

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SERIE »MEDIZIN
DER ZUKUNFT«

Gezielte Gen-
therapie dank
CRISPR/Cas9

SEPTEMBER 2015

KERNPHYSIK

Einheitliches Modell
beschreibt Atomkerne

PHYTOLITHE

Pflanzenreste begeistern Palä-
ontologen – und Kriminalisten!

LEBEN AUF DER ERDE

Der kosmische Ursprung
des irdischen Wassers

Feuerkugeln im All

Überraschende
Quanten-
phänomene
am Rand
Schwarzer
Löcher

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



THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT: Spektrum KOMPAKT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung: Schnell, verständlich und informativ!

€ 4,99
je Ausgabe



Diese und weitere Kompaktausgaben erhalten Sie unter:
www.spektrum.de/kompakt

QR-Code per
Smartphone
scannen!





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Rehabilitation des Atomkerns

Der Atomkern genießt einen zweifelhaften Ruf. Kaum jemand verbindet mit dem Begriff noch positive Assoziationen; eher wenige Forscher dürften sich heute uneingeschränkt und selbstbewusst als Kernphysiker bezeichnen – man nennt sich dann doch lieber Teilchenphysiker. Vor einem halben Jahrhundert war das noch anders, wie ich von meinem Vater weiß. Er war nämlich genau das: ein Kernphysiker, und zwar am »Kernforschungszentrum Karlsruhe«. Dieses heißt natürlich, dem allgemeinen Anti-Atomkern-Trend folgend, schon lange nicht mehr so. 1995 wurde es zunächst in »Forschungszentrum Karlsruhe – Technik und Umwelt« umgetauft; inzwischen ist es Teil des »Karlsruher Instituts für Technologie«. An die – im doppelten Sinne – strahlende Vergangenheit mit ihrer Erforschung kernphysikalischer Grundlagen und Entwicklung von Verfahren im Zusammenhang mit der Kernenergie erinnert also nicht mehr viel.

Dabei ist der Atomkern ein faszinierendes Objekt, über das wir immer noch viel zu wenig wissen. In ihm wirken drei der vier fundamentalen Naturkräfte; er weist Quanteneigenschaften auf, gleichzeitig interagieren hier zwar viele verschiedene Partikel – aber leider nicht so viele, dass man ihnen mit statistischen Methoden beikommen könnte. Diese Faktoren machen aus der Erforschung von Atomkernen eine so schwierige, aber gleichzeitig auch reizvolle Aufgabe, wie zwei französische Experten ab S. 42 aufzeigen. Hierbei haben Forscher skurril anmutende Eigenschaften entdeckt, etwa dass manche Kerne Flüssigkeiten gleichen und andere Ähnlichkeiten mit Molekülstrukturen aufweisen. Hoffentlich wird in Zukunft diesem zentralen Baustein der Materie wieder die nötige Aufmerksamkeit zuteil, um ihm seine letzten Geheimnisse zu entreißen.

Ein schlechten Ruf hat auch Plastik, das uns vor große Abfall- und Entsorgungsprobleme stellt. Eklatant ist die zunehmende Verschmutzung der Weltmeere mit Plastikmüll. Die riesigen, in Ozeanwirbeln treibenden Kunststoffansammlungen sind seit Jahren dokumentiert. Allerdings ist das nur ein kleiner Teil der gesamten Menge, die in die Umwelt gelangt. Unser Artikel ab S. 70 geht der Frage nach, wo der Rest eigentlich landet und welches Unheil er dabei anrichtet.

Andererseits weisen solche Polymere genau jene flexiblen Eigenschaften auf, die für eine neue Generation an Gerätschaften wesentlich sind. Wie der Maschinenbauprofessor Sridhar Kota ab S. 76 beschreibt, können biegsame, elastische Komponenten in vielen Fällen eine Aufgabe leichter, besser und billiger erledigen als die bisherigen, die kompliziert aus vielen kleinen, starren Einzelteilen zusammengesetzt sind. Wie der Atomkern hat also auch Plastik Licht- und Schattenseiten. Die Aufgabe verantwortungsvoller Wissenschaft ist es, erstere zu fördern und letztere zu minimieren.

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der theoretische Physiker **Joseph Polchinski** versucht, Ideen aus der Stringtheorie auf die Physik Schwarzer Löcher anzuwenden. Das hat dramatische Konsequenzen (S. 34).



Um mehr über frühe menschliche Kulturen zu erfahren, untersucht der Archäologe und Anthropologe **Thomas C. Hart** von der University of Texas haltbare mikroskopische Einschlüsse in Pflanzen – »Phytolithe« –, die auf die damaligen Lebensbedingungen schließen lassen (S. 28).



Ist Willensfreiheit bloß eine Illusion, wie manche Neurowissenschaftler meinen? Ab S. 60 argumentiert der Philosoph **Eddy Nahmias**: Mitnichten, wir sind keine biochemischen Automaten.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Was einen Schrei zum Schrei macht • Fullere im All • Wie Muscheln sich Perlenrollen • Unsere Vorfahren waren keine Baumbewohner • Pentaquarks entdeckt • Temponeurone im Gehirn

9 Bild des Monats

Blick auf Pluto

10 Forschung aktuell

Moby Dicks Boombox

Die Riesennase des Pottwals dient zur Lautgebung

Schwere Atome

Ionisierungsenergie von Lawrencium bestimmt

Indoeuropäisch

Die Ursprache kam aus der pontischen Steppe

Kurzsichtigkeit – die neue Pandemie

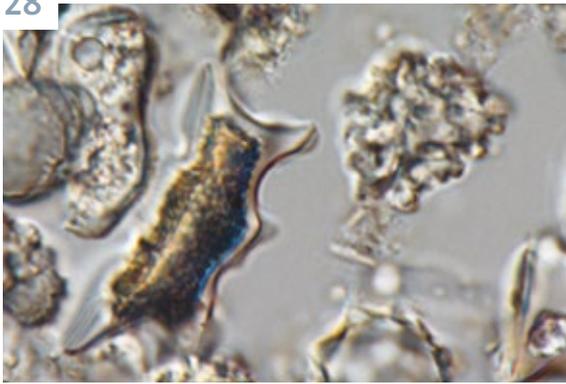
Forscher decken auf, warum Myopie weltweit auf dem Vormarsch ist

SPRINGER'S EINWÜRFE

Wächst uns die künstliche Intelligenz über den Kopf?

Bedrohung durch autonome Kampfmaschinen

28



MIT FRDL. GEN. VON CAROLINE A. E. STRÖMBERG UND REGAN E. DUNN

50



RON MILLER

60



SIMON PRADES

BIOLOGIE & MEDIZIN

SERIE »DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT« TEIL 5

► 22 Gezielter Eingriff ins Erbgut

Eine neue Methode namens CRISPR/Cas9 revolutioniert die Gentechnik – und bald wohl auch die Medizin.

Margaret Knox

► 28 Winzige Zeugen der Vergangenheit

Phytolithe – Kieselsäurepartikel aus Pflanzen – liefern Paläontologen, Archäologen und Kriminalisten wertvolle Aufschlüsse.

Thomas C. Hart

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

40 Das Rätsel von Mpemba

Warum gefriert eine warme Flüssigkeit schneller als eine kalte? Möglicherweise liegt das an Strömungsbewegungen.

H. Joachim Schlichting

► 42 Zwischen Flüssigkeit und Kristall

Atomkerne können die unterschiedlichsten Formen annehmen. Nun beginnen Physiker damit, die Vielfalt in ein einheitliches Modell zu fassen.

Jean-Paul Ebran und Elias Khan

► 50 Als die Meere vom Himmel fielen

Neue Entdeckungen befeuern die Debatte über die Herkunft des Wassers auf der Erde.

David Jewitt und Edward D. Young

MENSCH & KULTUR

60 Wie frei ist der Mensch?

Neue Resultate der Bewusstseinsforschung belegen: Der Mensch ist kein biochemischer Automat.

Eddy Nahmias

► TITELTHEMA

SINGULARITÄTEN

34 Die Feuerwand am Horizont

Joseph Polchinski

Was geschieht am Rande eines Schwarzen Lochs? Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik antworten darauf grundverschieden. Will man die Widersprüche auflösen, ergeben sich bizarre Szenarien. Möglicherweise endet an einer Energiebarriere sogar der Raum selbst!

70



NOAA

76



GREG RUFFING

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

64 Die Mathematik des Origami

Papierfalten ist auch eine geometrische Konstruktionsmethode – und sogar mächtiger als Zirkel und Lineal.

Jean-Paul Delahaye

ERDE & UMWELT

70 Der lange Weg des Plastikmülls im Meer

Plastik, wohin man sieht: Manche Orte im Ozean gleichen Müllhalden. Dabei schwimmt hier nur ein Teil unserer Abfälle. Wo landet der große Rest?

Daniel Lingenhöhl

TECHNIK & COMPUTER

76 Flexible Maschinen aus einem Guss

Am Stück gefertigte biegsame Geräte könnten heutige Maschinen schon bald vorsintflutlich erscheinen lassen.

Sridhar Kota

84 Wissenschaft im Rückblick

Vom Mäusefangen zum Antimaterie-Antrieb

86 Rezensionen

Christian Kreiß: Gekaufte Forschung • Paul M. Cobb: Der Kampf ums Paradies • Nick Reimer: Schlusskonferenz • Ralf Bürklin: Sie sind wieder da • Melvyn Little: Antikörper in der Krebsbekämpfung u. a.

94 Leserbrief/Impressum

96 Futur III

J.J. Roth: Firewall ums Herz

98 Vorschau

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

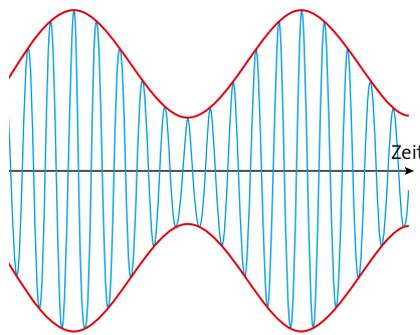
KOMMUNIKATION

Was einen Schrei zum Schrei macht

Ein gekreischter Hilfeschrei macht uns hellwach und zieht sofort die Aufmerksamkeit auf sich. Aber warum? Ein Team um David Poeppel vom Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik in Frankfurt hat nun festgestellt: Schreie weisen starke Amplitudenmodulationen zwischen 30 und 150 Hertz auf, weshalb wir sie als rau empfinden. Eine normale Sprechstimme dagegen ist mit unter 20 Hertz amplitudenmoduliert, und auch im Klang von Musikinstrumenten lässt sich das 30- bis 150-Hertz-Modulationsmuster kaum nachweisen.

Laut den Ergebnissen der Forscher bestimmt die »Rauigkeit« darüber, wie alarmierend Laute auf uns wirken. Das Team setzte Versuchsteilnehmer verschiedenen Klängen aus und befragte sie nach ihren Eindrücken. Die Probanden schätzten einen Klang als umso furchteinflößender ein – und

gelangten umso schneller zu diesem Urteil –, je stärker er zwischen 30 und 150 Hertz amplitudenmoduliert war. Zudem konnten sie entsprechende Laute genauer lokalisieren als eine normale Sprechstimme. Künstliche Alarmgeräte wie Sirenen erzeugen den Forschern zufolge ebenfalls Amplitu-



Amplitudenmodulation: Eine Welle hoher Frequenz (blau) ändert ihre Amplitude mit einer niedrigeren Frequenz (rot).

denmodulationen zwischen 30 und 150 Hertz und nutzen damit quasi das gleiche kommunikative Band wie Schreie.

Mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) untersuchte das Team auch, was beim Hören »rauer« Klänge im Gehirn von Probanden geschieht. Dabei zeigte sich, dass besonders die Amygdala, das »Angstzentrum«, auf 30- bis 150-Hertz-Amplitudenmodulationen reagiert. Filterte das Team diese Modulationen aus einem aufgezeichneten Schrei heraus, wirkte er auf die Teilnehmer nicht mehr so alarmierend. Dieser Mechanismus erklärt vielleicht sogar, warum manche musikalischen Intervalle als »dissonant« empfunden werden: Laut den Analysen zeichnen sie sich durch Amplitudenmodulationen zwischen 30 und 80 Hertz aus.

Curr. Biol. 25, S. 1–6, 2015

SPETRIUM DER WISSENSCHAFT, IMACH-ERICO BILBUCH / CC-BY-SA-3.0



Mehr Aktualität!

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

ASTROCHEMIE

Fullerene im All

Im interstellaren Weltraum gibt es tatsächlich Fullerene. In dieser besonderen Form des Kohlenstoffs bilden die Atome eine Kugeloberfläche aus Fünf- und Sechsecken, ähnlich einem Fußball. Schon vor mehr als 20 Jahren hatten Forscher entsprechende Moleküle im All vermutet – ein Postulat, das nun als bestätigt gelten kann.

Zwischen den Sternen der Milchstraße gibt es ausgedehnte Gas- und Staubwolken mit diversen Verbindungen darin. Sie filtern das zu uns kommende Licht der Sterne, indem sie, je nach ihrer chemischen Zusammensetzung, bestimmte Wellenlängen darin absorbieren. Schon länger vermuten Chemiker, dass zwei dieser Absorptionsbanden vom C60⁺-Fulleren stammen, das einfach positiv geladen ist und aus 60 Kohlenstoffatomen besteht, die in 12 Fünf- und 20 Sech-

ecken angeordnet sind. Es fehlte jedoch der wasserdichte Laborversuch, um diese These zu bestätigen: Um auf der Erde mit C60⁺ zu experimentieren, musste man es bisher in einer Matrix aus Neonatomen stabilisieren, was nicht den Verhältnissen im All entspricht.

Einem Team um John Maier von der Universität Basel ist es nun im Labor gelungen, das Spektrum von gasförmigem C60⁺ bei Temperaturen um minus 267 Grad Celsius zu vermessen, also unter Bedingungen ähnlich denen im All. Das Team fand zwei Absorptionsbanden bei 957,8 Nanometer und bei 963,3 Nanometer Wellenlänge. Sie stimmen haargenau mit den im Sternenlicht beobachteten Banden überein. Damit steht fest, dass C60⁺-Fullerene im Interstellarraum vorkommen.

Nature 523, S. 322–323, 2015

Wie sich die Muschel eine Perle rollt

Perlmuscheln erzeugen nahezu perfekt kugelförmige Schmuckstücke. Wie, haben jetzt Forscher um Yannick Gueguen von der Universität de Montpellier (Frankreich) herausgefunden. Ihre Untersuchungen belegen: Die Muschel rotiert die heranwachsende Perle fortwährend, wodurch diese eine kugelförmige Gestalt mit glatter Oberfläche erhält.

Bei vier Individuen der Perlmuschelart *Pinctada margaritifera* betrug die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich die Perle im Innern der Muschel drehte, durchschnittlich 1,27 Grad pro Minute. Etwa alle fünf Stunden vollendet das Kleinod demnach eine komplette Rotation. Dies ermittelten die Wissenschaftler, indem sie den Tieren millimetergroße, magnetische Perlenkeime einsetzten. Deren Ausrichtung innerhalb eines Tiers ließ sich mit Magnetensoren ermitteln.

Laut den Daten beginnt die gleichmäßige Rotation der heranwachsenden Perle etwa 40 Tage nach Einbringen des Keims. Bis dahin umhüllt die Muschel den Fremdkörper mit einem Perlsack. Dieser ummantelt den Keim anschließend unter kontinuierlichem Drehen mit Perlmutter. Die Rotation hielt im Versuch bis zu anderthalb Jahre an.

Anders als lange angenommen geht man heute davon aus, dass natürliche Perlen nicht nur durch das Eindringen eines Sandkorns in eine Muschel entstehen. Auch Verletzungen des Körpergewebes scheinen den Prozess auszulö-

sen. Deshalb bringen Perlenzüchter außer einem Fremdkörper noch ein Stück Mantelgewebe ins Innere der Muschel ein. Wozu der komplizierte Ablauf der Perlenbildung unter natürlichen Umständen dient, ist nicht restlos geklärt.

R. Soc. Open Sci. 2:150144, 2015



Perle in einer Auster: Ihre Kugelform und glatte Oberfläche rühren daher, dass sie während ihres Wachstums fortwährend rotiert.

Unsere Vorfahren waren wohl keine Baumbewohner

Bisher gingen viele Wissenschaftler davon aus, die gemeinsamen Vorfahren von Menschen und modernen Menschenaffen hätten lange Finger und kurze Daumen besessen, ähnlich heutigen Schimpansen. Durch den Gebrauch von Werkzeugen hätten sich die Hände unserer Ahnen allmählich zu Gliedmaßen für Präzisionsarbeiten entwickelt, indem der Daumen verglichen mit dem übrigen Fingern länger wurde, was den Pinzettengriff mit ermöglichte beziehungsweise erleichterte. Diese These stellen jetzt Forscher um den Anthropologen Sergio Almécija von der George Washington University (Washington, USA) in Frage.

Das Team untersuchte die Handformen von 270 Primaten einschließlich sämtlicher Hominiden-Arten und verglich sie mit denen von ausgestorbenen Primaten, etwa Ardipithecinen, Australopithecinen, Vertretern der Gattung Proconsul und Neandertalern. Die Wissenschaftler ermittelten jeweils das Verhältnis von Daumen- zu Ringfingerlänge, setzten die Handgröße in Relation zur Körpergröße und versuchten die evolutionäre Differenzierung der Hand in verschiedenen Primatenentwicklungslinien nachzuvollziehen. Sie kommen zum Schluss, die Hand des modernen Menschen ähnelte eher denen ursprünglicher Primaten –

in ihr seien also viele archaische Merkmale konserviert. Die Hände von Schimpansen und Orang-Utans hingegen stellten eine moderne Anpassung an das Leben in Bäumen dar, da die langen Finger und der kurze Daumen die Fortbewegung im Geäst erleichtern.

Sollte das zutreffen, stimmt das verbreitete Bild unserer Ahnen als Baumbewohner, die sich allmählich an ein Leben auf dem Boden anpassten, wohl nicht. Die baumbewohnende Lebensweise etwa von Schimpansen wäre demnach ein Sonderweg unter den Hominiden, der Veränderungen der Hand nach sich zog.

Nat. Comm. 6, 7717, 2015

TEILCHENPHYSIK

Pentaquarks entdeckt

Quarks sind nach heutigem Verständnis Elementarteilchen, aus denen sich größere Partikel zusammensetzen. Je drei von ihnen bilden beispielsweise ein Proton oder Neutron. Experimente haben nun bestätigt, dass es sogar Pentaquarks gibt, also Konglomerate aus fünf Quarks. Das berichtet ein internationales Team aus Wissenschaftlern, die am Teilchenbeschleuniger LHC forschen. Demnach ergab eine Auswertung älterer Messreihen jetzt sehr deutliche Hinweise auf die Quark-Quintette.

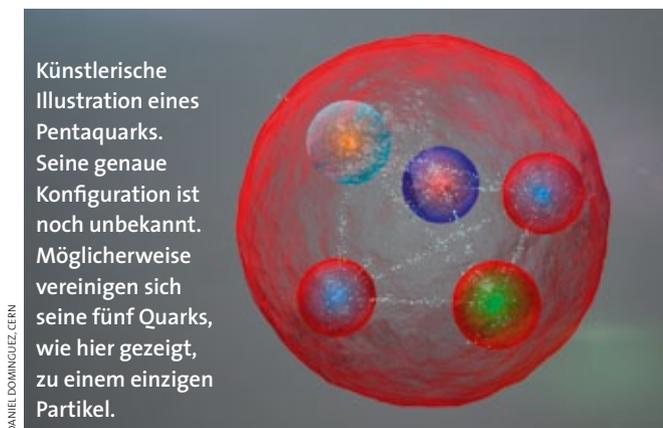
Physiker spekulieren bereits seit Jahrzehnten über die Existenz von Pentaquarks. Zwischenzeitlich sah es schon einmal so aus, als sei deren Nachweis gelungen, was sich

jedoch als Irrtum herausstellte. Die neuen Belege lassen allerdings kaum einen Zweifel zu: Sie haben eine Signifikanz von 9 Sigma, womit so gut wie ausgeschlossen ist, dass sie auf Zufallsschwankungen oder Messfehlern beruhen.

Insgesamt zweimal gingen den Wissenschaftlern kurzlebige Pentaquarks in die Detektorfalle. Deren Massen bezifferten die Forscher auf 4,38 und 4,45 Gigaelektronvolt, das ist rund 4,7-mal so schwer wie ein Proton. Die Spuren der Quark-Quintette ließen sich in Messreihen nachweisen, die zwischen 2009 und 2012 aufgenommen worden waren, um Zerfallsprodukte so genannter Lambda-b-Baryonen zu registrieren.

Laut den Daten bestanden die Pentaquarks je aus zwei Up-Quarks, einem Down-Quark und einem Charmonium, welches sich aus Charm-Quark und -Antiquark zusammensetzt. Dass beide Konglomerate sich in der Masse leicht unterschieden, geht vermutlich auf ihre unterschiedlichen Resonanzzustände zurück. Den Physikern zufolge repräsentieren die Pentaquarks ein noch nie beobachtetes Quark-Arrangement. Vor allem die Quantenchromodynamik, die gängige Theorie der starken Wechselwirkung, könnte von der Erforschung solcher exotischen Zusammenballungen profitieren. In den kommenden Jahren halten die Wissenschaftler den Nachweis zahlreicher weiterer Pentaquarkvarianten für möglich.

arXiv:1507.03414v1, 2015



NEUROLOGIE

Geschwindigkeitsneurone im Gehirn

Wissenschaftler um May-Britt und Edvard Moser von der Norwegischen Universität für Wissenschaft und Technologie (Trondheim) haben im Gehirn von Ratten spezialisierte Neurone entdeckt, die darauf reagieren, wie schnell sich die Tiere bewegen. Es handelt sich um Nervenzellen im medialen entorhinalen Kortex, einem Bereich der Großhirnrinde am Rand des Schläfenlappens. Diese »Temponeurone« feuerten im Experiment umso stärker, je schneller die Ratten eine vorgegebene Strecke entlangrannten. Die Information, wie hoch die Eigengeschwindigkeit ist, erhalten die Zellen offenbar nicht über den Sehsinn, sondern durch die Wahrnehmung von Körperbewegungen

(Propriozeption). Den Untersuchungen zufolge machen die »Temponeurone« etwa 15 Prozent aller Nervenzellen im medialen entorhinalen Kortex aus.

May-Britt und Edvard Moser erhielten 2014 den Nobelpreis für Medizin oder Physiologie, gemeinsam mit dem britisch-amerikanischen Neurowissenschaftler John O'Keefe. Letzterer hatte im Hirn von Ratten so genannte Ortszellen beobachtet, die jeweils nur an einer bestimmten Position im Raum aktiv werden. Die Mosers hingegen entdeckten »Rasterzellen«, die ein Koordinatennetz aus gleichseitigen Dreiecken bilden und deren Feuerrate davon abhängt, wie sich das Individuum durch die Umwelt bewegt. Beide

Zellsorten, die man inzwischen auch bei anderen Tieren nachgewiesen hat, arbeiten Hand in Hand, um ihrem Träger eine Vorstellung davon zu vermitteln, wo er sich gerade befindet.

Um diese Aufgabe allerdings bewältigen zu können, müssen vor allem die Rasterzellen durchgängig Informationen zum Bewegungstempo erhalten. Wie das funktioniert, war bislang unklar. Mit dem Nachweis der »Temponeurone« scheint die Frage nun beantwortet zu sein. Da Letztere auf Signalveränderungen mit einer ähnlichen Verzögerung reagieren wie Rasterzellen, vermuten die Forscher, dass beide Zelltypen eng zusammenwirken.

Nature 10.1038/nature14622, 2015

AUSSENPOSTEN DES SONNENSYSTEMS

Am 14. Juli 2015 hat die NASA-Raumsonde New Horizons nach neunjähriger Reise den Zwergplaneten Pluto erreicht. Es ist der erste Besuch eines Flugobjekts bei dem Himmelskörper überhaupt. Die übermittelten Aufnahmen zeigen vielfältige Strukturen gefrorener chemischer Verbindungen auf einer aktiven Oberfläche.



POTTWALAKUSTIK

Moby Dicks Boombox

Der Pottwal hat die größte Nase im Tierreich: Äußerlich erinnert sie an den Bug eines U-Boots, im Inneren jedoch ist sie völlig asymmetrisch aufgebaut. Ein neues Modell erklärt ihre Funktionsweise als Megaphon für die stärksten Laute von Lebewesen überhaupt.

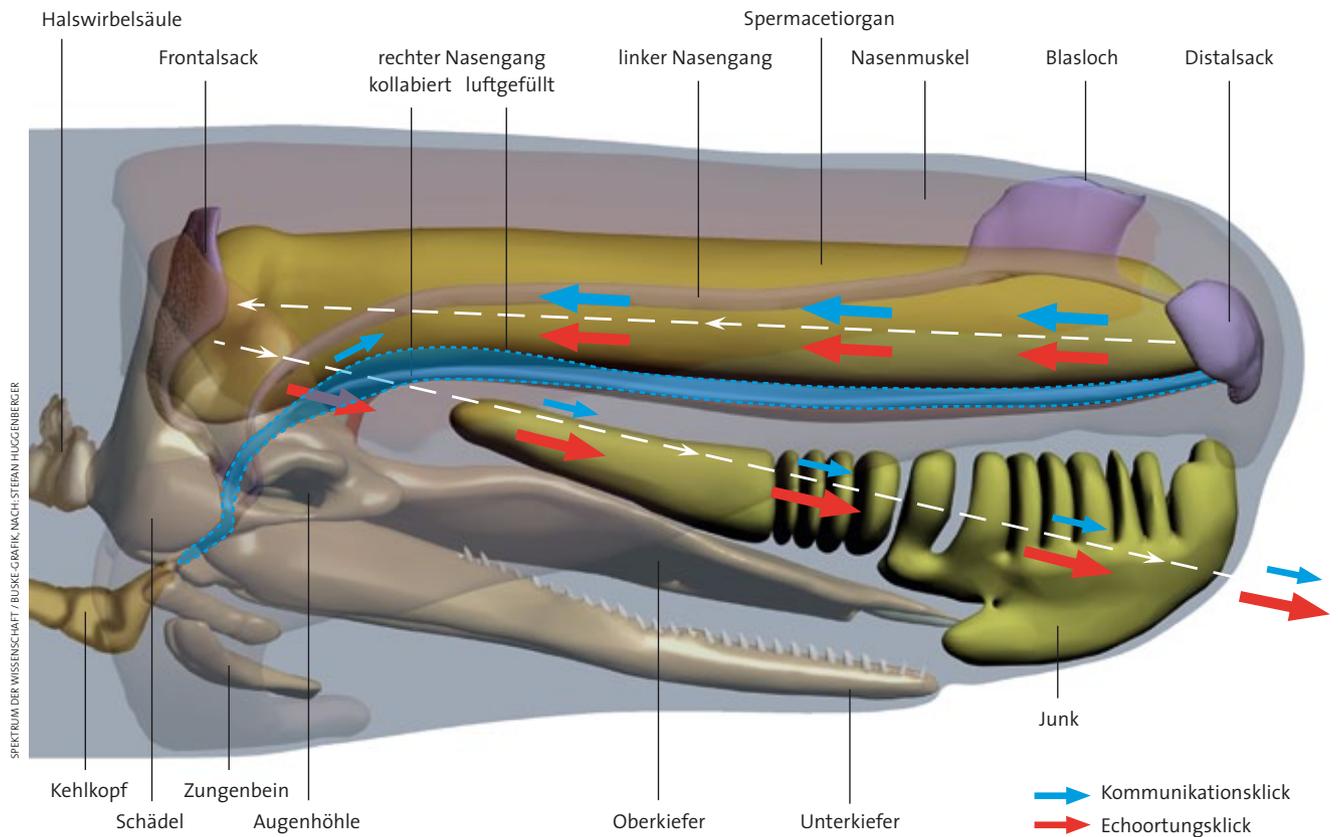
VON STEFAN HUGGENBERGER UND HELMUT A. OELSCHLÄGER

Eine enorme Schallwelle trifft den Riesenkalmar. Vorübergehend verliert er die Orientierung und taumelt wehrlos weiter. Der Pottwal ist in 1000 Meter Meerestiefe nicht einmal als Schatten wahrnehmbar. Er packt die geortete Beute, zerrt sie trotz heftiger Gegenwehr unaufhaltsam nach oben und verschlingt sie schließlich lebendig in einem Stück.

Zwischen 50 und 100 mittelgroße Tintenfische erjagt ein ausgewachsener, bis zu 20 Meter messender männlicher

Pottwal täglich. Die Weibchen des größten Raubtiers, das es je gab, werden halb so lang. Die gigantische »Nase«, das hervorstechendste Merkmal dieses Zahnwals, macht hier etwa ein Viertel der Körperlänge aus, bei erwachsenen Bullen sogar bis zu einem Drittel. Wozu die gewaltige Nase dient – denn Pottwale können nicht riechen –, beschäftigt Walfänger und Forscher seit Jahrhunderten. Vor einigen Jahrzehnten hieß es, sie helfe, den Auftrieb bei Tauchgängen auszugleichen. Das ist aber nach neueren Be-

funden wenig plausibel. Wir haben nun ein anatomisches Modell des Pottwalkopfs entwickelt, in das sowohl akustische Analysen anderer Forschergruppen aus den letzten Jahren als auch eigene anatomische Daten eingingen. Damit konnten wir ein Funktionsmodell vorschlagen, welches beschreibt, wie ein tauchender Pottwal seine Schallemission (Vokalisationen) zu verschiedenen Zwecken modulieren kann (*Mammal Review* 44, S. 81–87, 2014; *Journal of the Marine Biological Association of the Uni-*





DAY DONALDSON / CC-BY-2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.0/LEGALCODE)

Pottwale erzeugen zur Echoortung in der Tiefsee die lautesten Vokalisationen in der Tierwelt. Dazu dient ihre mächtige Nase, die bis zu einem Drittel der Körperlänge beträgt.

ted Kingdom 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0025315414001118>.

Wie bei anderen Zahnwalen gehört die Echoortung mit sehr kräftigen Klicklauten zu den wichtigsten Anpassungen der Pottwale an den offenen Ozean. Hiermit orientieren sie sich auch bei völliger Dunkelheit – Jagdausflüge bis in 800 Meter Tiefe sind keine Seltenheit, und große Bullen tauchen manchmal sogar noch wesentlich tiefer. Denn jegliche Objekte, auf welche die Klicks treffen, reflektieren den Schall. Über einen

Fettkörper im Unterkiefer hört der Wal die Muster der Echos, die er in seinem riesigen Gehirn augenblicklich in ein akustisches Bild seiner Umwelt umsetzt. Allerdings erfordert die Weite der Tiefsee einen extrem hohen Schalldruck. Dementsprechend erzeugt der Pottwal mit weit über 200 Dezibel die lautesten Vokalisationen im Tierreich. Diese energiereichen Klicks produziert er in der Nase, die somit vor allem eine enorme Schallkanone darstellt.

Computermodell vom Kopffinneren

Mit normalem Präparierwerkzeug wie Skalpell und Pinzette lässt sich nicht einmal ein junger Pottwal von vier Metern Länge sezieren, schon gar nicht die über fünf Meter lange Nase eines 18-Meter-Kolosses. Daher ist es nicht einfach, die anatomischen Beziehungen und Größenverhältnisse der verschiedenen Strukturen im Kopf überhaupt zu erkennen, etwa die genaue Lage und Abmessung der Nasengänge, Muskeln, Fettkörper und Luftsäcke, die an der Echoortung beteiligt sind. Uns standen für die Studien die Köpfe von drei verstorbenen Jungtieren zur Verfügung. Diese haben wir zunächst mit modernen bildgebenden Verfahren wie Computer- und Kernspintomografie dokumentiert und später seziiert. Das resultierende dreidimensionale anatomische Computermodell des Kopffinneren in den ersten Lebensmonaten wurde anhand von Unterwasserfotos erwachsener Tiere, anatomischen Angaben in früheren Studien und eigenen Messdaten an ausgewachsenen Schädeln in

Museen auf die Größenverhältnisse bei älteren Pottwalen angepasst. Wir haben also am Computer das Wachstum des Kopfes, vor allem aber das der Nase nach vorne simuliert. Auf diese Weise können wir begreiflich machen, wie der Pottwal die energiereichen Klicklaute erzeugt und aussendet.

Der Nasenkomplex liegt gewissermaßen in einem vom Schädel geformten Sessel, mit dem schnabelähnlich lang vorragenden Oberkiefer als Sitz und der knöchernen Stirn als Rückenlehne. Diese ist ähnlich wie ein Amphitheater gerundet. Den meisten Platz in dem Sessel beanspruchen zwei riesige wurstförmige Fettkörper: das Spermacetiorgan als oberes und der so genannte Junk als unteres langgestrecktes Kissen. Die beiden beim lebenden Tier luftgefüllten Nasengänge sehen völlig unterschiedlich aus. Der rechte Nasengang ist wesentlich voluminöser als der linke, beim seziierten Tier allerdings flach wie eine leere Hülle. Er führt mitten durch die Nase zwischen den beiden Fettkörpern hindurch und dann nicht direkt durch das Blasloch nach draußen, sondern erst in einen Luftsack an der Nasenspitze. Der linke, dünnere Nasengang zieht dicht unter der Haut links neben dem oberen Fettkörper direkt zum Blasloch, der einzigen Nasenöffnung. Dieses sitzt etwas nach links versetzt weit vorn oben auf der Nase. Beim Auftauchen atmet der Wal nur durch diesen linken Nasengang, der von kräftiger Muskulatur umgeben ist. Dadurch kann er im Bruchteil von Sekunden die Luft in der Lunge fast komplett austauschen.

Das neue Modell: Mit ihrer Nase bringen Pottwale zwei Typen von Lauten hervor – die außerordentlich starken Echoortungsklicks sowie schwächere Klicklaute mit bis zu sechs zusätzlichen Pulsen zur sozialen Verständigung. Beide Vokalisationsformen entstehen, wenn über den rechten Nasengang Luft durch eine lippenähnliche Struktur an der Nasenspitze gepresst wird. Ein hier befindlicher luftgefüllter Körper, der Distalsack, reflektiert die entstandenen Schwingungen nach hinten. Von dort wirft ein weiterer Luftsack, der Frontalsack, sie wieder nach vorn (gestrichelte weiße Linien) in den unteren Fettkörper, der sie fokussiert und ins Wasser entlässt (rote Pfeile). Im sozialen Kontext schwächen die Wale den ersten Klick stark ab und lassen die restliche Energie mehrmals in immer kleineren Portionen zur Nasenspitze zurücklaufen (blaue Pfeile). So entsteht eine Multipulsstruktur der Kommunikationsklicks.

Das Spermacetiorgan besteht chemisch gesehen überwiegend aus Wachs. Weil diese Substanz früher für Kerzen, als Lampenbrennstoff und Schmiermittel hochbegehrt war, erzielten Walfänger dafür immense Preise. Die Bezeichnung stammt von ihnen – beim lebenden Pottwal ist es dickflüssig und erinnert an die Konsistenz von Sperma. Den vorderen Teil des unteren Fettkörpers bilden senkrecht hintereinander aufgereihete Fettlinsen. Dieses Fett war weniger wertvoll, weshalb es die Walfänger als Junk – Ausschuss – bezeichneten.

Nasengang zur Lautproduktion

Vorn und hinten wird das Spermacetiorgan von je einem Luftsack begrenzt. An der Einmündung des rechten Nasengangs in den vorderen Sack sitzen breite Lippen. Blickt man von vorn darauf, erinnern sie an eine Affenschnauze (daher die englische Bezeichnung »monkey lips«). Nur ein sehr schmaler Gang führt von diesem Luftsack nach links oben zum Blasloch. Erzeugt der Wal einen Klicklaut für die Echoortung, so presst er mit hohem Druck Luft durch den rechten Nasengang nach vorn. Die zuvor fest geschlossenen Affenlippen öffnen sich dadurch kurz und schlagen gleich wieder aufeinander. Dieses Klatschen lässt das Spermacetiorgan im vorderen Bereich vibrieren. Der vordere (distale) Luftsack dient nun als akustischer Spiegel für diese Schwingungen: Er reflektiert die Schallwellen nach hinten zum Frontalsack. Wie der dänische Bioakustiker Bertel Møhl von der Universität Aarhus nachwies, wird der Schall dort nochmals reflektiert und wieder nach vorn geschickt – und zwar so, dass er diesmal quer zum rechten Nasengang in den Junk ausweicht. Hier fokussieren ihn die Fettlinsen, bevor er ins Wasser austritt. Auf diese Weise erzeugt der Pottwal eine gebündelte Schallkeule, mit der er die Tiefen der Meere bis zu zwei Kilometer weit ausloten kann.

Pottwale vokalisieren jedoch nicht nur bei der Echoortung. Sie nutzen Klicklaute auch zur Kommunikation. Wie Peter T. Madsen, ein Schüler Møhls,

entdeckte, entsprechen sich die beiden Klicktypen prinzipiell in ihrem Schwingungsmuster. Allerdings produzieren die Tiere zur Echoortung im Wesentlichen einen einzelnen sehr starken Puls. Bei der akustischen Kommunikation untereinander generieren sie im Klick dagegen einen rund 20 Dezibel schwächeren ersten Puls, dem eine kurze Serie leiser werdender Pulse folgt.

Der Unterschied zwischen den beiden Klicktypen rührt unserem neuen Modell zufolge daher, dass der vom Frontalsack reflektierte Schall bei sozialen Lauten nicht gleich vollständig in den Junk geschickt wird und daher auch nicht als eine einzige mächtige Schallwelle austritt. Vielmehr wird ein Großteil vom luftgefüllten rechten Nasengang abgefangen und nochmals zum vorderen Luftsack zurückgeworfen. Dies geschieht mehrere Male, und dabei werden die austretenden Schallmengen immer kleiner: Die wiederkehrenden Pulse nehmen also in der Lautstärke ab. Bei der Echoortung ist dieser Vorgang nur angedeutet erkennbar. Es lässt sich höchstens noch ein ganz schwacher zweiter Puls verzeichnen.

Nach unserer Vorstellung bestimmt der Wal über die Luftmenge im rechten Nasengang, welche der beiden Lautformen er erzeugt: Ist der rechte Gang luftleer und kollabiert, werden die Schallwellen dort nicht reflektiert: Ein Ortungslaut entsteht. Befindet sich darin jedoch Luft, wird die meiste Schallenergie mehrmals nacheinander zum vorderen Luftsack zurückgeschickt und gelangt dadurch nur portionsweise ins umgebende Wasser: Mit solchen Lauten kommuniziert der Wal. Zur Kontrolle der Luftfüllung im rechten Nasengang benutzt er vermutlich die dicken Muskelstränge, die über dem Spermacetiorgan liegen und die von ausgesprochen starken Nerven versorgt werden. Wir Menschen setzen die entsprechenden Muskeln und Nerven für unsere Mimik ein.

Bei toten Pottwalen enthält der rechte Nasengang kaum Luft, ist also ganz flach. Deswegen nehmen wir an, dass dies sozusagen der entspannte Normalzustand ist. Nur wenn der Wal Artge-

nossen etwas mitteilen möchte, pumpt er Luft hinein. Dafür, dass der rechte Nasengang mit der Schallerzeugung befasst ist, spricht also schon seine Lage mitten zwischen den beiden großen Fettkörpern. Die Aufgabenteilung der Nasengänge erklärt, wieso die Pottwalnase in ihrem Innern so auffallend asymmetrisch gebaut ist.

Erlernte Klickmuster

Um im weiten Ozean in Verbindung zu bleiben, kombinieren Pottwale ihre Kommunikationsklicks zu rhythmischen Mustern, so genannten Cudas. So finden die alten Bullen, die als Einzelgänger leben, und die Herden aus bis zu 30 Weibchen und Jungtieren zueinander; diese alten Bullen sind es, die auf Grund ihres hohen Sozialranges bei der Fortpflanzung zum Zuge kommen. Was die einzelnen Abfolgen von Cudas bedeuten, ist noch nicht ausreichend geklärt. Jungtiere müssen deren Bedeutung anscheinend erst erlernen; denn die Populationen und Familiengruppen verwenden unterschiedliche Muster.

Mit der ausgefeilten akustischen Verständigung und dem Sozialgefüge der Pottwale einerseits und der Fähigkeit zur Echoortung andererseits hängt offenbar die Größe des Pottwalgehirns zusammen. Bei erwachsenen Bullen beträgt seine Masse fast zehn Kilogramm, deutlich mehr als das sieben Kilogramm schwere Gehirn eines ähnlich großen Buckelwals. Dieser Bartenwal zeichnet sich durch lang anhaltende Gesänge aus und lebt ebenfalls in komplexen sozialen Gefügen. Beim Pottwal sind zusätzlich sowohl der Hörnerv als auch die Nerven für die »akustische« Mimik der Nasenmuskulatur besonders dick und die beteiligten Hirnstrukturen ungewöhnlich groß. Vermutlich erst dadurch wird das Pottwalgehirn absolut gesehen zum größten Gehirn überhaupt.

Stefan Huggenberger ist promovierter Zoologe und arbeitet in der Neuroanatomie an der Universität zu Köln. **Helmut A. Oelschläger** ist Zoologe und außerplanmäßiger Professor am Anatomischen Institut der Universität Frankfurt am Main.

Schweren Atomen auf die Pelle gerückt

Erstmals ließ sich die Ionisierungsenergie des Elements Lawrencium bestimmen. Das trickreiche Experiment zeigt, wie präzise heutige theoretische Modelle das Verhalten exotischer Atome vorhersagen.

