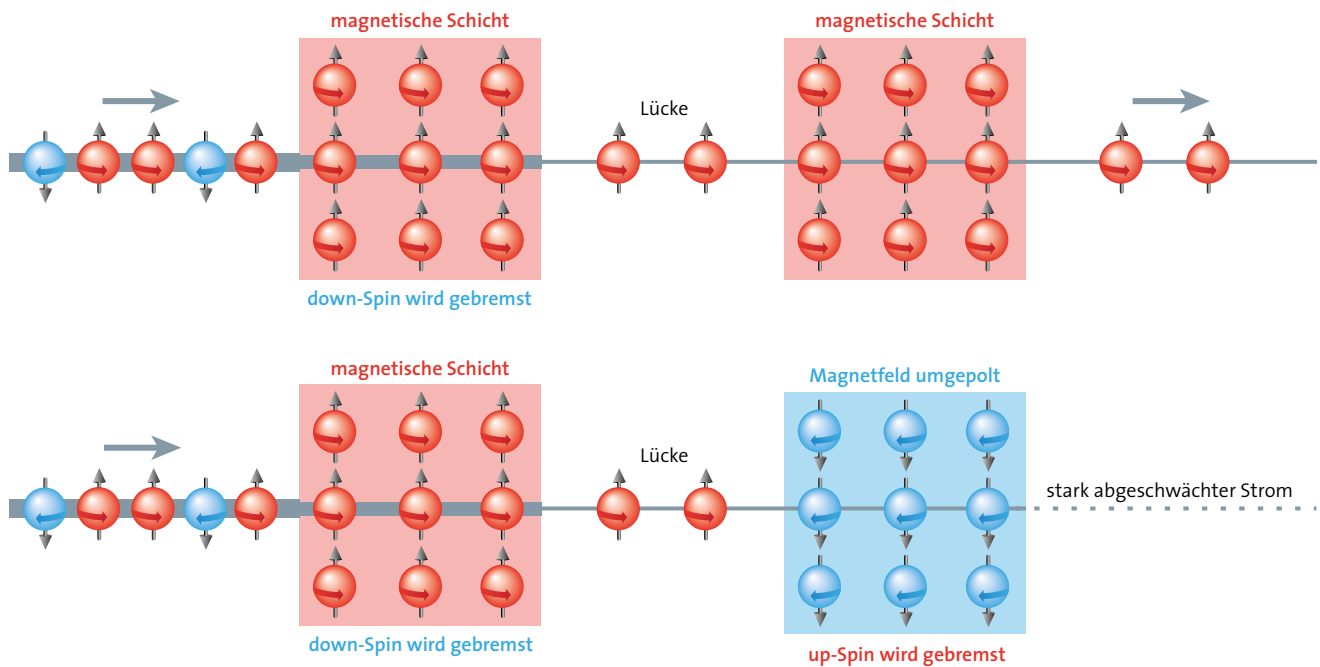
Erst kürzlich wurde diese Schwierigkeit überwunden: Die Firma Everspin aus Chandler (Arizona) hat Ende 2012 die Produktion von Spin-Torque-MRAMs mit einer Kapazität von 64 Megabyte aufgenommen. Crocus in Grenoble (Frankreich) und die zu Samsung gehörende Firma Grandis in Milpitas (Kalifornien) entwickeln andere Versionen.

Es ist nur eine Frage der Zeit, bis diese Speicher über Kapazitäten im Gigabyte-Bereich verfügen, und kein Grund in Sicht, der die Spin-Torque-MRAMs hindern könnte, die Rolle der herkömmlichen RAMs und der permanenten Datenspeicher zu übernehmen. Das würde den Elektronen den Weg zwischen verschiedenen Teilen des Computers verkür-

Innerhalb weniger Jahre nach dieser Entdeckung wurden »Spin-Ventile« entwickelt, Speicherzellen, die das beschriebene Phänomen, den GMR-Effekt (giant magnetoresistance, Riesenmagnetwiderstand), ausnutzen (Spektrum der Wissenschaft 11/2009, S. 90). Allein dadurch, dass das winzige Feld eines magnetischen Bits umklappt, verändert sich dessen elektrischer Widerstand. Mit Hilfe von Leseköpfen aus solchen Spin-Ventilen legten die Festplatten um einen Faktor 1000 an Speicherkapazität zu. Im Jahr 2007 erhielten Fert und Grünberg für ihre Entdeckung den Nobelpreis für Physik (Spektrum der Wissenschaft 12/2007, S. 18).

Diese erste Spin-Revolution war in ihrer Wirkung noch begrenzt. Magnetische Bits eignen sich zur Anwendung in Festplattenspeichern, weil sie ihren Zustand auch dann behalten, wenn der Rechner ausgeschaltet wird. Erst durch ein weiteres Magnetfeld werden sie überschrieben. Aber bis ein bestimmtes Bit unter dem Lesekopf entlangsaust und damit gelesen oder geschrieben werden kann, vergehen ein paar Millisekunden, was sich bei großen Datenmengen – zum Beispiel beim Start eines Programms – zu einer merklichen Verzögerung aufsummieren kann.

Aus diesem Grund haben die Firmen viel Zeit und Geld in die Suche nach alternativen Speichertechnologien investiert, zum Beispiel die mit elektrischen Ladungen arbeitenden »Flash«-Speicher, die in Digitalkameras, Smartphones, Tablets und zunehmend auch in Laptops eingesetzt werden



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH NEWS SCIENTIST

Ein Permanentmagnet ist ein Stück Materie, in dem viele Elektronen denselben Spin aufweisen. Diese hindern Elektronen mit entgegengesetztem Spin daran, das Material zu passieren. Das ergibt eine Art Schalter: ein Spin-Ventil.

zen und dadurch nicht nur Zeit, sondern auch Energie sparen. »Schon länger gibt es einen Trend weg von der Festplatte im PC, und das wäre vermutlich der nächste Schritt«, sagt der Physiker Del Atkinson von der Durham University in England.

Und damit wäre das Ende der Fahnenstange noch lange nicht erreicht. Wenn der Spin so gut zum Speichern geeignet ist, vielleicht kann man ihn auch für die Kernkompetenz des Computers verwenden, das Verknüpfen von Daten?

Ein heutiger Prozessor besteht aus Milliarden von Transistoren, deren Zustand durch elektrische Felder geschaltet wird. Diese Schalter sind zu elementaren Bauteilen (»Gattern«) angeordnet, die jeweils genau eine logische Operation ausführen. Ein NAND-Gatter zum Beispiel hat zwei binäre Eingänge und lässt einen Strom nur dann passieren, wenn mindestens einer der beiden null ist. Wenn Sie eine E-Mail oder einen Text schreiben, ein Video oder ein Musikstück abspielen, dann vollführen – entsprechend den Befehlen des benutzten Programms – diese Gatter jede Sekunde Millionen solcher Schaltvorgänge.

Währenddessen ändert jeder einzelne Schalter seinen Zustand vergleichsweise selten, muss aber dennoch dauernd unter Strom stehen, weil sonst sein Zustand verloren ginge. Dabei verbraucht er Energie und strahlt Wärme ab, was sich bei den heute üblichen Bauteildichten zu problematischen

Größenordnungen summiert (Spektrum der Wissenschaft 11/2013, S. 86). Das macht die Idee vom Transistor, der mit Elektronenspins an Stelle elektrischer Ströme arbeitet, so attraktiv: Einmal umgeklappt, verbleibt ein Spin ohne weitere Energiezufuhr in diesem Zustand.