VON ANDREAS TÜRLER

Es ist äußerst schwierig, die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Elementen am Ende des Periodensystems zu vermessen. Atome, deren Ordnungszahl Z größer ist als 100, deren Kern also mindestens so viele positiv geladene Protonen enthält, zerfallen schnell wieder. Dennoch gelang es Wissenschaftlern um Tetsuya Sato von der Japanischen Atomenergiebehörde nun, in Kernfusionsreaktionen einzelne ungeladene Lawrenciumatome ($Z=103$) zu erzeugen und rasch genug zu untersuchen. So bestimmten sie erstmals einen Wert für die Energie,

die nötig ist, das äußerste Elektron zu entfernen (*Nature* 520, S. 209–211, 2015). Dieses erste Ionisierungspotenzial ist eine wichtige Kennzahl für jedes Element. Die Forscher verglichen den Wert mit theoretischen Berechnungen und schlossen so eine Lücke in unserem Wissen über die Chemie der so genannten Actinoiden, einer Gruppe von Elementen im Periodensystem. Lawrencium ist ihr letztes und schwerstes Mitglied.

Hier spielt auch Einsteins Relativitätstheorie eine Rolle, die sonst eher aus der Hochenergiephysik und der Astronomie bekannt ist. Je stärker der Kern

eines Atoms positiv geladen ist, desto schneller bewegen sich die negativ geladenen Elektronen darum – bis hin zu einem beachtlichen Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit. Das erhöht ihre relativistische Masse, was dazu führt, dass innere Orbitale schrumpfen. Die Elektronen können sich also näher am Kern aufhalten und dessen Ladung besser abschirmen. Das wiederum vergrößert und destabilisiert andere, weiter außen gelegene Orbitale. Dazu kommen weitere relativistische Effekte, die sich auf die möglichen Elektronenenergien auswirken. All diese Aspekte müssen theoretisch

 **STERNE UND
WELTRAUM**



DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2016

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2016 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

MOTIVE
JETZT SCHON
ONLINE
ANSCHAUEN!

So einfach erreichen Sie uns:

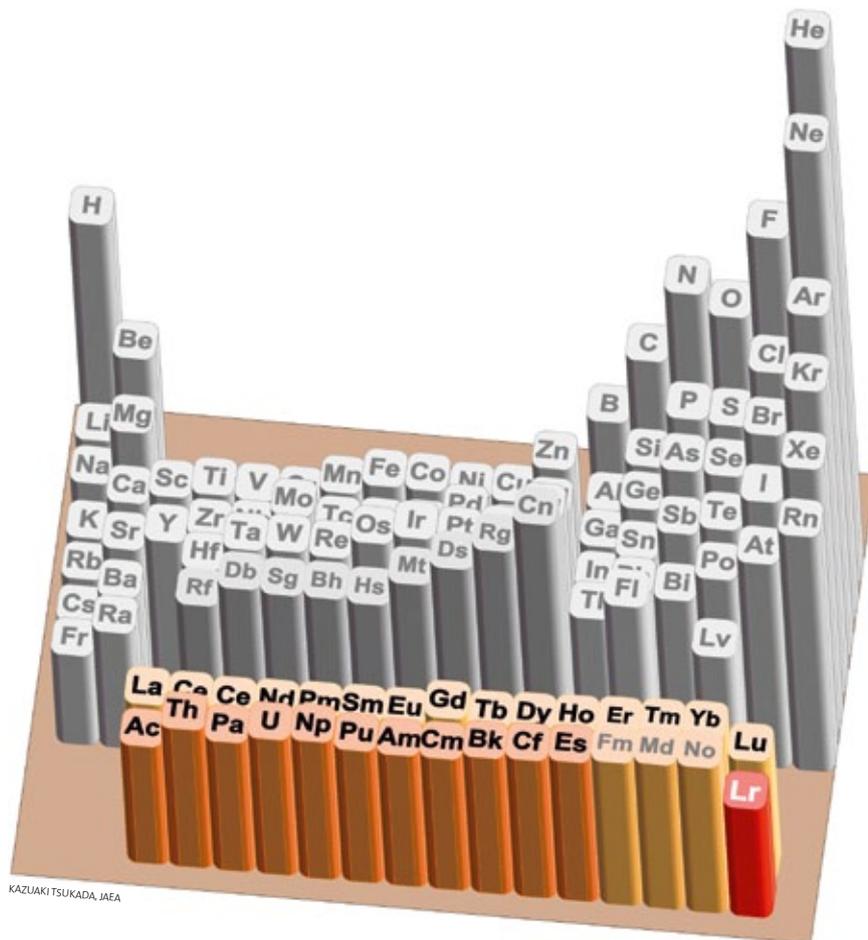
Telefon: 06221 9126-743

www.sterne-und-weltraum.de/kalender

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!





Das Periodensystem mit dem Block der Lanthanoide und Actinoide (farbig). Die Säulen zu jedem Elementsymbol illustrieren die Höhe des Ionisierungspotenzials. Dasjenige von Lawrencium (rot) ist niedriger als bei allen anderen Lanthanoiden (obere Reihe) und Actinoiden (untere Reihe).

sche Chemiker berücksichtigen, wenn sie Computermodelle erstellen wollen, um die voraussichtlichen Eigenschaften eines Elements zu berechnen.

Kurzlebige Einzelgänger

Experimentell lassen sich die superschweren Atome mit den stärksten relativistischen Einflüssen nur schwer untersuchen. Der zurzeit massereichste Vertreter hat eine Ordnungszahl von 118, was ihn zu den Edelgasen unterhalb von Xenon und Radon einordnet. Forscher können Elemente, die schwerer sind als Fermium ($Z=100$), nur künstlich als einzelne Atome herstellen. Dazu nutzen sie Fusionsreaktionen in Schwerionenbeschleunigern. Anschließend zerfallen die Nuklide. Selbst die langlebigsten unter ihnen haben Halbwertszeiten zwischen nur einigen

Stunden und weniger als einer Millisekunde. Beim Lawrencium-Isotop, welches das japanische Team synthetisierte, beträgt sie 27 Sekunden.

Die Forscher stellten das Element her, indem sie einen Strahl energiereicher Bor-Ionen auf Californium schossen, ein Actinoid mit der Ordnungszahl 98. Dabei entstand alle paar Sekunden ein Atom Lawrencium. Bei dem Fusionsprozess übertrug sich ein Teil des Bewegungsimpulses der Bor-Ionen auf das Lawrencium, so dass es wegflog und die Wissenschaftler es einfangen konnten. Dazu verwendeten sie in einer Heliumatmosphäre einen Strom fein verteilter Schwebeteilchen aus Kadmiumjodid, welche die Atome mitrissen. Durch eine Kapillare gelangte das Gemisch auf eine rund 2500 Grad Celsius heiße Metalloberfläche, wo die Hitze die

Atome ionisierte. Das Kadmiumjodid verdampfte und störte so nicht weiter. Den Anteil ionisierter Lawrencium-Atome identifizierten die Forscher dann mit Hilfe eines Massenspektrometers.

Mit ihrem Experiment bestimmten die Forscher um Sato den Wert des Ionisierungspotenzials auf 4,96 Elektronenvolt. Er stimmt ausgezeichnet mit dem theoretischen Betrag überein, den die Autoren ebenfalls im Computermodell ermittelten. Ihre Berechnung umfasst dabei nicht nur die relativistischen Effekte, sondern zudem Einflüsse der Quantenelektrodynamik. Letztere verändern die Energieniveaus zusätzlich, weil die Elektronen mit ihrem eigenen elektromagnetischen Feld sowie untereinander magnetisch wechselwirken.

Damit hat Lawrencium das niedrigste Ionisierungspotenzial aller Actinoide. Der Wert liegt auch unter dem aller Lanthanoide, jener Elementgruppe, die im Periodensystem eine Reihe darüber liegt.

Der schwere Weg zum Copernicium

Mit ihrem technisch ausgeklügelten Experiment senkten die Forscher drastisch die Menge eines Elements, die nötig ist, um sein Ionisierungspotenzial zu bestimmen. Doch das heißt leider nicht, dass Wissenschaftler so nun die weiteren superschweren Atome bis hin zu Element 118 vermessen können. Die Werte steigen gemäß Modellrechnungen von wahrscheinlich 6 Elektronenvolt bei Rutherfordium ($Z=104$) bis zu enormen 12 Elektronenvolt bei Copernicium ($Z=112$), dem vermutlich höchsten Ionisierungspotenzial aller bekannten Metalle. Bei diesen Größen ionisiert eine heiße Oberfläche nicht mehr effizient genug.

Außerdem profitierten Sato und seine Kollegen davon, tausende Atome Lawrencium herstellen zu können. Bei schwereren Mitgliedern des Periodensystems gelingt es momentan nur, einige wenige zu produzieren – im Fall von Element 118 nur etwa ein Atom pro Woche. Vor allem wegen ihrer geringen Halbwertszeit sind daher viel bessere experimentelle Methoden nötig. Im Idealfall müsste man das Teilchen ein-

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!



fangen und verschiedene Messungen vornehmen, bevor es wieder zerfällt. Es gibt zwar bereits Ionenfallen für Nobeilium und Lawrencium, aber noch keine für schwerere Elemente. Immerhin spricht nichts dagegen, dass dies irgendwann gelingen könnte.

Doch bis dahin sind wir auf rein theoretische Untersuchungen angewiesen. Das aktuelle Experiment beweist, wie gut die relativistische Quantentheorie

inzwischen ausgearbeitet ist und wie hervorragend die komplexen Computerprogramme funktionieren, mit denen Wissenschaftler die Berechnungen durchführen. So können wir bereits viel über die chemischen Eigenschaften superschwerer Elemente lernen, selbst wenn sie sich noch nicht im Labor überprüfen lassen. Mit ihrem ausgeklügelten Experiment haben die Forscher um Sato also zugleich eine Lanze für die

Vorhersagekraft theoretischer Modelle gebrochen.

Andreas Türler leitet das Labor für Radiochemie und Umweltchemie am Paul Scherrer Institut und ist Professor am Departement für Chemie und Biochemie an der Universität Bern.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 520, S. 166–167, 9. April 2015

SPRACHGESCHICHTE

Die Wiege des Indoeuropäischen

Die indoeuropäische Ursprache könnte laut neuen DNA-Studien aus der pontisch-kaspischen Steppe stammen. Von dort strömten in der Kupfer- und frühen Bronzezeit viele Menschen nach Mitteleuropa.

VON JOHN NOVEMBRE

Die Wanderbewegungen vorgeschichtlicher Bevölkerungen lassen sich nicht anhand von hinterlassenen Artefakten allein rekonstruieren. Denn Tonscherben sind eben nicht Menschen, wie die Forscher gern betonen. Um solche Wanderungen dennoch aufzuklären, arbeiten Archäologen und Populationsgenetiker heutzutage zusammen. In zwei umfangreichen Studien haben nun zwei große internationale Forscherteams menschliches Erbgut von zahlreichen mehrere tausend Jahre alten archäologischen Fundstätten Europas und Asiens verglichen (*Nature* 522, S. 167–172 und S. 207–211, 2015). Insgesamt analysierten sie DNA-Proben von 170 Individuen. Die Ergebnisse beider Ansätze weisen in die gleiche Richtung und könnten damit die langjährigen Dispute um die Herkunft der indoeuropäischen Sprachen beilegen.

Mindestens seit Anbeginn der Geschichtsschreibung werden quer durch Europa und in Zentral- und Südasien indoeuropäische Sprachen gesprochen. Zu dieser umfangreichen Sprachfamilie zählen unter anderem die italischen, germanischen, slavischen, hindischen und tocharischen Sprachen. Doch von woher kam Indoeuropäisch ursprünglich? Und wann hat es sich so weit aus-

gebreitet? Hierzu konkurrieren an vorderster Front zwei Vorstellungen.

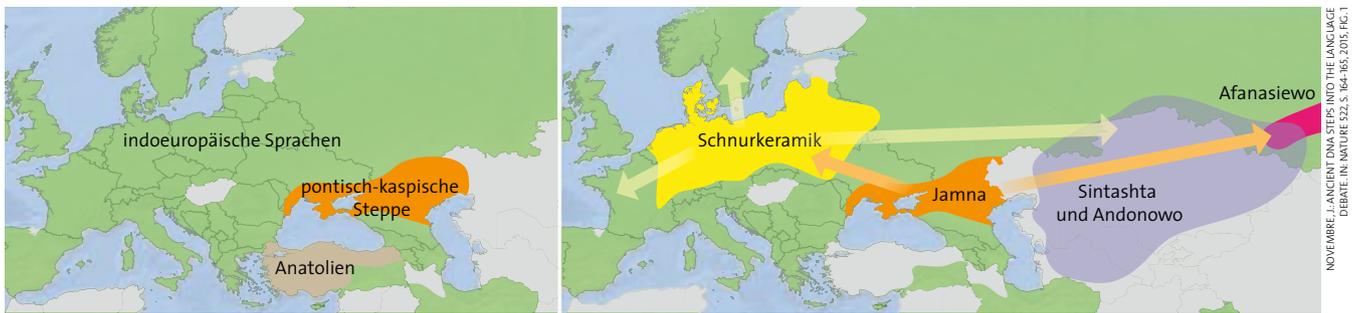
Der Anatolien-Hypothese zufolge kam Protoindoeuropäisch mit der sich ausbreitenden Landwirtschaft vor rund 9000 Jahren von Kleinasien her, wo bis in die frühe historische Zeit noch anatolische – indoeuropäische – Sprachen wie das Hethitische existierten. Die neue Lebensform, die sich bald in vielen Regionen Europas etablierte, leitete die Jungsteinzeit ein – das Neolithikum. Manche archäologischen und genetischen Befunde würden durchaus für diese Hypothese sprechen, ebenso eine neuere geografische Sprachstammaanalyse (*Science* 337, S. 957–960, 2012).

Nach der zweiten Vorstellung stammte Protoindoeuropäisch aus der pontisch-kaspischen Steppe, aus dem Gebiet nördlich von Schwarzem und Kaspischem Meer. Jüngere Versionen dieser These legen die Ausbreitung des Indoeuropäischen erst in die späte Kupfer- und frühe Bronzezeit, in eine Phase von vor 5700 bis vor 4000 Jahren. In dem Fall hätten reitende Hirten, die bereits Wagen mit Rädern kannten, die Protosprache mitgebracht. Sie könnten zur Jamna- (oder Jamnaja-) Kultur gehört haben.

Schon vorangegangene Erbgutvergleiche von heutigen mit früheren Eu-

ropäern hatten den Verdacht geweckt, dass vom weiter östlichen Eurasien viele Menschen nach Mitteleuropa gekommen sein müssen, nachdem sich die Landwirtschaft hier längst festgesetzt hatte (*Journal of Human Evolution* 79, S. 73–92, 2015; *Nature* 513, S. 409–413, 2014). Doch woher dieses Genmaterial kam und ob irgendwelche Steppenvölker daran beteiligt gewesen waren, blieb unklar. Deswegen analysierten die beiden Teams nun – im einen Fall 101, im anderen 69 – DNA-Proben von einer Anzahl archäologischer Stätten verschiedener Kulturen in Europa und Zentralasien. Die betreffenden Personen hatten vor 8000 bis vor 2900 Jahren gelebt. Zwar sind die gewonnenen genetischen Sequenzen lange nicht so umfassend und präzise, als wenn man frisches Erbmaterial untersucht. Doch sie genügen, um daran Migrationsereignisse grob zu erkennen.

In beiden Arbeiten zeichnet sich derselbe genetische Zusammenhang ab: Eine Verwandtschaft der mitteleuropäischen Schnurkeramiker mit Angehörigen der etwas älteren Jamna-Steppenkultur. Am ehesten lassen sich diese Befunde erklären, wenn man annimmt, dass damals entweder Vertreter dieser östlichen Kultur selbst oder nahe Ange-



Indoeuropäische Sprachen sind in weiten Teilen Eurasiens verbreitet (grüne Flächen). Nach einer Hypothese kam die Ursprache aus Kleinasien, nach einer anderen aus einer Region nördlich des Schwarzen und Kaspischen Meers (links). Genetische Daten von archäologischen Stätten stützen die zweite Vorstellung. Dem-

nach brachten Angehörige der Jamna-Kultur ihr Erbmateriale – und vermutlich ihre Sprache – in Mitteleuropa sowie in Mittel-asien ein. In Mitteleuropa entstand in der Zeit die Schnurkeramik-Kultur. (Die Pfeile zeigen Wanderbewegungen; die Farbflächen geben grob die Gebiete der Kulturen wieder).

hörige von ihnen in erheblicher Anzahl nach Mitteleuropa gelangten. Die Schnurkeramik-Kultur mit ihren charakteristisch verzierten Tongefäßen kam vor 4500 Jahren auf. Nach Ansicht von Archäologen könnte sie aus Vorformen in den Steppen am Schwarzen Meer hervorgegangen sein. Somit waren dort vielleicht auch die gesuchten Vorläufer der indoeuropäischen Sprachen zu Hause. Denn eine zentrale Annahme bei der Steppen-Hypothese ist, dass sich diese Sprachen in Europa mit der Schnurkeramik-Kultur verbreiteten.

Auch eine bisher rätselhafte genetische Beziehung zwischen Europäern und amerikanischen Ureinwohnern ließe sich anhand der neuen Befunde verstehen, wenn Menschen der Jamna-Kultur damals nach Westen vordrängen. Denn diese stammten ihrerseits wohl von den nördlichen eurasischen Populationen ab, die ebenfalls an der Besiedelung Amerikas teilhatten.

Die neuen Studien verweisen zugleich auf eine mögliche Ausbreitung jener Steppenbewohner nach Osten. Denn die Forscher entdeckten auch eine Verwandtschaft mit Menschen der Afanasiewo-Kultur in Mittelasien. Diese bestand vor rund 4500 Jahren in Südsibirien in einem Gebiet zwischen dem Tien Shan und dem Altai.

Des Weiteren stützen die Befunde Vermutungen, denen zufolge Schnurkeramiker später nach Osten zurückwanderten. Sie sollen am Entstehen der Bronzezeit Sintashta mitgewirkt ha-

ben, die vor rund 4000 Jahren in südlichen Uralgebiet aufkam. Aus ihr ging die Andonowo-Kultur hervor. Dieser Hergang ist deswegen interessant, weil nach der Steppen-Hypothese die tocharischen Sprachen, ein heute ausgestorbener indogermanischer Sprachzweig in Westchina, auf osteuropäische Steppenbewohner zurückgingen.

Später DNA-Zufluss aus dem Osten

All dies würde nach Ansicht der Forscher bedeuten, dass Wanderbewegungen in der Bronzezeit wesentlich die genetische Verteilung der Menschen in Eurasien gestalteten. Wie sich zugleich damit die Sprachen verbreitet haben, kann alte DNA nicht beweisen. Immerhin verleiht die nun nachgewiesene Expansion von Angehörigen der Jamna-Kultur der Steppenhypothese einiges Gewicht. Wieso sollte eine massive Ausbreitung von Genen nicht mit einer von Wörtern einhergegangen sein?

Abzuwarten bleibt, ob altes Erbgut die Hypothese untermauert wird, der zufolge der indoiranische Sprachzweig des Indoeuropäischen ebenfalls auf Nachfahren von Steppenbewohnern zurückgeht, die aber südwärts zogen. DNA-Untersuchungen im heutigen Indien könnten hierfür sprechen.

Noch wissen wir auch nicht, wie zahlreich jene Steppenbewohner waren, die Urindoeuropäisch sprachen. Offen ist ebenso, in welchem Maß sie sich ausbreiteten. In einigen Details differieren die beiden neuen Studien. Der

einen Arbeit zufolge steuerten Menschengruppen des Nahen Ostens wie die Armenier Erbgut zu den Jamna bei, nach der anderen nicht. Die armenischen zählen ebenfalls zu den indoeuropäischen Sprachen.

Seit zwei Jahrhunderten beschäftigen sich Wissenschaftler mit der Herkunft des Indoeuropäischen. Die beiden neuen Studien mit genetischen Daten sind ein Meilenstein in diesem Forschungsgebiet. Glücklicherweise verlaufen die Auseinandersetzungen der Experten heute offener als zu Zeiten, in denen oftmals rassistisches Gedankengut den Ton angab. Von ähnlichen Untersuchungen über andere Sprachfamilien dürfen wir zukünftig spannende Ergebnisse erwarten.

Obwohl sich die Genome der heute lebenden Menschen geografisch gesehen meistens recht kontinuierlich verändern, könnten die oft beobachteten graduellen Übergänge nach diesen Studien vielfach auf komplex verlaufene Wanderbewegungen und Vermischungen von früheren Menschengruppen zurückgehen. Der Vorgeschichtsforschung jedenfalls kommt es zugute, wenn sich Archäologen, Linguisten und Paläogenetiker verbünden.

John Novembre arbeitet an der University of Chicago in der Abteilung für Humangenetik.

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature 522, S. 164–165, 11. Juni 2015

SINNESPHYSIOLOGIE

Kurzsichtigkeit – die neue Pandemie

Weltweit ist Kurzsichtigkeit auf dem Vormarsch. Die entscheidende Ursache dafür glauben Forscher jetzt gefunden zu haben.

VON ELIE DOLGIN

Das Zhongshan Zentrum für Ophthalmologie in der Stadt Guangzhou im Süden Chinas war schon seit Langem die größte Augenklinik des Landes. Doch um 2010 begann sie aus allen Nähten zu platzen. Immer mehr Kinder mit Sehproblemen – oft Tausende pro Tag – kamen dorthin, um sich die Augen untersuchen und Brillen verschreiben zu lassen. Einige Ärzte und Wissenschaftler mussten sogar in Räume in einem nahe gelegenen Einkaufszentrum ausquartieren, um Platz für die Patientenflut zu schaffen.

Was war der Grund? In ganz Ostasien hat Kurzsichtigkeit, fachlich als Myopie bezeichnet, in den letzten Jahren extrem zugenommen. Vor 60 Jahren waren etwa 10 bis 20 Prozent der Chinesen kurzsichtig – heute sind es bis zu 90 Prozent der Teenager und jüngeren Erwachsenen, in Südkoreas Hauptstadt Seoul sogar unglaubliche 96,5 Prozent der 19-jährigen Männer. Auch in Europa und den USA leidet inzwischen rund jeder zweite Heranwachsende unter der Sehschwäche, doppelt so viele wie noch vor einem halben Jahrhundert. Laut Schätzungen könnte bis zum Ende des Jahrzehnts ein Drittel der Weltbevölkerung betroffen sein, also 2,5 Milliarden Menschen.

Brillen, Kontaktlinsen und Operationen können Abhilfe schaffen, aber nicht die Ursache beseitigen. Kurzsichtigkeit beruht auf einer leichten Verlängerung des Augapfels, wodurch die Linse das Licht eines weiter entfernten Objekts etwas vor der Netzhaut bündelt, anstatt direkt darauf (siehe Grafik). Weil das Auge während der gesamten Kindheit wächst, entwickelt sich die Sehschwäche in der Regel während der Schuljahre.

Bisher machten viele Forscher die Gene verantwortlich, weil in Studien



FOTO: J. ULANINA/970

Immer mehr Kinder müssen Brillen tragen – weil sie kurzsichtig sind.

aus den 1960er Jahren bei eineiigen, also genetisch identischen Zwillingen häufiger beide Geschwister kurzsichtig waren als bei zweieiigen. Zudem wurden bislang mehr als 100 Abschnitte im Erbgut mit Myopie in Zusammenhang gebracht.

Sogar die Inuit leiden unter der Sehschwäche

Dass jedoch die Genetik nicht die alleinige Ursache sein konnte, zeigte schon eine Studie von 1969 über die Inuit von der nördlichen Spitze Alaskas, deren Lebensstil sich zu diesem Zeitpunkt dramatisch änderte. Von den noch in isolierten Gemeinschaften aufgewachsenen Erwachsenen waren nur 2 von 131 kurzsichtig, dagegen mehr als die Hälfte ihrer Kinder und Enkel. Genetische Veränderungen laufen aber zu langsam ab, um die rapide Entwicklung in Alaska wie auch die weltweit in die Höhe schnellende Zahl an Kurzsichtigen zu erklären.

Ein Schuldiger war schnell gefunden: das ausufernde Lesen von Büchern. Die Idee stammt schon von dem deutschen Astronomen und Optikexperten Johannes Kepler, der vor mehr als 400 Jahren seine eigene Kurzsichtigkeit hierauf zurückführte. Tatsächlich verbringen Kinder in vielen Weltregionen immer mehr Zeit mit Lesen, Schreiben und inzwischen vor allem am Bildschirm von Computern oder Smartphones.

Dies trifft gerade auf ostasiatische Länder zu, wo gute schulische Leistungen einen sehr hohen Stellenwert haben und die Kinder daher viel Zeit mit Lernen verbringen. Laut einem Bericht der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) von 2014 machen 15-jährige in Shanghai heutzutage 14 Stunden pro Woche Hausaufgaben – in England sind es nur fünf und in den USA sechs Stunden. Es klingt auch plausibel, dass ein ständiges Arbeiten im Nahbereich das Wachstum des Augapfels steuert, damit er die ein-

Mehr erfahren. Besser leben.



AUCH ALS
E-PAPER

In FOCUS-DIABETES bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.
Medizin & Forschung: Besser messen! Wie innovative Technologien Ihre Lebensqualität und Werte verbessern.
Spezial Job: Arbeiten mit Diabetes – so wahren Sie Ihre Rechte im Beruf. Tricks, die Sie kennen sollten.
Reisen und Erleben: Gesund wandern. Die schönsten Wege für Anfänger und Fortgeschrittene.
Fitness & Bewegung: Fit mit dem richtigen Dreh. Diese Tanzstile begeistern und beschwingen jedes Alter.

FOCUS-DIABETES gibt es auch unter Tel. 0180 6 480 1006*, Fax 0180 6 480 1001*, www.focus-diabetes.de
* 0,20 €/Anruf aus dem dt. Festnetz. Mobil max. 0,60 €/Anruf.



Leben, wie ich will. Mit **DIABETES**
FOCUS

Wächst uns die künstliche Intelligenz über den Kopf?

Mehr als 10 000 Experten warnen vor autonomen Kampfmaschinen.

Können Maschinen jemals dem menschlichen Geist das Wasser reichen? Wenn ich mich unter Freunden und Bekannten umhöre, überwiegt die Skepsis: Niemals, so die vorherrschende Meinung, werde die künstliche Intelligenz (KI) trotz aller Fortschritte den Fähigkeiten unseres Denkens nahekomen.

Gegen diese verbreitete Ansicht spricht allerdings schon allein die Tatsache, dass unser Gehirn als Resultat der biologischen Evolution Bewusstsein entwickelt hat. Wer das bestreiten will, muss sich auf einen übernatürlichen Eingriff berufen, also auf eine Variante des Kreationismus. Sofern unser Denkvermögen aber das Ergebnis einer gewöhnlichen Anpassung durch Versuch und Irrtum über geologische Zeiträume hinweg ist, gibt es keinen prinzipiellen Grund, warum es mit zielgerichteter Forschung und Entwicklung nicht gelingen sollte, binnen einer historisch messbaren Zeitspanne Vergleichbares hervorzubringen.

Die Frage ist nur, wann. Der US-Denker Ray Kurzweil sieht die »Singularität«, bei der das menschliche Denken auf intelligente Maschinen übergehen wird, bereits für 2045 voraus. Doch entspringt diese hastige Prognose wohl eher seinem »transhumanistischen« Wunschdenken, das auf jeden befremdlich wirken dürfte, der einem ewigen Weiterleben in Speicherchips wenig abgewinnen mag.

Zwar wird es vermutlich noch eine ganze Weile dauern, bis KI-Systeme umfassend mit menschlicher Intelligenz konkurrieren können – doch in Teilbereichen leisten sie schon Erstaunliches (*Science* 349, S. 248–278, 2015). Enorme Fortschritte macht insbesondere das maschinelle Lernen: Ein Programm verarbeitet mittels mehrschichtiger neuronaler Netze Bild- oder Sprachdaten und erwirbt dabei schrittweise implizites, von außen nicht im Detail einsichtiges Wissen. Solche Systeme haben ein gewisses Innenleben und agieren autonom – obwohl sie sich im Großen und Ganzen zwar dem vom Programmierer vorgesehenen Lernziel nähern, verhalten sie sich im Einzelnen für menschliche Beobachter überraschend.

Angesichts dieser Entwicklung warnen KI-Forscher nun in einem offenen Brief vor den dahinter lauernden Gefahren. Grund zur Beunruhigung bietet insbesondere die Erfahrung, dass fast jede neue Technologie zunächst militärischen Zwecken dient. Vor der Tür stünden autonome Waffen, die »Ziele ohne menschliche Intervention auswählen und angreifen«, schreiben die Forscher und mahnen, »dass ein militärischer KI-Rüstungswettlauf der Menschheit nicht dienlich wäre« (www.futurofife.org/AI/open_letter_on_autonomous_weapons).

Das ist sehr vorsichtig ausgedrückt. Am Ende einer ungehemmten KI-Waffenrevolution droht eine Art Skynet aus den »Terminator«-Filmen: ein globales System autonomer Killermaschinen, für die jeder Mensch ein potenzielles Ziel darstellt. Die Verfasser des offenen Briefs sehen auch ganz konkrete Gefahren in naher Zukunft: »Autonome Waffen sind ideale Instrumente für Attentate, zur Destabilisierung von Staaten ... und zur selektiven Tötung ethnischer Gruppen.«

Unterzeichnet haben das Schreiben gut 10 000 KI-Forscher sowie prominente Physiker und Philosophen. Sie folgen dem historischen Vorbild jener Wissenschaftler, die für internationale Abkommen zur Kontrolle der militärischen Anwendung ihrer Arbeit eingetreten sind. Der KI-Pionier Stuart Russell von der University of California in Berkeley vergleicht sein Metier mit der Kernforschung, die zum nuklearen Wettrüsten geführt hat (*Nature* 349, S. 252, 2015): Genau wie diese müsse sich die »reine« KI-Forschung ihrer Ziele und Konsequenzen bewusst werden.



Michael Springer

fallenden Bilder möglichst scharf auf die Netzhaut fokussieren kann.

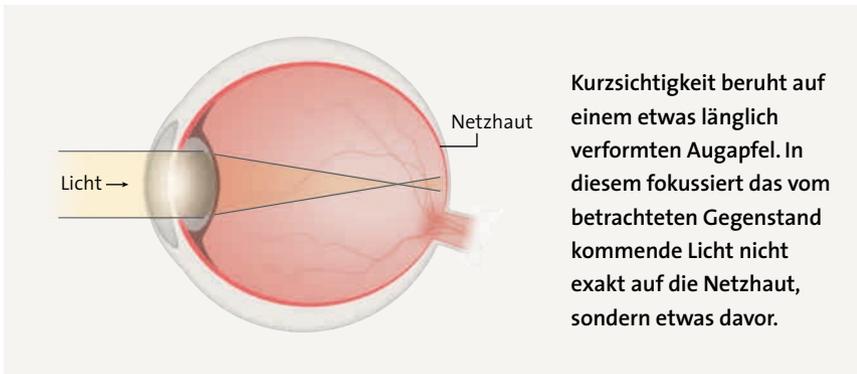
So attraktiv die Idee war, sie stellte sich dennoch als falsch heraus. Zu Beginn des Jahrtausends erfassten Forscher detaillierter, wie viele Bücher Kinder pro Woche lesen und wie viele Stunden sie am Computer verbrachten, – doch das alles schien das Risiko nicht zu verändern. Dann veröffentlichten Donald Mutti und seine Kollegen vom Ohio State University College of Optometry in Columbus die Ergebnisse einer Studie mit mehr als 500 Acht- und Neunjährigen aus Kalifornien, die bis dahin normalsichtig waren (*Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 48, S. 3524–3532, 2007). Das Team notierte sorgfältig, wie die Kinder ihren Tag verbrachten.

Hauptsache draußen

Fünf Jahre später war jedes fünfte davon kurzsichtig; und der einzige Umweltfaktor, mit dem sich ein Zusammenhang herstellen ließ, war die im Freien verbrachte Zeit. Kathryn Rose von der University of Technology in Sydney und ihre Kollegen kamen im Jahr darauf zu einem ähnlichen Schluss, nachdem sie drei Jahre lang 4000 Kinder in Sydneys Grund- und Mittelschulen beobachtet hatten: Jene, die weniger Zeit im Freien verbrachten, hatten ein größeres Risiko für Kurzsichtigkeit.

Das Team um Rose bemühte sich, jegliche andere Erklärung auszuschließen. So könnten Kinder ja draußen eher Sport treiben, der dann den Schutzeffekt hätte. Aber für Hallensport fand sich der Zusammenhang nicht. Dagegen wirkte die Zeit im Freien grundsätzlich positiv, auch wenn die Kinder einfach am Strand lasen. Außerdem verbrachten jene, die öfter im Freien waren, nicht unbedingt weniger Zeit mit Büchern, am Bildschirm oder mit anderen Tätigkeiten im Nahbereich ihrer Augen. Letztere könnten durchaus ebenfalls die Augen beeinflussen – das Sonnenlicht scheint aber entscheidend zu sein.

Manchen Forschern reicht die Datenlage allerdings noch nicht für einen Beweis aus. Christine Wildsoet von der University of California in Berkeley ist



skeptisch, weil die Zeit im Freien bei den meisten Studien durch Fragebogen ermittelt wurde. In einer kleinen Untersuchung mit am Körper der Probanden befestigten Lichtsensoren stellte sie fest, dass deren Angaben oft nicht mit den tatsächlichen Zeiten im Sonnenlicht übereinstimmten. Auch Ian Flitcroft, ein Spezialist für Kurzsichtigkeit am Children's University Hospital in Dublin, bezweifelt, dass tatsächlich das Licht der entscheidende Faktor ist. Seiner Meinung nach könnten die größeren Distanzen, mit denen das Auge im Freien ständig konfrontiert wird, eine wichtige Rolle spielen.

Andererseits untermauern Tierexperimente die Idee vom Schutzfaktor Licht. Verpasst man unter kontrollierten Bedingungen aufwachsenden Küken Brillen, die den Kontrast und die Auflösung der einfallenden Bilder modifizieren, kann allein schon eine Veränderung der Lichtintensität Kurzsichtigkeit hervorrufen. An diesem Tiermodell entdeckten 2009 Frank Schaeffel und zwei Mitarbeiter vom Forschungsinstitut für Augenheilkunde der Universität Tübingen: Hohe Lichtstärken, vergleichbar denen im Freien, verlangsamten die Ausbildung einer solchen experimentell ausgelösten Kurzsichtigkeit bei Küken um etwa 60 Prozent im Vergleich zu gängigen Innenraumbedingungen. Andere Studien fanden daraufhin ähnliche Effekte auch bei Spitzhörnchen und Rhesusaffen.

Laut der gängigsten Hypothese setzt dabei das Licht Dopamin in der Netzhaut frei, wo der Neurotransmitter das Längenwachstum des Auges blockiert. Denn die Injektion des Dopamin-Ge-

genspielerers Spiperon ins Auge der Küken hebt die Wirkung von hellem Licht wieder auf (*Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 51, S. 5247–5253, 2010). Die tagsüber ansteigende Dopaminproduktion schaltet normalerweise das Auge vom Stäbchensehen der Nacht auf das Zäpfchensehen des Tages um. Schwaches Licht, vergleichbar dem in Innenräumen, könnte den Tag-Nacht-Zyklus durcheinanderbringen und so zu unkontrolliertem Augenwachstum führen – so die Überlegung.

Hilft Unterricht im Freien?

Laut epidemiologischen Studien können mindestens 10000 Lux für etwa drei Stunden pro Tag Kurzsichtigkeit bei Kindern verhindern, sagt Ian Morgan von der Australian National University in Canberra. Das entspricht etwa der Helligkeit an einem sonnigen Sommertag im Schatten eines Baum und mit Sonnenbrille. Zum Vergleich bietet ein trüber Tag weniger als 10000 Lux und ein Büro oder Klassenzimmer mit Kunstlicht meist nicht mehr als 500 Lux.

Seit 2009 testet Morgan am Zhongshan Zentrum das in der Praxis: Bei 900 Sechs- und Siebenjährigen in sechs zufällig ausgewählten Schulen in Guangzhou führten die Verantwortlichen eine letzte Schulstunde von 40 Minuten im Freien ein. Im Alter von neun Jahren waren dann 30 Prozent kurzsichtig, in Vergleichsschulen betrug die Quote 40 Prozent. Die Daten sollen demnächst veröffentlicht werden.

Ein deutlicherer Effekt zeigte sich in einer Schule im Süden von Taiwan. Hier mussten die Schüler die gesamten 80 Minuten ihrer Pausen im Freien ver-

bringen und durften nicht mehr zwischen drinnen und draußen wählen. Ein Jahr später stellten die Ärzte fest, verglichen mit 18 Prozent in einer nahe gelegenen Schule ohne diese Maßnahme (*Ophthalmology* 120, S. 1080–1085, 2013). Weil Morgan sich bewusst ist, dass viele Schulen nicht flexibel genug sind, um Lehrstunden im Freien einzuführen, hat er letztes Jahr eine weitere Studie gestartet, bei der die Schüler in einem gläsernem Klassenzimmer unterrichtet werden, in das mehr natürliches Licht hineinkommt.

Laut Rose muss die zusätzliche Zeit im Freien von der Schule vorgeschrieben werden, weil die Eltern selten von sich aus darauf achten würden. Das hatte Seang Mei Saw, die an der National University of Singapore die Epidemiologie und Genetik der Myopie untersucht, auch festgestellt, als sie mit ihren Kollegen ein neunmonatiges Programm mit Eltern in Singapur testete. Sie stellten Schrittzähler zur Verfügung, organisierten Familienwochenenden im Freien und boten sogar Geld für Mitarbeit an. Doch am Ende hatten diese Familien nicht mehr Zeit im Freien verbracht als jene aus der Kontrollgruppe (*Ophthalmic Physiol. Opt.* 34, S. 362–368, 2014).

In manchen Gegenden der Erde können die Kinder aber gar nicht mehr Sonnenlicht erhaschen, etwa weil die Sonne nur wenige Stunden lang scheint. Manchmal strahlt sie auch zu heftig, oder es ist zu kalt, um längere Zeit draußen zu sein. Wie die Tierexperimente zeigen, könnte man sich in diesen Fällen mit starkem Licht in Innenräumen behelfen. So werden zur Behandlung der so genannten Winterdepression bereits Lampen verkauft, die bis zu 10000 Lux liefern. Ob sie auch gegen Kurzsichtigkeit bei Menschen helfen, gilt es jedoch erst noch genauer zu untersuchen.

Elie Dolgin ist Wissenschaftsjournalistin in Somerville, Massachusetts

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature 519, 19. März 2015, S. 276–278

Gezielter Eingriff ins Erbgut

»DIE MEDIZIN
DER ZUKUNFT«

DIE GROSSE
SPEKTRUM-
SERIE

Eine neue Methode, um DNA-Moleküle zu verändern, könnte die Medizin revolutionieren. Doch manche Wissenschaftler befürchten unkontrollierbare Entwicklungen.

Von Margaret Knox

Im Jahr 1973 zeigten der Genetiker Stanley Cohen und der Biochemiker Herbert Wayne Boyer, wie sich das Genom eines Lebewesens verändern lässt. Mit Hilfe von Restriktionsenzymen gelang es den beiden, Frosch-DNA in Bakterien einzuschleusen und dort ablesen zu lassen. Ende der 1970er Jahre produzierte Boyers Unternehmen Genentech bereits Insulin für Diabetiker, und zwar mit Hilfe gentechnisch veränderter *Escherichia coli*-Bakterien, die künstlich hergestellte Sequenzen aus dem menschlichen Genom enthielten. Wenig später schufen Forscher am Salk Institute for Biological Studies im kalifornischen La Jolla die erste »transgene« Maus mit eingefügten artfremden Erbgutstücken.

Schon diese frühen Erfolge der Gentechnik hatten großen Einfluss auf die moderne Medizin. Allerdings unterlagen die damaligen gentechnischen Methoden zwei wichtigen Be-

schränkungen: Sie waren erstens ungenau und ließen sich zweitens nur schwer in großem Maßstab medizinisch anwenden. Das erste Problem überwandene Wissenschaftler in den 1990er Jahren, indem sie Enzyme mit gezielt angepassten Eigenschaften erzeugten, die DNA-Moleküle an ganz bestimmten Stellen schneiden. Dazu mussten sie aber immer noch für jede DNA-Sequenz, die sie ins Visier nahmen, ein dazu passendes Enzym herstellen – eine Zeit raubende, mühsame Arbeit.

Das zweite Problem scheint nun ebenfalls vor einer Lösung zu stehen. 2012 stellten Wissenschaftler um Emmanuelle Charpentier (damals an der Universität Umeå, Schweden) und Jennifer Doudna von der University of California in Berkeley (USA) einen zelleigenen genetischen Mechanismus vor, der es ermöglicht, Genome so einfach und schnell wie noch nie zu verändern. Kurz darauf zeigten andere Forscher, dass man damit mehrere Veränderungen gleichzeitig im Genom einer Zelle vornehmen kann. Bereits jetzt hat diese Entwicklung den gentechnischen Fortschritt massiv beschleunigt, und sie wird sich wohl auch tief greifend auf die Medizin auswirken.

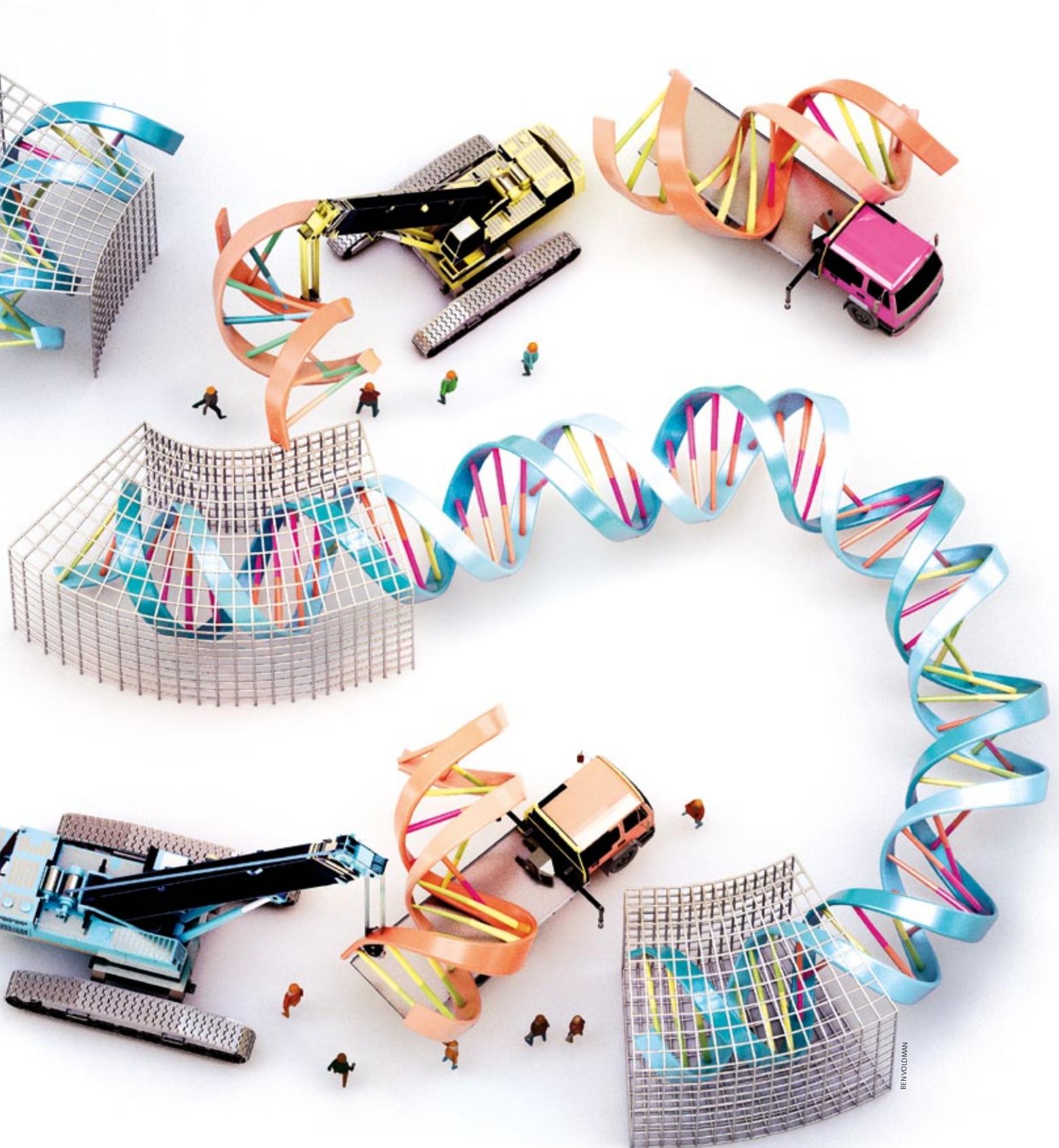
Bezeichnet wird die Technik meist als CRISPR/Cas9, wobei der Ausdruck CRISPR für »clustered regularly interspaced, short palindromic repeats« steht (deutsch: gehäuft auftretende, mit regelmäßigen Zwischenräumen angeordnete, kurze palindromische Wiederholungen). Das sind kurze, sich wiederholende DNA-Sequenzen im Erbgut von Bakterien und Archeen. Sie wechseln sich ab mit ebenfalls kurzen Zwischensequenzen, die ihrerseits übereinstimmen mit DNA-Bauplänen Bakterien infizierender Viren (Bakteriophagen). Mit Hilfe dieses Apparats »erinnern« sich Bakterien an Viren, von denen sie schon einmal attackiert wurden. Wissenschaftler untersuchen CRISPR-Sequenzen, seit japanische Forscher diese in den späten 1980er Jahren entdeckten. Doch welches machtvolle Werkzeug der Gentechnik darin schlummert, zeigte sich erst, als die Teams um Charpentier und Doudna auf ein Protein namens Cas9 stießen.

Charpentier, die heute am Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung in Braunschweig arbeitet, und Doudna lern-

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT

- | | | |
|---------------|---|-----------------------|
| Teil 1 | ► Die RNA-Revolution
<i>Christine Gorman und Dina Fine Maron</i>
Nanomedizin
<i>Dina Fine Maron, Mark Peplow und Larry Greenemeier</i> | Mai 2015 |
| Teil 2 | ► Designermoleküle für intelligente Medikamente
<i>Darlene K. Taylor, Uddhav Balami</i> | Juni 2015 |
| Teil 3 | ► Schwachstelle der Bakterienfestung
<i>Carl Zimmer</i> | Juli 2015 |
| Teil 4 | ► Impfen mit Zucker
<i>Peter H. Seeberger</i> | August 2015 |
| Teil 5 | ► Gezielter Eingriff ins Erbgut
<i>Margaret Knox</i> | September 2015 |
| Teil 6 | ► Menschliche Organe aus Tieren
<i>Jens Clausen</i> | Oktober 2015 |



BENVOIDMAN

Umbau des Erbguts: Mit dem CRISPR/Cas9-Verfahren lassen sich DNA-Stränge an beliebigen Stellen teilen. Schleust man außerdem genetisches Material in den Zellkern, fügt die zelluläre Reparaturmaschinerie dieses an der entsprechenden Stelle ein.

ten sich 2011 auf einer Konferenz in San Juan (Puerto Rico) kennen. Sie hatten viele Gemeinsamkeiten: Beide leiteten Arbeitsgruppen, die sich mit der Frage beschäftigten, wie Bakterien sich gegen Viren verteidigen. Und beide hatten herausgefunden, dass Bakterien angreifende Viren mit Hilfe eines molekularen »Gedächtnisses« identifizieren: Wenn die Mikroben ihr erstes Zusammentreffen mit einem Bakteriophagen überleben, bauen sie kurze Fragmente aus seiner DNA in ihr Erbgut ein, und zwar zwischen ihre CRISPR-Sequenzen. Auf diese Weise legen Bakterien ein Archiv viraler DNA von früheren Eindringlingen an – und das hilft ihnen, die infektiösen Partikel wiederzuerkennen, sobald diese erneut auftauchen. Allerdings reicht das allein für eine erfolgreiche Virenabwehr nicht aus, die Bakterien benötigen weitere Komponenten hierfür. Und genau darum drehen sich die folgenden Studien Charpentiers und Doudnas.

Kurz nach der Tagung in San Juan entschlossen sich die beiden Forscherinnen, künftig zusammenzuarbeiten. Charpentier und ihre Mitarbeiter überprüften Hinweise, wonach Streptokokken (Bakterien der Gattung *Streptococcus*) ein Protein namens Cas9 benutzen, um eindringende Viren zu eliminieren. Doudnas Team hingegen widmete sich der Frage, wie Cas9 funktioniert.

Zerschnitten und wieder zusammengefügt

Es stellte sich heraus, dass Krzysztof Chylinski, ein Mitarbeiter Charpentiers, und Martin Jinek, damals in Doudnas Team, in benachbarten Städten aufgewachsen waren und denselben polnischen Dialekt sprachen. »Sie konferierten über Skype, verstanden sich gut und tauschten von da an Daten und Ideen aus«, erzählt Doudna. »Die Zusammenarbeit unserer Gruppen nahm hierdurch deutlich an Fahrt auf.«

Den Wissenschaftlern beider Teams wurde schon bald klar: Cas9 könnte sich als nützliches Instrument zum Manipulieren des Genoms erweisen. Zwar gab es bereits gentechnische Werkzeuge in Form von Enzymen namens Nukleasen, die den DNA-Doppelstrang an bestimmten Stellen schneiden, worauf die zelluläre Maschinerie den Schnitt repariert und dabei manchmal genetisches Material einbaut, das zuvor in den Zellkern eingeschleust wurde. Doch als Doudna und Charpentier ihre Zusammenarbeit begannen, bestand der am weitesten entwickelte Ansatz darin, maßgeschneiderte Enzyme herzustellen, die den jeweils interessierenden DNA-Abschnitt selektiv durchtrennten. Jede genetische Modifikation benötigte also ein eigenes Enzym.

Das Streptokokken-Enzym Cas9 hingegen funktioniert anders, wie Doudna und Charpentier erkannten: Es begibt sich nicht von selbst zum jeweiligen Zielort auf der DNA, sondern wird von RNA-Molekülen dorthin geleitet – solchen RNAs nämlich, die durch Ablesen der CRISPR-Sequenzen und ihrer Zwischensequenzen entstehen. Der Komplex aus Cas9 und RNA gleitet dabei auf dem DNA-Strang (etwa dem eines eindringenden Virus) entlang. Jedes Mal, wenn er eine kurze Signalsequenz aus drei Nukleotiden erkennt, stoppt er kurz. Passt die Basenabfolge in der Umgebung dieser Stelle zu jener

AUF EINEN BLICK

REVOLUTION IN DER GENTECHNIK

1 Schon seit den 1970er Jahren verfügen Forscher über Werkzeuge, um die **Genome** von Lebewesen zu verändern. Doch die Methoden waren lange Zeit aufwändig, kostspielig und ungenau.

2 Ein neues Verfahren namens **CRISPR/Cas9** erweist sich in der Gentechnik als revolutionär. Es basiert auf einem **Immunabwehrmechanismus bei Bakterien** und ist schneller, billiger und weniger kompliziert als frühere Techniken.

3 Unternehmen entwickeln bereits **kommerzielle Anwendungen** für CRISPR/Cas9, etwa neue **Therapieverfahren** für so unterschiedliche Krankheiten wie Aids und Schizophrenie. Die Methode macht es derart einfach, Genome zu verändern, dass Ethiker schon jetzt unkontrollierbare Folgen befürchten.

der RNA des Komplexes, schneidet Cas9 den DNA-Strang – falls nicht, wandert der Komplex weiter.

Würde man sich diese natürliche Maschinerie zu Nutze machen, überlegten Charpentier und Doudna, könnte man allein über die Sequenz der RNA vorgeben, wo der Komplex den DNA-Strang kappt. Man müsste also nicht mehr für jeden Ort, an dem man schneiden will, ein eigenes Enzym konstruieren. Dies würde gentechnische Eingriffe viel einfacher, billiger und schneller machen.

Nach monatelangen Forschungsarbeiten schafften die Wissenschaftlerinnen den Durchbruch. Doudna hat den Moment noch lebhaft in Erinnerung. Jinek, damals Postdoc, hatte eine Testreihe mit Cas9 abgeschlossen und kam in Doudnas Büro, um mit ihr über die Ergebnisse zu sprechen. Dabei streiften sie ein Thema, das er bereits mit Chylinski erörtert hatte: Unter natürlichen Bedingungen nutzen Streptokokken nicht nur eine RNA, um Cas9 zur gewünschten Stelle auf der DNA zu dirigieren, sondern zwei davon. Wie wäre es, überlegten die Forscher, wenn man beide zu einem einzigen, künstlich hergestellten Strang zusammenfasste, einer so genannten Leit-RNA? Das hätte den Vorteil, dass man nur noch mit einem Zweikomponentensystem aus Leit-RNA und Cas9 umgehen würde – und dass man lediglich die Leit-RNA verändern müsste, um den Komplex, den sie mit Cas9 bildet, zu einem anderen Ort auf der DNA zu lenken.

»Es war einer dieser Momente, da sieht man die Daten, und irgendwas macht klick!«, sagt Doudna. »Uns wurde klar, dass wir die Leitsequenzen in einem Molekül vereinen konnten. Ein einziges Protein und ein einziges Leitmolekül ergäben zusammen ein äußerst leistungsfähiges gentechnisches Werkzeug. Mir lief es kalt den Rücken herunter, und ich dachte: du liebe Güte, wenn das klappt ...«

Es klappte. Und zwar so gut, wie es sich Doudna bei aller Begeisterung nicht hatte träumen lassen. Als Charpentier und sie am 17. August 2012 gemeinsam die Ergebnisse ihrer CRISPR/Cas9-Forschungen veröffentlichten, erkannten Fachkollegen sofort, welches Potenzial darin steckte. Ein globaler Wettlauf kam in Gang, um die neue Methode in verschiedenen Anwendungen zu testen.

Bereits 2013 hatten die Wissenschaftler so große Fortschritte gemacht, dass sie CRISPR/Cas9 nicht nur an Bakterien einsetzen konnten, sondern auch an den viel komplexeren Zellen von Pflanzen und Tieren. Man spekulierte sogar darüber, Neandertaler und Wollhaarmammuts gentechnisch zu rekonstruieren. An der Harvard University machte sich ein Team unter Leitung des Genetikers George Church daran, mittels CRISPR/Cas9 die Erbanlagen in menschlichen Zellen zu verändern, womit sich neue therapeutische Möglichkeiten eröffneten.

Flotten Schritts zur Kommerzialisierung

Wie nicht anders zu erwarten, floss nun immer mehr Geld in die CRISPR/Cas9-Forschung. Ende 2013 tat sich Doudna mit George Church, Feng Zhang vom MIT (Massachusetts, USA) und anderen Wissenschaftlern zusammen, um das Unternehmen Editas Medicine zu gründen. Die Firma verfolgt das Ziel, auf der Basis der CRISPR/Cas9-Methode neue Medikamente gegen ein breites Spektrum genetisch bedingter Erkrankungen zu entwickeln. Im April 2014 ging das Unternehmen CRISPR Therapeutics in Basel und London an den Start, das ähnliche Ziele wie Editas Medicine hat. Bis diese Firmen

neue Therapieverfahren entwickelt haben, werden noch Jahre vergehen. Laborzulieferer bieten aber bereits injektionsfertige CRISPR/Cas9-Sets an und liefern auf Bestellung auch CRISPR/Cas9-modifizierte Mäuse, Ratten und Kaninchen.

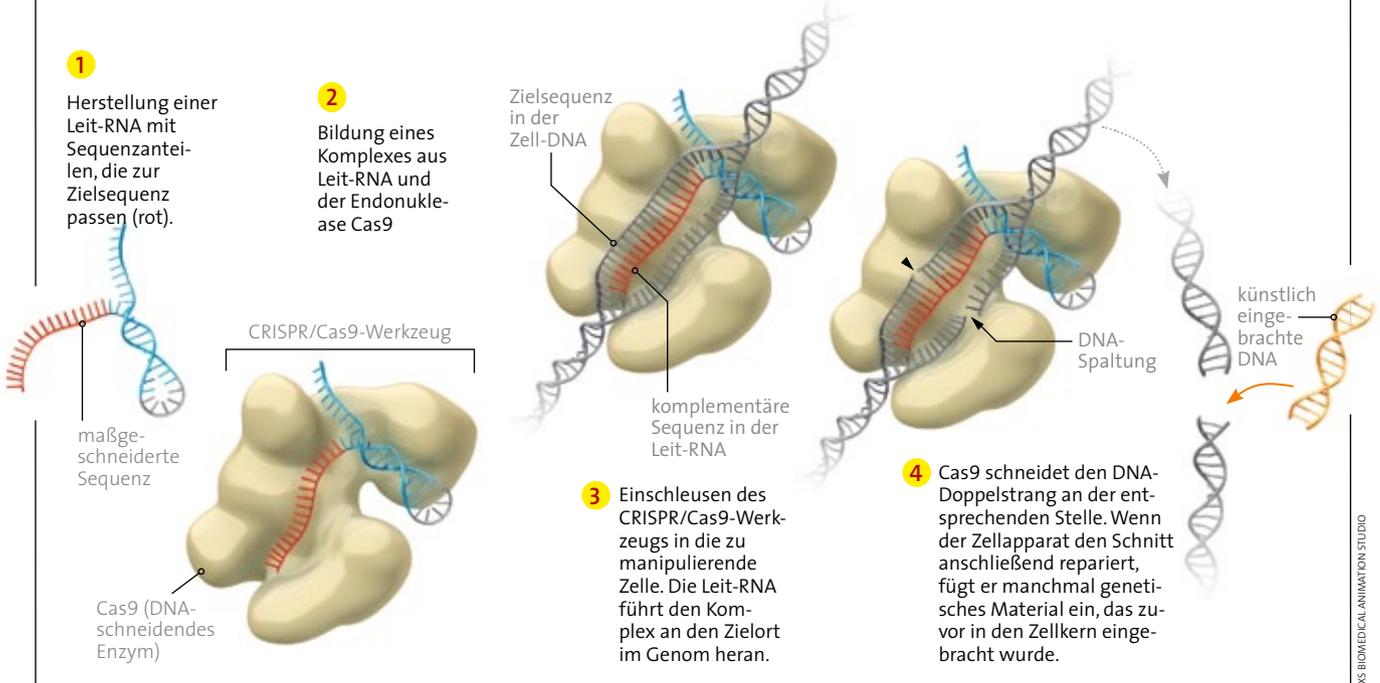
Im Jahr 2014 besuchte ich die SAGE Labs in St. Louis, eines der ersten Unternehmen, welche die CRISPR/Cas9-Technologie in Lizenz einsetzen, um Nagetiere gentechnisch zu manipulieren (es wurde inzwischen von der englischen Horizon Discovery Group übernommen). Die Wissenschaftler, die dort arbeiten, erhalten Onlinebestellungen, beispielsweise von einem Labor im kalifornischen Sacramento, das 20 *Pink1*-Knockout-Ratten ordert, um an den Tieren verschiedene Aspekte der Parkinsonkrankheit zu erforschen. In einem Nebengebäude sind Ratten mit diesem Gendefekt untergebracht – ebenso wie andere Nager, die per CRISPR/Cas9-Technik genetisch manipuliert wurden, um sie zu Modellorganismen für Schizophrenie oder Schmerzkrankungen zu machen. Nach Eingang der Bestellung suchen die Mitarbeiter die gewünschte Anzahl Ratten der richtigen Sorte heraus und verschicken sie per Luftfracht.

Manchmal benötigt ein Kunde jedoch gentechnisch veränderte Nager, die nicht vorrätig sind. Möchte er etwa einen bis-

So funktioniert CRISPR/Cas9

Streptokokken nutzen ein DNA-Archiv, um eindringende Viren zu zerstören. Ihr Genom enthält kurze, sich wiederholende Abschnitte, so genannte CRISPR. Dazwischen liegen DNA-Sequenzen, die mit denen von Viren übereinstimmen. Diese dienen als Vorlage für kurze RNA-Stücke, die eine Endonuklease namens Cas9 an die DNA eindringender Viren heranführen. Passt die Sequenz der Viren-DNA zu jener der RNA-Stücke, schneidet Cas9 an der entsprechenden Stelle und zerlegt damit die virale DNA.

Dieses natürliche System kann man zweckentfremden, um beliebige Sequenzen aus beliebigen DNA-Molekülen zu schneiden. Man muss hierfür eine passende Leit-RNA herstellen, die Cas9 an die gewünschte Stelle führt, was heute relativ einfach umzusetzen ist. Cas9 selbst als DNA-manipulierendes Enzym bleibt dabei unverändert – ein großer Vorteil gegenüber früheren Verfahren, die für jeden Eingriff die Herstellung eines spezifischen Enzyms erforderten.



Embryonenforschung mittels CRISPR/Cas9 sorgt für Aufregung

Im April dieses Jahres berichteten chinesische Forscher als erste weltweit, sie hätten mit gentechnischen Methoden gezielt ins Erbgut menschlicher Embryonen eingegriffen. Sie nutzten die CRISPR/Cas9-Methode, um ein Gen zu verändern, das in mutierter Form die schwere Blutkrankheit Beta-Thalassämie verursachen kann. Die Studie, die in der Fachzeitschrift »Protein & Cell« erschien, löste unter Forschern eine breite Debatte darüber aus, wie weit gentechnische Eingriffe noch ethisch vertretbar sind.

Diskutiert wurde auch, ob derartige Forschungsergebnisse überhaupt veröffentlicht werden sollten. Laut Junjiu Huang, dem federführenden Autor der chinesischen Studie, lehnten die Fachzeitschriften »Nature« und »Science« eine Publikation ab, unter anderem wegen ethischer Bedenken. »Protein & Cell« hingegen nahm den Artikel nur zwei Tage nachdem die Chinesen ihn eingereicht hatten zur Veröffentlichung an.

Die Studie lieferte sehr durchwachsene Ergebnisse. Die Wissenschaftler experimentierten mit nicht überlebenden Embryonen, die bei künstlichen Befruchtungen erzeugt worden waren. Sie behandelten 86 davon mit der CRISPR/Cas9-Technik, um ein bestimmtes Gen zu verändern, und ließen die Embryonen sich anschließend weiter entwickeln. 48 Stunden später hatten noch 71 überlebt, von denen 54 genetisch getestet wurden. Bei nur 4 Embryonen war das Gen wie gewünscht modifiziert worden. Zudem hatte das CRISPR/Cas9-System nicht bloß die Zielsequenz, sondern auch andere Stellen im Erbgut verändert, was das Risiko gefährlicher Mutationen birgt. Insgesamt lieferte die Studie einen deutlichen Beleg dafür, dass die Methode für gentechnische Eingriffe an Embryonen noch nicht ausgereift ist.

Unterdessen verlängert sich die Liste der Arten, bei denen Forscher mit Hilfe von CRISPR/Cas9 erfolgreich ins Genom eingegriffen haben. Entsprechende Ergebnisse liegen nicht nur von üblichen Modellorganismen wie Taufliegen und Mäusen vor, sondern unter anderem auch von Pilzen (*Candida albicans*), Wirbeltierparasiten (Trypanosomen und Kryptosporidien), Nutzpflanzen (Reis, Weizen, Orangen) und Nutztieren (Mischweine, Rinder, Ziegen). Schon seit längerem arbeiten Wissenschaftler auch an CRISPR/Cas9-Varianten, indem sie das Enzym Cas9 oder die Leit-RNA verändern, beispielsweise durch Verknüpfen der Leit-RNA mit Transkriptionsfaktoren. Diese modifizierten Systeme schneiden die Zielstruktur auf der DNA nicht mehr, sondern kurbeln die Expression des jeweils anvisierten Gens an, und zwar mitunter mehr als 100-fach. Frank Schubert

Protein & Cell 6, S. 363–372, 2015
Nature 520, S. 593–594, 2015
Nature 522, S. 20–24, 2015

her unbeachteten Zusammenhang zwischen der Parkinsonkrankheit und einem bestimmten Gen beziehungsweise einer spezifischen Mutation untersuchen, hat er bei der Bestellung diverse Möglichkeiten. Die SAGE-Wissenschaftler können mit CRISPR/Cas9 das Gen zum Beispiel abschalten, gezielt eine Mutation in ihm erzeugen oder es durch ein menschliches Allel ersetzen. Bei etlichen Krankheiten, von Parkinson über Mukoviszidose bis hin zu Aids, sind eine Vielzahl genetischer Varianten beteiligt, und all diese komplexen Mutationen nacheinander in lebenden Tieren zu erzeugen, dauerte früher bis zu einem Jahr. CRISPR/Cas9 hingegen erlaubt es den Wissenschaftlern, multiple genetische Veränderungen auf einen Schlag vorzunehmen, indem sie zeitgleich mehrere solcher Komplexe mit verschiedenen Leit-RNAs injizieren. Das reduziert die Zeitspanne auf wenige Wochen.

Zunächst stellen die Wissenschaftler maßgeschneiderte Leit-RNA(s) her. Dann fügen sie diese und Cas9 zu einem molekularen Komplex zusammen: dem CRISPR/Cas9-Werkzeug. Dieses Konstrukt testen die Forscher ungefähr eine Woche lang, indem sie es mit Hilfe kurzer, starker Spannungspulse in tierische Zellen einschleusen. Dort schneidet der Komplex die zelluläre DNA. Wenn die Zelle den Schnitt repariert, werden zusätzliche Nukleotide ins Erbmolekül eingebaut oder Teile der DNA-Sequenz entfernt.

CRISPR/Cas9 erzeugt allerdings nicht in allen behandelten Zellen solche Mutationen. Um festzustellen, wie effizient der Komplex gearbeitet hat, extrahieren die Wissenschaftler die DNA-Moleküle aus den Zellen und untersuchen diese mit molekularbiologischen Methoden. Am Ende der Prozedur steht ein Signal auf einem Computermonitor, das umso heller leuchtet, je mehr DNA-Moleküle CRISPR/Cas9 verändert hat.

Mit dem in vitro getesteten Werkzeug erzeugen die Wissenschaftler nun genetisch abgewandelte Embryonen. Hierfür injizieren sie CRISPR/Cas9-Komplexe in einen der beiden Vorkerne einer befruchteten Eizelle. Die Mutationen, die das Werkzeug dort erzeugt, betreffen somit den gesamten Embryo, der aus der befruchteten Eizelle entsteht.

Gentechnik für die Massen

Die Embryonen wachsen zunächst in temperierten Brut-schränken heran, bevor die SAGE-Mitarbeiter sie Rattenweibchen einpflanzen. Jede dieser »Leihmütter« bekommt 30 bis 40 Embryonen eingesetzt, von denen sie 20 Tage später 5 bis 20 als Jungtiere zur Welt bringt. Im Alter von zehn Tagen entnehmen die Wissenschaftler diesen Gewebeproben, um zu ermitteln, welche davon die beabsichtigte Genmutation tragen. »Das ist der spannende Teil«, sagt Brown. »Manchmal weisen wir nur in einem von 20 Tieren die Veränderung nach.« Doch angesichts der enorm großen Zahl von Embryonen, deren Erbgut man auf diese Weise verändern kann, handelt es sich in der Tat um eine Gentechnikmethode »für die Massen«, wie David Smoller, Geschäftsführer bei SAGE, es formuliert.

Nachdem die CRISPR/Cas9-Technik in zunehmendem Maß kommerziell eingesetzt wird, spekulieren Wissenschaft-

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



[www.spektrum.de/
t/gentherapie](http://www.spektrum.de/t/gentherapie)

FOTOLIA / GERNOT KRAUTBERGER

ler und Unternehmer über immer neue Anwendungsgebiete, und manche davon erscheinen wie Hybris. So besteht theoretisch die Möglichkeit, krank machende Mutationen, die auf den Embryo vererbt wurden, in der frühen Schwangerschaft zu korrigieren (siehe »Embryonenforschung«, links). Auch erlaubt die Methode im Prinzip, resistente Unkräuter anfällig für Herbizide zu machen oder gar ausgestorbene Tierarten wieder zum Leben zu erwecken. Solche Gedankenspiele wirken auf viele beängstigend. Medienschlagzeilen wie »Eine großartige Möglichkeit, Gott zu spielen« künden von der Furcht davor, Wissenschaftler könnten in ihrem Bemühen, etwa die Welt von Malaria-Mücken zu befreien oder die Huntington-Krankheit zu heilen, jede Menge Erbanlagen mit brandgefährlichen Mutationen in die Welt setzen.

Die Idee, Malaria-Mücken auszurotten, verfolgen mehrere Forschergruppen. Ihr Ansatz: eine schädliche Mutation auf einem Chromosom im Erbgut der Insekten verursachen und dann das Schwesterchromosom an der entsprechenden Stelle schneiden, so dass das zelluläre Reparatursystem die Mutation auf dieses kopiert. Infolgedessen erben praktisch alle Nachkommen die genetische Veränderung, die sich nun extrem schnell in der Population verbreitet. Auf diese Weise könnte man die Mückenpopulation rasch ausrotten und mit ihr die Malaria-Parasiten. Doch Todd Kuiken, Experte für biologische Sicherheit am Woodrow Wilson International Center for Scholars in Washington, warnt vor diesem Ansatz. Man müsse Sorge tragen, mit dem Verfahren nicht zehn neue Probleme zu schaffen, meint er. Die Veränderung oder gar Ausrottung einer ganzen Population könnte drastische, unvorhersehbare Konsequenzen für das betroffene Ökosystem haben, zumal sie wohl nicht umkehrbar sei.

Viele Wissenschaftler haben diese potenziellen Gefahren bereits erkannt. Als Forscher der Harvard University (USA) im Juli 2014 einen Artikel veröffentlichten, in dem es darum ging, mit Hilfe der CRISPR/Cas9-Technik Malaria-Mücken auszurotten, initiierten sie auch eine öffentliche Diskussion darüber und schlugen technische und juristische Maßnahmen für den Fall vor, dass die gentechnischen Eingriffe unkontrollierbare Konsequenzen haben. »Die CRISPR-Technik stößt eine unglaublich schnelle Entwicklung an«, sagt Jeantine Lunshof, Bioethikerin an der Harvard University. »Viele Menschen haben noch nicht davon gehört, aber es wird schon in großem Maßstab genutzt.« In Berkeley hat sich auf Betreiben Doudnas

ein Team zusammengefunden, das gezielt die ethischen Konsequenzen von CRISPR/Cas9-Anwendungen diskutiert.

Trotz alledem überwiegt die Begeisterung über die therapeutischen Möglichkeiten der neuen Technik. Mitte 2014 berichteten Wissenschaftler vom MIT, sie hätten Mäuse von der Tyrosinämie geheilt – einer seltenen Stoffwechselerkrankung –, indem sie ihnen das CRISPR/Cas9-Werkzeug einfach in den Schwanz injizierten. Sie verabreichten drei verschiedene Leit-RNAs zusammen mit Cas9 sowie der intakten Version des in den Tieren mutierten Gens. Damit gelang es ihnen, die funktionsfähige DNA in das Erbgut etwa einer von 250 Zellen der Leber einzuschleusen. Im darauf folgenden Monat vermehrten sich diese gesunden Leberzellen, bis sie im Gewebeverband schließlich ein Drittel der kranken ersetzt hatten – genug, um die Mäuse von den Symptomen zu befreien.

Wenig später berichteten Wissenschaftler der Temple University (Pennsylvania, USA), sie hätten die Sequenz des Aids-Erregers HIV mit Hilfe von CRISPR/Cas9 aus dem Genom mehrerer menschlicher Zelllinien herausgeschnitten. Für den Virologen Kamel Khalili, der diese Arbeiten leitete und seit den 1980er Jahren nach Ansätzen gegen HIV und Aids sucht, ist die CRISPR/Cas9-Technik geradezu revolutionär. Obwohl man in der Aidsbehandlung große Fortschritte gemacht hat, kann man HIV-Infektionen mit den heutigen Mitteln nur unter Kontrolle halten, aber nicht heilen. Das CRISPR/Cas9-Verfahren hingegen erlaubte es Khalili und seinem Team, die HIV-DNA, die sich ins Erbgut der Zellen integriert hatte, vollständig daraus zu entfernen und somit infizierte Zellen in gesunde umzuwandeln.

Zudem, so der Virologe, könne man auch gesunde Zellen vor einer Infektion mit dem Virus schützen. Hierfür müsse man die Zellen immunisieren, indem man kurze Sequenzen aus dem Genom des angreifenden Virus in sie einbaut, ähnlich wie das bei Bakterien zu beobachten ist, die sich mit viralen DNA-Fragmenten vor angreifenden Viren schützen. Man könne von einer Art genetischem Impfstoff sprechen. »Das wäre die ultimative Heilung«. ~

DIE AUTORIN



Margaret Knox ist Autorin und Lektorin. Sie lebt in Boulder, Colorado.

QUELLEN

- Barrangou, R.:** RNA Events. Cas9 Targeting and the CRISPR Revolution. In: *Science* 344, S. 707–708, 2014
Jinek, M. et al.: RNA-Programmed Genome Editing in Human Cells. In: *eLife*, 00471, 2013
Mali, P. et al.: Cas9 as a Versatile Tool for Engineering Biology. In: *Nature Methods* 10, S. 957–963, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1355999

Winzige Zeugen der Vergangenheit

Kieselsäurepartikel aus Pflanzen liefern Paläontologen, Archäologen und Kriminalisten wertvolle Aufschlüsse – über den Speiseplan der Dinosaurier bis hin zu Indizien für Mordprozesse.

Von Thomas C. Hart

Auf den Kapverdischen Inseln schrieb Charles Darwin (1809–1882) im Januar 1832 in sein Tagebuch von einem feinen Staub. In den später von ihm herausgebrachten Reisenotizen heißt es:

»Im Allgemeinen ist die Atmosphäre diesig, was durch das Herabsinken von äußerst feinem Staub verursacht wird, der auch die astronomischen Instrumente leicht beschädigt hatte. Am Morgen, bevor wir vor Porto Praya ankerten, sammelte ich ein kleines Päckchen dieses braun gefärbten feinen Staubes, der offenbar von der Gaze der Wetterfahne an der Mastspitze aus dem Wind gefiltert worden war. Auch hatte mir Mr. Lyell vier Päckchen Staub gegeben, der einige hundert Meilen nördlich dieser Inseln auf ein Fahrzeug gefallen war. Professor Ehrenberg hat ermittelt, dass dieser Staub zu großen Teilen aus Infusorien mit kieselhaltigen Schilden und aus kieselhaltigem Pflanzengewebe besteht. In den fünf Päckchen, die ich ihm schickte, hat er nicht weniger als siebenundsechzig verschiedene organische Formen bestimmt!« (aus: Charles Darwin, »Die Fahrt der Beagle«, neue Übersetzung 2006).

Christian Gottfried Ehrenberg (1795–1876), der Begründer der Mikrobiologie und Mikropaläontologie, war eine inter-

nationale Koryphäe, ebenso wie der Geologe Charles Lyell (1797–1875), dessen Hauptwerk über allmähliche Landveränderungen durch langsame Gesteinsbildung Darwin stark beeinflusste.

Weiterhin schreibt Darwin, solcher Staub trete in jener Meeresgegend häufig auf. Nicht selten verlören Schiffe in dem Dunst die Orientierung. Die winzigen Kieselsäurepartikel, damals als Pflanzen-Opale, Opal-Silikate oder Opal-Phytolithe bezeichnet, heißen heute meist einfach Phytolithe – »Pflanzensteine«.

Die an kleine Kristalle erinnernden Partikel entstehen weit gehend genetisch gesteuert in und zwischen Pflanzenzellen der äußeren Gewebeschichten. Die Pflanze nimmt über ihre Wurzeln in Wasser gelöste Mineralien auf, darunter Monokieselsäure: $\text{Si}(\text{OH})_4$; auch Orthokieselsäure genannt. Die Wassermoleküle verwendet sie zur Fotosynthese und Verdunstung, und die Kieselsäure bleibt auf dem Weg zu den Blättern zurück, verbindet sich zu größeren Strukturen und lagert sich ab (siehe Bild S. 30). Manche Pflanzen trennen das Wasser sogar aktiv von darin enthaltenen Mineralien und deponieren die Kieselsäure in speziellen Speichergeweben. Weil sich diese Gebilde an morphologische Gegebenheiten in der Pflanze anpassen, sind sie quasi Abdrücke ihrer Umgebung und darum vielfach spezifisch für bestimmte Pflanzenarten oder -gruppen.

In so gut wie allen Böden der verschiedensten Umwelten finden sich gewöhnlich Unmengen von Phytolithen, denn sie entstehen in Landpflanzen aus fast allen großen systematischen Gruppen, von den Blüten- und Samenpflanzen bis zu den Farnen. In der Hauptsache bestehen die 1 bis über 100 Mikrometer (ein zehntel Millimeter) großen Gebilde aus Siliziumdioxid, Wasser und organischem Kohlenstoff. In Spuren können sie außerdem beispielsweise Aluminium, Eisen, Magnesium, Mangan, Phosphor, Kupfer und Stickstoff enthalten. Farblich variieren sie zwischen hellbräunlich bis milchig trüb, wobei sie meistens leicht durchsichtig wirken. Gewöhnlich verbleiben die Phytolithe einer Pflanze nach deren Verwesung an Ort und Stelle, werden im Boden chemisch ge-

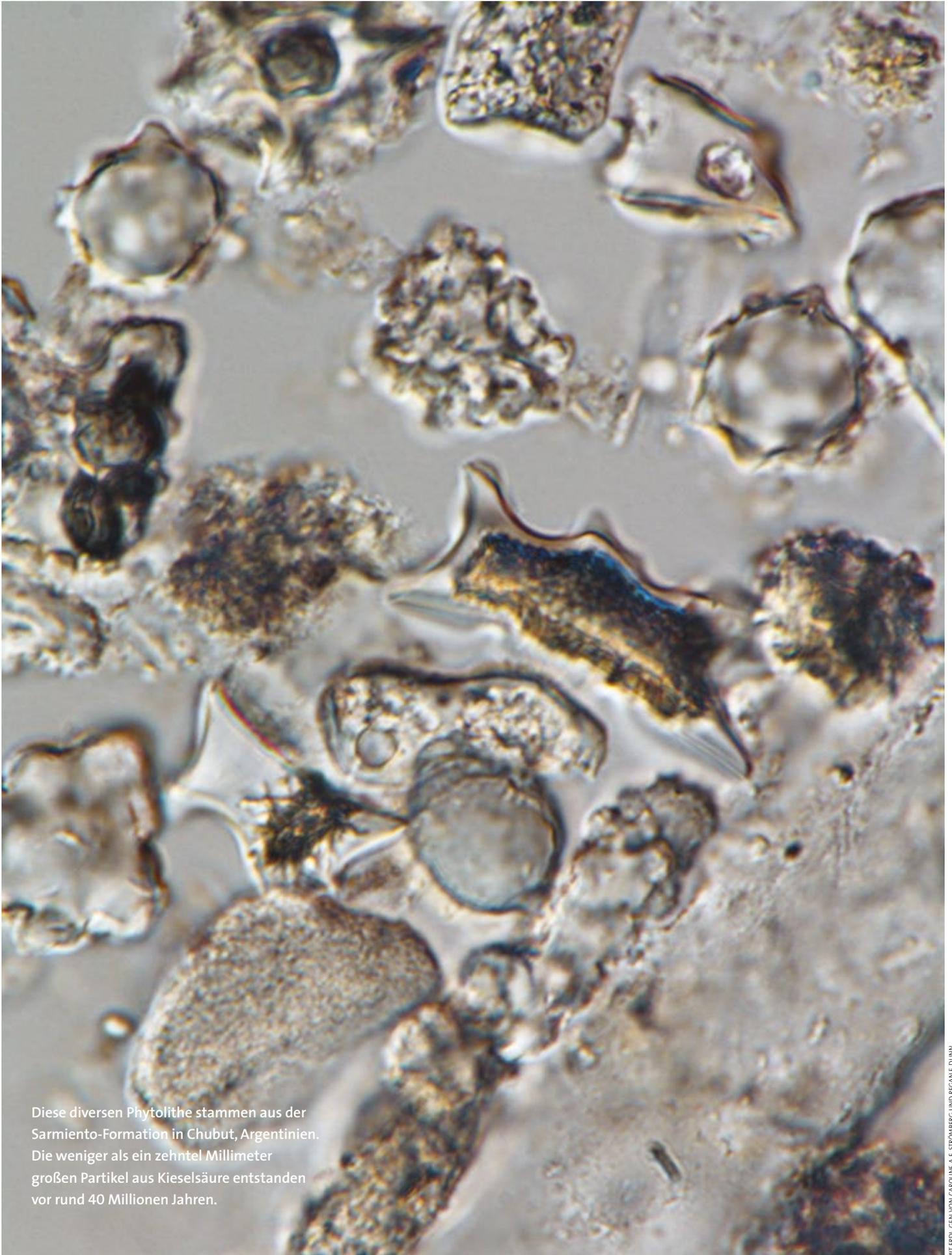
AUF EINEN BLICK

PHYTOLITHE: PFLANZENSPUREN, DIE ÜBERDAUERN

1 Winzige Pflanzensteinchen aus Kieselsäure – **Phytolithe** – bleiben dauerhaft zurück, wenn sich die Wirtspflanze zersetzt. Vielfach ist ihre Form charakteristisch für die Herkunftsart und darum für viele Forschungsgebiete wertvoll.

2 Wissenschaftler ziehen Phytolithe für **Evolutionsfragen** heran, für **archäologische Untersuchungen** – oder auch zur Aufklärung von **Verbrechen**.

3 Weil die Kieselsäurekörper Kohlenstoff binden, der nach dem Absterben der Wirtspflanze nicht freigesetzt wird, können sie einen deutlichen Beitrag zur **Reduktion von Kohlendioxid** in der Atmosphäre leisten.



Diese diversen Phytolithe stammen aus der Sarmiento-Formation in Chubut, Argentinien. Die weniger als ein zehntel Millimeter großen Partikel aus Kieselsäure entstanden vor rund 40 Millionen Jahren.

bunden und geben dann Aufschluss über die lokale Vegetation zur fraglichen Zeit. Doch kommt es auch vor, dass sie mit aufgewirbeltem Staub fortgetragen werden, manchmal sogar weit aufs Meer. Selbst dann lassen sie in Sedimenten zu Land und Wasser, ja selbst in der Tiefsee auf vergangene Klimaverhältnisse schließen (siehe SdW 2/15, S. 20–26).