Im Jahr 2007 demonstrierten Ian Appelbaum, damals an der University of Delaware in Newark, und seine Kollegen, wie Spin-Rechnen prinzipiell funktionieren könnte. Ihr Spin-Transistor verwendet sowohl elektrische als auch magnetische Felder, um einen Strom abhängig vom Wert seines Spins zu schalten. Allerdings ähnelt seine Funktionsweise noch sehr der eines klassischen Transistors. Im selben Jahr schlugen Hanan Dery, damals an der University of California in San Diego, und seine Kollegen ein anderes, potenziell leistungsfähigeres Verfahren vor. Ihr Gerät hat zwei spinpolarisierte Eingangsströme und zwei magnetische Kontakte (»Logikkontakte«), deren Orientierungen sich ändern lassen. Da-

durch entsteht sogar ein Gatter mit variabler Funktionsweise (siehe Kasten S. 96).

Das eröffnet völlig neue Möglichkeiten. Ein Gatter in einem herkömmlichen Prozessor ist unveränderlich; daher müssen die Chiphersteller von jeder Sorte ausreichend viele Exemplare bereitstellen, um die Anforderungen der unterschiedlichsten Programme erfüllen zu können. Mit Gattern, die sich selbst umschalten können, würde dieselbe Leistungsfähigkeit und Flexibilität weit weniger Hardware erfordern.

»Es ist das Prinzip der Wendejacke für Chips: Dasselbe Material erfüllt mehrere Funktionen«, sagt Behtash Behin-Aein, Ingenieur beim Computerchiphersteller Global Foundries in Santa Clara (Kalifornien), der an einem ähnlichen Ansatz arbeitet.

Die Hersteller werden sich erst mit der Spin-Logik befassen, wenn sie müssen – also bald!

Die technische Umsetzung dieser Konzepte wird noch große Anstrengungen erfordern. Insbesondere ist bislang der Elektronenstrom, der aus einem Gatter herauskommt, so schwach, dass er verstärkt werden muss, um als Eingangsstrom im nächsten Gatter seine Wirkung tun zu können. Transistoren leisten diese Verstärkung quasi nebenbei; für die Spin-Logik wird man sich etwas Neues ausdenken müssen. Das dürfte für die Hersteller von Hard- und Software nicht die oberste Priorität besitzen; denn sie haben derart hohe Summen in die konventionelle Technologie investiert, dass sie erst davon abrücken werden, wenn diese an ihre physikalischen Grenzen stößt. Aber das wird nach den gängigen Prognosen in ungefähr zehn Jahren der Fall sein.

Echtes Denken mit dem Spin

Einige Physiker denken schon weiter. Wenn die Spin-Revolution erst einmal ausgebrochen sei, könne sie vielleicht dazu dienen, den flexibelsten Computer der Welt nachzubauen: das menschliche Gehirn. Dessen elementare Bauteile, die Neurone, unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von den Gattern eines gewöhnlichen Computers. Insbesondere haben sie viele Eingänge, und diese können nicht nur die Werte 0 und 1, sondern sozusagen auch alles dazwischen annehmen. Ein Neuron stößt ein Ausgangssignal immer dann aus, wenn die Summe der Eingänge einen gewissen Schwellenwert überschreitet. Überdies sind sie lernfähig, das heißt, sie ändern ihre Eigenschaften abhängig von den Signalen, die sie verarbeiten.

Bislang pflegen die Forscher diese Eigenschaften – und gewisse Strukturen echter Gehirne – in so genannte neuronale Netze einzubauen. Dieses schon einige Jahrzehnte alte Kon-

zept hat in letzter Zeit spektakuläre Erfolge eingefahren, und zwar im Wesentlichen nicht durch neue Ideen, sondern durch massive Erhöhung der Anzahl der Bauteile (»deep learning«, siehe auch Spektrum der Wissenschaft 9/2014, S. 62). Der Chiphersteller Qualcomm aus San Diego (Kalifornien) baut nach diesem Prinzip »neuromorphe Chips«. Und in der Tat schlagen sich mit diesem Gerät ausgestattete Roboter überraschend gut bei Aufgaben wie Sprach- und Mustererkennung, die ein Mensch leicht und ein üblicher Computer nur äußerst mühsam bewältigt. Aber auch der neuromorphe Chip ist – wie praktisch jedes neuronale Netz – bislang noch ein gewöhnlicher Chip, ausgestattet mit einem Programm, welches das Verhalten eines Neurons mit konventionellen Mitteln nachbildet.

Die Physikerin Julie Grollier von der Unité Mixte de Physique in Palaiseau bei Paris, einer gemeinsamen Einrichtung der Forschungsgemeinschaft CNRS und des Industrieunternehmens Thales, hält diesen Weg für eine Sackgasse. Man benötigt nämlich Dutzende von Transistoren, um ein einzelnes Neuron wiederzugeben, und noch einmal so viele für eine einzelne Synapse. Selbst wenn es gelänge, all diese Komponenten auf engem Raum unterzubringen, hätte man es wieder mit der größten Bedrohung der Rechentechnik zu tun: der Überhitzung.

Im Jahr 2011 legten Grollier, ihr ehemaliger Doktorvater Albert Fert und andere einen Gegenentwurf vor: den Spin-Memristor (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 86, aktualisiert in Spezial PMT 3/2013, S. 48). Der elektrische Widerstand dieses Bauteils lässt sich mit Hilfe eines Spin-Stroms auf einen beliebigen Wert einstellen. Damit ist er eine Weiterentwicklung eines Spin-Ventils, bei der es nicht

Das Spin-Handy

Spinpolarisierte Ströme können, quasi als Nebentätigkeit, auch Funkwellen für das mobile Telefonieren erzeugen. Der Mikrowellensender hätte nur ein Tausendstel des bisher benötigten Volumens und wäre auf die Frequenz jedes Netzbetreibers abstimmbar.

Schickt man einen Elektronenstrom mit einheitlichem Spin in ein magnetisches Material, so versucht er, dessen Spins auf Linie zu bringen. Gibt man ihm dafür nicht genug Zeit, dann kippen die Spins des Materials nicht vollständig um, sondern beginnen – in einem gewissen quantenmechanischen Sinn – zu rotieren. Wenn man eine geeignete Folge solcher kurzen Elektronenpulse in das Material sendet, geraten dessen Spins in Schwingungen und strahlen dabei Energie bei Mikrowellenfrequenzen ab.

Ein zweiter elektrischer Strom, durch dasselbe Material geschickt, kann dessen »Trägheit« verändern. Die Spins reagieren also mehr oder weniger bereitwillig auf den ersten Strom, was sich in einer Veränderung der Frequenz äußert, ebenso wie ein System aus Masse und Schraubenfeder langsamer schwingt,

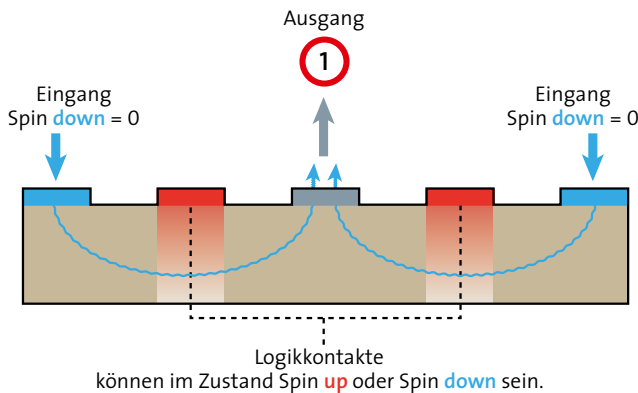
wenn man die Masse vergrößert. Im Jahr 2012 führten der Ingenieur Kang Wang und seine Kollegen an der University of California in Los Angeles ein Spin-Ventil vor, das Mikrowellen mit 0,28 Mikrowatt abstrahlte; das kommt der Energie, die für mobile Geräte benötigt wird, schon ziemlich nahe. Innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre könnten solche Spin-Ventil-Oszillatoren in Smartphones eingebaut werden.

Auch das Festnetz und vor allem das Internet könnten von der neuen Technik profitieren. Die Laserlichtimpulse, mit denen man aktuell Signale für die Glasfaserübertragung kodiert, werden von hin- und herschwingenden Elektronen erzeugt. Das ist einer der Faktoren, welche die Übertragungsrate für Informationen auf etwa 50 Gigahertz begrenzen. Im Jahr 2011 zeigten Nils Gerhardt und seine Kollegen an der Ruhr-Universität Bochum, dass man Laserlicht durch Umklappen von Elektronenspins erzeugen kann, und zwar mit fast der dreifachen Frequenz eines konventionellen Lasers, was die für das Internet verfügbare Bandbreite innerhalb der nächsten zehn Jahre dramatisch erhöhen könnte.

Schaltbare Schalter

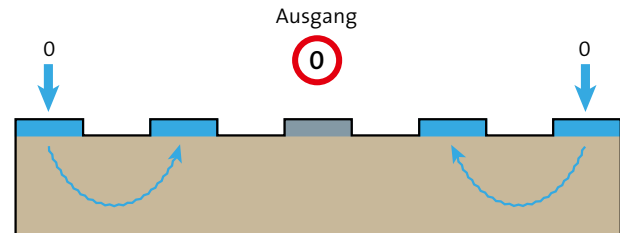
Die Funktionsweise eines logischen Gatters, das mit Spins arbeitet, kann im laufenden Betrieb verändert werden. Hierbei nutzt man das Prinzip, dass ein spinpolarisierter Strom – wie jeder elektrische Strom – bevorzugt den Weg des geringsten Widerstands wählt.

Wenn einer der Logikkontakte die zum Eingangsstrom entgegengesetzte Spin-Orientierung hat, zieht dieser es vor, zum



Ausgang zu fließen. Daraus folgt: Wenn beide Logikkontakte im Zustand Spin up sind, arbeitet der Schalter als NAND-Gatter, das heißt, er liefert einen Ausgangsstrom nur, wenn mindestens einer der Eingänge 0 (Spin down) ist.

Werden die Logikkontakte auf Spin down umgestellt, entsteht ein OR-Gatter: Ein Ausgangsstrom fließt nur, wenn mindestens einer der Eingangsströme 1 (Spin up) ist.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH NEW SCIENTIST

nur die Zustände »ein« oder »aus« gibt, sondern auch jeden dazwischen.

Ein Spin-Memristor könne als Synapse fungieren, sagt Grollier, wobei sein einstellbarer Widerstand dem synaptischen Gewicht entspricht. Das ist der Faktor, der die Stärke des über die Synapse vermittelten Signals bestimmt und der sich beim Lernen verändert. Als Neurone kämen andere Typen von Spin-Ventilen in Frage, die über dickere magnetische Schichten verfügen und deshalb erst schalten, wenn der eingehende Spin-Strom eine gewisse Stärke überschreitet.

»Diese Spin-Bauteile entsprechen fast eins zu eins biologischen Neuronen und Synapsen«, sagt Kaushik Roy, Ingenieur an der Purdue University in West Lafayette (Indiana). Im September 2013 zeigte er mit seinen Kollegen Mrigank Sharad und Deliang Fan in einer Simulation, dass Spin-Neurone lediglich ein Prozent der Wärme erzeugen, die bei herkömmlicher Technologie anfallen würde. Damit wäre ein großes Hindernis für die praktische Realisierung eines gehirnähnlichen Computers überwunden.

Bislang hält sich Roy allerdings zurück mit einer Prognose, wie nahe ein neuromorpher Spin-Computer dem echten Gehirn kommen kann. »Er tut eben nicht dasselbe wie das Gehirn«, sagt er. »Vor allem wissen wir gar nicht so genau, was das Gehirn tut.«

Sicher ist jedoch, dass sich der Spin nach vorsichtigen Anfängen inzwischen seinen Weg in jede Komponente unserer elektronischen Geräte bahnt. Wir stehen erst am Anfang der Spin-Revolution – und niemand kann heute schon sagen, wohin sie uns einmal führen wird. »Die Zeit war einfach reif dafür«, sagt Hutcheson. »Jedenfalls nimmt jetzt plötzlich alles gewaltig Fahrt auf.« ~

DER AUTOR



Jon Cartwright ist Wissenschaftsjournalist in Bristol (Großbritannien).

QUELLEN

- Behin-Aein, B. et al.:** Computing with Spins and Magnets. In: MRS Bulletin 39, S. 696–702, 2014. <http://arxiv.org/abs/1411.6960>
- Dery, H. et al.:** Spin-based Logic in Semiconductors for Reconfigurable Large-scale Circuits. In: Nature 447, S. 573–576, 2007
- Gerhardt, N. et al.:** Ultrafast Spin-induced Polarization Oscillations with Tunable Lifetime in Vertical-cavity Surface-emitting Lasers. In: Applied Physics Letters 99, 151107, 2011
- Sharad, M. et al.:** Spin Neurons: A Possible Path to Energy-Efficient Neuromorphic Computers. <http://arxiv.org/abs/1309.3303>
- Zhongming Zeng et al.:** High-Power Coherent Microwave Emission from Magnetic Tunnel Junction Nano-oscillators with Perpendicular Anisotropy. In: ACS Nano 6, S. 6115–6121, 2012

WEBLINKS

<http://julie.grollier.free.fr/memristors.htm>
Julie Grollier über Spin-Memristoren und bio-inspired computing
www.technologyreview.com/featuredstory/526506/neuromorphic-chips/
Neuromorphic Chips. Hauptartikel aus »MIT Technology Review«

© New Scientist
www.newscientist.com

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1327782



Martin Neukamm (Hg.)

Darwin heute
*Evolution als Leitbild in
 den modernen Wissenschaften*

WBG, Darmstadt 2014

270 S., € 49,95

EVOLUTIONSTHEORIE

Grundpfeiler des empirischen Weltbilds

Die Evolutionstheorie ist ein Leitprinzip der Wissenschaft – und das nicht nur in der Biologie, wie dieser Band überzeugend darlegt.

Was hat Darwins Evolutionstheorie, inzwischen mehr als 150 Jahre alt, mit uns zu tun? Sind die Ideen des englischen Naturforschers noch aktuell? Welche Rolle spielen sie in der modernen Wissenschaft? Diesen Fragen geht das vorliegende Buch nach. Renommiertere Autoren erörtern darin, inwiefern der Evolutionsgedanke die Welt verstehen hilft.