Jüngeren Studien zufolge scheinen Phytolithe den Pflanzen auf verschiedene Weise zu nützen. Unter anderem bestimmen über ihre Herstellung die gleichen Gene wie über die Bildung von Lignin, einem Hauptbestandteil von Holz, der gegen Fraßfeinde und Infektionen schützt. Pflanzenteile mit reichlich solchen Einlagerungen lassen sich nur mühsam fressen und verdauen wie auch von Pilzen schwer angreifen. Teils verleihen die Kieselsäuren zudem Stabilität, etwa den Stängeln und Blättern von Reispflanzen. Außerdem halten sie giftige Schwermetalle wie Mangan und Aluminium fest. Noch ist aber nicht erwiesen, ob es sich hierbei um regelrechte Anpassungen der Pflanzen handelt oder lediglich um Nebeneffekte von noch nicht erkannten Vorgängen.

Viel besser erforscht sind Phytolithe dagegen als Anzeiger für zurückliegende Geschehnisse und Umwelten. Paläontologen, Archäologen und Klimatologen lieferten sie bereits manchen entscheidenden Hinweis, nicht zuletzt für Altersbestimmungen. Im Umfeld von archäologischen Artefakten etwa erbrachten sie wertvolle zusätzliche Daten, denn die pflanzlichen Kieselsäurepartikel überdauern oft viele Millionen Jahre und bis zu 1000 Grad Celsius. Archäologen zählen sie zu den begleitenden Ökofakten, unter die alles Mögliche fällt – Tierknochen und Parasitenspuren, verkohlte, getrocknete oder wasserdurchtränkte Pflanzenreste, Pollen, Stärkekörner oder diverse kristalline Überbleibsel aus Pflanzenfasern. Das Wichtigste dabei: Häufig lässt die Form der Kieselsäuregebilde auf eine bestimmte Pflanzengruppe, nicht selten genau auf die Art oder sogar Unterart und manchmal auf den verwendeten Pflanzenteil schließen, etwa wenn solche Partikel an Oberflächen von Gerätschaften haften. Und Phytolithe in versteinertem Kot, im Zahnbelag und sogar im Zahnstein erzählen, was die Menschen oder Tiere aßen.

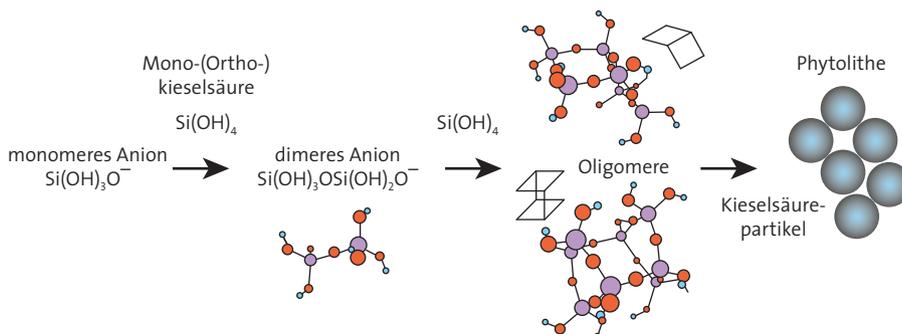
Auch brachten sie bereits Licht in einige große evolutive Umschwünge, so das Aufkommen von Graslandschaften und die Evolution von deren Bewohnern. Wann Gräser und mit ihnen Savannen und Steppen – und die daran angepassten Tiere – entstanden und sich ausbreiteten, war lange unsicher.

Irgendwann vor rund 70 Millionen Jahren, also im späten Erdmittelalter oder am Beginn der Erdneuzeit, müsste diese Entwicklung eingesetzt haben, in deren Folge viele Regionen ein völlig anderes Gesicht bekamen. Caroline Strömberg von der University of Washington in Seattle und ihre Mitarbeiter entdeckten Phytolithen in Indien in Kotsteinen von Titanosauriern aus der späten Kreidezeit (Bild rechts). Damals, kurz vor dem Untergang der Dinosaurier, hatten die langhalsigen Kolosse neben allen möglichen anderen Pflanzen auch verschiedene Süßgräser gefressen. Sie müssen in Waldbeständen geweidet haben, denn ansonsten taten sie sich unter anderem an Nadelbäumen, Palmfarnen und Palmen gütlich. Demnach könnten Süßgräser zuerst in Wäldern entstanden sein und haben erst später eigene großflächige Ökosysteme gebildet. Das würde erklären, wieso Tiere jener Zeit noch nicht besonders konstruierte hochkronige, harte Zähne zum Zermalmern harten Pflanzenmaterials wie Gräsern besaßen.

Verkannte Mastodonten: Indizien im Zahnstein der Urzeitriesen

Bis zu den Untersuchungen von 2001, die Katrina Gobetz von der James Madison University in Harrisonburg (Virginia) und Steven Bozarth von der University of Kansas in Lawrence durchführten, dachten die Fachleute, das Amerikanische Mastodon (*Mammot americanum*), das in Nordamerika vor 1,8 Millionen Jahren auftrat und weit verbreitet war, habe sich hauptsächlich im Wald ernährt. Das nicht ganz mammutgroße, dickfellige Tier starb dort erst vor 10000 Jahren aus. In einer der ersten Studien dieser Art gewannen die Forscher Phytolithe aus dem Zahnstein von drei Mastodonten aus Kansas, die vor rund 12000 Jahren gelebt hatten. Diese besagten: Jene Tiere fraßen vorwiegend Süßgräser einer bestimmten Gruppe und nur wenig Laub, Zweige; oder vielleicht auch einmal Früchte von Sträuchern und Bäumen. Sie müssen in einer offenen, feuchten, kühlen Umgebung geweidet haben, da ihr Zahnstein außerdem Kiesalagen enthielt.

Ein anderes Beispiel ist der chinesische und nordindische Riesenmenschenaffe *Gigantopithecus*, der vielleicht drei Meter groß war und von vor 6 Millionen bis vor 200000 Jahren lebte. Die Kolosse dürften sich meist auf dem Waldboden aufgehalten haben und liefen auf den Fingerknöcheln. Wie die Archäobotanikerin Dolores Piperno von der Smithsonian Institution in Washington, D.C., und ihre Mitarbeiter heraus-



Mit Wasser, das sie aus dem Boden ziehen, nehmen Pflanzen darin gelöste Mono-kieselsäure auf. Diese lagert sich in der Pflanze ab und bildet dabei charakteristische mikroskopische Partikel, die die Zeiten überdauern.



Solche Phytolithe aus frühen Gräsern in versteinertem Kot von Titanosauriern offenbaren, dass diese Pflanzengruppe bereits zur Zeit der Dinosaurier entstand – anscheinend im Wald.

fanden, haften an den Zähnen von deren Fossilien Kieselsäurepartikel diverser Gräser, so von Bambus. Außerdem fraßen diese Menschenaffen Blätter oder Früchte von Bäumen. Die Untersuchung von 1990 zählt zu den ersten, die nachwiesen, dass Phytolithe auch im Zahnbelag erhalten bleiben können.

Erst 2012 gaben Studien von Amanda G. Henry vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig Aufschluss über die Ernährungs- und somit Lebensweise eines kürzlich entdeckten Australopithecinen, der zur Zeit der ersten Frühmenschen vor zwei Millionen Jahren im südlichen Afrika lebte. Noch ist unklar, wie nah *Australopithecus sediba* mit der Gattung *Homo* verwandt war. Den Einlagerungen im Zahnstein zufolge aß dieser Primat offenbar Blätter und Früchte sowie verschiedenste Gräser, allesamt Schattliebende Tropengewächse von eher feuchten Standorten – statt seine Nahrung in der Savanne zu suchen, wie bei einem unmittelbaren Vorfahren der ersten Menschen eher zu erwarten wäre (siehe SdW 9/12, S. 22–31).

Phytolithe können sogar frühe handwerkliche Tätigkeiten anzeigen. Manuel Dominguez-Rodrigo von der Universidad Complutense in Madrid und seine Mitarbeiter entdeckten an rund 1,6 Millionen Jahre alten Faustkeilen von Peninj in Tansania Kieselsäurepartikel von Akazien. Wahrscheinlich waren es Vertreter von *Homo erectus* (auch *H. ergaster* genannt), die damals das Holz bearbeiteten. Die hölzernen Artefakte – vielleicht Werkzeuge –, die sie fertigten, haben sich nicht er-

halten. Die bis dahin frühesten Hinweise auf dergleichen waren eine Million Jahre jünger.

Selbst das Verhalten und soziale Leben von Neandertalern rücken solche Untersuchungen in ein neues Licht. 2012 zeigten Henry und Piperno mit ihren Teams an Zahnstein, dass diese Frühmenschen keineswegs überwiegend Fleisch verzehrten. Vielmehr aßen sie im Gebiet des heutigen Irak zum Beispiel auch Datteln und in der Region von Belgien Wurzeln und Knollen. Eine andere Studie lässt erahnen, wie die Bewohner der Höhle Tor Faraj im Jordantal – mutmaßlich Neandertaler – an diesem Ort vor über 50 000 Jahren lebten: Am Eingang fanden sich Phytolithe von holzigen Pflanzen. Hatte die Menschen hier mit Ästen oder Stämmen einen Windschutz errichtet? Im Innern der Höhle waren um die Feuerstelle in der Mitte Kieselsäurepartikel aus Schalen von Datteln und Grassamen zu entdecken. Vermutlich bereitete man dort Pflanzennahrung zu. Und im hinteren Teil der Höhle gab es Unmengen von Grasphytolithen – anscheinend betteten sich die Leute auf Gräser. Diese Befunde wie auch ähnliche von anderen Wohnorten bewiesen erstmals, dass Neandertaler ein durchaus modernes Verhalten zeigten.

Ein weiteres großes Forschungsfeld betrifft die Herkunft unserer Nutzpflanzen. Gerade im Tropenklima zersetzen sich die meisten Pflanzenbestandteile rasch. Zusammen mit der Paläoethnologin Deborah Pearsall von der University of Missouri in Columbia konnte Piperno den Ursprung von Mais klären helfen. Die Forscherinnen erkannten, dass die Phytolithe des Vorfahren, der Teosinte, ziemlich anders aussehen (Bild S. 32). Das führte zusammen mit anderen Indizien auf die richtige Spur: Mais dürfte vor rund 9000 bis 8000 Jahren im Tal des Rio Balsas in Südwestmexiko gezüchtet worden sein. Mit ähnlichen Methoden untersuchen Botaniker, wo Reis, Weizen, Hafer, Bananen oder die mit Bananen verwandte Faserpflanze Ensete domestiziert wurden.

Wie die ersten sesshaften Kulturen Pflanzen nutzten

Besonders für die Archäologie sind pflanzliche Siliziumeinschlüsse oft aufschlussreich – sogar dann noch, wenn reichlich Artefakte vorliegen. Bei meiner Doktorarbeit an der University of Connecticut in Storrs analysierte ich Phytolithe sowie mikroskopische Stärkekörner aus menschlichem Zahnstein und aus archäologischen Sedimenten vom Ort Tell Zeidan im heutigen Syrien. Die mesopotamische Siedlung am Zusammenfluss des Balikh und des Euphrat existierte von 6000 bis 3800 v. Chr., also genau in der Phase, als vielschichtige Gesellschaften aufkamen. Wie es aussieht, holten die Bewohner Brenn- und Baumaterial aus umliegenden Feuchtgebieten und Wäldern. Die verkohlten Holz- und Samenreste ließen das so nicht erkennen, zumal sich Blätter von Bäumen und Sumpfpflanzen kaum jemals erhalten haben. Die geplante Gesamtschau der Daten verspricht neue Einblicke in die Bedeutung von Pflanzen und Ackerbau für eine der ersten komplexen menschlichen Gesellschaften.

Für meine Masterarbeit an der University of Missouri hatte ich Stärkekörner sowie Phytolithe aus der Erde und von

Tonscherben aus zwei mittelalterlichen englischen Orten untersucht: Glebe Cottage in Wicken in Northamptonshire; und Durley Cottage in Cambridgeshire. Meine Daten verglich ich mit vorhandenen Befunden zum Ackerbau. Interessanterweise passte beides nicht völlig zusammen. Angebaut wurden hauptsächlich eine Hafer-Gerste-Mischung und Roggen. Doch gegessen hatten die Menschen Weizen, Gerste und Hülsenfrüchte. Wie in bäuerlichen Gesellschaften vielerorts in der Welt üblich, verkaufte man anscheinend die meisten produzierten Lebensmittel, und die Landbevölkerung nahm mit dem Vorlieb, was sie für den Eigenbedarf anbauen konnte.

Das Leben der frühen europäischen Siedler in Nordamerika erhellen Phytolithenanalysen von einer Farm bei Williamsburg in Virginia. Bereits im 17. Jahrhundert betrieben deren Bewohner ihren Hof und die Ländereien unvermutet gut durchorganisiert und wirtschaftlich effizient. Zum Beispiel hatten sie das Land säuberlich in Felder, Weiden und Obstgärten aufgeteilt.

An dem in den Kieselsäurepartikeln eingeschlossenen Kohlenstoff lassen sich Datierungen anhand des radioaktiven Kohlenstoffisotops C-14 vornehmen, das mit der Zeit zerfällt. Die klassische Methode der Radiokarbonmessung wurde mit der Beschleuniger-Massenspektrometrie wesentlich verfeinert. Dieses Vorgehen ist zwar viel aufwändiger, doch benötigt man nur noch winzige Proben. Oft sind Messungen an Phytolithen Retter in der Not, wenn anderes Material fehlt. Sie haben außerdem den Vorteil, dass man nicht wie sonst oft nur einen Messwert pro Probe erhält, sondern wegen ihrer großen Anzahl viele. Und sie schützen den Kohlenstoff während der notwendigen Aufbereitung der Proben vor den scharfen Chemikalien.

Eingeschlossener Kohlenstoff eignet sich auch dazu, aus Sedimenten auf den Charakter der Vegetation zu einer bestimmten Zeit zu schließen und somit die Umwelt- und Klimabedingungen an einem Ort oder in einer Region festzustellen. In dem Fall vergleicht man das Verhältnis der Isotope C-12 und C-13. Gewöhnlich bevorzugen Pflanzen zur Photosynthese Kohlendioxid mit der leichteren Variante. Manche Pflanzen, die Trockenheit und starkes Licht gut aushalten, tolerieren allerdings ziemlich hohe Anteile von C-13. Zu die-

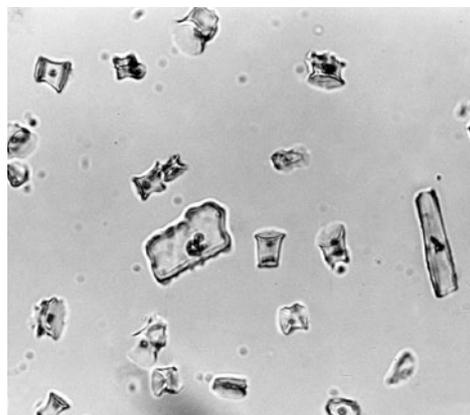
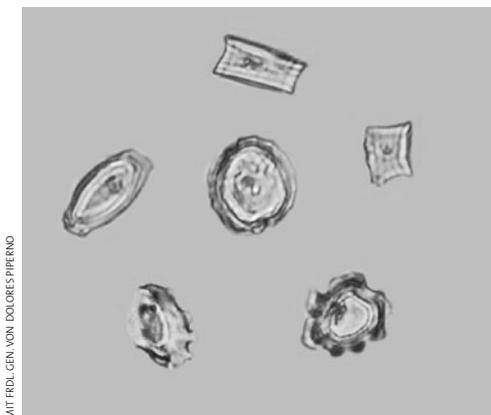
sem Typ gehört ungefähr die Hälfte aller Gräser. Dagegen benötigen die meisten Bäume, Sträucher und Nutzpflanzen viel Feuchtigkeit und vertragen nur mäßige Temperaturen und Sonneneinstrahlung. Sie bauen mehr C-12 ein. Vermutlich ließen sich mit ähnlichen Ansätzen auch Sauerstoff-, Wasserstoff- und Aluminiumisotope von Phytolithen bestimmen. Diese Analysen sind aber noch nicht ausgereift.

In einer Veröffentlichung von 2012 schlug Amanda Henry vor, Phytolithenstudien auf lebende Wildtiere auszudehnen, deren Nahrungsspektrum man ermitteln möchte. Gerade für manche Primaten ist die Gewinnung solcher Daten im Freiland bisher sehr aufwändig und oft trotzdem lückenhaft. Die Forscher müssen den Tieren immerfort dicht auf der Spur bleiben und sie beim Fressen beobachten; oder sie fahnden nach Fraßspuren oder Pflanzenresten an den Aufenthaltsorten und im Kot. Außer in den Fäkalien könnte man auch im Boden nach den Mikropartikeln suchen. Unter Umständen ließe sich von betäubten Tieren Zahnstein gewinnen. Schimpansen können sogar an ihren Werkzeugen aufschlussreiche Spuren hinterlassen.

Leugnen zwecklos: Überführte Verbrecher

Ein völlig anderes Feld ist die Forensik. Mehrere Kriminalfälle konnten bereits mittels Phytolithenindizien aufgeklärt werden. Darunter fällt ein Geschehen im US-Staat Washington. Ein Mann stand im Verdacht der Brandstiftung, Veruntreuung und des Mordes an seinem Sohn, leugnete aber. Sein Haus war plötzlich abgebrannt, und die Unterlagen für die Gebäudeversicherung befanden sich in einem Nachbarhaus. Der Sohn, den er als vermisst gemeldet hatte, wurde zwei Tage später ermordet aufgefunden. Dreck und Schäden an seinem Auto erklärte er damit, dass er einen bestimmten schlechten Weg entlanggefahren sei. Doch die in dem Dreck gefundenen Phytolithe passten nicht zu diesem Weg, dafür jedoch zu der Fundstelle der Leiche, was die Schuld des Angeklagten bewies.

Zuletzt seien noch die vielfältigen nanotechnologischen Verwendungsmöglichkeiten von Phytolithen erwähnt, an denen schon länger intensiv geforscht wird. Um sie künstlich zu erzeugen, müsste man die entsprechenden morphologischen Strukturen in Pflanzen nachahmen, an denen sie sich



Die Teosinte, von der Mais abstammt, bildet deutlich andere Phytolithe (links) als domestizierter Mais (rechts). Anhand der Pflanzensteinchen stellte sich heraus, dass Menschen dieses Getreide erstmals vor über 8000 Jahren in Südwestmexiko züchteten.

MIT FREIL. GEN. VON DOLORES PIRENO

MIT FREIL. GEN. VON DOLORES PIRENO

Diese Phytolithe stammen aus wenigen Bodenproben aus einem Bergregenwald in Panama. Viele von ihnen lassen sich einem Taxon oder einer Pflanzenart zuordnen: zum Beispiel Magnolien (a); Pfeilwurzgewächsen (b); Palmen (c). Mitunter hilft bei der präzisen Zuordnung allein die Form oder die Oberflächenstruktur – die glatt, warzig oder knorrig sein kann – oder beides zusammen (d–f). Der große, reich verzierte Phytolith rechts in der Mitte (f) stammt von einem Baum. u: Partikel, die nicht zugeordnet werden konnten.



MIT FREDL. GEN. VON DOLORES PIPERNO

normalerweise bilden. Bisher konzentrieren sich die Studien aber meist auf ihre natürlichen Eigenschaften und ihre Gewinnung aus Pflanzen. Beispielsweise vermindern solche Einlagerungen in den Blättern des Weißen Straußgrases, eines verbreiteten Wiesen- und Rasengrases, die Hitzebelastung für die Pflanze. Diese Wirkung ließe sich etwa für Schutzvorrichtungen von thermischen Trennschalern, für Temperatursicherungen, PTC-Widerstände (deren Widerstand bei steigender Temperatur zunimmt) oder für Wärmefühler in Elektrogeräten nutzen.

Auch ein Einsatz gegen Schädlinge ist denkbar. Insekten trocknen durch feinen kieselensäurehaltigen Puder aus, der sich zum Beispiel aus Reisstroh durch Schmelzen der Pflanzensteinchen gewinnen lässt. Als Bestandteil von Nanoverbundstoffen würden diese ebenfalls zunächst erhitzt, damit sie zu einfachen Molekülen degradieren, die sich dann weiterbehandeln lassen. In dieser Form eignet sich Kieselsäure außerdem hervorragend als Träger für medizinische Wirkstoffe und für Kapseln um Enzyme, die erst im Körper freigesetzt werden sollen.

Gegenwärtig untersuchen australische und chinesische Wissenschaftler, ob sich Phytolithe als Speicher für das Treibhausgas Kohlendioxid eignen. Nach der gängigen Auffassung gelangt, wenn Pflanzen sich zersetzen oder vermodern, mehr vom eingebauten Kohlenstoff zurück in die Atmosphäre, als in Phytolithen verbleibt. Das muss einer Studie von Xin Xin Zuo und Hou Yuan Yu von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften zufolge aber nicht immer zutreffen. Die Forscher prüften dazu eine Echte Hirse und eine Kolbenhirse. Nach ihrer Hochrechnung können beide Kulturpflanzen in ihren Phytolithen pro Hektar rund 0,02 Tonnen Koh-

lenstoff dauerhaft binden: mehr, als bei ihrer Verwesung als Kohlendioxid freikommt. Allein die in China angebaute Echte Hirse würde der Atmosphäre jährlich 2370000 Tonnen Kohlendioxid entziehen. Auch Bambuswälder haben nach anderen Studien ein hohes Potenzial als Kohlenstoffsenke.

Charles Darwin ahnte nicht, wie wertvoll die feinen Staubpartikel, die er einsammelte, für die Wissenschaft einmal werden sollten. ~

DER AUTOR



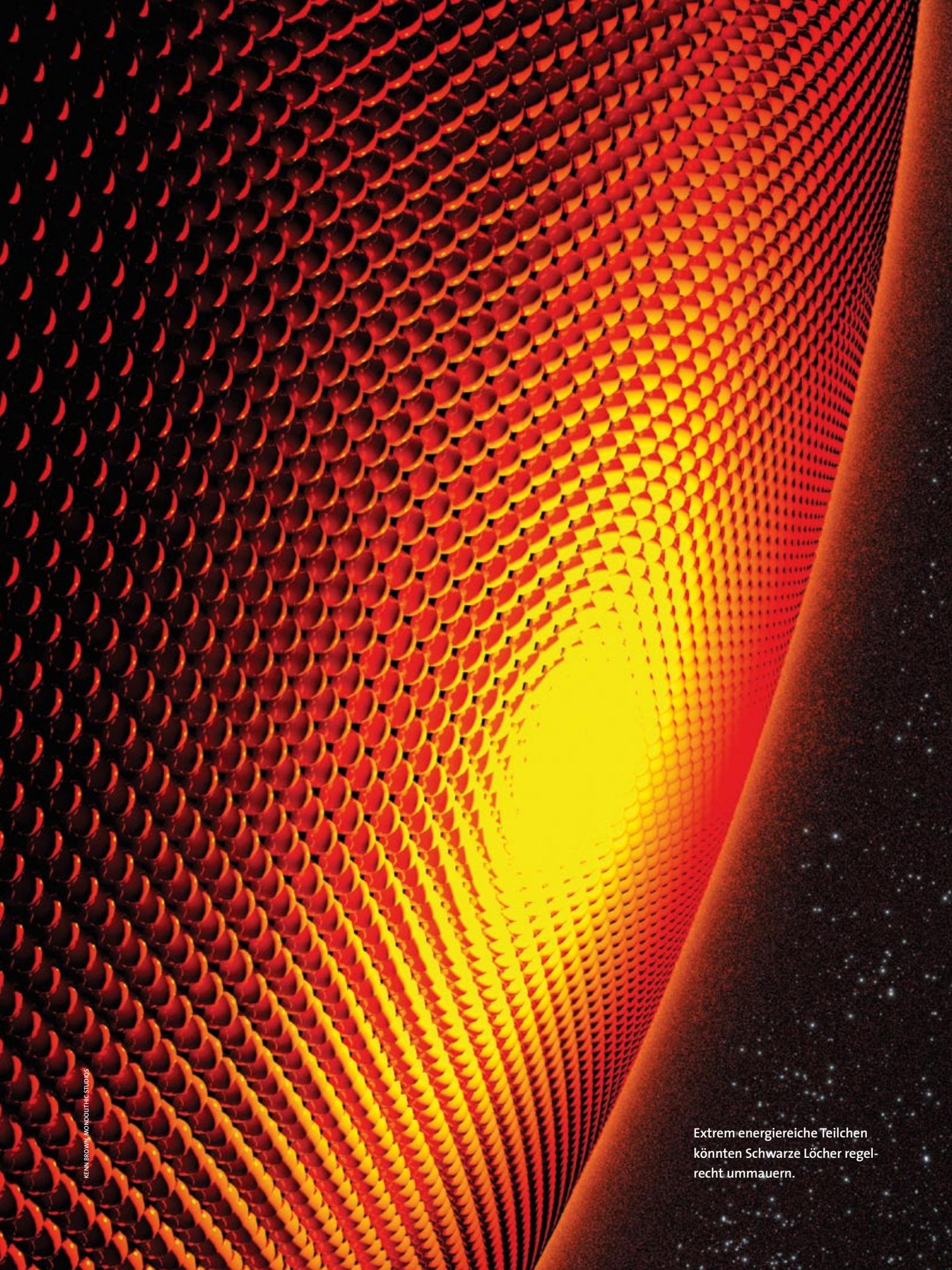
Thomas C. Hart ist Anthropologe und leitet das Labor für Umweltarchäologie an der University of Texas in Austin. Mit archäologischen und archäobotanischen Methoden erforscht er die Umweltbeziehungen der ersten komplexen menschlichen Gesellschaften im Nahen Osten und die Besiedlung Amerikas.

QUELLEN

- Henry, A.G.:** Recovering Dietary Information from Extant and Extinct Primates Using Plant Microremains. In: *International Journal of Primatology* 33, S. 702–715, 2012
- Neethirajan, S.R. et al.:** Potential of Silica Bodies (Phytoliths) for Nanotechnology. In: *Trends in Biotechnology* 27, S. 461–467, 2009
- Parr, J.F. et al.:** Carbon Bio-Sequestration within the Phytoliths of Economic Bamboo Species. In: *Global Change Biology* 16, S. 2661–2667, 2010
- Piperno, D.R.:** *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Palaeoecologists*. AltaMira Press, Lanham (Maryland) 2006

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1356000

© American Scientist



KENYA BROWN / MCDONALD'S STUDIOS

Extrem energiereiche Teilchen
könnten Schwarze Löcher regel-
recht ummauern.

TITELTHEMA: SINGULARITÄTEN

Die Feuerwand am Horizont

Was geschieht am Rand eines Schwarzen Lochs? Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik antworten darauf grundverschieden. Will man die Widersprüche auflösen, ergeben sich bizarre Szenarien. Möglicherweise endet an einer Energiebarriere sogar der Raum selbst.

Von Joseph Polchinski

In ein Schwarzes Loch zu stürzen, wäre eine Reise ohne Wiederkehr. Sollte das einem Astronauten passieren – was würde er dabei sehen und spüren? Was passiert am so genannten Ereignishorizont, hinter dem es selbst für das Licht kein Entrinnen mehr gibt? Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie zufolge nichts Besonderes. Ein frei fallender Beobachter sähe keine Grenze, welche den Moment markiert, ab dem sein Sturz unumkehrbar wird. Er würde auch keine anderen physikalischen Gesetze beobachten.

Doch als meine Kollegen und ich dieses Szenario angesichts neuer Erkenntnisse über den Einfluss der Quantenmechanik betrachteten, erlebten wir eine große Überraschung. Demnach sollte der Astronaut am Ereignishorizont auf eine tödliche Feuerwand aus energiereichen Elementarteilchen prallen. Diese Barriere könnte sogar das Ende des Raums überhaupt markieren.

Auf dieses bizarre Ergebnis stießen wir erstmals 2012, als wir versuchten, Ideen aus der Stringtheorie auf die Physik Schwarzer Löcher anzuwenden. Es ging uns um ein interessantes Argument des berühmten Astrophysikers Stephen Hawking aus den 1970er Jahren. Hawking hatte einen fundamentalen Konflikt zwischen den Vorhersagen der Quantentheorie und der Relativitätstheorie für diese physikalisch extreme Umgebung entdeckt. Eine der beiden Theorien müsse demnach fehlerhaft sein, so seine Schlussfolgerung.

Überschreitet eine Materieansammlung eine kritische Dichte, so führt die Schwerkraft zu einem unaufhaltsamen Kollaps. Die Masse stürzt immer weiter zusammen, bis sie unendlich dicht in einem einzigen Punkt konzentriert ist. Wie sich Raum und Zeit um eine solche »Singularität« krümmen, beschreibt die allge-

meine Relativitätstheorie. Den Mittelpunkt umhüllt demnach ein Ereignishorizont, dessen Durchmesser von der enthaltenen Masse abhängt. Nichts kann aus dessen innerem Bereich herausgelangen, nicht einmal Licht – daher auch die Bezeichnung Schwarzes Loch. Alles, was von außen kommend den Ereignishorizont überquert, rast haltlos in die Singularität.

Für einen einfallenden Beobachter wäre diese schicksalhafte Grenze aber recht unspektakulär. Dafür sorgt das Äquivalenzprinzip der allgemeinen Relativitätstheorie. Für jemanden, der in einem Schwerfeld frei fällt, dürfen sich lokal die physikalischen Gesetze nicht von einer Situation unterscheiden, in der er schwerelos ist und überhaupt nicht von der Gravitation beeinflusst wird. Wer in ein Schwarzes Loch stürzt, darf also keinen Effekt durch die Schwerkraft bemerken, auch nicht am Ereignishorizont.

Dieses traditionelle Bild Schwarzer Löcher brachte Hawking 1975 ins Wanken. Er betrachtete in einer Veröffentlichung die seltsame Vorhersage der Quantenmechanik, dass sich im Vakuum regelmäßig spontan Paare aus Teilchen und ihren Antiteilchen bilden und wieder auslöschen. Finden solche Fluktuationen knapp außerhalb des Ereignishorizonts statt, kann es, wie Hawking zeigte, zu einer Aufspaltung des Paares kommen. Das eine Teilchen fällt in das Schwarze Loch und das andere fliegt davon weg. Genauere Überlegungen zeigen, dass dieser Vorgang dem Schwarzen Loch Energie entzieht. Diese »Hawking-Strahlung« führt demnach langsam dazu, dass die Masse des Schwarzen Lochs abnimmt und es schließlich völlig verdampft.

Für reale Schwarze Löcher ist dieser Prozess bedeutungslos – es strömt sehr viel mehr Gas und Staub in sie

hinein, als sie Masse durch die Hawking-Strahlung verlieren. Doch ein isoliertes Schwarzes Loch zu untersuchen, ist ein interessantes theoretisches Problem. Dieses Gedankenexperiment führte Hawking zu einem Widerspruch zwischen allgemeiner Relativität und Quantenmechanik.

Das Strahlungsspektrum eines solchen Schwarzen Lochs entspricht, wie Hawking feststellte, dem so genannten planckschen Spektrum eines Schwarzen Körpers, einer idealisierten thermischen Strahlungsquelle. Dem Schwarzen Loch lässt sich formal eine Temperatur zuordnen. Normalerweise entspringt diese der Bewegung von Atomen oder Molekülen innerhalb eines Objekts. Nun kann man als Gedankenexperiment analog für Schwarze Löcher annehmen, sie besäßen eine mikroskopische Struktur aus diskreten Bausteinen oder Bits. Der Physiker Jacob Bekenstein, jetzt an der Hebräischen Universität von Jerusalem tätig, war zwei Jahre zuvor bereits zu einem ähnlichen Schluss gekommen. Die Arbeiten von Bekenstein und Hawking liefern eine Formel für die Anzahl der Bits eines Schwarzen Lochs. Damit wiederum lässt sich dessen Entropie berechnen – ein Maß für die Unordnung eines Systems. Sie nimmt zu, wenn die Zahl der möglichen quantenmechanischen Zustände anwächst. Je größer die Zahl der Bits in einem Schwarzen Loch, desto mehr mögliche Anordnungen gibt es und desto größer ist also auch die Entropie.

Im Gegensatz dazu ist in der allgemeinen Relativitätstheorie die Geometrie Schwarzer Löcher glatt. Sie haben keine Haare, wie es einmal John Wheeler von der Princeton University formulierte. Schwarze Löcher lassen sich demnach vollständig durch ihre Masse, ihren Spin (die Eigendrehung) und ihre elektrische Ladung beschreiben; weitere Eigenschaften besitzen sie nicht. Doch die Quantenmechanik gibt den Schwarzen Löchern zusätzlich eine Entropie, eine mikroskopische Struktur.

Die Hawking-Strahlung ist aber auch für die Quantentheorie eine Herausforderung. Hawkings Berechnungen zeigten, dass die Teilchen, die einem Schwarzen Loch entkommen, in keiner Weise von den Eigenschaften der Materie abhängen, die das Schwarze Loch gebildet hat – normalerweise ein kollabierter massereicher Stern – oder die später hineingefallen ist. Wenn wir also einen Zettel mit einer Mitteilung in das Schwarze Loch stürzen lassen, gibt es prinzipiell

keine Möglichkeit, die Botschaft später aus der Hawking-Strahlung zu rekonstruieren. Wenn die Nachricht den Horizont passiert hat, kann sie nicht beeinflussen, was später außerhalb geschieht. Die Information ist im Inneren gefangen.

Die Quantentheorie beschreibt jedes physikalische System mit Hilfe einer Wellenfunktion. Sie liefert die Wahrscheinlichkeit dafür, dass man es in einem bestimmten Zustand beobachtet. In Hawkings Gedankenexperiment bedeutet der Verlust von Information nun, dass wir keine Möglichkeit haben, aus unserem Wissen über die hineingefallene Materie die Wellenfunktion der Hawking-Strahlung vorherzusagen. Die Regeln der Quantenmechanik verbieten jedoch eine solche Situation. Hawking folgerte daraus, die Quantenphysik müsse umgeschrieben werden, um einen Informationsverlust zuzulassen.

Von einer Paradoxie zur nächsten

Man könnte leicht denken, es wäre nur konsequent, dass in Schwarzen Löchern auch Information verschwindet – sie zerstören schließlich alles, was hineinfällt. Aber vergleichen wir den Vorgang einmal mit dem Verbrennen des Zettels: Die Mitteilung zerfällt dabei zwar; und natürlich ist es nicht praktikabel, sie aus Rauch und Asche zu rekonstruieren. Aber der Vorgang als solcher lässt sich zumindest im Prinzip komplett mit der normalen Quantenmechanik beschreiben, angewendet auf die Teilchen des Zettels. Die Wellenfunktion der Überreste hänge dann von der ursprünglichen Nachricht ab. Und diese ließe sich daraus grundsätzlich auch wieder rekonstruieren. Im Fall der Hawking-Strahlung aber gibt es keine solche eindeutige Beziehung.

Aus dieser Situation zogen viele Theoretiker den Schluss, Hawking habe sich geirrt. Einige argumentierten, dass Information, wenn es denn erst einmal erlaubt wäre, nicht nur in exotischen Umgebungen wie der eines Schwarzen Lochs verschwinden würde, sondern überall und jederzeit. Denn alles, was passieren darf, passiert in der Quantenphysik tatsächlich. Wenn Hawking Recht hätte, dann müssten wir Anzeichen dafür also auch in der alltäglichen Physik beobachten, möglicherweise bis hin zu Verletzungen der Energieerhaltung.

Theoretiker stehen also vor einem riesigen Paradoxon. Entweder sie modifizieren die Quantenmechanik, um den Verlust von Information zu erlauben, oder die Relativitätstheorie, um zuzulassen, dass Information aus dem Inneren Schwarzer Löcher entkommen kann. Es gibt noch eine dritte Möglichkeit: Vielleicht verdampfen Schwarze Löcher gar nicht vollständig, sondern es bleibt ein mikroskopischer Rest zurück, der die gesamte Information der ursprünglichen Materie enthält. Diese Lösung erzeugt jedoch neue Probleme. Ein derart kleines Objekt mit einer so großen Menge an Bits verletzt etwa die von Bekenstein und Hawking entwickelte Idee der Entropie Schwarzer Löcher. Wir hoffen aber, dass sich aus der verwirrenden Situation ein eingehenderes Verständnis von Quantenmechanik und Relativität entwickelt – idealerweise sogar ein Weg, um die Widersprüche zwischen diesen jenen tragenden Säulen der Physik zu beseitigen.

AUF EINEN BLICK

FEUERTAUF FÜR DIE RAUMZEIT

- 1 Theoretische Physiker vermuten, dass am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs ständig **Teilchen** entstehen und entweichen.
- 2 Mit der Strahlung würden im klassischen Bild **Informationen** verloren gehen. Das jedoch ist quantenmechanisch verboten.
- 3 Wenn es gelingt, dieses Problem zu lösen, würde das zugleich einen Weg weisen, **Relativitätstheorie** und **Quantenphysik** zu vereinen. Physiker entwerfen ganz neue Sichtweisen, um die möglichen Vorgänge zu verstehen.

Widersprüchliche Objekte

Stephen Hawking zeigte 1975 mathematisch, dass Schwarze Löcher eine kleine Menge Strahlung aussenden sollten. Denn gemäß der Quantenmechanik entstehen ständig und überall im Kosmos Paare aus Teilchen und Antiteilchen und verschwinden sofort wieder. Doch wenn ein solches Duo an der Grenze

zu einem Schwarzen Loch erscheint, kann das eine Teilchen über dessen Ereignishorizont hineinfallen und das andere ins All entkommen. Dieses Phänomen – die Hawking-Strahlung – führt zu einer Reihe von Fragen über die physikalischen Gesetze im Inneren Schwarzer Löcher.

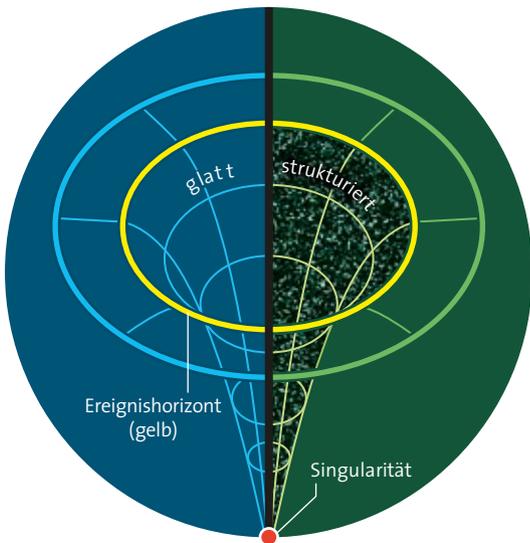
Das Entropieproblem

Das Spektrum der Hawking-Strahlung führt dazu, dass man Schwarzen Löchern formal eine Temperatur zuordnen kann. So wie die Wärme eines Körpers der Ausdruck einer Bewegung kleinerer Bestandteile ist, hätten auch Schwarze Löcher eine Struktur, deren Einheiten sich unterschiedlich anordnen können. Das wiederum erlaubt, rechnerisch ein Maß für die Unordnung eines Schwarzen Lochs zu bestimmen, die Entropie. Die allgemeine Relativitätstheorie hingegen verbietet Schwarzen Löchern eine solche Eigenschaft und schreibt eine glatte, unstrukturierte Raumzeit vor.

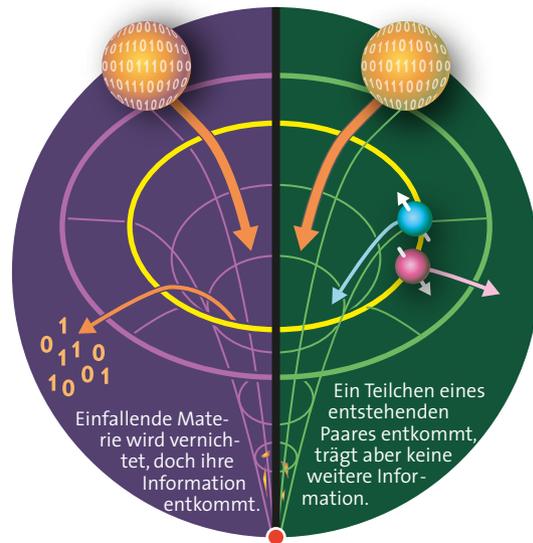
Das Informationsparadoxon

Eine Grundregel der Quantenmechanik ist, dass Information erhalten bleibt. Jede Nachricht muss sich zumindest im Prinzip immer wieder rekonstruieren lassen. Die Hawking-Strahlung impliziert jedoch, dass Schwarze Löcher die Information der Materie zerstören, die in sie hineinfällt – denn die Eigenschaften der entfliehenden Teilchen hängen in keiner Weise davon ab. Hawking schlug deshalb vor, die Quantenmechanik so zu modifizieren, dass sie den Verlust erlaubt.

Relativitätstheorie Hawking-Strahlung



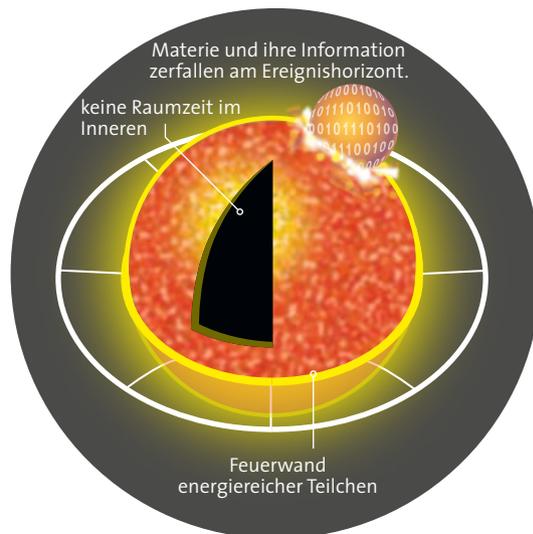
Quantenmechanik Hawking-Strahlung



Lösungsansätze führen zu Feuerwänden

Falls es gelingt, allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik zu vereinen, sollte dieses neue Konstrukt auch Schwarze Löcher widerspruchsfrei beschreiben. Ein Durchbruch war die Stringtheorie, in der Elementarteilchen winzige schwingende Fäden sind. Mit diesem Ansatz scheinen sich zumindest einige Aspekte des Informationsparadoxons und des Entropieproblems aufzulösen.