Insgesamt acht Beiträge erklären die Bedeutung von Darwins Ideen für Philosophie, Kosmologie, Molekularbiologie, Biochemie, Medizin und Verhaltensbiologie. Zusammen umreißen sie wesentliche Teile des heutigen empirischen Weltbilds. Das macht den Band zu einem wertvollen Übersichtswerk. Zentrale wissenschaftliche Befunde, so die Botschaft des Buchs, lassen sich ohne Evolutionstheorie überhaupt nicht verstehen und erklären.

Der erste Beitrag zeigt auf, wie sehr Darwins Werk die Philosophie befruchtet hat. Auch wenn der Naturforscher selbst sich kaum zu philosophischen Themen äußerte, sind seine Ideen für alle philosophischen Teilgebiete bedeutsam. Die Auseinandersetzung mit der Evolutionstheorie hat zahlreiche neue Disziplinen hervorgebracht, etwa die evolutionäre Erkenntnistheorie, die evolutionäre Ethik, die evolutionäre Ästhetik, die evolutionäre Logik und die evolutionäre Metaphysik. Leser, die

in Philosophie wenig bewandert sind, bekommen in dem Abschnitt einige Grundlagen dieser Wissenschaft vermittelt.

Es folgt ein Beitrag über Kosmologie, geschrieben unter anderem von dem bekannten Astrophysiker Harald Lesch. Gut verständlich legt dieses Kapitel dar, wie Wissenschaftler sich heute die Entstehung des Universums aus einer Quantenfluktuation heraus vorstellen. Auch die kosmische Inflation sowie die Strukturbildung im Weltall werden anschaulich behandelt. So interessant dieser Abschnitt freilich ist, es erschließt sich nicht recht, was die Geschichte des Universums mit darwinscher Evolution zu tun hat. Schließlich setzt die letztere drei Dinge voraus: Vermehrung mit Vererbung, Variation und Selektion.

Näher am Thema ist der nächste Beitrag, der sich mit evolutionärer Entwicklungsbiologie befasst. Er hilft das verblüffende Phänomen zu begreifen, dass sich die Embryonalstadien unterschiedlichster Tierarten ähneln. Der mutmaßliche Grund dafür: Ursprüngliche (also stammesgeschichtlich alte) Prozesse der Embryonalentwicklung bleiben in allen Spezies weit gehend erhalten, weil ihre grundlegende und abrupte Änderung die Embryonalentwicklung massiv stören würde. Interessierte Leser erfahren in dem Zusammenhang einiges über homöotische

Gene, Genkopplung und den Gestaltungsspielraum der Evolution.

Spannend präsentiert sich auch der Abschnitt über chemische Evolution. Hier geht es darum, wie organische Substanzen – etwa Amino- und Nukleinsäuren – auf der jungen Erde entstanden sein könnten. Natürlich beschreiben die Autoren das berühmte Miller-Urey-Experiment, mit dem sich nachweisen lässt, dass unter den Bedingungen der postulierten Uratmosphäre zahlreiche jener Moleküle entstehen, aus denen sich Lebewesen zusammensetzen. Die Autoren befassen sich aber auch mit den vielen Abwandlungen dieses Experiments sowie mit der spontanen Bildung organischer Substanzen an »Schwarzen Rauchern« (Tiefseequellen) und in vulkanischen Schloten. Zudem legen sie faszinierende Erkenntnisse darüber vor, wie sich der genetische Kode im Zuge der Evolution allmählich herausgebildet hat.

Leser, die keine Scheu vor Mathematik haben, werden auch Kapitel 6 interessant finden, das in die mathematische Modellierung evolutionärer Prozesse einführt. Solche Simulationen machen unter anderem begreiflich, warum es in der biologischen Evolution niemals nur einen einzigen »optimalen Bauplan« gibt, der alle anderen verdrängt. Stattdessen evolvierten erfolgreiche Baupläne stets in eine Schar von Varianten, eine so genannte Quasispezies.

Weitere Beiträge behandeln die evolutionäre Grundlage verschiedener Lebensstrategien und legen dar, was Medi-

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Mehr Rezensionen
finden Sie unter:
[www.spektrum.de/
rezensionen](http://www.spektrum.de/rezensionen)



ziner aus der Evolutionstheorie lernen können. Dabei geht es unter anderem um die Frage, warum wir altern. Der körperliche Verfall im Alter, so das Fazit, ist keineswegs unausweichlich; vielmehr sieht unser »genetischer Betriebsplan« vor, dass unser Körper irgendwann den Selbsterhalt einstellt. Eine Lebensdauer von hunderten oder tausenden Jahren wäre wohl nicht grundsätzlich unmöglich. Derart langlebige Organismen werden aber von der natürlichen Selektion nicht begünstigt – unter anderem deshalb, weil es sich evolutionär auszahlt, Reproduktionsvorteile in der Jugend auf Kosten der Fitness im Alter zu erkaufen, das auf Grund äußerer Gefah-

ren ohnehin meist nicht erlebt wird. Das Buch schließt mit einer Betrachtung dessen, ob sich aus der Evolutionstheorie ethische Normen herleiten lassen, und verbindet diese Überlegungen mit intelligenter Religionskritik.

»Darwin heute« überspannt ein so breites Themenspektrum, dass man es als umfassendes Kompendium der heutigen Wissenschaft ansehen kann. Die Beiträge sind von Fachautoren verfasst und entsprechend forschungsnah, detailliert und tiefgründig. Das macht den Band zur anspruchsvollen, manchmal anstrengenden Lektüre. Die Texte enthalten umfangreiche Literaturlisten und zahlreiche Fußnoten,

mitunter auch hilfreiche Glossare. Insbesondere jene Kapitel, die sich mit Philosophie befassen, konfrontieren den Leser aber weit gehend hemmungslos mit schwer zu verstehender Fachsprache. Streckenweise häufen sich Rechtschreibfehler.

Trotz dieser Mängel überzeugt das Werk durch seinen enormen fachlichen Gehalt. Ein empfehlenswertes Buch für alle Interessierten, das seinen Lesern allerdings einige Vorkenntnisse und Durchhaltevermögen abverlangt.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Richard Elwes

**Das Chaos im Karpfenteich oder
Wie die Mathematik unsere Welt regiert**

Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg 2014

464 S., € 16,99

MATHEMATIK

Der Name ist Programm

Ein mathematisches Sammelsurium mit Anlaufschwierigkeiten.

Das vorliegende Werk enthält 35 Beiträge, die unterschiedliche Anwendungen von Mathematik im Alltag und in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen beschreiben. Zum Teil weisen sie aufeinander, sind aber gleichwohl unabhängig voneinander lesbar. Der Buchtitel spielt auf Beitrag 14 an, der sich mit rekursiv definierten Folgen und ihrer Anwendung bei Räuber-Beute-Problemen beschäftigt.

Autor Richard Elwes, Jahrgang 1978, ist in Deutschland bisher noch nicht durch Veröffentlichungen in Erscheinung getreten. Auf seiner Homepage erfährt man, dass er einen Mathematik-Lehrauftrag an der University of Leeds

(England) hat. Einige Beiträge von ihm erschienen in populärwissenschaftlichen Zeitschriften wie dem »New Scientist«, außerdem hat Elwes mehrere Mathematiksbücher in englischer Sprache verfasst.