Doch genauere stringtheoretische Rechnungen sorgten für eine Überraschung: Energiereiche Barrieren am Ereignishorizont würden jedes eindringende Objekt zerstören. Die physikalischen Gesetze brechen an der Grenze Schwarzer Löcher offenbar derart dramatisch zusammen, dass auch die Folgen extrem wären – hier könnten sogar Raum und Zeit enden.



Mit einem Hilfsmittel versuchen Physiker schon lange, die verschiedenen Probleme zu lösen, die bei der Suche nach einer einheitlichen Beschreibung auftreten: mit der Stringtheorie. Hier werden die bislang als punktförmig angenommenen Elementarteilchen durch winzige offene oder geschlossene Fäden (englisch: strings) ersetzt. Das lässt zwar eine Reihe mathematischer Schwierigkeiten verschwinden, ändert aber zunächst nichts an der Situation am Horizont eines Schwarzen Lochs.

Zu einem Durchbruch kam es 1995, als ich mich im Rahmen eines Gedankenexperiments mit Strings in kleinen Räumen befasste. Die Stringtheorie, so wie wir sie damals verstanden, konnte nicht vollständig sein. Sie erforderte vielmehr die Existenz von Objekten mit mehr als den vertrauten drei Raumdimensionen und einer Zeitdimension. In Schwarzen Löchern müssten diese »D-Branen« winzig sein, aufgerollt in versteckten Dimensionen, die so klein sind, dass wir sie bislang nicht entdecken können. Im Jahr darauf zeigten Andrew Strominger und Cumrun Vafa von der Harvard University, wie Strings und D-Branen die genaue Anzahl der Bits liefern, die für die Entropie eines Schwarzen Lochs nötig ist – jedenfalls für bestimmte, sehr symmetrische Schwarze Löcher. Damit war das Entropierätsel zumindest teilweise gelöst.

Und was ist mit dem Informationsverlust? Juan Maldacena, heute am Institute for Advanced Study in Princeton, stieß 1997 auf eine Lösung. Eine Quantentheorie der Gravitation, die auf der Stringtheorie aufbaut, ist demnach unter bestimmten Bedingungen mathematisch äquivalent zu einer gewöhnlichen Quantentheorie. Gemäß dieser »Maldacena-Dualität« entspricht insbesondere die Quantenphysik eines Schwarzen Lochs derjenigen eines gewöhnlichen Gases aus heißen Teilchen. Die Raumzeit unterscheidet sich demnach fundamental von dem, was wir kennen: Sie ähnelt einem dreidimensionalen Hologramm, projiziert aus der zweidimensionalen Oberfläche einer Kugel (siehe »Schwerkraft – eine Illusion?« von Juan Maldacena in SdW 3/2006, S. 36).

Die Maldacena-Dualität ermöglicht es den Physikern, die Quantenmechanik Schwarzer Löcher zu beschreiben. Wenn Maldacenas Annahmen korrekt sind, dann gelten die Quantengesetze auch für die Gravitation, und Information kann nicht verloren gehen. Auf etwas kompliziertere Weise folgt außerdem, dass Schwarze Löcher vollständig verdampfen –

die Information muss also mit der Hawking-Strahlung entweichen.

Zwar konnte die Maldacena-Dualität noch nicht bewiesen werden. Aber zahlreiche Indizien unterstützen sie. Sogar Hawking änderte daraufhin seine Meinung. 2004 glaubte er nicht mehr, Schwarze Löcher würden Information vernichten, und löste öffentlich eine Wettschuld gegenüber seinem Kollegen John Preskill ein. Viele Theoretiker gingen nun davon aus, dass kein Beobachter in der Nähe eines Schwarzen Lochs, das den Maldacena-Regeln gehorcht, irgendeine Verletzung von Einsteins Gleichungen oder anderen physikalischen Gesetze sehen würde. Allerdings lieferte die Dualität keine klare Antwort auf die Frage, wie Information aus dem Inneren des Ereignishorizonts nach außen gelangen soll.

Der Teufel steckt im Detail

Bereits zu Beginn der 1990er Jahre schlugen Leonard Susskind von der Stanford University und Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht in den Niederlanden eine Lösung für das ursprüngliche Informationsproblem vor: die »Komplementarität« Schwarzer Löcher. Ihr Argument bedeutet im Wesentlichen, dass ein Beobachter, der durch den Ereignishorizont in ein Schwarzes Loch springt, die Information im Inneren sieht; jemand, der draußen bleibt, sieht sie dagegen herauskommen. Ein Widerspruch entsteht nicht – beide können schließlich nicht mehr miteinander kommunizieren.

Es schien so, als würden die Maldacena-Dualität und die Komplementarität alle Paradoxien beseitigen. Doch die Tücken steckten im Ausarbeiten der Einzelheiten. 2012 versuchten meine Kollegen und ich ein Modell zu entwickeln, das beide Ansätze miteinander kombiniert. Wir scheiterten mehrere Male und erkannten, dass nicht unsere mathematischen Defizite die Ursache dafür waren, sondern dass ein tieferes Problem vorlag. Eine Unstimmigkeit blieb bestehen.

Diese taucht auf, wenn man das seltsame Quantenphänomen der Verschränkung berücksichtigt. Es läuft unserer Alltagserfahrung und Intuition komplett zuwider. Wären Elementarteilchen Würfel, so entsprächen verschränkte Objekte zweien, deren Augenzahlen sich stets zu sieben summieren. Misst man die Eigenschaften nur eines der beiden, beispielsweise eine Fünf, so steht damit automatisch fest, was das andere anzeigt: eine Zwei. Die Quantenmechanik sagt außerdem voraus, dass diese Beziehung monogam ist. Ein Teilchen kann nicht mit zwei voneinander unabhängigen Systemen gleichzeitig verschränkt sein, sondern immer nur mit einem.

Und genau das führt bei Schwarzen Löchern zu einem Problem, wenn man ein Photonenpaar der Hawking-Strahlung betrachtet, das entsteht, wenn das Schwarze Loch bereits mindestens zur Hälfte verdampft ist. Die beiden Lichtteilchen sind miteinander verschränkt. Photon A fällt in das Schwarze Loch hinein, Photon B entweicht. Nun muss aber auch die Information aller ursprünglich ins Schwarze Loch gefallenen Materie in der gesamten Hawking-Strahlung kodiert sein. Dann muss Photon B mit einer Kombination C aller bereits früher entwichenen Photonen verschränkt sein.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Schwarze Löcher« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/schwarze-loecher



ESO / LUIS CALÇADA



Nur mittels dieser Verbindung bleibt die hineingestürzte Information erhalten, während das Schwarze Loch weiter schrumpft. Das aber wäre Polygamie! Photon B wäre mit zwei verschiedenen Systemen verknüpft, nämlich einerseits mit seinem ursprünglichen Partner, andererseits mit den längst emittierten Teilchen der Hawking-Strahlung.

Der Preis für die Rettung der Quantenmechanik wäre, die Verschränkung zwischen A und B aufzulösen. Das würde rechnerisch jedoch eine große Menge Energie freisetzen. Am Ereignishorizont entstünde eine Feuerwand aus energiereichen Teilchen. Die Konsequenz: Ein hineingefallener Astronaut würde ihn – im Gegensatz zur Vorhersage der Relativitätstheorie – als überaus besonderen Ort wahrnehmen. Schließlich würde er dort verbrennen.

Er war für uns verstörend, auf eine so dramatische Abweichung von der allgemeinen Relativitätstheorie zu stoßen. Aber unsere Argumente waren einfach nachzuvollziehen, und wir konnten keine Fehler finden. Im Prinzip hatten wir lediglich die ursprüngliche Überlegung Hawkings umgedreht. Wir gingen davon aus, dass Information erhalten bleibt, und schauten, wohin diese Annahme uns führte. Und statt auf subtile Effekte der Komplementarität stießen wir auf einen drastischen Zusammenbruch der Relativitätstheorie. Als wir anderen Kollegen unsere Rechnungen darlegten, begegneten wir zunächst Skepsis, die dann von derselben Verwunderung abgelöst wurde, die auch wir empfanden.

Entweder diese Feuerwände existieren – oder wir müssen einige hochgehaltene Glaubenssätze der Quantentheorie opfern. Unglücklicherweise lässt sich die Angelegenheit nicht einfach klären, indem man reale Schwarze Löcher beobachtet. Eine etwaige Strahlung würde durch deren Schwerkraft so stark abgeschwächt, dass wir sie kaum messen könnten.

Und wenn es Feuerwände tatsächlich gibt, was sind sie dann physikalisch? Eine mögliche Vorstellung: Dort endet der Raum. Vielleicht existieren im Inneren eines Schwarzen Lochs einfach nicht die notwendigen Bedingungen dafür, dass sich Raumzeit bilden kann. »weil der Quantenspeicher des Schwarzen Lochs voll ist« – so formulierte es mein Kollege Donald Marolf. Dann hört das All am Horizont auf. Ein

darauf zustürzender Astronaut würde sich auf dieser Grenze in Quantenbits auflösen, die dort verbleiben.

Die Physiker haben vieles versucht, um solche bizarr anmutenden Szenarien zu vermeiden. Eine der Ideen ist, dass das hineingefallene Photon A auf irgendeine Weise zugleich Bestandteil der bereits entwichenen Photonen C ist. Die Idee ähnelt der Komplementarität Schwarzer Löcher und würde das Polygamieproblem lösen. Versucht man jedoch, ein konkretes Modell dieses theoretischen Entwurfs zu entwickeln, so landet man erneut dabei, die Quantenmechanik umzuschreiben. Die bislang radikalste Idee entwickelten Maldacena und Susskind gemeinsam. Ihnen zufolge ist jedes Paar verschränkter Photonen durch ein mikroskopisches Wurmloch verbunden. Auf diese Weise lassen sich weite Regionen der Raumzeit, wie beispielsweise das Innere eines Schwarzen Lochs, aus einer großen Menge von Verschränkungen konstruieren.

Hawking hatte vorgeschlagen, dass die allgemeine Relativitätstheorie auch für Schwarze Löcher korrekt ist, aber die Quantenmechanik dort zusammenbricht. Maldacena dagegen kam zu dem Schluss, dass die Quantenmechanik intakt bleibt, aber die Raumzeit holografisch ist. Vielleicht liegt die Wahrheit irgendwo dazwischen. Zahlreiche weitere Ideen kursieren, von denen die meisten den einen oder anderen lange bewährten Grundsatz opfern. Es gibt unter den Forschern keinen Konsens darüber, in welcher Richtung die Lösung zu suchen ist. Eine wichtige Frage ist außerdem: Was bedeuten die Phänomene für echte Schwarze Löcher wie etwa jenes im Zentrum unserer Milchstraße? Noch können wir auch darauf keine Antwort geben.

Für uns Wissenschaftler ist es eine aufregende Zeit. Wir sind auf einen weiteren Widerspruch zwischen den beiden zentralen Theorien der Physik gestoßen. Unser Unvermögen, zu sagen, ob es Feuerwände tatsächlich gibt oder nicht, offenbart die Grenzen unserer gegenwärtigen Ansätze für eine Quantengravitation. Die Theoretiker müssen ihre grundlegenden Annahmen über das Universum sowie die Natur von Raum und Zeit überdenken. Die Rätsel zu lösen, die uns die Vorgänge am Ereignishorizont aufgeben, könnte dann endlich den Durchbruch bringen, den wir benötigen. ~

DER AUTOR



Joseph Polchinski ist Physikprofessor an der University of California in Santa Barbara und ständiges Mitglied des dortigen Kavli Institute of Theoretical Physics. Er arbeitet in verschiedenen Bereichen der theoretischen Physik, um dem Mechanismus des holografischen Prinzips und einer möglichen Quantengravitation nachzuspüren.

QUELLE

Almheiri, A. et al.: Black Holes: Complementarity or Firewalls? In: Journal of High Energy Physics 2013, 62, 2013
Preprint bei <http://arxiv.org/abs/1207.3123>

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1346953

Das Rätsel von Mpemba

Wenn eine warme Flüssigkeit schneller gefriert als eine kalte, spielen möglicherweise Strömungsbewegungen die entscheidende Rolle.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Sagt Ihnen Mpemba etwas? Hinter dem fremdartigen Namen steckt das ungewöhnliche Phänomen, dass heißes Wasser unter sonst gleichen Bedingungen schneller gefriert als kaltes. Der »Mpemba-Effekt« scheint der physikalischen Intuition zu widersprechen. Denn zuerst denkt doch wohl jeder an ein Szenario wie dieses: Zwei gefüllte Behälter, die sich nur in der Wassertemperatur unterscheiden (zum Beispiel 20 und 70 Grad Celsius), werden zeitgleich abgekühlt. Das zu Beginn 70 Grad heiße Wasser wird nach einiger Zeit bei 20 Grad angekommen sein. Ab da hat es noch denselben Weg vor sich, den der Inhalt des Gefäßes mit anfangs 20 Grad bereits ein Stück weit hinter sich hat. Also wird das wärmere Wasser später gefrieren – logisch, oder?

Bereits Aristoteles bemerkte das merkwürdige Geschehen. Seitdem äußerten sich immer wieder Naturforscher dazu, etwa Roger Bacon (1214–

1292) und René Descartes (1596–1650). Auch dem ersten deutschen Professor für Experimentalphysik Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) war bekannt, dass »gekochtes Wasser, welches sehr warm in ein kleines Zuckerglas gegossen und mit ungekochtem kaltem Wasser zugleich der Kälte ausgesetzt wurde, eher gefror als das letztere«.

In der Moderne geriet die Erscheinung wieder in Vergessenheit, bis der tansanische Schüler Erasto Mpemba in den 1960er Jahren beim Eismachen den fortan nach ihm benannten Effekt wiederentdeckte. Zahlreiche Untersuchungen folgten. Diese haben zwar vor Augen geführt, wie komplex das Problem ist – von einer einheitlichen, allgemein akzeptierten Erklärung kann aber nach wie vor nicht die Rede sein.

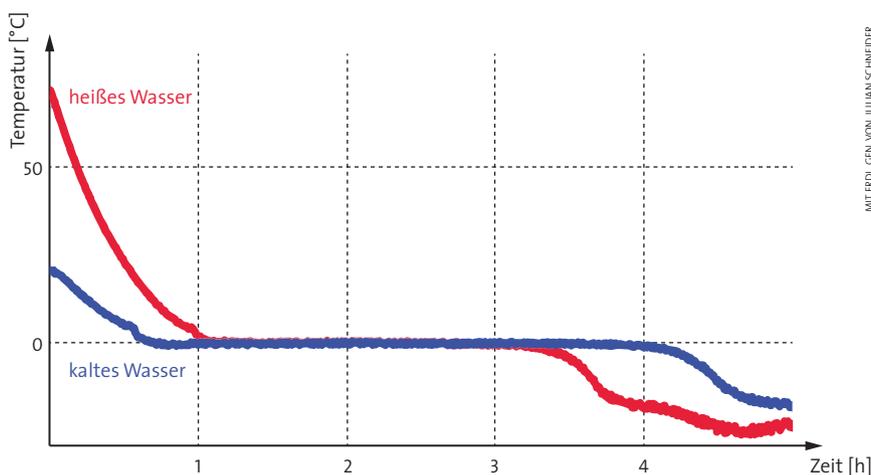
Die Hauptschwierigkeit dabei, die Ursache zu finden, besteht darin, die zahlreichen Einflussfaktoren experimentell unter Kontrolle zu bringen und

die wesentlichen zu identifizieren. Einige Wissenschaftler hielten die stärkere Verdunstung des heißen Wassers und den entsprechenden Flüssigkeitsverlust für entscheidend. Man kann jedoch den Mpemba-Effekt ebenso in abgedeckten Behältern messen, so dass dieses Argument nicht überzeugt. In anderen Arbeiten halten Forscher im Wasser gelöste Stoffe – wie etwa Luft – für ausschlaggebend. Doch diese These ist nicht stichhaltig, weil sich das Phänomen bei vorher gekochtem und demineralisiertem Wasser ebenfalls zeigt.

Aus innerem Antrieb umgewälzt

Häufig friert Wasser nicht genau bei null Grad, sondern erst bei tieferen Temperaturen. Mancher wird das von Mineralwasser kennen, das im Eisfach gelegen oder in einer frostigen Winternacht auf dem Balkon gestanden hat. Der Kristallisationsvorgang beginnt oft erst beim Öffnen der Flasche, vollzieht sich dann aber ziemlich flott. Einige Arbeiten zum Mpemba-Effekt kommen daher zu dem Ergebnis, das ursprünglich heiße Wasser werde weniger unterkühlt und somit zuerst fest. Doch dagegen spricht, dass das anfangs heiße Wasser auch dann früher gefriert, wenn keine Unterkühlung auftritt oder diese verhindert wird.

Schließlich gibt es noch einen wesentlichen Unterschied zwischen heißem und kaltem Wasser: In ersterem beeinflusst die Konvektion den Wärmeaustausch viel stärker. Das sind schwerkraftbedingte Strömungen, bei denen das an der Oberfläche gekühlte Wasser absinkt, weil es dichter ist (jedenfalls solange das Wasser wärmer als vier Grad Celsius ist, wo es seine größte Dichte hat). Aufsteigendes heißes Wasser er-



Werden 72 Grad Celsius heißes (rote Kurve) und 20 Grad kaltes Wasser (blau) gleichzeitig abgekühlt, sinkt die Innentemperatur der anfangs wärmeren Flüssigkeit früher unter null Grad, sie ist also zuerst vollständig gefroren. Die Messwerte entstanden bei einer Versuchsreihe im Rahmen eines »Jugend forscht«-Projekts des Schülers Julian Schneider.

MIT FRIEDRICH VON JULIAN SCHNEIDER



setzt es. So hält sich an der Oberfläche ständig eine höhere Temperaturdifferenz und damit ein stärkerer Wärmestrom zur Umgebung.

Das kennt jeder, der schon einmal etwa seine Suppe durch Rühren heruntergekühlt hat. Bei der heißen Wasserprobe läuft der Mechanismus gleichsam selbst organisiert ab. Aus diesem Grund halten es einige Wissenschaftler für möglich, dass die Konvektion allein in der Lage sein könnte, den Mpemba-Effekt hervorzurufen. Einen Beweis dafür gab es bislang aber noch nicht.

Vielleicht ist es dem Schüler Julian Schneider aus Rottweil im Rahmen seines Projekts für »Jugend forscht« jetzt gelungen, diesen Nachweis zu führen. Jedenfalls demonstrierte er mit ausgeklügelten Experimenten die überragende Rolle der Konvektion im anfangs heißen Wasser. Systematisch konnte er zunächst einige Vorgänge ausschlie-

ßen, die bis dahin als Favoriten für die Ursache des Mpemba-Effekts galten.

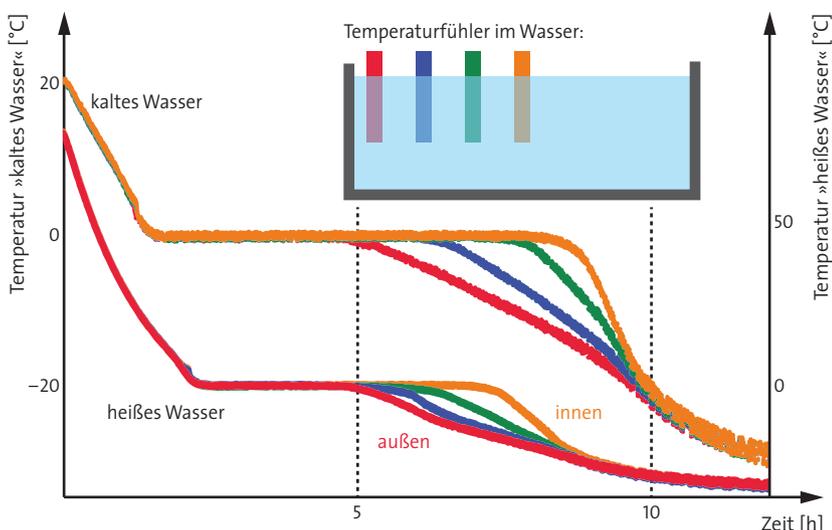
Um die inhomogene Temperaturschichtung zu dokumentieren, hat Julian Schneider mit speziellen Messfühlerwerten an verschiedenen Stellen im Behälter aufgezeichnet. Dabei zeigte sich, dass wegen der von Anfang an vorhandenen kräftigen Konvektion das heiße Wasser selbst dann noch schneller abkühlte, als es sich bereits unterhalb der Starttemperatur des kalten Wassers befand. So gefror es rascher vollständig. Auch unterhalb von vier Grad Celsius, wo sich die Dichteverhältnisse im Wasser umkehren, dominierte die Konvektion in der ehemals heißen Flüssigkeit.

Doch wie ist es möglich, dass sich das ursprünglich warme Wasser, wenn es selbst abgekühlt ist, sogar dann noch schneller bewegt als das kalte? Dazu muss man sich die Wärmeverteilung etwas genauer ansehen. Obwohl die

In einem Glas mit Wasser frieren zuerst die Oberfläche und die Seiten, die Kontakt zur kalten Umgebung haben. Das sorgt für eine isolierende Eisschicht, während im Inneren lange ein flüssiger Bereich verbleibt. In anfangs wärmeren Flüssigkeiten wälzen Konvektionsströme den Inhalt stärker um, so dass er schneller komplett zu Eis wird.

Durchschnittstemperatur dieselbe ist, herrscht ein größerer Unterschied zwischen innen und außen als beim kälteren Wasser. Daher bewegt sich letzteres langsamer und kristallisiert schneller an den Wänden, was wachsende isolierende Eisschichten erzeugt. Wir haben es hier also mit der paradox erscheinenden Situation zu tun, dass das kühleren Wasser unter anderem deshalb langsamer durchfriert, weil es an den Grenzschichten zur Luft früher gefriert.

Dieser Einfluss der Wasserbewegung auf den Wärmeaustausch führt offenbar dazu, dass sich der scheinbare Vorteil der niedrigeren Starttemperatur beim kalten Wasser schließlich als Nachteil erweist. Ob mit Julian Schneiders Erklärung der Mpemba-Effekt nun aber endgültig entzaubert ist, bleibt abzuwarten. Schließlich war das Phänomen schon einige Male für Überraschungen gut. ~



Mit mehreren Temperaturfühler im Gefäß lässt sich nachverfolgen, dass in beiden Behältern das Wasser zuerst am Rand gefriert und zuletzt in der Mitte. Beim anfangs heißeren Wasser (Temperaturskala rechts) vollzieht sich das aber wesentlich schneller, vermutlich, weil lange nachwirkende Konvektionsströme den Wärmeaustausch begünstigen.

DER AUTOR



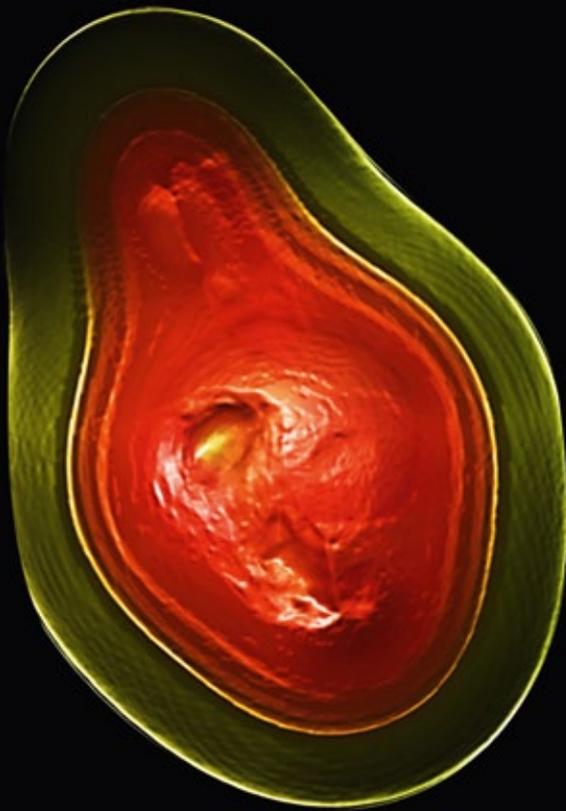
H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

QUELLEN

Jeng, M.: The Mpemba Effect: When can Hot Water Freeze Faster than Cold? In: American Journal of Physics 74, S. 514–522, 2006

Schneider, J.: Der Mpemba-Effekt und seine Ursache. Ausarbeitung für »Jugend forscht«, Rottweil 2014

Dieser Artikel und mehr Links im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1356009



Neon-20



Kohlenstoff-12

JEAN-PAUL EBRAN

KERNPHYSIK

Zwischen Flüssigkeit und Kristall

Ob abgeplattet oder birnenförmig, eher flüssig oder von einem Halo umgeben – ein Atomkern kann unterschiedlichste Formen und Zustände annehmen. Nun beginnen die Physiker damit, die Vielfalt in einem einheitlichen Modell zu fassen.

Von Jean-Paul Ebran und Elias Khan

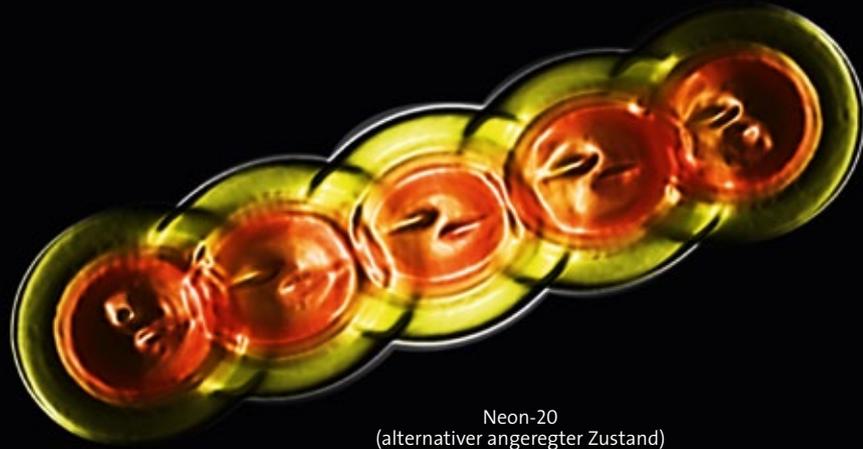
Alle Materie, die uns umgibt, besteht aus Atomen. Nach dem zu Beginn des 20. Jahrhunderts aufgestellten Modell des britisch-neuseeländischen Physikers Ernest Rutherford (1871–1937) ließe sich ein Atom mit einem mikroskopischen Planetensystem vergleichen, bei dem die Elektronen um einen kugelförmigen Kern kreisen. Mit dem Aufkommen der Quantenmechanik hat sich diese Vorstellung verfeinert:

Statt Umlaufbahnen ordnet man der Elektronenhülle eine Art Wolke zu, deren Dichteverteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen entspricht.

Wie aber steht es um den Atomkern? Ist dieser wirklich kugelförmig? Mittlerweile haben die Kernphysiker ein viel komplexeres Bild von ihm. Anhand von theoretischen Modellen und Experimenten konnten sie Kerne nachweisen, die abgeflacht sind, die Form einer Blase, einer Birne oder



Schwefel-32

Neon-20
(alternativer angeregter Zustand)

Innerhalb mancher Atomkerne bilden Protonen und Neutronen dichte Substrukturen oder Cluster (in roter Farbe gekennzeichnet), die durch die starke Wechselwirkung gebunden sind. Physiker sprechen von »molekularen Kernen«, denn sie erinnern an Moleküle, deren Atome elektronische Bindungen eingehen. Diese Bilder sind das Ergebnis von numerischen Simulationen.

JEAN-PAUL EBRAN

einer Banane aufweisen – aber auch solche, deren Struktur an jene von Molekülen erinnert (siehe Bilder oben).

Doch auch mehr als ein Jahrhundert nach seiner Entdeckung hat der Atomkern noch nicht all seine Geheimnisse preisgegeben. Noch fehlt ein Gesamtbild, in das sich die Strukturvielfalt einordnen lässt. Der Grund dafür: Der Kern ist ein Quantenobjekt und deshalb schwierig zu untersuchen. Er setzt sich aus Bestandteilen zusammen, die ihrerseits komplex sind; zudem bestimmen drei der vier Grundkräfte der Natur gleichzeitig die Dynamik dieses Konglomerats.

Die Idee, dass sich Vielfalt aus wenigen fundamentalen Regeln ableiten lässt, ist nicht neu. Die Chemiker etwa haben die Elemente nach bestimmten Eigenschaften in einer Tabelle angeordnet, die von der Anzahl der Elektronen in den äußeren Schichten der Atomhülle abhängen. Und die Physiker konnten die Hunderte von Teilchen, die sie in den Beschleunigern entdeckten, klassifizieren, als sie begriffen hatten, dass diese sich ihrerseits aus Elementarteilchen, den Quarks, zusammensetzen.

Um das breite Spektrum an Kernstrukturen zu verstehen, haben wir ebenfalls nach den ihnen zu Grunde liegenden Regeln gesucht. In unserem Ansatz berücksichtigen

wir verschiedene mögliche Kernzustände: Ähnlich wie bei den Phasen »fest«, »flüssig« und »gasförmig« der uns aus dem Alltag vertrauten Materie hängen sie von den Eigenschaften der Bausteine des Kerns ab.

Diese so genannten Nukleonen – Protonen und Neutronen – bestehen selbst aus Elementarteilchen: aus Quarks und Gluonen. Im Wesentlichen setzt sich ein Proton aus zwei u-Quarks und einem d-Quark zusammen, während zwei d-Quarks und ein u-Quark ein Neutron bilden. Zu-

AUF EINEN BLICK

KONKURRENZ IM KERN

1 In Atomkernen spielen der **Quantencharakter der Nukleonen**, aber auch deren Wechselwirkungen untereinander eine wichtige Rolle. Je nachdem, welcher Aspekt dominiert, bilden sich dort unterschiedliche Aggregatzustände aus.

2 Anhand eines neu definierten **Phasenparameters** lassen sich Zustände wie »Quantenflüssigkeit«, »molekularer« oder »kristalliner Kern« nun mit einem einzigen, umfassenden Modell beschreiben.

3 Die **kristalline Phase** tritt zwar nicht in einzelnen Kernen, vermutlich aber in der Kruste von **Neutronensternen** auf.



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



www.spektrum.de/t/teilchenphysik

sammgehalten werden diese Teilchen durch die starke Wechselwirkung, welche die Gluonen übermitteln. Ihr Name deutet auf ihre Funktion als Klebstoff (englisch: glue) zwischen den Quarks hin. Die starke Wechselwirkung hält außerdem die Nukleonen untereinander zusammen. Die Theorie der Quantenchromodynamik beschreibt ein Nukleon letztlich als eine Art Suppe, die aus mehreren wechselwirkenden Quarks und Gluonen besteht. Diese Grundkraft ist also sehr komplex und bisher nur teilweise verstanden.

Wegen der elektrischen Ladung der Protonen wirkt auch die elektromagnetische Kraft im und auf den Kern. Und schließlich sind die Nukleonen empfindlich gegenüber der schwachen Wechselwirkung, die sich in der Beta-Radioaktivität zeigt. Dabei wandelt sich zum Beispiel ein Neutron in ein Proton um und sendet ein Elektron aus sowie ein weiteres, nur schwer fassbares Teilchen: ein Neutrino.

Komplexes Zusammenspiel

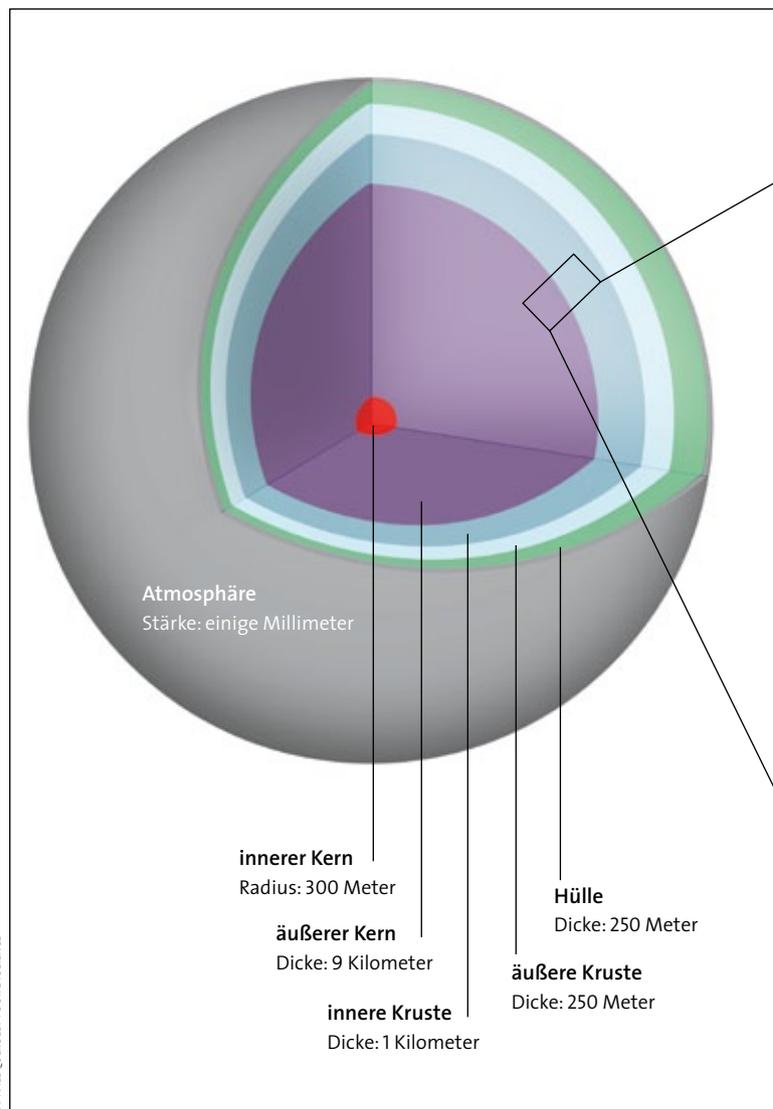
Um den Atomkern zu untersuchen, muss man also die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung sowie sämtliche Nukleonen berücksichtigen. Das stellt eine große mathematische Herausforderung dar. Warum? Nur zwei miteinander wechselwirkende Teilchen zu beschreiben, fällt ziemlich leicht. Ein System mit einer sehr großen Anzahl von Bestandteilen wie zum Beispiel ein Gas können wir wiederum statistisch untersuchen. So lassen sich etwa dessen thermodynamische Größen wie Druck und Temperatur berechnen. Ein Atomkern mit seinen einigen dutzend oder hundert Nukleonen befindet sich aber genau zwischen diesen beiden Bereichen. Er lässt sich weder exakt noch statistisch beschreiben. Seine Eigenschaften ändern sich bereits grundlegend, wenn man ihm nur ein einziges Nukleon hinzufügt!

Ein fruchtbarer Ansatz besteht darin, die verschiedenen Kernzustände zu betrachten, die sich aus dem Zusammenspiel zwischen der Quantennatur der Nukleonen und den zwischen ihnen auftretenden Wechselwirkungen ergeben. Da die Nukleonen zugleich Wellen- und Teilcheneigenschaften besitzen, lassen sie sich mathematisch durch eine Wellenfunktion beschreiben, welche ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit bestimmt. Je nachdem, ob diese Funktion im Raum punktuell konzentriert oder ausgedehnt ist, erscheint jedes Nukleon im Kern mehr oder weniger gut lokalisiert. Da-

bei ist die Position dieses Nukleons umso präziser definiert, je stärker seine Wechselwirkung mit seinesgleichen die Bewegung der übrigen Protonen und Neutronen dominiert.

Unlängst haben wir zwei charakteristische Größen des Atomkerns genauer studiert und miteinander verglichen: die räumliche Ausdehnung der Wellenfunktionen und den mittleren Abstand zwischen den Nukleonen. Anhand des Verhältnisses dieser beiden Größen zueinander, des Phasenparameters, definierten wir drei verschiedene Kernzustände: die flüssige (Phasenparameter >1), die molekulare (Phasenparameter $=1$) und die kristalline Phase (Phasenparameter <1). Die Nukleonen sind dabei jeweils unterschiedlich gut lokalisiert. Das beeinflusst unter anderem Struktur und Form des Kerns.

Zwar waren diese Zustände bereits zuvor bekannt. Bisher beschrieb man sie jedoch mit Hilfe von drei separaten Modellen, die sich nicht miteinander verbinden ließen. Nun aber können wir die Vielfalt der bei Kernexperimenten beobachteten Phänomene durch einen einzigen Ansatz erfassen (siehe Grafik S. 46).



In den meisten Fällen organisieren sich die Nukleonen im Kern als Quantenflüssigkeit. (Den phänomenologischen Ansatz für die Deutung der Quantenflüssigkeiten führte der sowjetische Physiker Lew Landau bereits 1956 ein.) In diesem Aggregatzustand ist die Wechselwirkung zwischen den Nukleonen beträchtlich, sie dominiert die energetische Anregung der Kernbestandteile jedoch nicht. Die Phase ähnelt also flüssiger gewöhnlicher Materie. Darin stehen die Moleküle ebenfalls in Wechselwirkung miteinander, aber die thermische Anregung ist noch verhältnismäßig groß. Die Nukleonen zeigen sich im Gesamtvolumen des Kerns entsprechend delokalisiert: Ihre Wellenfunktionen sind räumlich sehr ausgedehnt und überlappen sich. Dies verleiht dem Kern eine recht homogene Dichte.

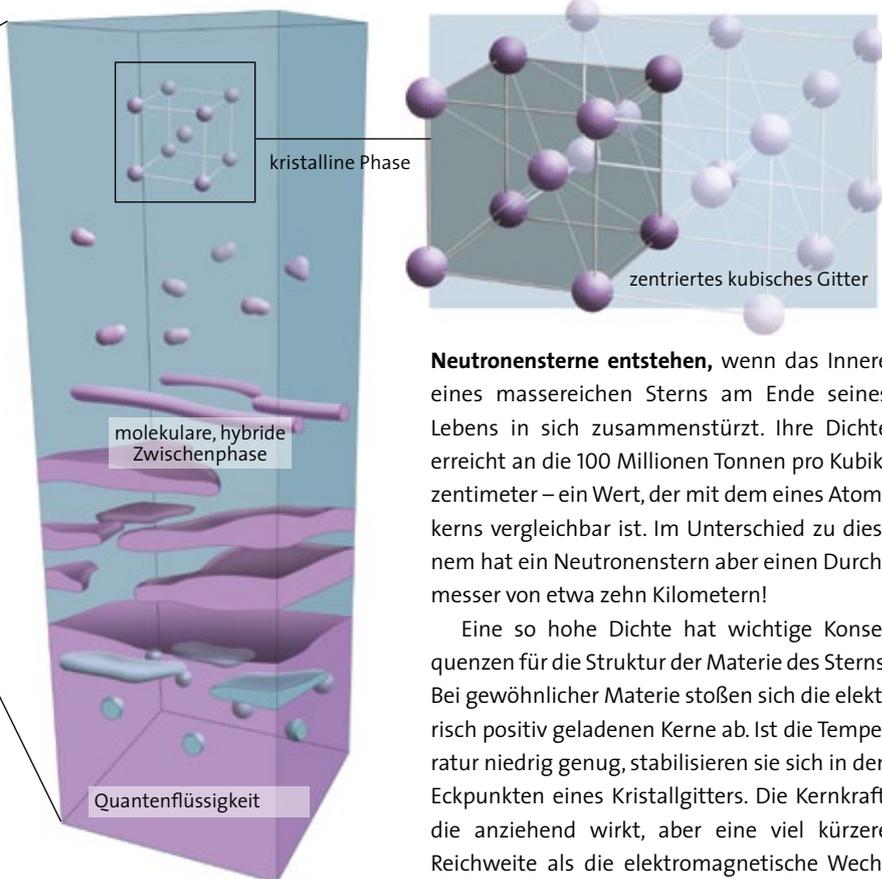
Mit Hilfe der so genannten Mittelfeldtheorie lässt sich dieser Zustand als Potenzialsenke darstellen, in der jedem Teilchen dasselbe Potenzial zugewiesen ist. Der Einfluss durch die anderen Mitglieder ist bereits darin enthalten. Die Form dieses mittleren Kernpotenzials lässt sich allerdings nicht einfach definieren, denn man muss die Eigentümlich-

keiten der starken Wechselwirkung berücksichtigen sowie die Tatsache, dass die Nukleonen dieses Potenzial selbst erzeugen. Dennoch lassen sich mit der Methode zahlreiche Phänomene beschreiben, etwa unterschiedliche Verformungen, die der Kern in angeregtem oder sogar in nicht angeregtem Zustand annehmen kann. Selbst dann muss er nicht kugelförmig sein, sondern kann zum Beispiel die Form einer Untertasse, einer Birne oder eines Rugbyballs besitzen, wie Physiker erstmals 2013 direkt am CERN beobachteten.

Superfluide Kerne

Außer den Deformationen beschreibt das Modell der Quantenflüssigkeiten noch andere Kerneigenschaften. Auf Grund ihrer fermionischen Beschaffenheit (zwei solcher Teilchen können nicht den identischen Quantenzustand am gleichen Ort einnehmen) gehen Nukleonen in manchen Kernen Zweierbindungen ein. Es bilden sich Fermionen-Paare, so genannte Cooper-Paare. Dadurch wird der Kern superfluid. Dieser Prozess ähnelt der Cooper-Paarbildung von Elektronen in metallischen Supraleitern, wobei der elektrische Material-

Exotische Kernmaterie in Neutronensternen



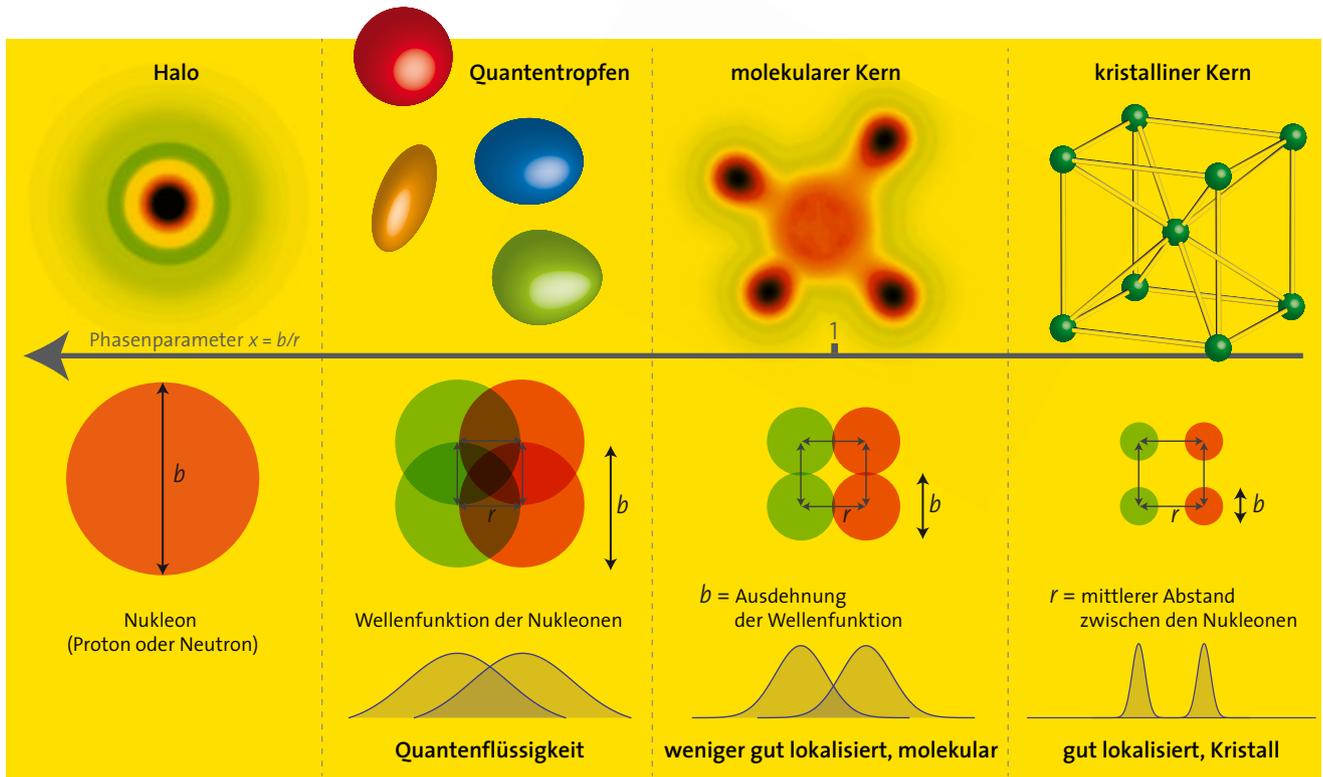
Neutronensterne entstehen, wenn das Innere eines massereichen Sterns am Ende seines Lebens in sich zusammenstürzt. Ihre Dichte erreicht an die 100 Millionen Tonnen pro Kubikzentimeter – ein Wert, der mit dem eines Atomkerns vergleichbar ist. Im Unterschied zu diesem hat ein Neutronenstern aber einen Durchmesser von etwa zehn Kilometern!

Eine so hohe Dichte hat wichtige Konsequenzen für die Struktur der Materie des Sterns. Bei gewöhnlicher Materie stoßen sich die elektrisch positiv geladenen Kerne ab. Ist die Temperatur niedrig genug, stabilisieren sie sich in den Eckpunkten eines Kristallgitters. Die Kernkraft, die anziehend wirkt, aber eine viel kürzere Reichweite als die elektromagnetische Wechselwirkung hat, gewährleistet den Zusammenhalt der Neutronen und Protonen innerhalb

eines jeden Kerns. In einem Neutronenstern dominiert die Schwerkraft über die elektromagnetische Abstoßung. Das führt zu einem kurzen Abstand zwischen den Kernen.

Die Sternenhülle besteht aus einem Kristallgitter von Eisenkernen, die in einem Elektronengas schwimmen. In der Außenkruste ist die Dichte am größten. Dort wechselwirken Protonen mit Elektronen so stark, dass sie teils zu Neutronen zusammengedrückt werden. Das Kristallgitter besteht daher also aus unterschiedlichen Kernen mit einer Kernladungszahl, die nahe der des Eisens liegt. Da sie sehr reich an Neutronen sind, werden Letztere aus den Kernen herausgedrängt und bilden in der Umgebung ein Neutronengas.

Die Dichte im Inneren der Kruste erreicht jene von Atomkernen. Das Gleichgewicht zwischen der anziehenden Kernkraft, der elektrischen Abstoßung und der Schwerkraft wird komplex und führt zur Entstehung von exotischen Materiezuständen, die immer mehr Neutronen enthalten und immer dichter sind. Sie lassen sich durch die molekularen Kernmodelle gut beschreiben. Der Übergang führt im Inneren der Kruste zu einer homogenen Phase, einer Art Kernflüssigkeit, aber in einem makroskopischen Maßstab.



Die Atomkerne weisen eine große Vielfalt von Strukturen auf, die sich mit Hilfe eines so genannten Phasenparameters klassifizieren lassen. Dieser Parameter ist das Verhältnis zweier Längen: das Verhältnis zwischen der Ausdehnung (b) der Wellenfunktion, die den Quantenzustand eines jeden Nukleons beschreibt, und dem mittleren Abstand (r) der Nukleonen.

widerstand verschwindet. Die Viskosität der Kernflüssigkeit nimmt drastisch ab, wenn sie superfluid ist. Das wirkt sich stark auf das Trägheitsmoment aus, das die Energie des Kerns in Abhängigkeit von seiner Rotationsgeschwindigkeit um sich selbst bestimmt, und muss bei Labormessungen berücksichtigt werden.

In der Quantenflüssigkeitsphase ist die Potentialsenke nicht tief genug, um die Nukleonen im Kern zu lokalisieren. Der Phasenparameter – das Verhältnis zwischen der räumlichen Streuung der Wellenfunktion eines Nukleons und dem Abstand zwischen zwei benachbarten Nukleonen – liegt weit oberhalb von eins. Wäre die Potentialsenke dagegen deutlich tiefer, dann ließen sich die Nukleonen wesentlich besser orten, der Phasenparameter wäre kleiner, und der Zustand würde sich einer kristallinen Kernphase annähern, in der sich die Nukleonen an den Eckpunkten eines gedachten Gitters anordnen.

Aber gibt es diese kristalline Phase in der Natur überhaupt? Der Phasenparameter ließe sich etwa verringern, indem man die Anzahl der Nukleonen eines Kerns erhöht, denn dann nimmt die Potentialsenke zunächst zu. Wegen der kurzen Reichweite der zwischen den Nukleonen wirkenden Kräfte stellt sich aber schnell ein Sättigungseffekt ein. Die Tiefe der Potentialsenke erreicht unabhängig vom betrachteten Kern einen Grenzwert. Außerdem wächst die räumliche Ausdehnung der Wellenfunktion mit der Anzahl der Nukleonen. Ein nukleonenreicher Kern verhält sich schließlich wie

eine Quantenflüssigkeit und hat einen Phasenparameter, der größer als eins ist. Ein leichter Kern wiederum enthält nicht genug Nukleonen, um eine kristalline Struktur zu bilden.

Dieser Zustand scheint also in einem Atomkern gar nicht möglich zu sein. Dagegen könnte er in der Kruste von Neutronensternen existieren. Die Existenz dieser Objekte wurde kurz nach der Entdeckung des Neutrons in den 1930er Jahren vorhergesagt. Das erste Exemplar fand schließlich die Doktorandin Jocelyn Bell im Jahr 1967 als Pulsar. Neutronensterne sind häufig als Radioquellen zu beobachten, die mit einer Periode von einigen dutzend Millisekunden bis zu einigen Sekunden pulsieren. Sie senden entlang ihrer Magnetfeldachse, die nicht mit der Rotationsachse übereinstimmt, gebündelte Radiostrahlung aus. Dieser Lichtkegel überstreicht den Raum periodisch wie das Leuchtfeuer eines Leuchtturms. Mittlerweile sind einige Tausend solcher Pulsare bekannt.

Riesenatomkerne im All

Die Masse von Neutronensternen ist ähnlich groß wie jene der Sonne, aber auf ein Kugelvolumen mit einem Radius von nur etwa zehn Kilometern zusammengedrängt. Damit gehören diese Objekte zu den dichtesten im Universum: ein Kubikzentimeter eines solchen Himmelskörpers wiegt ungefähr 100 Millionen Tonnen! Diese extreme Dichte ist vergleichbar mit jener von Atomkernen. Neutronensterne lassen sich also wie eine Art Riesenatomkern modellieren. Vermut-

lich erzeugen die extrem starken Gravitationseffekte in den äußeren Schichten dieser Sterne eine Dichte, bei der Kernkristalle entstehen (siehe »Exotische Kernmaterie«, S. 44/45).

Diese Sterne könnten auch andere exotische Materieformen beherbergen. Während ihre Kruste eine kristalline Struktur aufweist, lässt sich das Innere als nukleare Quantenflüssigkeit mit einem Radius von mehreren Kilometern beschreiben. Zwischen diesen beiden Bereichen sollte eine hybride Phase des Typs Kernmolekül existieren. Die Ausdehnung der Wellenfunktion der Nukleonen ist in diesem Zustand von der gleichen Größenordnung wie der mittlere Abstand, der die Nukleonen voneinander trennt: Der Phasenparameter ist ungefähr eins.

Diese molekulare Phase existiert auch in manchen Kernen, die aus einigen dutzend Nukleonen bestehen. Solche Kerne werden stabil, wenn sich die Nukleonen zu Clustern aus jeweils zwei Protonen und zwei Neutronen, also zu α -Teilchen, zusammenfinden. Sie erinnern an klassische Moleküle, sind aber 100 000-mal kleiner. Enthalten die Kerne außerdem nur wenige Protonen, aber viele Neutronen, verteilen sich die überschüssigen Neutronen zwischen den Clustern und spielen dieselbe stabilisierende Rolle wie die Elekt-

ronen in den chemischen Bindungen zwischen den Atomen eines Moleküls.

Die Idee eines in Nukleonen-Clustern strukturierten Kerns stammt bereits aus den 1930er Jahren. Damals schlugen der amerikanische Physiker Lawrence Hafstad (1904–1993) und sein ungarisch-amerikanischer Kollege Edward Teller (1908–2003) vor, dass sich die Kerne von Beryllium-8, Kohlenstoff-12, Sauerstoff-16 und Neon-20, die alle ebenso viele Protonen wie Neutronen besitzen, mit Hilfe von Konglomeraten aus α -Teilchen beschreiben lassen. Doch erst in den 1960er Jahren konnte man diesen Kernzustand mit theoretischen Werkzeugen besser erklären und auch experimentell nachweisen.

Die Existenz von Kohlenstoff-12 ist der beste Beweis dafür, dass sich manche Kerne in der molekularen Phase befinden (siehe »Der Hoyle-Zustand«, unten). Die Synthese dieses Elements in den Sternen läuft über eine Schlüsselreaktion ab: die Fusion dreier α -Teilchen führt zu einem angeregten so genannten Hoyle-Zustand, der als molekulare Phase beschrieben wird. Ohne diesen Schritt wäre die Entstehung von Kohlenstoff, Sauerstoff und allen anderen schwereren Elementen nur schwer möglich.

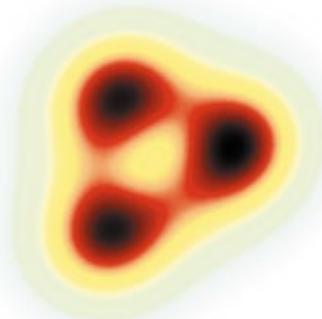
Der Hoyle-Zustand: Ein Kern aus molekularem Kohlenstoff

Wenige Minuten nach dem Urknall, bei Temperaturen von einigen Milliarden Grad, fusionierten Protonen und Neutronen und bildeten Wasserstoff, Deuterium (ein Wasserstoffisotop mit einem Neutron), etwas Helium und Spuren von Lithium-7. Dann stagnierte die primordiale Nukleosynthese jedoch, da die Dichte nicht hoch genug war, um auch weniger stabile Kerne mit mehr Nukleonen entstehen zu lassen.

Erst in den Sternen waren bei entsprechend hohen Temperaturen und Dichten die Bedingungen zur Entstehung von schwereren Elementen wie etwa Kohlenstoff gegeben. Die Dichte kann dort 100-mal größer sein als im Universum zur Zeit der primordialen Nukleosynthese. Zunächst fusioniert im Inneren der Sterne Wasserstoff zu Helium. Ist der Wasserstoffvorrat dort aufgebraucht, kommt die Fusion zum Erliegen und der Kern des Sterns kontrahiert, bis sich dort die Dichte so weit erhöht, dass die Heliumfusion einsetzen kann. Dabei verbinden sich zwei Heliumkerne zu einem Beryllium-8-Kern, der seinerseits mit einem Heliumkern verschmilzt und einen Kern von Kohlenstoff-12 erzeugt. Diese Reaktion heißt Tripel- α (denn der Heliumkern wird auch als α -Teilchen bezeichnet). Sie ist aller-

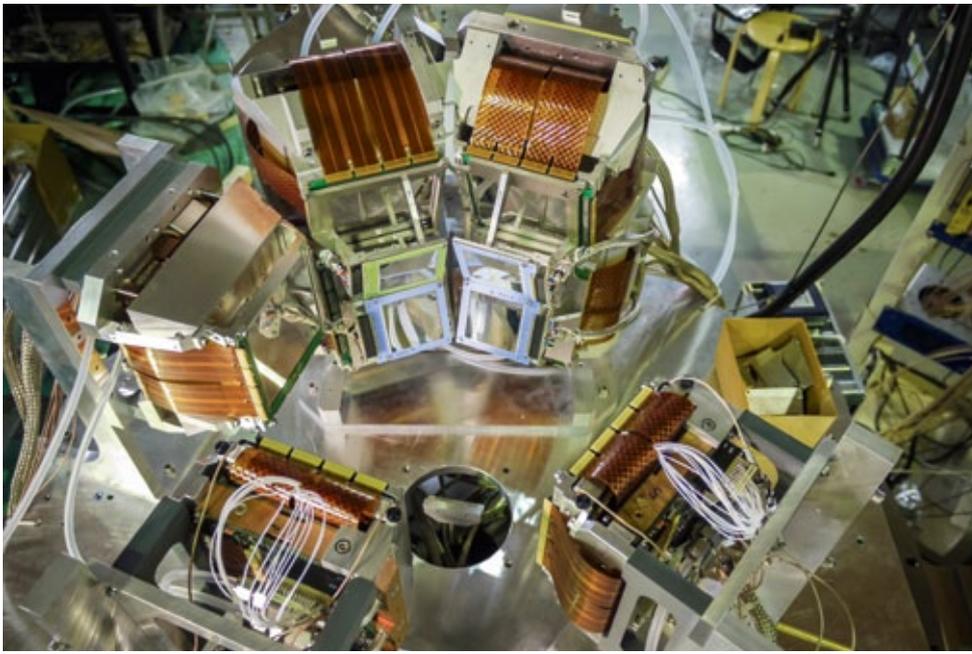
dings a priori wenig wahrscheinlich, da das Beryllium-8 sehr instabil ist und meistens zerfällt, bevor ein drittes α -Teilchen mit ihm wechselwirkt und fusioniert. Da der Grundzustand von Beryllium-8 fast dieselbe Energie wie zwei α -Teilchen besitzt, kann Beryllium-8 jedoch recht leicht (wieder) entstehen. Dennoch ist es eigentlich nicht langlebig genug, um auf demselben Weg als Nächstes Kohlenstoff-12 in ausreichendem Maß zu erzeugen.

Da wir im Universum Kohlenstoff beobachten, muss der Triple- α -Prozess aber irgendwie stattfinden. Im Jahr 1954 stellte der englische Physiker Fred Hoyle daher folgende Überlegung an: Könnte Kohlenstoff-12 nicht einen angeregten Zustand aus drei α -Teilchen annehmen (der heute als Hoyle-Zustand bezeichnet wird), dessen Energie nahezu gleich der Energie eines Beryllium-8-Atoms und eines α -Teilchens wäre? Die Existenz dieses angeregten Zustands würde nämlich die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Kohlenstoff-12 erhöhen. Nur wenige Monate nach Hoyles Vorhersage wurde er tatsächlich nachgewiesen. Er ist zwar instabil und zerfällt meistens in Beryllium. Aber einmal in 2500 Fällen entsteht ein stabiler Kohlenstoff-12-Kern. Das ebnet den Weg zur Bildung von Sauerstoff und allen weiteren schwereren Elementen.



JEAN-PAUL EBRAN

Der Hoyle-Zustand ist ein Kernzustand des angeregten Kohlenstoff-12, der eine molekulare Phase bildet, während sich die Nukleonen durch Bildung dreier α -Teilchen umgruppieren.



Der molekulare Kern ist eine der erstaunlichsten Kernphasen, bei dem sich die Nukleonen zu α -Teilchen zusammenschließen (gebundene Zustände von zwei Protonen und zwei Neutronen). Das ist etwa der Fall bei Kohlenstoff-12 aus drei α -Teilchen oder bei Neon-20 aus fünf davon. Wenn diese Kerne zerfallen, dann emittieren sie leichter α -Teilchen, die von der Anlage MUST2 (Foto) am Grand Accélérateur National D'Ions Lourds im französischen Caen nachgewiesen werden können.

Neben Quantenflüssigkeiten und Kernmolekülen können Atomkerne noch andere, exotischere Zustände einnehmen und so genannte Halos bilden. Im Jahr 1985 haben Isao Tanihata und seine Kollegen am Lawrence Berkeley National Laboratory den Radius mehrerer leichter Kerne gemessen. Für Lithium-11 etwa fanden sie einen Wert, der mit jenem von Blei-208 vergleichbar ist, obwohl Ersteres 20-mal weniger Nukleonen besitzt. Sein Kern hat einen Halo, der aus zwei stark delokalisierten Neutronen besteht. Auch andere neutronenreiche Kerne weisen eine Halostruktur auf. Der Halo lässt sich ebenfalls mit unserer vereinheitlichten Methode der verschiedenen Kernzustände beschreiben. Er ist ein Extremfall der delokalisierten Wellenfunktion bestimmter Nukleonen und entsteht, wenn diese nur schwach gebunden sind.

Neue Kernformen zu untersuchen, ist besonders schwierig, da sie in instabilen Kernen mit Lebensdauern in der Größenordnung von einigen Nanosekunden bis zu einigen Millisekunden auftreten. Wegen der schwachen Wechselwirkung zerfallen diese sehr schnell. So verhält es sich auch mit den theoretisch vorhergesagten Blaskernen. In ihrer Mitte ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Protonen wegen eines spezifischen Quanteneffekts sehr gering. Deshalb sind sie praktisch hohl. Das überrascht, denn das Innere eines Atomkerns ist im Allgemeinen extrem dicht.

Erste experimentelle Anzeichen für die Existenz von Blaskernen, die einen Spezialfall von Quantenflüssigkeiten darstellen, wurden vor Kurzem am GANIL (Grand Accélérateur National D'Ions Lourds) in Frankreich beobachtet. Ein direkter Nachweis des Hohlraums in diesen Kernen steht zwar noch aus – ein Kandidat dafür ist aber das instabile Silizium-34.

Etwa 95 Prozent der bekannten Kerne sind instabil, während die stabilen – wie etwa der des Sauerstoffs, den wir atmen – nur eine kleine Minderheit darstellen. Die Kernphysik

des 20. Jahrhunderts war gekennzeichnet durch die Untersuchung der 300 stabilen Kerne und hat den Weg zur Erforschung der instabilen Kerne eröffnet. Die Experimente unseres Jahrhunderts sind auf eine systematische Untersuchung der letzteren ausgerichtet, von denen es Tausende gibt. Mit den neuesten und auch sich heute noch im Bau befindlichen Anlagen in Japan, in den Vereinigten Staaten und in Europa werden wir fast alle der Theorie nach möglichen Kerne erzeugen können. Ihre Gesamtzahl schätzt man auf rund 7000. Möglicherweise werden wir dabei Formen und Zustände entdecken, von denen wir heute noch keinerlei Vorstellung haben. \sim

DIE AUTOREN



Jean-Paul Ebran (links) ist Forscher am Commissariat Energie Atomique in Arpajon. **Elias Khan** ist Professor an der Universität Paris-Sud und am Institut für Kernphysik in Orsay.

QUELLEN

- Burgunder, G. et al.:** Experimental Study of the Two-Body Spin-Orbit Force in Nuclei. In: Physical Review Letters 112, 042502, 2014
Ebran, J.-P. et al.: Density Functional Theory Studies of Cluster States in Nuclei. In: Physical Review C 90, 054329, 2014
Ebran, J.-P. et al.: How Atomic Nuclei Cluster. In: Nature 487, S. 341–344, 2012
Erler, J. et al.: The Limits of the Nuclear Landscape. In: Nature 486, S. 509–512, 2012
Gaffney, L. P. et al.: Studies of Pear-Shaped Nuclei Using Accelerated Radioactive Beams. In: Nature 497, S. 199–204, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1356002

DHV-Symposium 2015

Familie im Spiegel der Wissenschaft

Wissenschaftszentrum Bonn,
Mittwoch, 28. Oktober 2015, 10:00-17:45 Uhr

Familie im Spiegel der Wissenschaft – die Sicht einer Historikerin

Univ.-Professorin Dr. Gunilla Budde, Universität Oldenburg, Institut für Geschichte,
Vizepräsidentin für Studium und Lehre

Familie im Spiegel der Wissenschaft – die Sicht eines Juristen

Univ.-Professor Dr. Dr. Udo Di Fabio, Universität Bonn, Institut für öffentliches Recht,
Abteilung Staatsrecht, Richter des Bundesverfassungsgerichts a.D.

Familie im Spiegel der Wissenschaft – die Sicht eines Mediziners

Univ.-Professor Dr. Stefan Wilm, Universitätsklinikum Düsseldorf, Direktor des Instituts
für Allgemeinmedizin

Familie im Spiegel der Wissenschaft – die Sicht einer Soziologin

Univ.-Professorin (em.) Dr. Dr. h.c. Rosemarie Nave-Herz, Universität Oldenburg, Institut
für Soziologie, Schwerpunkt Familiensoziologie

Familie im Spiegel der Wissenschaft – die Sicht einer Psychologin

Univ.-Professorin Dr. Claudia Quaiser-Pohl, Universität Koblenz-Landau, Institut für
Psychologie, Abteilung Entwicklungspsychologie und Psychologische Diagnostik

Familie im Spiegel der Wissenschaft – die Sicht einer Wirtschaftswissenschaftlerin

Univ.-Professorin Dr. Notburga Ott, Universität Bochum, Fakultät für Sozialwissenschaft,
Sektion für Sozialpolitik und Sozialökonomie

Podiumsdiskussion mit allen Referenten

Moderation: Birgitta vom Lehn, freie Journalistin und Buchautorin

Teilnahmegebühr: EUR 50,-/ ermäßigte Teilnahmegebühr für Studierende: EUR 30,-

Informationen und Anmeldung: Deutscher Hochschulverband, Dipl.-Biol. Claudia Schweigele, Rheinallee 18-20, 53173 Bonn
Tel.: 0228/90266-68, Fax: 0228/90266-97, schweigele@hochschulverband.de

<https://www.hochschulverband.de/cms1/fachtagungen.html>



SONNENSYSTEM

Als die Meere vom Himmel fielen

Neue Entdeckungen befeuern die Debatte über die Herkunft des Wassers auf der Erde: Stammt es überwiegend von Kometen, von Asteroiden – oder von ganz anderen Himmelskörpern?

Von David Jewitt und Edward D. Young



Übrig gebliebene Planetesimale aus den äußeren wasserreichen Regionen des Sonnensystems bombardierten die Erde und lieferten Wasser für die Ozeane.

RON WILDER

Blickt man von der Küste auf das offene Meer hinaus, scheint es, als sei es schon immer da gewesen. Aber das ist keineswegs der Fall. Sein Wasser, die Regentropfen, die Feuchtigkeit der Luft, jeder Schluck aus einem Becher – das alles stammt aus einer Zeit, als die Ozeane buchstäblich vom Himmel fielen.

Das gesamte Wasser unseres Sonnensystems lässt sich bis zu der ursprünglichen Materiewolke aus Gas und Staub zurückverfolgen, aus der vor mehr als 4,5 Milliarden Jahren die Sonne und ihre Planeten entstanden. Sie war reich an Wasserstoff und Sauerstoff, den beiden chemischen Bestandteilen von Wasser (H₂O). Das überrascht nicht, ist doch Wasserstoff das häufigste und Sauerstoff das dritthäufigste Element im Kosmos – auf Platz 2 steht das Edelgas Helium. Die Sonne und die großen Gasplaneten, die vor den Gesteinsplaneten entstanden, nahmen das meiste Gas der Wolke auf. Ein großer Teil des übrigen Sauerstoffs verband sich mit anderen Elementen wie Kohlenstoff und Magnesium. Trotzdem reichte die restliche Menge an Wasserstoff und Sauerstoff aus, um im Sonnensystem erheblich mehr Wasser als Gestein zu produzieren.

Allerdings widerspricht das unseren Beobachtungen: Die Erde und ihre Nachbarn Mars und Venus sowie Merkur bestehen überwiegend aus Gestein. Ihr verhältnismäßig geringer Wasseranteil folgt daraus, wo und auf welche Art und Weise sie entstanden sind. Als die Materiewolke, aus der das Sonnensystem hervorging, kollabierte, verformte sie sich durch die Drehimpulserhaltung zunächst zu einer flachen, rotierenden so genannten protoplanetaren Scheibe. Nach heutigen Erkenntnissen bildeten sich in ihr die Gesteinsplaneten Schritt für Schritt, indem kleinere Objekte zusammenstießen und zu größeren verschmolzen: Aus mikroskopisch kleinen Staubkörnchen entwickelten sich Steine, diese wuchsen weiter zu Felsbrocken und schließlich zu kilometergroßen Planetenbausteinen, den Planetesimalen. Die heutigen Asteroiden und Kometen entstanden aus übrig gebliebenen Planetesimalen.

In der inneren, sonnennahen Region der Materiescheibe ließen Reibungswärme und Sonneneinstrahlung Wasserstoff und andere leichte Elemente entweichen. Für die Planetenbildung blieb dort lediglich relativ trockenes Material zu-

rück. Während also nahe der Sonne Gesteinskörper entstanden, waren weiter außen, etwa in der Gegend des heutigen Asteroidengürtels und der Jupiterbahn, die Temperaturen so niedrig, dass Wasser und andere flüchtige Stoffe ausfrieren konnten. Astronomen bezeichnen diese Übergangsregion als Schneegrenze. Das meiste Wasser auf der Erde muss, so die allgemeine Überzeugung, von jenseits der Schneegrenze stammen. Vielleicht kam es als Schauer von eisigen Asteroiden und Kometen, die von den äußeren Riesenplaneten in der letzten Phase der Planetenentstehung in das innere Sonnensystem geschleudert wurden.

Beobachtungen von protoplanetaren Scheiben um fremde Sterne lieferten jüngst weitere Hinweise auf die Existenz von Schneegrenzen und Kollisionen von Planetesimalen. In den Tiefen des interstellaren Raums sehen wir heute also dieselben Prozesse, die vor langer Zeit in unserem Sonnensystem abliefen. Trotzdem sind viele Aspekte der Herkunft der irdischen Ozeane immer noch rätselhaft.

Planet Ozean – einst knochentrocken

Vom All aus betrachtet erscheint uns die Erde als blauer Planet. Zwei Drittel seiner Oberfläche sind von Wasser bedeckt. Und sogar wir Menschen bestehen zu mehr als zwei Dritteln aus Wasser. Die Ozeane haben eine mittlere Tiefe von vier Kilometern und enthalten genug Wasser, um eine Kugel mit einem Durchmesser von 1300 Kilometern zu füllen. Und doch macht dieses lediglich 0,02 Prozent der gesamten Masse der Erde aus. Wäre unser Planet eine 300 Tonnen schwere Boeing 777, so entspräche der Wassergehalt gerade einmal der Masse eines einzigen Passagiers. Das in den Polkappen, in Wolken, Flüssen, Seen, feuchtem Erdboden und allen Lebewesen enthaltene Wasser trägt nur einen winzigen Teil zu dieser Menge bei.

Im felsigen Erdmantel, der sich über mehr als 3000 Kilometer von der Kruste bis zum Kern erstreckt, verbirgt sich weiteres Wasser. Es liegt dort nicht in flüssiger Form vor, sondern ist in die molekulare Struktur hydratisierter Gesteine und Mineralien eingebunden, die tektonische Prozesse unter die Kruste transportiert haben. Ein Teil dieser im Gestein gefangenen Feuchtigkeit kann über Vulkane aus dem Mantel wieder an die Oberfläche gelangen, doch der überwiegende Rest bleibt in der Tiefe verborgen.

Unterhalb des Erdmantels liegt der mächtige Nickel-Eisen-Kern. Er enthält nicht nur etwa 30 Prozent der Masse der Erde, sondern möglicherweise auch mehr Wasser als der Mantel – allerdings in Form von Wasserstoff. Unter anderen Bedingungen als den extremen Drücken und Temperaturen im Kern würde sich dieser aber sofort mit Sauerstoff aus der Umgebung zu Wasser verbinden.

Wie viel Wasser sich im Inneren unseres Planeten befindet, weiß niemand genau. Einerseits fehlen direkte Materialproben von dort, andererseits wissen wir auch nicht, wie effektiv Wasser von der Oberfläche nach innen und wieder zurück transportiert wird. Realistische Annahmen liefern für

AUF EINEN BLICK

HERKUNFT DES IRDISCHEN WASSERS

1 In der **Umgebung der jungen Sonne** war die Strahlung so intensiv, dass sich das dort vorhandene Wasser in äußere Regionen des Sonnensystems verflüchtigte.

2 In Sonnennähe entstanden so relativ trockene Planeten. Vermutlich gelangte das meiste Wasser erst in einer späten Entwicklungsphase durch **Asteroiden-** oder **Kometenschauer** auf die Erde.

3 Die Sachlage ist jedoch nicht eindeutig. Möglicherweise wirkten bei der **Entstehung der irdischen Ozeane** verschiedene Prozesse zusammen.



den Mantel noch einmal so viel Wasser, wie in allen Ozeanen enthalten ist. Aber selbst dann macht das Wasser nur 0,04 Prozent der Erdmasse aus. So seltsam es auch klingen mag: Die Erde ist 100-mal trockener als alte Knochen. Trotzdem stellt sich die Frage, woher das Wasser auf unserem Planeten stammt.

Kometen oder Asteroiden?

Inzwischen gehen die Forscher davon aus, dass die junge Erde noch trockener war als die heutige. Vermutlich gelangte das Wasser in einer recht späten Entwicklungsphase auf unseren Heimatplaneten, noch nachdem sich der Mond bildete.

Zumindest für einige zehn Millionen Jahre nach ihrer Geburt muss die Erde – wie die anderen Gesteinsplaneten der Sonne auch – eine teilweise geschmolzene Oberfläche besessen haben. Ursache dafür war ein ständiger Zustrom von kilometergroßen Planetesimalen, die dem jungen Planeten mit ihren Einschlägen große Mengen an Energie zuführten. Zwar gibt es geochemische Hinweise auf Spuren von Wasser in den Magmaozeanen der frühen Erde. Aber geschmolzenes Gestein eignet sich nicht sonderlich gut als Aufenthaltsort für Wasser. Der größte Teil der Feuchtigkeit der Proto-Erde und der Planetesimale dürfte daher als ionisiertes Gas und Dampf wieder ins All entwichen sein. Ein Teil davon könnte allerdings auf die Erde zurückgefallen und gebunden in Gestein in den Mantel abgesunken sein.

Weitere große Einschläge haben vermutlich später den Gehalt an Wasser auf und nahe der Erdoberfläche verändert. So kollidierte die Erde vor 4,47 Milliarden Jahren mit einem marsgroßen Körper. Aus den bei dieser Katastrophe ausgeworfenen Trümmern bildete sich der Mond. Die enorme Einschlagsenergie dürfte einen Großteil der Atmosphäre hinweggefegt, jeden bereits vorhandenen Ozean schlagartig

zum Verdampfen gebracht und einen mehrere hundert Kilometer tiefen Magmaozean produziert haben. Unabhängig davon, ob die Erde feucht oder trocken entstanden ist – dieses Ereignis hat nahezu das gesamte damals bereits vorhandene Wasser von unserem Planeten entfernt.

Daher haben die Astronomen lange nach einer Quelle gesucht, die nach der Abkühlung des Erde-Mond-Systems Wasser auf unseren Planeten bringen konnte. Seit den 1950er Jahren wissen wir, dass Kometen reich an Wassereis sind. Die Schweifsterne kommen aus zwei großen Reservoiren in das innere Sonnensystem: dem Kuipergürtel, der etwa auf Höhe der heutigen Plutobahn beginnt, und der Oortschen Wolke, die sich jenseits des Kuipergürtels möglicherweise bis zur halben Entfernung des nächsten Sterns ins All hinaus erstreckt. Vielleicht, so dachten viele Forscher, waren Kometen die vorherrschende Quelle der irdischen Ozeane.

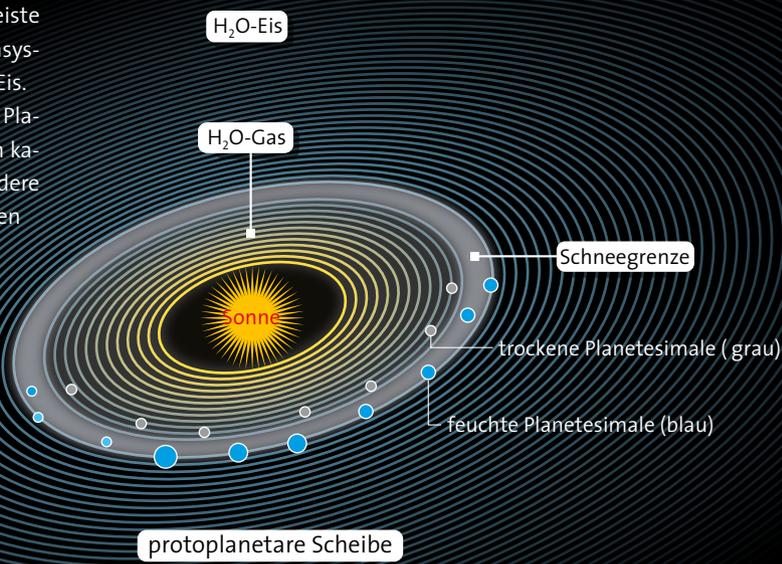
Doch in den 1980er und 1990er Jahren geriet dieser Erklärungsansatz ins Wanken. Damals bestimmte man erstmals das Verhältnis von Deuterium (D) zu Wasserstoff (H) in Kometen aus der Oortschen Wolke. Deuterium ist ein schweres Isotop des Wasserstoffs, das zusätzlich zum Proton ein Neutron in seinem Atomkern enthält. Die Häufigkeit von Deuterium im Verhältnis zu normalem Wasserstoff liefert eine Art Fingerabdruck für die Geschichte eines Himmelskörpers. Wenn die irdischen Ozeane also aus geschmolzenen Kometen entstanden sind, müsste ihr D/H-Verhältnis dem der heutigen Kometen gleichen. Die Objekte aus der Oortschen Wolke besitzen allerdings einen doppelt so hohen D/H-Wert wie das Meereswasser. Folglich muss der größte Teil des Wassers auf der Erde einen anderen Ursprung haben.

Zwar zeigten in den vergangenen Jahren Messungen des D/H-Verhältnisses an Kometen aus dem Kuipergürtel ähnliche Werte wie die irdischen Ozeane. Aber Ende 2014

Der Ursprung der Meere – die turbulente Geschichte des irdischen Wassers

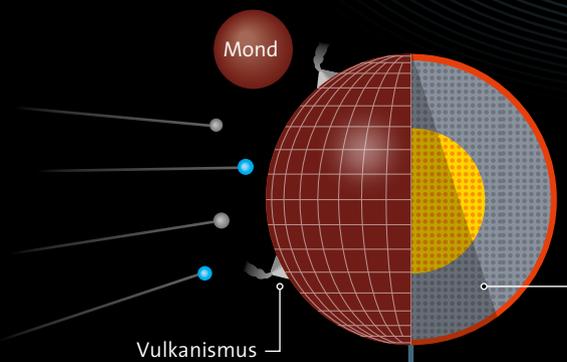
Die Erde war nicht immer ein Planet mit Ozeanen. Vor 4,5 Milliarden Jahren entstand sie in einer wirbelnden Scheibe aus Gas und Staub um die junge Sonne. Die Materiescheibe war reich an Wasserstoff und Sauerstoff, den Bestandteilen von Wasser, aber das meiste Wasser verflüchtigte sich in die äußeren Regionen des Sonnensystems jenseits der Schneegrenze und existierte dort in Form von Eis.

Unser Heimatplanet entstand aus Planetenbausteinen, den Planetesimalen, die in der Scheibe zusammenstießen. Einige davon kamen aus der Region nahe der Sonne und waren trocken, andere kamen von jenseits der Schneegrenze und brachten der jungen Erde bereits ein wenig Wasser. Es waren jedoch viele weitere Schritte nötig, um die heute vorhandenen Ozeane entstehen zu lassen. Grundsätzlich sind sich die Forscher über dieses Szenario einig – nicht aber über die Einzelheiten. So ist immer noch strittig, ob Kometen oder Asteroiden weiteres Wasser zur Erde brachten.



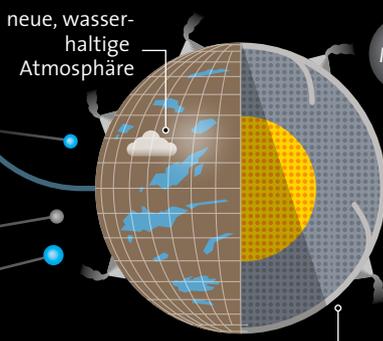
4 Nachwirkungen

Die Erde ist jetzt trocken und erholt sich langsam von dem gewaltigen Einschlag. Vulkane und kleinere Einschläge füllen die Atmosphäre wieder mit Wasserdampf auf.



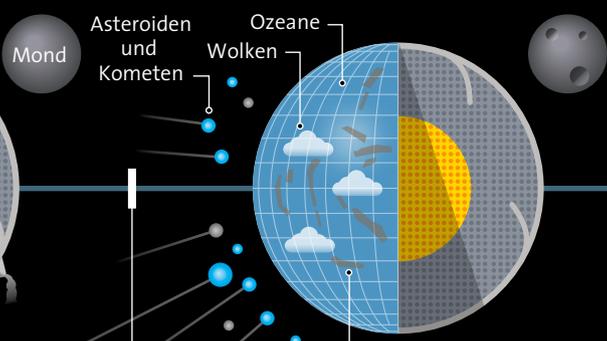
5 Abkühlung

Wasser von einschlagenden Himmelskörpern sowie von vulkanischer Ausgasung bildet kleine Seen auf der abkühlenden Oberfläche.



6 Späte Lieferung

Viele übrig gebliebene Planetesimale aus dem wasserreichen äußeren Sonnensystem – ein Gemisch aus Asteroiden und Kometen – bombardieren den Planeten. Aus der dampfgeschwängerten Atmosphäre fällt Regen und füllt die Ozeane.



vor 3,9 Milliarden Jahren

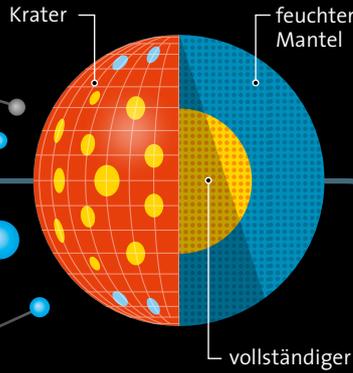
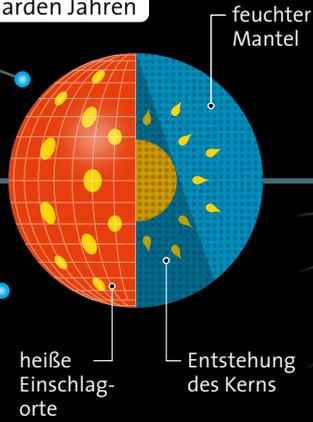
1 Heißer Start

Durch die Hitze seiner Entstehung ist unser Planet geschmolzen. In seinem Mantel enthält er aber ein wenig Feuchtigkeit.