Für den ersten Abschnitt, also den Einstieg des Buchs, hat der Autor ein merkwürdig sprödes Thema ausgewählt: die verschiedenen Stufen des Wissens. Eine Entscheidung, die sich nicht recht nachvollziehen lässt. Elwes beschreibt hier, dass Personen mitunter gewisse (Er-)Kenntnisse über andere Personen haben, aber nicht wissen, ob diese wissen, dass die jeweils anderen diese Kenntnisse haben. Der Autor ver-

deutlicht das an einem klassischen Beispiel: Einige Gäste eines Banketts haben Speisereste im Gesicht, was sie selbst nicht bemerken, die anderen aber wohl. Aus Höflichkeit weist niemand die Betroffenen auf ihren Makel hin; stattdessen schlägt der Butler so lange auf einen Gong, bis ihnen die Peinlichkeit auffällt und sie sich säubern. Im zweiten Teil des Kapitels geht Elwes etwas sprunghaft zum Prinzip des »bayesianischen Updatens« über, welches er allerdings so kurz behandelt, dass viele Leser ratlos zurückbleiben werden – es sei denn, sie berücksichtigen einen Hinweis des Übersetzers Carl Freytag und ziehen ein anderes Buch zu Rate, das kürzlich im gleichen Verlag erschien und ebenfalls von Freytag ins Deutsche übertragen wurde. Der Abschnitt endet mit einem kurzen Ausflug in die Logik (oder Unlogik) des Marktes, bei dem ebenfalls reichlich Fragen auftauchen, die aber in einem späteren Beitrag beantwortet werden.

So mancher Leser wird bei der Lektüre dieser ersten Seiten versucht sein, das Buch enttäuscht beiseitezulegen. Ihm sei gesagt, dass die Mehrzahl der folgenden Kapitel erheblich leichter lesbar und inhaltlich interessanter ist. Sie befassen sich mit Fragestellungen, die in der Chemie, Astronomie, Physik oder Informatik eine wichtige Rolle spielen. Ihre Reihenfolge entspricht

keinem erkennbaren Prinzip; diese »Unordnung« unterstreicht das Anliegen des Autors, das breite Spektrum mathematischer Anwendungen aufzuzeigen.

Chemie-Interessierte werden mit Sicherheit Gefallen an dem Beitrag über Baumstrukturen und atomare Netze

Im Gesamteindruck nimmt sich das Werk überzeugender aus als nach der Lektüre einzelner Beiträge, die isoliert nicht immer sehr ergiebig erscheinen

finden. Technikliebhaber wiederum erfahren, was die Fluchtpunkte in Kunstwerken mit der Orientierung von Robotern im Raum zu tun haben. Man findet Passagen, die sich mit dem Problem gerechter Wahlen beschäftigen, und andere, die erläutern, worauf Computergrafiker achten müssen. Auch spricht der Autor die Nützlichkeit von Gruppentestverfahren an, ebenso wie Me-

thoden der Wettervorhersage, die Bedeutung des Simplex-Algorithmus im Kontext der ökonomischen Optimierung oder die Abstände von Knoten in sozialen Netzwerken. Ein Beitrag befasst sich mit Börsenspekulation, Hedgefonds, Derivaten und Ähnlichem und erklärt das Thema spannend und

verständlich am Beispiel der Spekulationsblase auf dem holländischen Tulpenmarkt um das Jahr 1636.

Viele Leser dürfte überraschen, wie vielfältig sich mathematische Methoden einsetzen lassen: nicht nur in den Naturwissenschaften, der Informatik und Technik, sondern auch in der Ökonomie, Soziologie und Philosophie. Im Gesamteindruck nimmt sich das Werk jeden-

falls überzeugender aus als nach der Lektüre einzelner Beiträge, die isoliert nicht immer sehr ergiebig erscheinen.

Ein Stichwortverzeichnis am Ende erleichtert das Auffinden bestimmter Themen, was wegen der unübersichtlichen Struktur des Buchs auch notwendig ist. Mitunter versucht der Autor, anhand einfacher Beispielrechnungen die Mathematik etwas konkreter werden zu lassen – es gelingt ihm jedoch nicht durchweg. Für erhebliche Irritation sorgt zudem, dass das Buch keinen einzigen konkreten Literaturhinweis enthält. Möchte der Leser mehr über die einzelnen Themen erfahren, ist er auf Internetsuchmaschinen angewiesen. Alles in allem ein zwar interessantes Buch, aber mit deutlichen Mängeln.

Heinz Klaus Strick

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

ANZEIGE



Dolce Vita – mal anders

Auf den Spuren ganz normaler Bürger im antiken Rom

Wo vergnügte sich der einfache Römer, welche Feste feierte er, ja, wie lebte er überhaupt? Sklavenmärkte und Gladiatorenkämpfe gehörten ebenso zum Alltag wie die Inanspruchnahme von Liebediensten. Der Leser begleitet eine römische Ärztin in die germanische Provinz und lernt Verblüffendes über die römische Badekultur, die Kunst des Aquäduktbaus und die wenig zarte Praxis der Heiratsanbahnung. Und er erfährt, dass auch die Lichter im Alten Rom ihr eigenes Geheimnis hatten ...

Karin Schlott (Hrsg.)
Brot und Spiele
Alltag im Alten Rom
148 Seiten, 96 Farb-Abbildungen
Kartoniert
€ 19,80 [D]
ISBN 978-3-515-10172-1

www.steiner-verlag.de

Franz Steiner Verlag

Franz Steiner Verlag · Birkenwaldstraße 44 · 70191 Stuttgart · Telefon 0711 2582 341 · Fax 0711 2582 390 · Mail service@steiner-verlag.de

Alle Preise inklusive MwSt. [D], sofern nicht anders angegeben. Lieferung erfolgt versandkostenfrei innerhalb Deutschlands.



Rainer Elkar, Katrin Keller, Helmuth Schneider

Handwerk: Von den Anfängen bis zur Gegenwart

Theiss, Darmstadt 2014. 224 S., € 49,95

»Handwerk stirbt nie« – diesen Satz des römischen Schriftstellers Titus Petronius (um 14–66) setzen die Autoren an den Anfang dieses lehrreichen Buchs, und es gelingt ihnen, seine Gültigkeit bis in unsere Tage nachzuweisen. Auf rund 200 Seiten schlagen sie einen Bogen vom ersten Faustkeil bis zu den modernen Handwerksberufen. Dass dieser Streifzug durch hunderttausende Jahre der Geschichte an der Oberfläche bleiben muss, ist den Verfassern durchaus bewusst. Sie verstehen ihr Werk denn auch eher als Anregung zu einer »lesenden und schauenden Auseinandersetzung« mit dem Thema. Und das leistet ihr reich bebildertes und hochwertig verarbeitetes Buch in der Tat. Schade, dass ein übersichtliches Literaturverzeichnis fehlt und die weiterführende Literatur nur in den Anmerkungen auftaucht. Trotzdem lässt sich der Band allen Interessierten empfehlen.