2 Proto-Erde

Durch das Bombardement mit Planetesimalen wächst der Planet. Schwere Elemente sinken nach innen und bilden den Kern. Das Wasser ist hauptsächlich in Form hydratisierter Mineralien im Mantel gebunden, obwohl eine kleine Menge auch auf der abkühlenden Oberfläche vorhanden ist.

vor 4,55 Milliarden Jahren



vor 4,47 Milliarden Jahren

3 Geburt des Mondes

Ein gewaltiger Einschlag erschüttert den Planeten bis in seinen Kern, entreißt ihm die Atmosphäre, zerbricht den Mantel und schleudert einen Großteil des irdischen Wassers ins All. Aus den Gesteinstrümmern bildet sich der Mond.

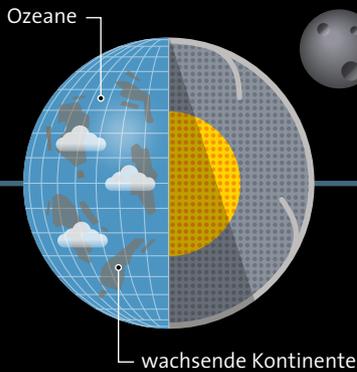
Magma-Ozean

Theia
(marsgroßes Objekt)

Ausgasung

7 Vom Planeten »Ozean« ...

Die Welt kühlt nach diesem Bombardement erneut ab. Unterseeische Vulkane tragen zum Wachstum der Kontinente bei.



8 ... zum Planeten »Erde«

Mit ausgewachsenen Kontinenten und Ozeanen bietet die Erde heute das uns vertraute Bild.

heute





ESA, ROSETTA / NANCY

Die Zusammensetzung des Wassers von dem Kometen 67/P Tschurjumow-Gerasimenko (oben) unterscheidet sich in seinem D/H-Gehalt von jenem der irdischen Ozeane. Das Wasser von einigen Asteroiden (unten) dagegen ist unserem Wasser sehr viel ähnlicher.



NASA, JPL / PHUPRE

lieferte die ESA-Sonde Rosetta für den ebenfalls aus dem Kuipergürtel stammenden Kometen 67/P Tschurjumow-Gerasimenko einen dreimal höheren D/H-Wert. Dieses Ergebnis in Verbindung mit Analysen der orbitalen Dynamik einfallender Körper aus den kometenreichen Regionen spricht gegen Kometen als vorherrschende Quelle des irdischen Wassers – auch wenn sicherlich gelegentlich ein Schweifstern seinen Teil dazu beigetragen hat.

Die offensichtliche Alternative sind Asteroiden – und die meisten Forscher gehen heute davon aus, dass der Löwenanteil des irdischen Wassers von solchen Himmelskörpern stammt. Wie Kometen sind auch Asteroiden Bruchstücke von Planetesimalen aus der Entstehungszeit des Sonnensystems. Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter liegt viel näher an der Erde als der Kuipergürtel. Damit ist auch die Wahrscheinlichkeit viel größer, dass ein aus der Bahn geworfenes Objekt aus dieser Zone die Erde trifft. Ein Beleg dafür ist der Mond: Seine kraterübersäte Oberfläche zeugt von zahlreichen Asteroideneinschlägen in seiner Frühzeit.

Meteoriten als Zeugen

Und Meteoriten – kleine Bruchstücke von Asteroiden, die den Erdboden erreichen – erinnern uns daran, dass die Erde immer noch stetig von interplanetaren Trümmern getroffen wird. Die Untersuchung dieser vom Himmel gefallenen Steine bietet uns einen Einblick in ihre Geschichte und hilft uns dabei, die Frage zu beantworten, ob Asteroiden die Ozeane der Erde gefüllt haben könnten. Messungen an bestimmten Arten von Meteoriten haben inzwischen gezeigt, dass ihr D/H-Wert mit jenem des Meeresswassers übereinstimmt.

Wie ihre Ursprungsasteroiden, so überdecken auch Meteoriten einen weiten Bereich an chemischen Zusammensetzungen und besitzen ganz unterschiedliche Anteile an Wasser. Viele der wasserarmen, steinigen Meteoriten stammen von Asteroiden, die ihre Bahn am inneren Rand des Gürtels ziehen, etwa doppelt so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Kohlige Chondrite dagegen, Meteoriten aus hydratisierten Mineralien und Karbonaten, stammen von relativ feuchten Asteroiden am äußeren Rand des Gürtels, etwa auf halbem Weg zu Jupiter. Sie enthalten bis zu mehrere Gewichtsprozent an Wasser.

Einer von uns (Young) hat sich intensiv mit der Geschichte des Wassers in solchen Gesteinsbrocken aus dem All befasst. Die wasserreichen Mineralien in kohligen Chondriten bilden sich über Reaktionen zwischen dem Gestein und flüsigem oder dampfförmigem Wasser, die bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von wenigen hundert Grad Celsius ablaufen. Auf der Erde entstehen solche Mineralien, wenn Wasser durch poröses Gestein hindurchsickert. In Meteoriten künden sie von einer Ära im Sonnensystem, in der Wassereis geschmolzen und durch die Gesteinsmatrix des Asteroiden geflossen ist.

Die Wärmequelle, die das Eis zum Schmelzen gebracht hat, war höchst wahrscheinlich das radioaktive Isotop Aluminium-26, das im jungen Sonnensystem in großen Mengen

vorhanden war. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von 717 000 Jahren in Magnesium-26 und liefert so über mehrere Millionen Jahre hinweg reichlich Energie. In den kalten Außenzonen des Sonnensystems jenseits der Schneegrenze war die Zerfallswärme von Aluminium-26 ein effizienter, wenn auch nur kurz wirkender Einfluss auf die Geologie und die Hydrologie der an flüchtigen Substanzen reichen Asteroiden. Nach der Entstehung der Sonne war das Wasser in vielen Asteroiden über einige Millionen Jahre hinweg flüssig und trieb hydrothermale Zirkulationssysteme in ihnen an. Ganz ähnliche Wasserkreisläufe findet man beispielsweise bei Vulkanschloten auf den Mittelozeanischen Rücken der Erde.

Das warme Wasser sickerte durch Risse und Spalten des radioaktiv erwärmten Gesteins und führte zur Bildung von hydratisierten Mineralien und Karbonaten. In der Endphase der Planetenentstehung streuten die äußeren Riesenplaneten durch ihre Gravitation kleinere Körper kreuz und quer durch das Sonnensystem – und so konnten wasserhaltige Asteroiden aus dem Bereich jenseits der Schneegrenze auf die Erde und die anderen Gesteinsplaneten stürzen.

Hinweise auf diese Umwälzung im jungen Sonnensystem finden wir sowohl im chemischen Aufbau der Erde als auch des Planeten Mars. Elemente der Platin-Gruppe beispielsweise sind siderophil, das heißt Eisen liebend. Sie besitzen also eine stärkere chemische Affinität zu Eisen und anderen Me-

tallen als zu Gestein. Auf der neugeborenen, geschmolzenen Erde sollten diese Elemente deshalb zusammen mit Eisen und Nickel in den Kern abgesunken sein. Doch überraschenderweise findet man im heutigen Mantel und sogar in der Kruste einen beachtlichen Anteil an siderophilen Elementen. Das passt zu der Annahme, dass etwa ein Prozent der Erdmasse von Chondriten stammt, die erst eingeschlagen sind, nachdem der Planet abgekühlt war und sich der Kern bereits vollständig herausgebildet hatte. Nur durch dieses späte Bombardement aus dem All haben wir auf der Erde Zugang zu Platin, einem Element, das nicht nur für Schmuck, sondern auch für Auto-Katalysatoren von Bedeutung ist. Und es ist möglicherweise ebenfalls die Erklärung für all das Wasser der irdischen Ozeane. Sehr wahrscheinlich traf ein gewaltiger Schwung von Materie aus dem Asteroidengürtel gegen Ende der Planetenentstehung nicht nur Erde und Mars, sondern alle inneren Planeten.

Allerdings hat das schöne Bild von den Asteroiden, die das Wasser zur Erde liefern, wohl einen entscheidenden Fehler. Darauf stießen die Forscher, als sie ihren Blick auf Edelgase wie Xenon und Argon richteten. Diese sind chemisch nahezu inert, sie reagieren kaum mit anderen Stoffen. Daher lassen sich mit ihnen physikalische Prozesse gut verfolgen. Wenn die Gesteinsplaneten und die Asteroiden eng miteinander verwandt sind, sollten sie auch ähnliche Anteile der meisten

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,-

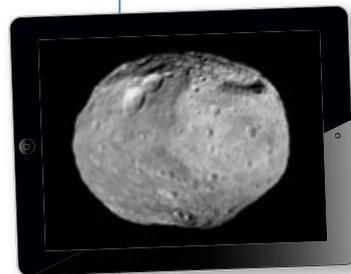
Weitere Informationen und Anmelde­möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!





NASA, JPL / CALTECH / UCLA / MPS / DLR / IDA

Unser
Online-Dossier
zum Thema
»Asteroiden und
Kometen« finden Sie unter



[www.spektrum.de/
t/asteroiden-und-kometen](http://www.spektrum.de/t/asteroiden-und-kometen)

Edelgase aufweisen. Tatsächlich zeigte sich aber, dass Erde und Mars sehr viel weniger Xenon und Argon enthalten als Meteoriten.

Es gibt viele Vorschläge zur Lösung dieses Xenon-Problems – darunter einige, die das Pendel zurück zu den Kometen als Hauptlieferanten des irdischen Wassers und anderer flüchtiger Substanzen schwingen lassen. Während wir diesen Text verfassen, warten die Wissenschaftler ungeduldig auf erste Messungen der Edelgase auf einem Kometen, nämlich auf 67P/Tschurjumow-Gerasimenko durch Rosetta. Sie könnten dabei helfen, eine endgültige Antwort auf die Frage nach dem Ursprung des irdischen Wassers zu finden. Wie die Vergangenheit zeigt, könnten sie aber ebenso gut noch schwierigere Fragen aufwerfen – und damit die Debatte für weitere Jahrzehnte in Gang halten.

Nur scheinbar ein Gegensatz?

Asteroiden oder Kometen – es scheint keine einfache Antwort auf diese Frage zu geben. Vielleicht ist aber nicht der Vorgang selbst, sondern die von uns gestellte Frage das Problem. Der Unterschied zwischen Asteroiden und Kometen ist möglicherweise gar nicht so gewaltig wie ursprünglich angenommen. Einer von uns (Jewitt) hat unlängst zusammen mit Henry Hsieh vom Institut für Astronomie und Astrophysik der Academia Sinica in Taiwan Objekte im Asteroidengürtel entdeckt, die wie Kometen auf ihrer Bahn periodisch Staub ausstoßen. Entgegen unseren Erwartungen enthalten sie noch Eis, obwohl sie sich in der sonnendurchfluteten Region innerhalb der Schneegrenze befinden.

Darüber hinaus ist die eigentliche Frage ja nicht, warum die Erde so viel, sondern eher, warum sie so wenig Wasser besitzt. Es gibt zahlreiche Wege, auf denen die Erde ihren relativ geringen Anteil an Wasser erhalten haben könnte. Sie hängen eng mit der genauen Geschichte des Planeten, der einschlagenden Himmelskörper und den Anfangsbedingungen ihrer Entstehung zusammen. All die Unsicherheiten lassen eine Menge Spielraum für andere, exotischere Erklärungen für die Herkunft des irdischen Wassers: Auch wenn diese unwahrscheinlich sind, lassen sie sich nicht völlig ausschließen.

Rein theoretisch könnte beispielsweise der größte Teil des Wassers nahezu von Beginn an auf der Erde gewesen sein. Neuere Forschungen deuten darauf hin, dass sich Wasserstoff-

ionen des Sonnenwinds in Form hydratisierter Mineralien auf den amorphen Oberflächen interplanetarer Staubpartikel ansammeln können – die so bereits am Anfang der Planetenentstehung wasserhaltiges Material in die Planetesimale einbrachten. Selbst dann wäre aber schwer zu verstehen, wie ein solches, ursprünglich tief im Mantel vorhandenes Wasserreservoir die Entstehungsphase der Erde überstehen und schließlich nach dem großen Bombardement herausickern konnte.

In jüngster Zeit haben größere Himmelskörper die Aufmerksamkeit der Forscher auf sich gezogen, so etwa der Zwergplanet Ceres, der mit einem Durchmesser von 900 Kilometern der größte bekannte Asteroid ist. Anfang 2014 beobachteten Astronomen, dass von Ceres etwa 20000 Kilogramm Dampf pro Stunde wegströmen. Einige Forscher vermuten daher, Ceres bestehe zur Hälfte aus Wasser. Die Erde hat etwa die 6000-fache Masse von Ceres. Das bedeutet, dass bereits fünf derartige Objekte genauso viel Wasser enthalten könnten wie die gesamte Erde.

Solche Objekte gab es im chaotischen, frühen Sonnensystem viele; sie waren deutlich häufiger als heute. So könnten durchaus mehrere ceresähnliche Himmelskörper ihren Weg in das innere Sonnensystem und zur Erde gefunden haben. Eine Hand voll von ihnen hätte bereits ausgereicht, um unseren Planeten mit Ozeanen auszustatten – weitere Asteroiden- oder Kometenschauer wären völlig unnötig gewesen. Inzwischen hat die NASA-Sonde Dawn Ceres erreicht und wird uns bald ein neues Bild des Zwergplaneten liefern. Und vielleicht neue, überraschende Erkenntnisse über die Geschichte des Wassers auf der Erde und im Sonnensystem. ~

DIE AUTOREN



David Jewitt (links) ist Mitglied der National Academy of Sciences der USA und Professor für Astronomie an der University of California in Los Angeles. Er trinkt viel Wasser – aber nur in Form von Kaffee. **Edward D. Young** ist Professor für Geo-

und Kosmochemie am Institute for Planets and Exoplanets der University of California in Los Angeles und erforscht die Chemie von Meteoriten, des interstellaren Mediums sowie von Sternen auf der Suche nach Hinweisen auf den Ursprung des Sonnensystems.

QUELLEN

- Altwegg, K. et al.:** 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter Family Comet with a High D/H Ratio. In: *Science* 347, 1261952, 2015
Bardley, J.P. et al.: Detection of Solar Wind-Produced Water in Irradiated Rims on Silicate Minerals. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111, S. 1732–1735, 2014
Hsieh, H.H., Jewitt, D.: A Population of Comets in the Main Asteroid Belt. In: *Science*, 312, S. 561–563, 2006
Mottl, M.J. et al.: Water and Astrobiology. In: *Chemie der Erde / Geochemistry* 67, S. 253–282, 2007

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1356001

Leserreisen – Frühjahr und Herbst 2016

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern 2016 erneut interessante Reisen nach Chile zu den großen Observatorien und nach Lappland mit spektakulären Polarlichtern sowie eine Kurzreise nach Genf mit besonderen Vorträgen und einem Besuch des CERN.



Chile

IM REICH DER
RIESENTESKOPE

Nicht ohne Grund wird Chile das »Mekka der Astronomie« genannt: Im Norden des Landes werden bald sieben Großsternwarten beheimatet sein. Mit unserer Leserreise haben Sie die Möglichkeit, die drei bekanntesten von ihnen – Las Campanas, La Silla und natürlich das Cerro Paranal mit seinen berühmten 8,2-Meter-VLT-Teleskopen und der Interferometrieanlage – unter fachkundiger Leitung zu besuchen. Ebenfalls geplant ist ein Besuch der Montagestation des ALMA-Projekts.

Landschaftlich kommen Sie ebenfalls voll auf Ihre Kosten. Auf unserem Programm stehen unter anderem die Atacama-Wüste und die fantastische Welt der hohen Anden: San Pedro de Atacama, die große Salzkordillere, der viertgrößte Salzsee der Welt, die Hochlandlagunen des Altiplano und die El-Tatio-Geysire. Zudem haben Sie die Möglichkeit, den eindrucksvollen Himmel der südlichen Hemisphäre durch ein Teleskop zu bestaunen. In der 7-tägigen Verlängerung der Reise geht es dann nach Südküste – ins wildromantische Patagonien mit Magellanstraße, zum Nationalpark Torres del Paine, in die Gletscherwelten und zu den Pinguinkolonien.

Hauptreise 25. 1. – 8. 2. 2016

Preis im DZ/F: € 5390,-

Verlängerung 8. 2. – 15. 2. 2016

Preis im DZ/F: € 2190,-



Lappland

ZU DEN POLARLICHTERN
NORDSKANDINAVIENS

Im März 2016 geht es zu den eindrucksvollen Polarlichterscheinungen im hohen Norden. Unser Ziel ist der 69. Breitengrad rund um den Inarisee in Finnland und das Pasviktal in Norwegen.

Neben geführten Polarlichtbeobachtungen und interessanten Vorträgen bietet die Reise zudem viele Winteraktivitäten: Husky-, Rentier- oder Schneescooter-Safaris, skandinavische Sauna sowie eine Königskrabben-Safari. Auch die lappländische Samen-Kultur kommt nicht zu kurz.

Bei Verlängerung der Reise beginnt in Kirkenes eine 6-tägige Kreuzfahrt entlang der malerischen norwegischen Küste nach Bergen. Diese faszinierende Hurtigruten-Tour steuert viele Küstenstationen an: Hammerfest, Tromsø, die Inselwelt der Lofoten, Bodø und Trondheim.

Die Reise wird fachkundig betreut: Vorträge, laserunterstützte Führungen am Nordhimmel – ein handliches Planetarium und ein Teleskop sind auch mit dabei.

Hauptreise 7. 3. – 16. 3. 2016

Preis pro Person im DZ/HP: € 2330,-

(individuelle Verlängerung auf Anfrage)



Genf

DEM URSPRUNG DES
UNIVERSUMS AUF DER SPUR

Mit dieser Kurzreise begeben wir uns am CERN, der Europäischen Organisation für Kernforschung bei Genf, auf das wohl größte intellektuelle Abenteuer der modernen Forschung: die Suche nach dem Ursprung des Universums.

Zwei Fachleute stimmen uns auf den halbtägigen Besuch ein. Zum einen hält Prof. Dr. Dieter B. Herrmann aus Berlin einen einleitenden wissenschaftshistorischen Vortrag zur Erforschung des Mikro- und Makrokosmos, zum anderen gibt uns Prof. Jürg Schacher aus Bern, ein erfahrener CERN-Mitarbeiter, einen persönlichen Einblick in die Arbeit, die an dieser wichtigen Forschungseinrichtung geleistet wird. Schließlich erhalten wir eine Führung im CERN.

Bei einem Ausflug zum Genfer See kann man außerdem die Schönheit der französischen Schweiz genießen. Zum Abschluss ist ein Besuch mit Besichtigung der UNO (United Nations Office) möglich. Reisebetreuung und Vorträge sind deutschsprachig.

Geplanter Termin: 20. 9. – 23. 9. 2016

4-tägig (Eigenreise)

Preis im DZ/HP: € 890,-



Bevor der Autor zu schreiben begann, überlegte er sich verschiedene Möglichkeiten für den ersten Satz und entschied sich schließlich für eine davon. Bewusste Planung entspricht dem, was wir landläufig mit freiem Willen meinen.

HIRNFORSCHUNG

Wie frei ist der Mensch?

Manche Neurowissenschaftler denken, der Mensch sei ein biochemischer Automat – und Willensfreiheit nur ein subjektiver Eindruck. Doch neue Ergebnisse der Bewusstseinsforschung widerlegen dies.

Von Eddy Nahmias

Vor einiger Zeit lag ich nachts wach und zerbrach mir den Kopf darüber, wie ich diesen Text beginnen sollte. Ich stellte mir mehrere Varianten eines ersten Satzes vor, eines nächsten und eines dritten. Dann überlegte ich, wie ich zum darauf folgenden Absatz übergehen könnte und weiter zum übrigen Artikel. Die Vor- und Nachteile jeder dieser Möglichkeiten kreisten in meinem Kopf und hinderten mich am Einschlafen. Währenddessen liefen in den Nervenzellen meines Gehirns komplizierte Prozesse ab. Tatsächlich erklärt die neurale Aktivität, warum ich verschiedene Varianten erwog und warum ich jetzt gerade diese Worte schreibe und keine anderen. Außerdem erklären die Hirnvorgänge, warum ich einen freien Willen besitze.

Allerdings meinen in letzter Zeit viele Neurowissenschaftler, Psychologen und Fernsehautoritäten, Letzteres sei ein Irrtum. Sie berufen sich auf einige oft zitierte Experimente und behaupten, unbewusste Prozesse hätten die Wahl der Worte verursacht, die ich letztlich niederschrieb. Demzufolge entsteht eine bewusste Überlegung und Entscheidung erst, nachdem neurale Weichenstellungen unterhalb der Schwelle unseres Bewusstseins zuvor festgelegt haben, was wir wählen werden. Und da unser Gehirn uns damit quasi die Entscheidung abnimmt, ist Willensfreiheit bloß eine Illusion.

Die Experimente, die als Beweis dafür dienen sollen, dass unser Gehirn hinter den Kulissen die Führung übernimmt, führte der amerikanische Physiologe Benjamin Libet (1916–2007) in den 1980er Jahren an der University of California in San Francisco durch. Er bat Versuchspersonen, auf deren Kopf er Elektroden angebracht hatte, zu einem willkürlich gewählten Zeitpunkt eine Hand zu bewegen. Die von den Elektroden aufgezeichneten Aktivitätsschwankungen zeigten ein so genanntes Bereitschaftspotenzial an, das schon rund eine halbe Sekunde vor der willkürlichen Handbewegung auftrat. Doch den Probanden wurde ihre Absicht, die Hand zu rühren, laut einer parallel laufenden Zeitmessung erst eine Viertelsekunde vor der Ausführung bewusst. Daraus schloss Libet, dass das Gehirn den Entschluss zur Handbewegung bereits gefasst hatte, bevor dieser ins Bewusstsein trat. Das schien zu besagen: Unbewusste Hirnprozesse trafen die Entscheidung.

Nach neueren Untersuchungen mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) beginnt die unbewusste Vor-

bereitung von Entscheidungen sogar noch früher. 2013 legte der Neurologe John-Dylan Haynes vom Bernstein Center for Computational Neuroscience in Berlin Versuchspersonen in einen fMRT-Scanner und ließ ihnen die freie Wahl, zwei Zahlen entweder zu addieren oder zu subtrahieren. Aus den neuronalen Aktivitätsmustern ließ sich schon ganze vier Sekunden, bevor den Probanden ihre Entscheidung bewusst wurde, vorhersagen, welchen Rechenweg sie einschlagen würden.

Solche Experimente haben zu der pauschalen Behauptung geführt, der freie Wille sei erledigt. »Unsere Entscheidungen sind, lange bevor unser Bewusstsein ins Spiel kommt, unbewusst vorherbestimmt«, kommentierte Haynes 2008 in der Zeitschrift »New Scientist« und fügte hinzu: »Anscheinend trifft das Gehirn die Entscheidung vor der Person.« Für den Evolutionsbiologen Jerry Coyne von der University of Chicago ist eine Entscheidung niemals Folge einer bewussten Wahl; es gebe weder Entscheidungsfreiheit noch freien Willen. Der amerikanische Neurowissenschaftler, Philosoph und Debattenredner Sam Harris hält uns alle für »biochemische Marionetten«: Wenn man die Entscheidung eines Menschen mit Hilfe eines Gehirnschanners schon mehrere Sekunden früher wissen könne als er selbst – wo bleibe dann der bewusste Akteur, der Herr sei über sein eigenes Innenleben?

Aber zeigt die Forschung wirklich, dass unser bewusstes Überlegen und Planen nur ein Nebenprodukt unbewusster Hirnaktivität ist und auf unser späteres Handeln keinerlei

AUF EINEN BLICK

WOLLEN ODER MÜSSEN

1 Die meisten sozialen Institutionen beruhen auf **moralischen und rechtlichen Regeln**, die voraussetzen, dass Menschen einen **freien Willen** besitzen.

2 In den letzten Jahrzehnten haben **raffinierte Experimente** ergeben, dass das Gehirn bereits Aktivität zeigt, bevor uns bewusst wird, dass wir eine Entscheidung gefällt haben. Das scheint die Willensfreiheit in Frage zu stellen.

3 Vermutlich ist unser Wille weniger frei, als wir meinen. Aber das bedeutet nicht, er existiere überhaupt nicht. Wie sozialpsychologische Versuche demonstrieren, haben **bewusste Überlegungen und Intentionen** einen deutlichen Einfluss auf unsere Handlungen.



Einfluss ausübt? Nein, ganz und gar nicht. Der Philosoph Alfred R. Mele von der Florida State University in Tallahassee, ich und andere halten die Folgerung, der freie Willen sei eine Fata Morgana, für einen Fehlschluss.

Stopp! Nicht so schnell!

Diejenigen, die meinen, die Wissenschaft entlarve den freien Willen als Illusion, nenne ich Willusionisten. Es gibt viele Gründe, ihren Argumenten zu misstrauen. Erstens reicht der derzeitige technische Stand der Neurowissenschaft längst nicht für eine Klärung der Frage aus, ob die neurale Aktivität, die unserem Ausdenken und Bewerten zukünftiger Möglichkeiten zu Grunde liegt, irgendwelche Auswirkungen auf die tatsächliche Wahl hat, die wir Minuten, Stunden oder Tage später treffen. Stattdessen verwischt die von den Willusionisten diskutierte Forschung die Grenze zwischen bewussten und unbewussten Handlungen.

Nehmen wir das Libet-Experiment. Eigentlich beginnt es damit, dass die Versuchsteilnehmer sich bewusst darauf vorbereiten, eine Serie von wiederholten und ungeplanten Aktionen auszuführen. Nach dem Start des Experiments bewegen sie die Hand, sobald spontan ein entsprechendes Bedürfnis entsteht. Die am bewussten Planen beteiligte neurale Aktivität beeinflusst wahrscheinlich das spätere unbewusste Auslösen von Bewegungen – und offenbart damit eine Wechselwirkung zwischen bewusster und unbewusster Hirntätigkeit.

Auch Haynes, der seine Probanden in vielen Versuchsreihen immer wieder zufällig zwischen Addieren und Subtrahieren wählen ließ, liefert keine überzeugende Widerlegung der Willensfreiheit. Die schon vier Sekunden vor dem bewussten Willenserlebnis auftretende Hirnaktivität ist wohl eher ein Indiz für eine unbewusste Vorentscheidung in der einen oder anderen Richtung.

Außerdem sagte das frühe Aktivitätsmuster die dann tatsächlich getroffene Wahl nur um zehn Prozent besser voraus als ein Münzwurf. Hirnprozesse können unsere Entscheidung nicht schon vier Sekunden vor der Ausführung ein für alle Mal festlegen, denn wir sind offenbar fähig, auf eine veränderte Situation in viel kürzerer Zeit zu reagieren. Andernfalls wären wir alle längst im Straßenverkehr umgekommen!

Ganz im Gegenteil bereitet uns die unbewusste Nerventätigkeit offenbar auf das Handeln in Entscheidungssituationen vor, indem sie uns veranlasst, unser Verhalten bewusst zu steuern und an überraschende Situationen anzupassen.

Die Willusionisten verweisen auch auf psychologische Forschungen, denen zufolge wir weniger bewusste Kontrolle über unsere Handlungen ausüben, als wir meinen. Richtig ist, dass wir oft durch subtile Details unserer Umgebung, emotionale Neigungen oder kognitive Vorurteile unmerklich beeinflusst werden. Solange wir uns das nicht bewusst machen, können wir nichts dagegen unternehmen. Darum ist unser Wille zwar weniger frei, als es auf den ersten Blick scheint – aber zwischen eingeschränkter Freiheit und völliger Willenslosigkeit besteht ein großer Unterschied.

Bei den Experimenten von Libet und Haynes treffen die Probanden Entscheidungen, ohne zum Zeitpunkt der Handlung eine bewusste Überlegung anzustellen. Häufig wiederholte oder gewohnheitsmäßige Verhaltensweisen sind zwar manchmal recht kompliziert, erfordern aber wenig Nachdenken, da sie durch Lernen automatisiert wurden. Man steckt den Schlüssel ins Schloss. Ein Torhüter wirft sich dem Ball entgegen. Ein Pianist versenkt sich in die Melodie von Beethovens Mondscheinsonate.

Absichtliches Drehen eines Schlüssels, Springen nach einem Ball, Niederdrücken weißer und schwarzer Klaviertasten erfordert einen speziellen Typus mentaler Verarbeitung. Was ich in jener schlaflosen Nacht tat – bewusstes Abwägen von Alternativen – war völlig verschieden vom Ausführen einer eingeübten Routinetätigkeit. Zahlreichen psychologischen Untersuchungen zufolge macht es einen Unterschied, ob wir eine Handlung mit bewusstem, gezieltem Nachdenken ausführen. Demnach erhöhen Intentionen, die wir formulieren, um bestimmte Aufgaben unter speziellen Umständen zu erledigen – Psychologen sprechen von Implementierungsintentionen –, die Wahrscheinlichkeit, dass wir das geplante Verhalten vollenden werden. Wie der Psychologe Peter Gollwitzer von der New York University nachwies, isst ein Diätpatient, der sich bewusst vornimmt, jeden Gedanken an eine verführerische Speise zu ignorieren, davon weniger als jemand, der einfach bloß abnehmen möchte. Allgemein beruht Selbstbeherrschung laut seinem Kollegen Walter Mischel von der Columbia University in New York auf unserer Fähigkeit, uns willentlich von einer Versuchung abzulenken. Und Roy F. Baumeister von der Florida State University demonstrierte, dass bewusstes Überlegen die Ausführung logischer und sprachlicher Aufgaben verbessert; es hilft uns, aus früheren Fehlern zu lernen und impulsives Verhalten zu zügeln.

Wir alle führen tagtäglich Handlungen aus, die wir uns bewusst vorgenommen haben. Es ist zwar prinzipiell möglich, dass die neurale Aktivität, die diese Planung vollzieht, keinerlei Einfluss auf das hat, was wir tun – oder dass sie nur nachträglich Geschichten erfindet, um uns und anderen das Getane zu erklären. Aber evolutionsbiologisch ergäbe das wenig Sinn. Das Gehirn trägt nur 2 Prozent zum Körpergewicht bei, verschlingt aber 20 Prozent der vom Körper aufgewandten

Energie. Sollten neurale Prozesse komplizierte bewusste Gedanken ermöglichen, ohne unser Verhalten im Geringsten zu beeinflussen, würden sie unter starken Selektionsdruck geraten. Die Schaltkreise im Gehirn, die mir eine Vorstellung davon vermitteln, wie ich diesen Artikel am besten schreiben soll, bewirken wahrscheinlich auch, wie er am Ende aussieht.

Freiheit im Gehirn?

Doch nach Meinung der Willusionisten kann die geistige Verarbeitung im Gehirn einfach nicht als freier Wille gelten. Oft heißt es, wer an Willensfreiheit glaube, müsse zu den so genannten Dualisten gehören, das heißt den Geist für eine nicht-physikalische Substanz halten, die separat vom Gehirn existiert. »Die Idee des freien Willens besagt, dass wir Entscheidungen treffen und Gedanken haben, ohne dass dabei etwas im Spiel ist, das auch nur entfernt einem physikalischen Vorgang ähnelt«, schrieb der Neurowissenschaftler Read Montague 2008. Und Coyne behauptet, dass ein wirklich freier Wille von uns verlangen würde, aus der Struktur unseres Gehirns auszusteigen und seine Arbeitsweise abzuändern.

Tatsächlich stellen sich manche Leute Willensfreiheit so vor – aber ohne guten Grund. Die meisten philosophischen Theorien entwickeln eine Idee vom freien Willen, die sich durchaus mit einer naturwissenschaftlichen Auffassung der menschlichen Natur vereinbaren lässt. Erhebungen zufolge akzeptieren die meisten Menschen im Gegensatz zu den Behauptungen der Willusionisten, dass wir auch dann einen freien Willen besitzen können, wenn unsere geistige Tätigkeit samt und sonders auf Hirnprozessen beruht. Doch wenn Willensfreiheit und Dualismus nicht notwendig zusammengehören, darf man nicht predigen, der freie Wille sei eine Illusion, weil aus wissenschaftlicher Sicht der Dualismus nicht zutrifft.

Um Einstellungen zur Willensfreiheit zu testen, kann man beispielsweise folgende Möglichkeit ausmalen: Angenommen, Hirnforscher hätten ein bildgebendes Verfahren entwickelt, das die perfekte Vorhersage einer Handlung anhand der früheren Hirntätigkeit erlaubt. Tatsächlich meint Harris, dieses Szenario »würde das Gefühl der Willensfreiheit als das entlarven, was es ist: eine Illusion«.

Gerät der Glaube an die Willensfreiheit ins Wanken, wenn man weiß, dass die teils unbewusste Datenverarbeitung im Gehirn das Verhalten vorherbestimmt? Um diese Frage experimentell zu klären, haben Jason Shepard von der Emory University in Druid Hills (Georgia), Shane Reuter von der Washington University in St. Louis und ich kürzlich Versuchspersonen mit detaillierten Beschreibungen von futuristischen Szenarien im Sinn von Harris konfrontiert.

An der Studie nahmen Hunderte von Studenten der Georgia State University in Atlanta teil. Sie lasen eine Geschichte über eine Frau namens Jill, die in ferner Zukunft einen Monat lang eine bildgebende Sensorkappe trägt. Mit den vom Hirnscanner gelieferten Daten sagen Neurologen sämtliche Gedanken und Taten von Jill voraus – selbst wenn Jill versucht, das System zu täuschen. Das Szenario schloss mit der Folgerung: »Diese Experimente bestätigen, dass die gesamte

menschliche Geistestätigkeit nichts ist als Hirnaktivität; deswegen lässt sich alles, was Menschen denken oder tun, aus ihrer früheren Hirntätigkeit vorhersagen.«

Zu mehr als 80 Prozent hielten die Teilnehmer eine derartige Zukunftstechnik für möglich, aber zugleich bejahten 87 Prozent die Frage nach Jills Willensfreiheit. Sie wurden auch gefragt, ob die Existenz einer solchen Technik den freien Willen in Frage stelle. Das verneinten rund 75 Prozent. Eine deutliche Mehrheit meinte: Solange die Technik nicht die Möglichkeit schafft, das Gehirn von außen zu manipulieren und zu steuern, werden die Menschen freien Willen besitzen und moralisch verantwortlich für ihr Verhalten sein.

Wie die meisten Versuchsteilnehmer offenbar meinten, registriert der hypothetische Scanner einfach die Hirnaktivität, die Jills Nachdenken über die fällige Entscheidung entspricht. Anscheinend fanden sie nicht, dass Jills Gehirn ihr etwas aufzwingt – und sie keinen freien Willen hat –, sondern dass der Hirnscanner einfach nachweist, wie der freie Wille im Gehirn arbeitet.

Warum glauben die Willusionisten das Gegenteil? Das könnte mit dem derzeitigen Forschungsstand zu tun haben. Vorläufig kann die Neurowissenschaft das Bewusstsein noch nicht erklären – das heißt eine Theorie entwickeln, die unseren Geist weder auf elementare Hirnvorgänge reduziert noch ganz von ihnen trennt. Vorderhand ist es verführerisch, wie die Willusionisten zu denken: Wenn das Gehirn für alles zuständig ist, gibt es für den bewussten Geist nichts zu tun.

Mit den künftigen Fortschritten der Neurowissenschaft wird sich präziser klären lassen, inwieweit wir bewusste Kontrolle ausüben und in welchem Maß unbewusste Prozesse unsere Aktionen beherrschen. Die Antwort auf diese Frage ist wichtig. Unser Rechtssystem und die moralische Grundlage vieler Institutionen hängen davon ab, wann Menschen für ihre Taten verantwortlich sind – und wann nicht. ☺

DER AUTOR



Eddy Nahmias ist Professor für Philosophie am Neuroscience Institute der Georgia State University in Atlanta.

QUELLEN

- Baumeister, R. F., Masicampo, E. J.:** Conscious Thought Is for Facilitating Social and Cultural Interactions: How Mental Simulations Serve the Animal-Culture Interface. In: *Psychological Review* 117, S. 945–971, 2010
- Nahmias, E. et al.:** It's OK if »My Brain Made Me Do It«: People's Intuitions about Free Will and Neuroscientific Prediction. In: *Cognition* 133, S. 502–516, 2014
- Soon, C. S. et al.:** Predicting Free Choices for Abstract Intentions. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, S. 6217–6222, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351065

GEOMETRIE

Die Mathematik des Origami

Erst seit kurzer Zeit wird die jahrhundertealte Kunst des Papierfaltens mathematisch untersucht. Dabei zeigen sich enge Verbindungen zur Algebra, zur Zahlentheorie und zur Theorie der Berechnung.

VON JEAN-PAUL DELAHAYE



Papiervögel, Netze und Sätze zum Origami

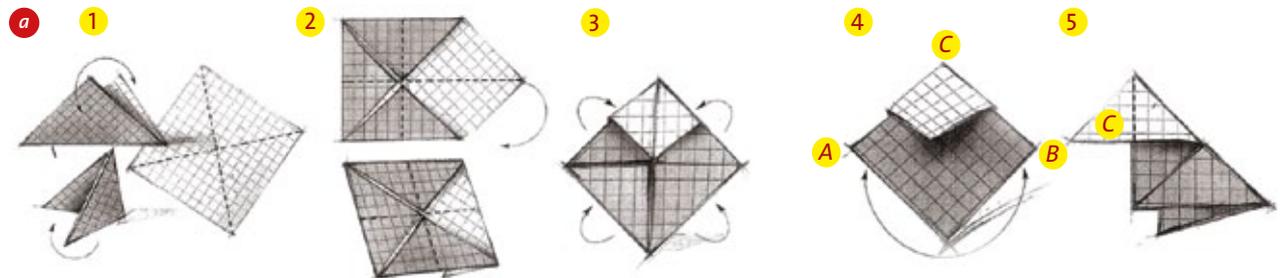
Für die Theorie ist es zweckmäßig, ein Origami-Objekt wie den in Frankreich beliebten Papiervogel zu falten (a), wieder zu entfalten (b) und die Knicke in dem quadratischen Blatt Papier zu studieren. Von ihnen gibt es drei Arten:

- Bergfalze (rot). Sie stehen im fertigen Objekt hervor wie Berg Rücken.
- Talfalze (blau). Sie werden zu Tälern, sind also vom Betrachter weiter entfernt als die angrenzenden Flächen.
- Einige weitere Faltnetze (grau) werden bei der Konstruktion benötigt, verschwinden aber in der endgültigen Form: Die beiden angrenzenden Teilflächen liegen in einer Ebene. Für das Folgende bleiben diese Linien außer Betracht.

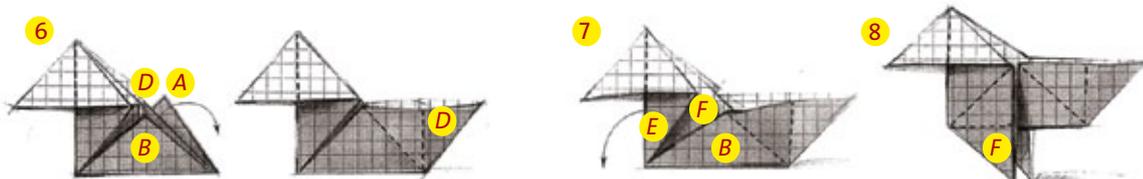
Wir fassen das Netz aus Berg- und Talfalzen als Graph auf; seine Kanten sind die Falzlinien und seine Knoten deren Treff-

punkte. Der Graph zerlegt das ganze Quadrat in Teilflächen, deren jede von Falzlinien (oder vom Rand des Quadrats) begrenzt ist. Ein Origami-Netz hat folgende Eigenschaften:

1. Die genannten Teilflächen lassen sich mit zwei Farben so einfärben, dass benachbarte Flächen niemals dieselbe Farbe bekommen (c, gelb und grün).
2. In jedem Knoten des Graphen, der im Inneren des Blatts liegt, treffen sich entweder zwei rote Kanten mehr als blaue oder zwei blaue Kanten mehr als rote (Satz von Maekawa). In den vier inneren Knoten unseres Beispiels (b) treffen sich vier rote Kanten und zwei blaue (links oben) oder drei blaue und eine rote (alle anderen). Insbesondere ist die Anzahl der Kanten, die in einem inneren Knoten zusammentreffen, stets gerade. Hieraus folgt übrigens die Eigenschaft 1.



Falten Sie die Ecken eines quadratischen Blatts auf dessen Mittelpunkt (1) und klappen Sie eine dieser Ecken auf die Rückseite (2). Falten Sie die Ecken des neu entstandenen Quadrats wieder auf den Mittelpunkt (3). Nun drehen Sie das gefaltete Blatt um (4),



ziehen die Spitze C hoch und falten A auf B (5). Holen Sie den Schwanz zwischen dem Punkt D und dessen Spiegelbild heraus (6) und klappen Sie ihn nach außen (7). Holen Sie die Füße F zwischen B und E hervor (7) und falten Sie sie nach unten aus (8).