THOMAS TRÖSCH



Susan Middleton

In den Tiefen des Ozeans – Die schillernde Welt der Wirbellosen

Knesebeck, München 2014. 254 S., € 49,95

Sieben Jahre lang nahm die Tierfotografin Susan Middleton an wissenschaftlichen Expeditionen im Pazifik teil und machte faszinierende Aufnahmen von Einsiedlerkrebse, Seegurken und anderen Wirbellosen. In diesem Bildband setzt sie die Tiere vor weißem oder dunklem Hintergrund gekonnt in Szene. Einen Plattwurm etwa hat sie mehrere Stunden beobachtet, bis sich das Tier spektakulär zu bewegen begann – der perfekte Moment, um auf den Auslöser zu drücken. Der Band gliedert sich in fünf Kapitel, jedes eingeleitet von einem kurzen und leicht verständlichen Text, der systematische und evolutionäre Hintergründe erklärt. Sodann folgen Bilder, die allerdings in keinem erkennbaren Zusammenhang zum zuvor Geschriebenen stehen. Dennoch gewährt das Werk einzigartige Einblicke in eine Welt, die nicht nur Laien weit gehend unbekannt ist: Allein während das Buch entstand, wurden in den Tiefen des Ozeans zwei neue Arten entdeckt.

ANNA KLINGER



Rudolf E. Lang

Sehen: Wie sich das Gehirn ein Bild macht

Reclam, Stuttgart 2014. 175 S., € 16,95

Rudolf E. Lang war Professor für Physiologie und Pathophysiologie an der Universität Marburg und arbeitet jetzt als freier Autor in München. In seinem Buch geht er der visuellen Wahrnehmung auf den Grund. Er schildert bahnbrechende Experimente aus der Hirnforschung und erläutert, welche Zellen und Strukturen am Sehen mitwirken, wie sie aufgebaut sind und funktionieren. Als Rahmenhandlung dient ihm ein fiktiver Besuch des Gemäldes der Mona Lisa im Louvre. Das Buch beginnt damit, dass sich das Bild dem Betrachter präsentiert, und endet in dem Moment, in dem es in seinem Bewusstsein auftaucht. Inhaltlich ist Lang ein sehr fundiertes Werk gelungen. Leider liest es sich etwas mühsam und kann sich obendrein nicht recht entscheiden, ob es Fach- oder Lesebuch sein möchte. Das Gleichnis des Louvre-Besuchs, das der Autor immer wieder heranzieht, wirkt auf Dauer etwas bemüht und lockert die Aneinanderreihung von Fakten und Empirie nur bedingt auf.

RUTH LACHMUTH



Philip Würfel

Unter Strom – Die neuen Spielregeln der Stromwirtschaft

Springer Spektrum, Wiesbaden 2015. 188 S., € 19,99

Warum lagern Energiekonzerne die Geschäftsbereiche mit nuklear-fossiler Stromerzeugung aus? Ab welchem Strompreis wird die Energiewende unpopulär? Wie viel demokratische Mitgestaltung verträgt die Energieversorgung? Philip Würfel prüft alle Verfahren der Stromgewinnung auf Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit. Dabei erweist er sich als sachlicher, unvoreingenommener Autor, der verständlich und engagiert schreibt. Seiner Ansicht nach ist die Energiewende eine zentrale Herausforderung für Politik und Wirtschaft – und birgt durchaus die Gefahr des Scheiterns. Würfel zeigt auf, wie der Umbau trotzdem gelingen kann. Er behandelt wissenschaftliche Grundlagen der Energieversorgung, diskutiert ethische und umweltpolitische Aspekte und befasst sich mit interessanten Nebenthemen wie virtuellen Kraftwerk und Schwarmstrom.

JÜRGEN SCHARBERTH



Bruno P. Kremer
Kiwi, Kaffee, Kardamom
Exotik frisch auf den Tisch
Hirzel, Stuttgart 2015
290 S., € 39,-

NUTZPFLANZEN

Wo der Pfeffer wächst

Ein Botaniker führt uns zu den Ursprüngen der beliebtesten Obst- und Gemüsesorten.

Bananen kommen aus Ecuador, Tee stammt aus Indien, und die meisten Kakaobäume wachsen im Westen Afrikas. Aber woher importieren wir die Erdnüsse für den Brotaufstrich? Worin unterscheiden sich Mandarine, Clementine und Pomeranze? Und wie sieht die Ananaspflanze aus?

In seinem Buch »Kiwi, Kaffee, Kardamom« lädt Bruno Kremer den Leser zu einer kulinarischen Entdeckungsreise ein. Er widmet sich den Herkunfts- und Anbauregionen von 123 Pflanzenarten, deren Früchte, Samen, Sprossachsen oder Wurzelknollen wir verzehren. Was gängige Bezeichnungen wie »Beere«, »Nuss« oder »Schote« im botanischen Sinn bedeuten, fasst Kremer in einer allgemein verständlichen Einleitung zusammen. Hier erfährt der Leser unter anderem, dass Johannisbeeren eine Traube bilden, Weinbeeren hingegen eine Rispe – und dass die Walnuss eigentlich keine Nuss ist, sondern zu den Steinfrüchten zählt.

Der Hauptteil des Buchs präsentiert sich sehr übersichtlich. Von *Actinidia chinensis*, besser bekannt als »Kiwi«, bis zur Weinrebe *Vitis vinifera* widmet der Autor jeder Nutzpflanze zwei bis drei Seiten. Zuerst erscheinen Farbfotos des jeweiligen Gewächses, dann kommen Absätze mit Informationen, etwa zur Botanik oder zur landwirtschaftlichen Verwendung. Schließlich erklärt Kremer die Herkunft der Pflanzennamen und rückt verbreitete Missverständnisse gerade. So gehört der

Cayennepfeffer nicht zu den Pfeffergewächsen, sondern wird aus den Früchten einer Paprikaart gewonnen. Auch auf die berühmte Frage, warum die Banane krumm ist, liefert er eine Antwort: Der trichterförmige Blütenstand gibt die Richtung vor, in die die Früchte wachsen. Bei einigen Obst- und Gemüsesorten gibt der Autor nützliche Tipps für deren Anbau oder präsentiert Rezepte zum Ausprobieren.

Kremer, der am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität zu Köln lehrt und zahlreiche Sach- und Lehrbücher veröffentlicht hat, bemüht sich durchweg um Sachlichkeit. Informationen, die Anlass zum Diskutieren geben könnten, lässt er beiseite. So erfährt man nichts darüber, dass nutzbare Pflanzenteile vielerorts in harter Arbeit von Kindern geerntet werden oder dass der Anbau einiger Pflanzen zu ökologischen Problemen führt. Für kritische Konsumenten bietet das Buch daher keine Orientierung. Auch vermisst man Informationen zur wirtschaftlichen Bedeutung der wichtigsten Handelspflanzen.

Insgesamt präsentiert sich »Kiwi, Kaffee, Kardamom« als aufschlussreiches und ansprechend gestaltetes Nachschlagewerk für Obst- und Gemüseliebhaber. Mit knapp 40 Euro hat es allerdings einen stolzen Preis.

Maren Emmerich

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Stuttgart.

JAHRGANGS- CD-ROM 2014



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

So erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/recherche

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.de

Verwachsung am Knochen

Die Trinksitten der Bewohner Nord-europas wiesen Forscher mit modernen Methoden anhand von Grabbeigaben nach, berichtete die Archäologin und Archäobotanikerin Annine Fuchs. (»Met & Co. – Alkopops bei den Nordmännern«, Januar 2015, S. 62)

Ingo Buchsteiner, Heubach: Auf Seite 62/63 ist das Foto einer Frauenleiche (Juellinge-Grab) zu sehen. Darauf sieht man zirka zehn Zentimeter proximal des rechten Kniegelenks eine Verwachsung am Oberschenkelknochen. Handelt es sich dabei um eine schlecht verheilte Fraktur, Osteomyelitis oder ein Sarkom? Gibt es hierzu nähere Informationen? Im Internet habe ich nichts dazu gefunden.