POURIA SCIENCE

Origami ist die Kunst, aus einem Stück Papier ein Objekt zu falten: ein geometrisches wie ein Polyeder oder ein figürliches wie ein Tier, eine Blume oder eine Person. Beim traditionellen Origami arbeitet man mit einem quadratischen Blatt Papier; es ist nur geradliniges Falten erlaubt, und Schere und Klebstoff sind verboten. In neueren Varianten sind diese strengen Regeln etwas aufgelockert. Beim »modularen Origami« darf man sein Werk aus mehreren Blättern konstruieren. Oder Schneiden und Kleben sind erlaubt.

Erik Demaine vom Massachusetts Institute of Technology gelang es, einen alten Zaubertrick des berühmten Harry Houdini (1874–1926) zu verallgemeinern: Zu jeder vorgegebenen, von geraden Linien begrenzten Figur findet sein Verfahren eine Faltung mit der Eigenschaft, dass ein einziger geradliniger Scherenschnitt durch das gefaltete Papier die geforderte Figur produziert (Spektrum der Wissenschaft 4/2011, S. 92).

Manche Origami-Künstler befeuchten das Papier, bevor sie ans Werk gehen

(wetfolding), wodurch das Endprodukt besser die Form hält. Andere genehmigen sich Knicklinien, insbesondere krumme, die man nicht durch das übliche Falten erzeugen kann.

Das klassische Origami entstand in Japan im 17. Jahrhundert und verbreitete sich im 19. Jahrhundert über die ganze Welt. Die Frühgeschichte dieses köstlichen Zeitvertreibs ist schwer zu rekonstruieren, da seine Produkte in der Regel die Jahrhunderte nicht überdauern; jedoch gab es mit Sicherheit schon vor dem Siegeszug der japani-

3. Für die Winkel $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{2n}$ zwischen den Kanten, die in einem inneren Knoten zusammentreffen (und deren Anzahl gerade ist), gilt der Satz von Kawasaki: $\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \dots - \alpha_{2n} = 0$. Da außerdem stets $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_{2n} = 360^\circ$ gilt, ist die Summe der Winkel mit gerader Nummer gleich der Summe der Winkel mit ungerader Nummer. Also müssen beide Summen gleich 180° sein.

Im Fall des Papiervogels lässt sich das für den Winkel um den Knoten, in dem vier rote Kanten und zwei blaue zusammentreffen, nachrechnen (b):

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ, \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 45^\circ$$

Folglich ist

$$\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_4 + \alpha_5 - \alpha_6 = 0^\circ,$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 = 360^\circ$$

und damit $\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_5 = \alpha_2 + \alpha_4 + \alpha_6 = 180^\circ$.

Die genannten Bedingungen sind notwendig: Ein Netz, das sie nicht erfüllt, ist nicht zu einem flachen Endprodukt faltbar. Sie sind allerdings nicht hinreichend: Nicht jedes Netz, das den Bedingungen genügt, lässt sich entlang seiner Kanten (und keiner anderen) flachfalten. Vielmehr kommt man zuweilen beim Versuch des Faltens in die Verlegenheit, dass sich zwei Flächen gegenseitig durchdringen müssten; Bild (d) zeigt ein Beispiel. Probieren Sie es aus!

Die Kawasaki-Bedingung $\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \dots - \alpha_{2n} = 0$ für die Winkel um einen Knoten des Graphen ist notwendig und hinreichend dafür, dass das Blatt lokal flachfaltbar ist, das heißt, man kann die an diesen Knoten grenzenden Teilflächen flach aufeinanderlegen.

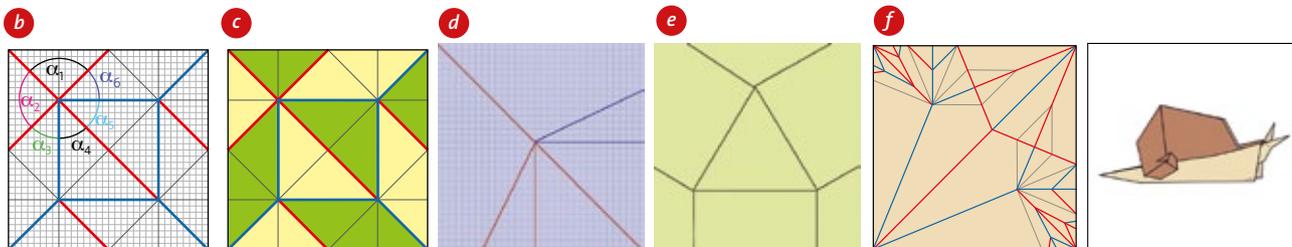
Anders gesagt: Ist diese Bedingung erfüllt, so gibt es eine Möglichkeit, für jede zu diesem Knoten gehörige Faltlinie zu entscheiden, ob sie ein Berg- oder ein Talfalz ist; mit dieser Wahl ist dann das Blatt an diesem Knoten lokal flachfaltbar.

Folgt aus der lokalen Flachfaltbarkeit in jedem Knoten die globale? Wenn also ein Netz gegeben ist, das in jedem seiner Knoten die Kawasaki-Bedingung erfüllt, kann man dann alle Faltlinien so zu Berg- oder Talfalzen erklären, dass das komplette Netz flachfaltbar ist? Die Antwort lautet Nein. Das in (e) abgebildete Gegenbeispiel hat Thomas Hull 1994 ausgearbeitet.

Wenn es eine Zuweisung von Berg- und Talfalzen gibt, die das ganze Netz flachfaltbar macht, dann ist sie nicht schwer zu finden. Marshall Bern und Barry Hayes haben einen Algorithmus beschrieben, der eine derartige Zuweisung angibt oder deren Nichtexistenz beweist, und das mit einer Rechenzeit, die proportional der Anzahl der Kanten ist.

Dagegen ist die Frage, ob die Faltung eines bedingungsgemäßen Netzes am Problem der Selbstdurchdringung scheitert, algorithmisch schwer (»NP-vollständig«): Es kann keinen Algorithmus geben, der sie in einer Zeit entscheidet, die durch eine Potenz der Kantenanzahl abschätzbar ist.

Das Netz für die Schnecke (f) stammt von dem großen Origamisten Robert Lang. An jedem inneren Knoten sind die Bedingungen 1, 2 und 3 erfüllt. Ein erfahrener Origamist kann aus dem Netz und einem Bild des fertigen Objekts mit etwas Glück erschließen, wie und in welcher Reihenfolge die Faltungen auszuführen sind.



schen Kunst Papierfaltspiele in China, Italien, Deutschland und Spanien.

Die mathematische Erforschung des Origami begann 1907 und hat in den letzten 30 Jahren beachtliche Fortschritte erzielt. Ein Pionier der neueren Origami-Forschung ist Robert Lang, der sich nach einer Karriere als Physiker inzwischen ganz der Papierfaltkunst widmet (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 10/2007, S. 93). Den eher theoretisch ausgerichteten Forschern gelang es zu klären, welche Zahlen »durch Origami konstruierbar« sind. Dabei betrachtet man Origami als geometrische Konstruktionsmethode analog dem klassischen Verfahren der antiken Griechen zur Erzeugung geometrischer Objekte, bei dem gleichfalls nur sehr wenige Mittel – Zirkel und Lineal – zugelassen sind. Seit 1989 kommt die Gemeinde der Wissenschaftler, die sich mit Origami und seiner Verwendung in der Lehre befassen, auf internationalen Kongressen zusammen. Das sechste Treffen dieser Serie fand im August 2014 in Tokio statt.

Die neue Disziplin, deren Anfangsgründe ich im Folgenden vorstellen möchte, ist in rapidem Wachstum begriffen. Mittlerweile findet sie Anwendungen in der Biologie – wo die Proteinfaltung ein zentrales Problem ist – und in der Technik; dabei geht es um Strukturen wie Airbags oder Sonnensegel für Raumflugkörper, die sich, Platz sparend zusammengefoldet, glatt und störungsfrei wieder entfalten sollen. Dafür ist ein genaues Verständnis der Gelenk- und Faltmechanismen erforderlich.

Das Netz der Falten

Bei dem besonders asketischen »reinen« Origami sind nicht nur Schere, Klebstoff und krumme Faltnlinien verboten; man verlangt auch, dass das Endprodukt flachgedrückt werden kann. In Frankreich ist das bekannteste unter diesen reinen Faltoobjekten die »cocotte en papier«, in der man mit etwas Fantasie einen gallischen Hahn erkennen kann (Bild S. 64 oben). Die japanische Standard-Origami-Übung für den Anfänger ergibt ebenfalls einen Vogel, und zwar einen Kranich. Er ist

eleganter, aber auch schwieriger zu falten.

Falten wir nun den französischen Papiervogel (Einzelheiten im Kasten S. 64/65); das Video <https://www.youtube.com/watch?v=77OX1FJLlo> zeigt einen anderen Weg zum selben Ergebnis). Dann falten wir das Blatt wieder auseinander und betrachten die Knicke, die unsere Aktivität hinterlassen hat; dabei geht es nur um solche, die für die Endform wirklich erforderlich sind. Wir markieren diese rot für Bergfalze (hervorstehende Knicklinien), blau für Talfalze (zurückspringende Knicklinien) und erhalten das, was man das »Netz der Faltnlinien« (crease pattern) nennt.

Zu jedem Origami-Objekt gibt es also ein Netz, aber keineswegs umgekehrt! Vielmehr erfüllen echte Origami-Netze gewisse Bedingungen (Kasten S. 64/65). So müssen an jedem Treffpunkt von Faltnlinien im Inneren des Blatts entweder zwei Bergfalze mehr als Talfalze zusammenkommen oder umgekehrt. Dieser Satz wurde 1989 von dem Franzosen Jacques Justin gefunden und danach von dem Japaner Jun Maekawa wiederentdeckt. Aber der Sprachgebrauch ist ungerecht: Heute heißt diese bemerkenswerte Eigenschaft überall auf der Erde nicht »Satz von Justin«, sondern »Satz von Maekawa«.

Für seine jeweils nächste Faltnlinie orientiert sich der Origamist stets an bereits vorhandenen Punkten oder Linien, bringt also zum Beispiel zwei Punkte durch Falten miteinander zur Deckung. Damit führt er auf dem Blatt das Äquivalent einer geometrischen Konstruktion aus; sie wird erkennbar, wenn man das Blatt wieder entfaltet. Wie üblich stellt man sich vor, dass entgegen der Realität alle Konstruktionen mit vollkommener Präzision ausgeführt werden: Die Faltnlinien sind unendlich dünn und perfekt geradlinig, Punkte haben keine Ausdehnung ... So verstanden entspricht Origami den Konstruktionen der Griechen mit Zirkel und Lineal.

Bekanntlich gibt es gewisse Dinge, die man unter Beachtung des griechischen Reinheitsgebots nicht konstruieren kann. Das prominenteste ist das Quadrat, das einem gegebenen Kreis flä-

chengleich ist, die sprichwörtliche »Quadratur des Zirkels«. Vor diesem Hintergrund liegt die Frage nahe, ob Origami als Konstruktionstechnik mächtiger ist als die Verfahren der Griechen: Kann man durch Falten mehr geometrische Konstruktionen erzeugen als mit Zirkel und Lineal, oder weniger, oder genau dieselben? Bemerkenswerterweise lässt sich die Frage sehr genau beantworten.

Sieben elementare Faltungen

Dazu gilt es zunächst die elementaren Operationen des Origami zu benennen. Es stellt sich heraus, dass es sieben Typen von Faltungen gibt, mit deren Hilfe man aus bereits vorhandenen Punkten und Geraden neue konstruieren kann. Entsprechend basiert die Geometrie des Origami auf sieben Axiomen, die nach ihren Schöpfern Jacques Justin, Humaki Huzita und Koshiro Hatori benannt sind (siehe »Origami-Geometrie«, rechts).

Eine eingeschränkte Variante, die nur die ersten vier unter den sieben Konstruktionen erlaubt, heißt pythagoreisches Origami. Dieses ist genauso mächtig wie die Konstruktion mit Lineal und Stechzirkel; mit Letzterem kann man Streckenlängen übertragen, aber keine Kreise zeichnen. Entsprechend heißen die Zahlen, die man – als Koordinaten konstruierbarer Punkte – mit diesen eingeschränkten Möglichkeiten erreichen kann, pythagoreische Zahlen.

Algebraisch ist die Menge der pythagoreischen Zahlen wie folgt definiert. Die natürlichen Zahlen gehören dazu; und wenn zwei Zahlen a und b zur Menge gehören, dann gilt das auch für $a + b$, $a - b$, $a \cdot b$, a/b sowie für $\sqrt{a^2 + b^2}$. Zum Beispiel ist $\sqrt{2}$ eine pythagoreische Zahl, denn $2 = 1^2 + 1^2$. Gleiches gilt für kompliziertere Ausdrücke wie

$$\frac{\sqrt{9 + (1 + \sqrt{2})^2}}{11/\sqrt{2}}$$

Dagegen sind Zahlen wie π und die Kubikwurzel aus 2 keine pythagoreischen Zahlen.

Es stellt sich heraus, dass die ersten fünf Origami-Axiome zusammen genauso mächtig sind wie die klassischen

Konstruktionen mit (gewöhnlichem) Zirkel und Lineal. Die so erhaltenen Zahlen heißen euklidisch. Es sind alle Zahlen, die man ausgehend von den natürlichen Zahlen durch Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division und Quadratwurzelziehen (ohne Einschränkung an die Zahl, aus der man die Wurzel zieht) bekommen kann. Beispielsweise ist die Zahl

$$\frac{\sqrt{\sqrt{2}(4 + \sqrt{11})}}{\sqrt{\sqrt{2} + 2\sqrt{21}}}$$

euklidisch. Man weiß, dass die Zahl π nicht euklidisch ist: Die Quadratur des Kreises ist mit Zirkel und Lineal ebenso unmöglich wie mit den ersten fünf elementaren Faltungen. Auch die Kubikwurzel aus 2 ist keine euklidische Zahl: Das antike Problem der Würfelverdopplung – zu einem gegebenen Würfel konstruiere einen Würfel doppelten Volumens – lässt sich mit diesen Mitteln nicht lösen.

Nimmt man zum System der Origami-Geometrie die Axiome 6 und 7 beziehungsweise die entsprechenden Faltungen hinzu, so gelangt man über den klassisch-euklidischen Bereich hinaus. Die Menge der »durch Origami konstruierbaren Zahlen« (mit allen sieben Typen von Faltungen) ist größer als die Menge der euklidischen Zahlen. Genauer: Zu den euklidischen Zahlen kommen alle Zahlen hinzu, die sich durch Ziehen von Kubikwurzeln erzeugen lassen. Ein Beispiel für eine Origami-Zahl, die nicht zu den euklidischen Zahlen gehört, ist

$$\frac{\sqrt{\sqrt{2} + 2\sqrt[3]{2}}}{\sqrt[3]{\sqrt{2}(4 + \sqrt{2})}}$$

Mit dem vollständigen Origami-Axiomensystem ist sowohl die Verdopplung des Würfels als auch die Dreiteilung des Winkels möglich.

Bei näherer Betrachtung stellt sich heraus, dass das siebte Axiom entbehrlich ist: Alles, was man mit seiner Hilfe konstruieren kann, geht auch schon mit den ersten sechs Axiomen.

Die Origami-Zahlen umfassen alle Lösungen von Gleichungen ersten,

Origami-Geometrie: Die Axiome von Justin, Huzita und Hatori

Die klassische Geometrie des Euklid beginnt mit der Aufzählung der elementaren Konstruktionen, die mit Zirkel und Lineal möglich sind: Zu zwei beliebigen Punkten gibt es genau eine Gerade; zwei beliebige nicht parallele Geraden schneiden sich in genau einem Punkt; zu einer Geraden und einem Punkt, der nicht auf ihr liegt, gibt es genau eine Senkrechte durch diesen Punkt auf die Gerade ... Und wenn ein Axiom besagt »es gibt X «, dann ist stets auch gemeint » X ist konstruierbar«.

Entsprechend haben Jacques Justin, Humaki Huzita und Koshiro Hatori sieben Axiome aufgestellt, die beschreiben, welche Konstruktionen durch Papierfalten möglich sind.

Axiom 1: Zu zwei Punkten A und B gibt es genau eine Falllinie durch diese Punkte.

Axiom 2: Zu zwei Punkten A und B gibt es genau eine Faltung, die A und B zur Deckung bringt.

Axiom 3: Zu zwei Geraden g und h gibt es genau eine Faltung, die g und h zur Deckung bringt.

Axiom 4: Zu einem Punkt A und einer Geraden g gibt es genau eine Falllinie, die senkrecht zu g ist und durch A geht.

Axiom 5: Zu zwei Punkten A und B und einer Geraden g gibt es genau eine Faltung, deren Falllinie durch B geht und durch die A auf g zu liegen kommt.

Axiom 6: Zu zwei Punkten A und B sowie zwei Geraden g und h gibt es genau eine Faltung, die A auf g und B auf h bringt.

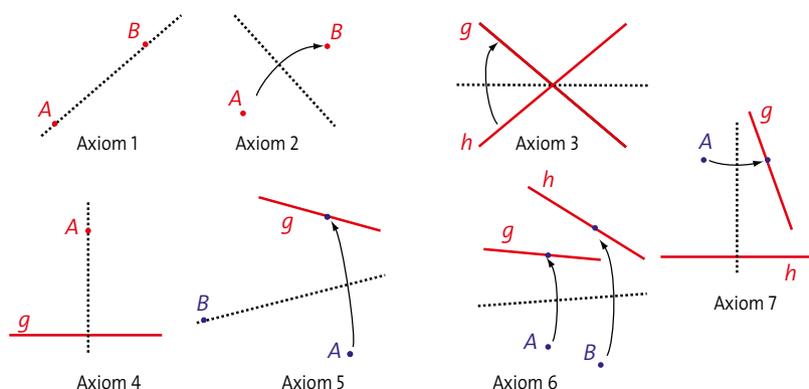
Axiom 7: Zu einem Punkt A und zwei Geraden g und h gibt es eine Faltung, die A auf g bringt und deren Falllinie senkrecht zu h verläuft.

Diese Axiome sehen nicht die Möglichkeit vor, mehr als eine Faltung zugleich auszuführen. Wenn man das erlaubt, vergrößert sich das Sortiment der möglichen Konstruktionen.

Angenommen, wir hätten zu Beginn nichts weiter gegeben als zwei Punkte, die eine Längeneinheit voneinander entfernt sind. Durch Falten, das heißt Anwenden der Axiome 1 bis 7, können wir daraus eine Vielzahl weiterer Punkte konstruieren. Deren Koordinaten bilden die Menge der durch Origami konstruierbaren Zahlen, die wir mit OR bezeichnen. Ganz analog dazu gibt es die Menge der aus zwei gegebenen Punkten mit Zirkel und Lineal konstruierbaren Zahlen; nennen wir sie ZL .

Die Kreiszahl π liegt nicht in ZL , wie Ferdinand Lindemann 1882 gezeigt hat. Darüber hinaus kann man beweisen, dass die Kubikwurzel aus 2 nicht zu ZL gehört und dass es unmöglich ist, einen beliebigen Winkel mit Zirkel und Lineal dreizuteilen.

Die Menge OR ist größer als ZL . Die Zahl π liegt nicht in OR : Auch mit Origami ist die Quadratur des Kreises nicht möglich. Aber die Kubikwurzel aus 2 ist ein Element von OR . Folglich ist das antike, mit Zirkel und Lineal unlösbare Problem der Würfelverdopplung mit Origami lösbar. Das gilt auch für die Dreiteilung des Winkels (siehe »Satz von Haga«, S. 68).



zweiten, dritten oder vierten Grades (mit ganzzahligen Koeffizienten). Es wurden praktisch durchführbare Verfahren beschrieben, mit denen sich durch Falten eine beliebige Gleichung dritten Grades lösen lässt. Die mit Origami erreichbaren Konstruktionen entsprechen jenen, die ein klassischer Geometer ausführen könnte, wenn er außer Zirkel und Lineal die Möglichkeit zur Verfügung hätte, zu zwei gegebenen Kegelschnitten (Ellipsen, Hyper-

beln, Parabeln) eine gemeinsame Tangente zu konstruieren.

Aber selbst mit den sieben Origami-Axiomen gelingt die Quadratur des Kreises nicht. Zudem bleiben viele algebraische Zahlen (das sind Lösungen von Polynomgleichungen mit ganzzahligen Koeffizienten) wie beispielsweise die fünfte Wurzel aus 2 unerreichbar.

Allerdings kann man die Konstruktionsmöglichkeiten durch Origami noch vergrößern, wenn man zulässt,

dass mehrere Faltungen zugleich ausgeführt werden. Bis heute kann man noch nicht genau abgrenzen, wohin diese Erweiterung führt.

Robert Lang hat immerhin gezeigt, dass die Teilung eines gegebenen Winkels in fünf gleiche Teile im Origami mit sieben Axiomen nicht möglich ist, wohl aber, wenn man eine doppelte Faltung zulässt. Die dadurch eröffneten Möglichkeiten zu untersuchen, erweist sich als schwierig und ohne Computer

Satz von Haga, Würfelverdupplung und Winkeldreiteilung

Der Satz von Kazuo Haga liefert ein Verfahren, um mit geringem Aufwand alle rationalen Zahlen (Quotienten ganzer Zahlen) durch Faltungen zu konstruieren.

Man geht von einem quadratischen Blatt mit Kantenlänge 1 aus (Bild links). Auf seiner Oberseite liegt ein Punkt P , der aus vorangegangenen Faltungen hervorgegangen ist. Man falte den unteren linken Eckpunkt D auf P . Es sei $x=AP$. Man nutze, dass ARP und PQB ähnliche Dreiecke sind und dass $RP=RD$ ist. Daraus ergibt sich $y=BQ=2x/(1+x)$. Nimmt man $x=1/2$, so erhält man $y=2/3$. Daraus lässt sich durch Halbieren $1/3$ gewinnen. Mit dieser Vorgehensweise kann man nach und nach alle gewünschten Brüche bekommen. Die nebenstehende Tabelle gibt Beispiele.

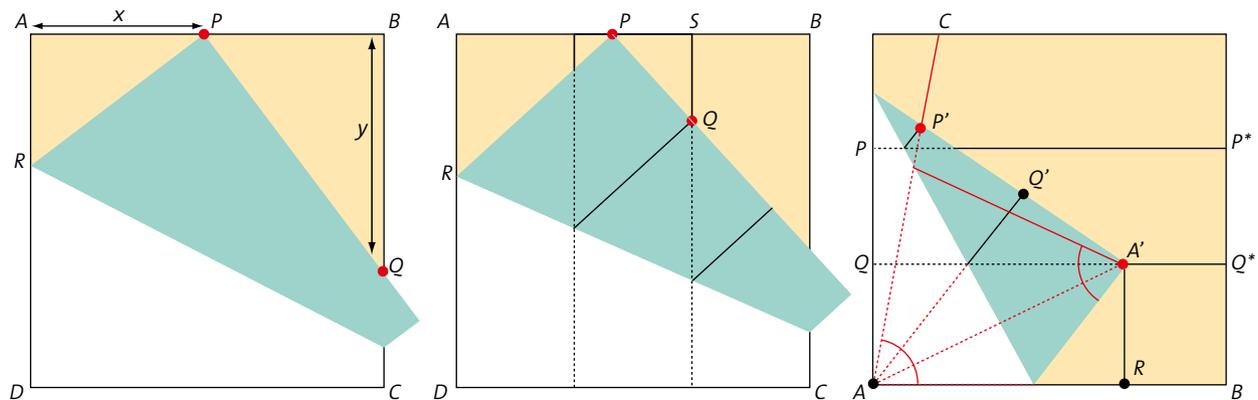
Ein von Peter Messer angegebenes Verfahren erlaubt es, die Kubikwurzel aus 2, die mit Zirkel und Lineal nicht konstruiert werden kann, zu erhalten.

Vorab faltet man das quadratische Papier in drei gleich breite vertikale Streifen und entfaltet es wieder. Dann lässt man den Punkt P (der dem linken unteren Eckpunkt D des quadratischen Blatts entspricht) entlang der oberen Kante des Blatts wandern (Bild Mitte), und zwar von der linken Ecke nach rechts, bis der Punkt Q (dieser ist der Endpunkt der Vertikalen im Abstand $1/3$ zum linken Rand des Blatts) auf die vertikale Linie im

Abstand $2/3$ vom linken Rand des Blatts fällt. Hat man dies erreicht, so hat man die richtige Position für P gefunden, und PB/PA ist gleich der Kubikwurzel aus 2.

Hisashi Abe hat die folgende Dreiteilung des Winkels CAB mit Origami angegeben (Bild rechts). Man nimmt zwei horizontale Faltungen PP^* und QQ^* vor, wobei QQ^* die Mittelparallele zwischen PP^* und der unteren Seite des quadratischen Blatts sein soll. Dann faltet man das Blatt so, dass P auf die Strecke AC und zugleich A auf QQ^* zu liegen kommen. Dann ist der Winkel $A'AB$ gleich dem dritten Teil des Winkels CAB , denn die drei Winkel PAQ , QAA' und $A'AB$ sind gleich groß.

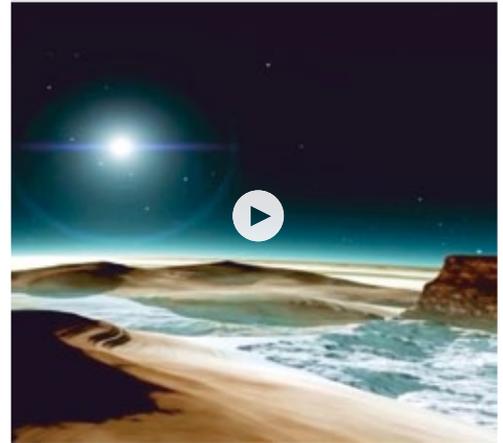
AP	BQ	QC	AR	PQ
x	$\frac{2x}{1+x}$	$\frac{1-x}{1+x}$	$\frac{1-x^2}{2}$	$\frac{1+x^2}{1+x}$
$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{5}{6}$
$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{4}{9}$	$\frac{5}{6}$
$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{5}{18}$	$\frac{13}{15}$
$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{12}{25}$	$\frac{13}{15}$



POUR LA SCIENCE

VIDEOS

AUS DER WISSENSCHAFT –
SPANNEND UND INFORMATIV



AstroViews 14: New Horizons erreicht Pluto

Der Zwergplanet erhält erstmals Besuch von der Erde. Astronom Klaus Jäger berichtet über die ersten Bilder von Pluto und Charon kurz vor der Annäherung der Raumsonde.



AstroViews 13: Der lange Weg zu den Galaxien (Teil 2)

Woher wissen wir, wie weit weg eine Galaxie ist? Sind kosmologische Entfernungsangaben überhaupt eindeutig oder spielt uns die Dunkle Energie einen Streich? Teil 2 von »Entfernungsbestimmungen im All«



Diese und noch viel
mehr Videos finden
Sie unter:

sterne-und-weltraum.de/videos

praktisch nicht durchführbar. Für die doppelte Faltung muss man bereits 489 Axiome aufstellen, wie Lang gemeinsam mit Roger Alperin mit Rechnerunterstützung herausfand. Darüber hinaus bewiesen die beiden, dass man eine beliebige Gleichung n -ten Grades mit ganzzahligen Koeffizienten mit $(n-2)$ -fachen Faltungen lösen kann. Mit mehrfachen Faltungen werden also insbesondere alle algebraischen Zahlen erreichbar – ein Ergebnis, das die Forscher überrascht hat.

Effekte der Papierdicke

Kehren wir zum Schluss aus den Höhen der exakten geometrischen Konstruktionen in die Niederungen der Realität zurück. Wie oft kann man ein Stück Papier durch Aufeinanderlegen seiner zwei Hälften zusammenfalten? Für diese Frage interessieren sich die Hersteller – und Benutzer – von Landkarten ebenso wie die Drucker, die aus einem großen Blatt 16 oder 32 Seiten einer Zeitschrift zusammenfalten.

Es gibt zwei Versionen des Problems: Entweder sind nur Faltungen in einer Richtung zulässig – sinnvoll für Blätter, die in einer Richtung wesentlich länger sind als in der anderen. Oder das Blatt darf in zwei zueinander senkrechten Richtungen gefaltet werden.

Ein Gerücht, dessen Ursprung sich im Dunkeln verliert, besagt, dass höchstens acht derartige Faltungen möglich seien – was immerhin ein Heft aus $2^8 = 256$ Blättern ergäbe. Die Amerikanerin Britney Gallivan machte sich noch als Schülerin daran, dies zu widerlegen. Das gelang ihr mit einer 1200 Meter langen Rolle Toilettenpapier, die sie zwölfmal zusammenfalten konnte – mit sämtlichen Falten senkrecht zur Längsrichtung.

Darüber hinaus entwickelte sie eine Theorie für derartige Faltungen. Entgegen der ersten plausiblen Annahme benötigt man nicht etwa einen doppelt so langen Streifen, um die Anzahl der Faltungen um eins hochzutreiben, sondern ungefähr einen der vierfachen Länge; denn ein beachtlicher Teil des Materials wird dafür verbraucht, die übereinanderliegenden »Einzelblätter«

durch die Verallgemeinerung eines Buchrückens miteinander zu verbinden. Für die Länge L dieses »Verlustmaterials« hat Gallivan die Formel

$$L = d\pi(2^n + 4)(2^n - 1)/6$$

entwickelt. Dabei bedeutet d die Dicke des Papiers und n die Anzahl der ausgeführten Faltungen. Man erkennt, dass sich L in etwa vervierfacht, wenn man n um eine Einheit vergrößert.

Gegenwärtig untersuchen die Forscher noch viele andere Aspekte des Faltens. Dabei stellt sich heraus, dass sich hinter scheinbar einfachen geometrischen Problemen anspruchsvolle Mathematik versteckt – in erster Linie Geometrie, aber auch Algebra, Zahlentheorie sowie Algorithmen- und Komplexitätstheorie.

Offensichtlich ist das Thema noch längst nicht erschöpfend behandelt. Vielmehr nimmt es einen erstaunlichen Umfang an: Der Tagungsband des 2011 von der Universität Singapur organisierten Origami-Kongresses vereinigt ungefähr 50 Beiträge auf 654 Seiten! 

DER AUTOR



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor am Institut für Grundlagen der Informatik der Université de Lille.

QUELLEN

Alperin, R.: A Mathematical Theory of Origami Constructions and Numbers. In: New York Journal of Mathematics 6, S. 119–133, 2000

Alperin, R., Lang, R.: One-, Two- and Multi-fold Origami Axioms. In: Origami 4, S. 371–393, 2006

Demaine, E., O'Rourke, J.: Geometric Folding Algorithms. Cambridge University Press, Cambridge 2007

Lang, R.: Origami Design Secrets. Mathematical Methods for an Ancient Art. CRC Press, Boca Raton 2012

O'Rourke, J.: How to Fold it. The Mathematics of Linkage, Origami, and Polyhedra. Cambridge University Press, 2011

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1356011

Der lange Weg des Plastikmülls im Meer

Plastik, wohin man sieht: Manche Orte im Ozean gleichen einer Müllhalde. Dabei schwimmt hier nur ein Teil der Abfälle. Denn der große Rest landet anderswo.

Von Daniel Lingenhöhl

Noch ist die Tiefsee für uns Menschen weitgehend unbekanntes Terrain: schlechter kartiert als der Mars und weniger erforscht als der Mond. Und doch lagern dort unten bereits massenhaft Abfallprodukte unserer Zivilisation: Plastikflaschen und -tüten, Jogurtbecher, Fischernetze, Turnschuhe und Golfbälle. »Es war eine schockierende Erkenntnis, dass unser Müll schon da herumliegt, noch bevor die Tiefsee überhaupt richtig erforscht ist. Während unserer Arbeit entdeckten wir überall Abfall – vom Strand bis zu den entlegensten und tiefsten Orten der Ozeane«, beschreibt Christopher Pham von der Universität der Azoren in Ponta Delgada das typische Bild, das die Weltmeere mittlerweile abgeben.

Die Ozeane sind zu Müllhalden verkommen, in denen Hunderttausende oder gar Millionen Tonnen Kunststoffreste schwimmen – oder an teils noch unbekanntenen Orten abgelagert werden. Nur ein geringer Prozentsatz davon ist mit bloßem Auge sichtbar. Von den rund 300 Millionen Ton-

nen der allseits beliebten und flexibel einsetzbaren Polymere, die jährlich weltweit produziert werden, landen nach vorsichtigen Schätzungen etwa 0,1 Prozent im Meer. Dort sollten sich deshalb über Jahre hinweg riesige Mengen von Kunststoffabfall ansammeln.

Doch auf der offenen See schwimmt tatsächlich nur ein kleiner Teil gut sichtbar herum. Für eine der neuesten Schätzungen haben Marcus Eriksen vom Five Gyres Institute in Santa Monica (Kalifornien) und seine Kollegen die Daten von 24 Forschungsfahrten ausgewertet, die in die großen subtropischen Ozeanwirbel, vor die australische Küste, in das Mittelmeer und in den Golf von Bengalen, führten. Demnach treiben weltweit rund 270 000 Tonnen Plastikmüll im Meer; der nicht direkt sichtbare Abfall, der zum Beispiel bereits in der Tiefsee liegt, ist dabei nicht erfasst.

Noch eindrucksvoller als das Gesamtgewicht erscheint die errechnete Menge an Einzelteilchen. Alles in allem schwirren etwa 5,25 Billionen Kunststoffpartikel in den Ozeanen umher – von relativ großen Stücken wie ganzen Tüten, Flaschen, Netzen oder Schuhen bis hin zu nur einige Millimeter oder weniger messenden Partikeln, die stellenweise häufiger sind als tierisches und pflanzliches Plankton.

AUF EINEN BLICK

KUNSTSTOFFBELASTUNG DER OZEANE

- 1** Weltweit schwimmen rund **270 000 Tonnen Plastikmüll im Meer**. Doch die an der Oberfläche treibenden Abfälle machen nur einen kleinen Teil dessen aus, was an Kunststoffen die Ozeane verunreinigt.
- 2** Die Hauptmenge **sinkt** in die Tiefsee, nachdem Organismen das eigentlich leichte Material besiedelt haben, so dass es schwerer als Wasser wird.
- 3** Oft verschlucken auch **Fische, Schildkröten** oder **Vögel** die Plastikteilchen, ohne sie verdauen oder wieder ausscheiden zu können. Nach ihrem Tod sinkt der Müll dann mit den Kadavern an den Meeresgrund.
- 4** Ein gewisser Prozentsatz des Kunststoffabfalls gerät zudem in die **Arktis**, wo er im Meereis eingefroren wird. Andere Polymerpartikel versteinern sogar nach ihrem Einschluss im Sediment – und bilden so genannte **Plastiglomerate**.

Endstation Tiefsee

Letztlich landet ein großer Teil der Kunststoffreste am Meeresboden. »Plastik war der häufigste Müll in der Tiefsee, verloren gegangene Fischernetze und -leinen fanden sich zudem an Unterwasserbergen, Sandbänken oder Mittel-ozeanischen Rücken«, so Pham. Er und 23 Kollegen hatten 32 Stellen in allen Teilen des Nordatlantiks von der Küste bis zum Mittelozeanischen Rücken, im Arktischen Ozean und Mittelmeer per Video oder mit dem Schleppnetz untersucht – überall lagen die Spuren der Zivilisation herum. Selbst in 2000 Kilometer Entfernung vom Festland war der Meeresboden mit Müll übersät. Etwa 85 Prozent davon entfielen auf alltägliche Kunststoffe und Fischereimaterial, der Rest auf Glas und Metalle, Papier, Kleidung oder Keramik.



JOHN COSTA / CSIC

Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven und ihren Kollegen. Die Forscher verglichen tausende Bilder von einer Tiefseestation des Instituts in der arktischen Framstraße zwischen Spitzbergen und Grönland: In nur neun Jahren, zwischen 2002 und 2011, verdoppelte sich die Zahl der Aufnahmen, die Plastikmüll zeigten.

Die ermittelte Steigerung von ein auf zwei Prozent hört sich dabei zuerst nach wenig an, doch ist der Trend für Bergmann sehr besorgniserregend: »Der Arktische Ozean und vor allem seine Tiefseegebiete galten lange Zeit als entlegene, nahezu unberührte Erdregionen. Doch zumindest rund um unser Observatorium liegt hier inzwischen genauso viel Plastikmüll auf dem Grund wie zum Beispiel in einem Meeresgraben nicht weit von Lissabon.«

Endstation Arktis

Schuld daran ist der Ferntransport durch ozeanische Strömungen wie den Golfstrom, die den Abfall von Küstenmetropolen oder beliebten Schifffahrtsrouten noch in den letzten Winkel des Planeten verfrachten. Ein Teil davon bleibt zumindest für eine gewisse Zeit in riesigen Wirbeln in den Ozeanen gefangen, die mittlerweile auch als »Müllstrudel der Menschheit« bekannt sind. In diesen gigantischen Kreisströmen in den Subtropen sammelt sich alles an, was unsere Zivilisation an Waren produziert – von der Einkaufstasche bis hin zu kompletten Containern oder Jachtrümpfen. Dabei erreicht der Abfallteppich im Nordpazifik annähernd die Dimensionen Westeuropas. Nicht ganz so groß sind die Wir-

bel im Südpazifik, Nordatlantik und Indischen Ozean. Wind und Wellen reißen allerdings immer wieder einen Teil des Mülls heraus und treiben ihn zurück an Land.

Ein gewisser Prozentsatz gerät indes an einen anderen abgelegenen Ort: das arktische Eis. Denn was die Studie von Bergmann und ihren Kollegen andeutet, ist im wahrsten Sinn des Wortes nur die Spitze des Eisbergs: Tatsächlich stecken Billionen Kunststoffpartikel im Meereis der Arktis fest (und vielleicht auch der Antarktis, die allerdings stärker vom Rest der Erde isoliert ist). Das fanden Rachel Obbard vom Dartmouth College und ihre Kollegen heraus, als sie vier Eisbohrkerne von dort analysierten, die sie während zweier Expeditionen 2005 und 2010 gezogen hatten. Dazu schmolzen sie das Eis, filterten das Wasser und zählten die aufgefundenen Sedimente per Hand. In jedem Kubikmeter Eis fanden sie dabei hunderte Plastikpartikel; im Schnitt liegen die Konzentrationen damit doppelt so hoch wie im gleichen Volumen Wasser im pazifischen Müllstrudel.

Partikel, die von der Form und Farbe auf Kunststoff schließen ließen, wurden anschließend mit einem Infrarotspektrometer genauer bestimmt. Mehr als die Hälfte der Überreste stammte aus Kunstseideprodukten, gefolgt von Polyester und Nylon – sehr gebräuchlichen Werkstoffen. Durch den Einschluss im arktischen Eis sind diese Abfälle zwar zeitweilig aus dem Verkehr gezogen, doch schwindet die Meereisbedeckung in der Region kontinuierlich. Außerdem verliert mehrjähriges und damit sehr dauerhaftes, dickes Eis an Volumen. Deshalb kehren die Partikel mittlerweile zuneh-

Viele Meeresorganismen – hier Schnecken – nutzen treibende Kunststoffabfälle als Siedlungsplatz.

Ein Teil des Plastikmülls im Meer landet im Magen von Tieren. Dieses Albatrosküken verendete, weil seine Eltern es mit Kunststoffabfällen gefüttert hatten, die sie vermutlich mit Weichtieren und Fischen verwechselten.



CHRIS JORDAN (VIA U.S. FISH AND WILDLIFE SERVICE HEADQUARTERS) / CC-BY-2.0 (CREATIVE COMMONS ORG./LICENSES/IBY/2.0/LEGALCODE)

mend in den biogeochemischen Kreislauf zurück. Die Forscher rechnen damit, dass dadurch in den nächsten Jahren zehntausende Tonnen Kunststoff erneut ins Meer gelangen.

Das geschieht meist in Form kleiner und kleinster Partikel. Denn auch robuste Kunststoffe vermögen dem Zahn der Zeit nicht ewig zu trotzen, wenn sie auf dem offenen Meer treiben: Während sie in die Arktis unterwegs sind oder in den Müllstrudeln kreisen, machen die UV-Strahlung der Sonne und das Salzwasser das Material spröde; kleinere und größe-

re Organismen besiedeln es, nagen daran oder beeinflussen es mit ihren Ausscheidungsprodukten. Dadurch zerfällt der Müll in immer kleinere Teile, bis am Ende nur noch Partikel mit einem Durchmesser von weniger als fünf Millimetern übrig bleiben. Am Strand oder im Eis sind sie dann immer noch mit dem bloßen Auge als bunte Körnchen auszumachen, die Jahrzehnte überdauern können.

»In besonders verschmutzten Regionen dümpeln bis zu eine Million kleiner Kunststoffteilchen pro Quadratkilometer im Meer herum«, beklagt Kara Lavender Law von der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts, die zusammen mit Richard Thompson von der Plymouth University (England) dem Mikroplastik nachspürt. Fatehi Dubaish und Gerd Liebezeit von der Universität Oldenburg haben im Jadebusen stellenweise bis zu 1770 Plastikkörner pro Liter Wasser gezählt. Und Andrés Cózar von der Universidad de Cádiz (Spanien) ergänzt: »Aus 88 Prozent unserer 200 000 Wasserproben aus aller Welt haben wir solche Teilchen herausgefiltert.«



SPANISH NATIONAL RESEARCH COUNCIL (CSIC)

Unter dem Einfluss von Sonne, Wind und Wellen zerfallen die Kunststoffe im Wasser mit der Zeit in winzige Partikel.

Endstation Nahrungskette

Die Plastikkrümel mischen sich demnach stark mit dem Plankton; im nordpazifischen Müllstrudel kommt auf fünf Algen, Krebschen oder