Antwort der Redaktion:

Die Autorin hat sich auf der Homepage des Nationalmuseums umgesehen. Demnach handelt es sich bei der von Ihnen bemerkten Verwachsung um einen gutartigen Tumor. Mit der Todesursache hat er nichts zu tun; diese ist bislang ungeklärt.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

Leben wir innerhalb eines Ereignishorizonts?

Am Anfang war ein Schwarzes Loch in einem höherdimensionalen Universum, postulierten die Physiker Niyesh Afshordi, Robert B. Mann und Raziye Pourhasan. (»Das Schwarze Loch am Beginn der Zeit«, Februar 2015, S. 40)

R. Göhring, Hofheim/Taunus: Sowohl in dem Einstein-de-Sitter- als auch im Lambda-CDM-Modell lässt sich zeigen,

dass die (zeitlich veränderliche) Hubble-Sphäre dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs der gesamten Masse/Energie innerhalb der Hubble-Sphäre entspricht. Im Einstein-de-Sitter-Modell legt man die kritische Massendichte zu Grunde, im Lambda-CDM-Modell die baryonische, die Dunkle Materie und das Massenäquivalent der Dunklen Energie; die Friedmann-Gleichungen liefern dann die zeitliche Entwicklung für die Hubble-Sphäre beziehungsweise den Ereignishorizont. Dieses Ergebnis steht aber in keinem Zusammenhang mit dem im Artikel beschriebenen Ereignis des Ursprungs des Universums.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

oder per E-Mail: leserbrieue@spektrum.de

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

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser
Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Dr. Gerhard Trageser;
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

Assistentin des Chefredakteurs: Ann-Kristin Ebert

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: Michaela Butler, Dr. Markus Fischer, Dr. Andreas Nestke, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

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 GmbH (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: DE52600100700022076708, BIC: PBNKDE33

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

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Annette Freistühler, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-1322

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preislise Nr. 36 vom 1.1. 2015.

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: © 2015 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für 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 Flore, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



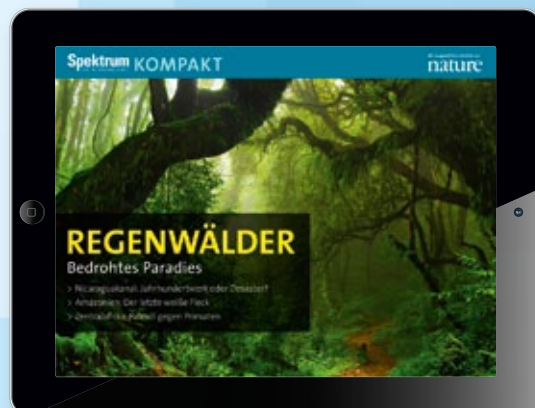
Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT: Spektrum KOMPAKT

In den **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen finden Sie alle wichtigen Informationen zu einem bestimmten Themenkomplex als PDF-Download.

€ 4,99
je Ausgabe



Diese und weitere Kompaktausgaben erhalten Sie unter:
www.spektrum.de/kompakt

QR-Code per
Smartphone
scannen!



GIB MIR DEINE HAND

VON EMILY ECKART

Die deaktivierten Roboter standen aufrecht in Käfigen. Ich wanderte unter rotem Licht durch die Reihen, auf der Suche nach dem einen Gesicht, das mir etwas bedeutete. Sie stand hinten. Ihre angenehmen Züge fielen auf; die anderen Roboter hatte man absichtlich hässlich gestaltet.

»Rosalind«, flüsterte ich, als könnte ich eine Antwort erwarten. Aber nur mein Atem und das leise Sirren des Lichts waren zu hören. Ihr angenehmes Summen, beruhigend wie ein Herzschlag, war verstummt. Sie war vollständig deaktiviert worden, ihr Gedächtnisspeicher gelöscht.

Selbst in abgeschaltetem Zustand behielt ihr Gesicht den Anflug eines rätselhaften Lächelns. Das war also bloß ihr Standard-Gesichtsausdruck – nicht ein Lächeln, das, wie ich geglaubt hatte, nur mir galt.

Ich traf Rosalind eine Woche nach der Flucht der Terroristen, als die Stadt mit glitzernden Trümmern übersät war. Der Kommandant stellte unserer Einheit die Roboter vor. Sie glichen beiden Geschlechtern und allen Rassen, waren aber alle hässlich – mit eng beieinanderstehenden Augen, seltsam geformten Nasen und Warzen.

»Ihr werdet diese Roboter zur Durchsichtung von Gebäuden verwenden, die von den Terroristen aufgegeben wurden«, sagte er. »Ihre Außensensoren können die Dämpfe von acht verschie-

denen Sprengstoffen entdecken sowie Nervengifte und andere chemische Waffen. Auf diese Weise riskieren wir keine Menschenleben.« Er wies jedem Soldaten einen Roboter zu. Als er zu mir kam, war kein Roboter mehr übrig.

Er nahm mich beiseite. »Es gibt noch einen Roboter der früheren Generation. Kein ideales Modell, aber sie sind zu teuer, um sie wegzuworfen. Wir meinen, du kommst damit klar.«

Er führte mich in einen anderen Raum. Der Roboter trug Jeans und ein T-Shirt mit V-Ausschnitt. Ihre Haut hatte die Farbe eines Sojagetränks mit Kaffeegeschmack. Ihre Augen waren groß und grün.

»Das ist RL38501X. Wir bestellten menschenähnliche Roboter, nachdem Studien gezeigt hatten, dass Soldaten am besten mit Maschinen arbeiten, zu denen sie eine Beziehung aufbauen. Aber diese Generation war zu attraktiv. Die Leute wurden abhängig. Letztes Jahr folgte ein Mann seinem Roboter in ein Gebäude mit Sprengfalle und starb.«

Der Roboter lächelte mich an. Ihr freundlicher Gesichtsausdruck erinnerte mich an meine Mutter, die zusammen mit dem Rest meiner Familie bei der Bombenserie von 2032 umgekommen war.

»Das ist eine Maschine«, sagte er. »Denk daran.«

Während ich im SmartCar an den Stadtrand fuhr, machte RL38501X in ihrem abgeriegelten Heckabteil Kon-

versation. »Sind Sie aus dieser Gegend?«, fragte sie.

»Nein. Wurde 2033 hierher zum Militär versetzt.«

»Wie gefällt es Ihnen?«

Ich zuckte die Achseln. »Manchmal ist es einsam.«

»Das ist traurig. Niemand sollte sich einsam fühlen.«

Am Kontrollpunkt ließ ich sie aussteigen. Bloß eine Maschine, schärfte ich mir ein. Sie sollte eine verdächtige Lagerhalle nach Novichok-Nervengift durchsuchen. Während ich wartete, ertappte ich mich dabei, mich um sie zu sorgen. Bleib heil, RL... Wer konnte sich die Seriennummer merken? RL soll für einen Namen stehen, beschloss ich. Und wusste ihn auch sofort: Rosalind.

Während andere Roboter explodierten oder von giftigen Chemikalien kontaminiert wurden, lief Rosalind monatelang ohne Zwischenfall. Wir wurden näher an die Kampffront versetzt. Zu unserem ersten Jahrestag fuhr ich sie auf den Hügel über der neuen Stadt. Wir schauten über die Ruinen, die mit Müll und Trümmern übersäten Straßen. Im Morgenlicht sah der glitzernde Schutt fast schön aus – wenn man vergaß, was er bedeutete.

»Deine Hand ist wie meine«, sagte Rosalind. Ich hatte mich gefragt, wann sie das bemerken würde. Meine Linke war eine Prothese. Ich hatte dieselbe dünne Linie auf dem Handrücken wie

sie, die gleichen Titangelenke unter künstlicher Haut.

»Ich verlor meine echte Hand bei einem Unfall.« Auf der Flucht aus meiner belagerten Heimatstadt. Ich war auf die Straße gestürzt, und ein führerloses SmartCar hatte mir die Hand zerquetscht.

Rosalind runzelte ihre Stirn. »Was ist eine echte Hand? Ist die nicht echt?« Sie berührte meine Prothese. Ein elektrischer Schlag sprang zwischen uns über, scharf und grell, viel lebhafter als die schwachen Empfindungen, an die ich gewöhnt war.

»Au!« Ich fühlte mich schuldig, sobald ihr Gesicht Schmerz ausdrückte. Ich ergriff ihre Rechte mit meiner Linken. Sie lächelte. Wortlos sahen wir zu, wie die Sonne über der Stadt aufstieg.

Mir war nicht wohl bei dem gedrun- genen Betonbau, den Rosalind diesmal überprüfen sollte. Die zerbrochenen Fenster klafften wie fehlende Zähne im Grinsen eines Übeltäters.

Während ich wartete, überlegte ich, wohin ich sie an diesem Abend ausführen sollte. Ich hatte sie unter dem Vorwand von Wartungsarbeiten zwei Näch- te pro Woche aus dem Roboterlager- raum kommen lassen. Bisher hatten wir einer Mozart-Sinfonie gelauscht und uns einen Truffaut-Film angeschaut. Sie hatte noch nie die Sterne gesehen.

Ich spähte durch die Windschutz- scheibe hinaus und fragte mich, wann

sie zurückkäme. Es dauerte länger als üblich. Mein Kopfhörer meldete einen Anruf.

»Dein Roboter wurde kontaminiert. Kehre sofort zur Basis zurück.«

»Kontaminiert? Wie?«

»Ein neuer Bakterienstamm, den die Terroristen genetisch manipuliert ha- ben. Extrem resistent gegen alle be- kannten Antibiotika.«

»Aber ich kann nicht einfach weg- fahren ...«

»Kehre sofort zur Basis zurück. Dein Roboter wird den BioLabs zur Analyse überstellt und sicher entsorgt. Dir wird morgen ein neuer zugewiesen.«

Die Entsorgungsfabrik lag fünf Mei- len von der Basis entfernt, aber durch den Adrenalinschock verging die Fahrt wie im Flug. Ich schlich ins Gebäude und fand sie in einen Käfig gepfercht, reglos, abgeschaltet. Durch die Gitter- stäbe ergriff ich die schlaffe Hand und zog sie an mich. Ihre Silikonhaut fühlte sich glatt und kalt an.

Mit der Rechten schraubte ich erst meine Prothese ab, dann ihre linke Hand. Rasch verband ich sie mit mei- nem Stumpf. Mein Atem ging schnel- ler, als ich Rosalind verließ. Fühlte ich ein Jucken in meiner Brust, wurde mir bereits schwindlig? Würde ich bald sterben? Es war mir egal. Ein Teil von ihr gehörte nun zu mir, im Guten wie im Schlechten. Ohne Rosalind hatte ich doch niemanden auf der Welt. 🌌

DIE AUTORIN

Emily Eckart studierte Musik und engli- sche Literatur an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts). Ihre Texte erscheinen auch in »Potomac Review« und »Literary Orphans«. Mehr über ihre Arbeit unter: www.emilyeckart.com

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 517, S. 406, 15. Januar 2015

Die ersten Sterne

Rund 380 000 Jahre nach dem Urknall begann für das Universum eine »dunkle Ära«. Erst nach einer Milliarde Jahren wurde es lichtdurchlässig, und die ersten Sterne begannen zu strahlen. Diese Supersterne waren vermutlich millionenfach größer als unsere Sonne und bildeten gigantische Schwarze Löcher oder Supernovae.

ADOLF SCHALLER: STSCI / NASA



Kampf gegen Ebola

Fieberhaft arbeiten Experten an Medikamenten und Impfstoffen gegen das gefährliche Virus. Deren Wirksamkeit zu erproben, ist allerdings schwierig – schon weil es die Voraussetzungen kaum erlauben, aussagekräftige Tests an genügend großen Personenzahlen durchzuführen.

Schwimmende Einzeller und Nanoroboter

Pantoffeltierchen und Spermien treiben sich durch synchronisiertes Schlagen ihrer Flimmerhärchen durchs Wasser. Die Einzelheiten dieser Bewegung sind inzwischen so gut durchschaut, dass man sie als Antrieb für Nanoroboter verwenden kann.



JACOPO PASOTTI

Trotz der Karakorum der Klimaerwärmung?

Während weltweit die Gletscher schrumpfen, scheinen sie in einem der höchsten Gebirge der Erde auf dem Vormarsch zu sein. Was ist der Grund dafür – oder trügt der Eindruck? Aufschluss gab jüngst eine Expedition in die Region.



HELMUT FISCHLINGER

Archaeopteryx – wie die Federn fliegen lernten

Ein neues Fossil zeigt: Der Urvogel konnte besser fliegen als gedacht. Doch seinen Vorfahren dienten ihre Federn und »Flügel« zunächst nur zum Impornieren.

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

JETZT BESTELLEN:
DAS SPEKTRUM-DER-WISSENSCHAFT-ABO
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



**1. »Meine kurze Geschichte«
von Stephen Hawking**

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

JAHRES- ODER GESCHENKABO

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10 % günstiger gegenüber dem Normalpreis. Weitere Vergünstigungen unter: www.spektrum.de/aboplus

+ WUNSCHGESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

+ PÜNKTLICHE LIEFERUNG:

Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



**2. LOOI-Taschenset »Pop-Prism«
und »Artists Moon«**

In diesen beiden Taschen findet alles seinen Platz; zudem gibt es für kleinere Dinge eine Innentasche. Die Taschen sind jeweils bis zu 20 kg belastbar und können zusammengefoldet werden.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



20 Jahre
Georg von Holtzbrinck
Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2015

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

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

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis für Bewerber, die Jahrgang 1986 oder jünger sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit je 5.000 EUR dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 EUR dotiert.**

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

Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2015 mit 3 Beiträgen (Print) bzw. 2-3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

KONTAKT

**Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group**

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

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

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Sprecher der Unternehmensleitung,
Boehringer Ingelheim GmbH

ULRICH BLUMENTHAL

Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

PROF. DR. ANGELA FRIEDERICI

Direktorin, Max-Planck-Institut für
Kognitions- und Neurowissenschaften

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Wissenschaftsgemeinschaft
Gottfried Wilhelm Leibniz e. V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER

Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR

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

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

nature

Spektrum
DER WISSENSCHAFT



www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis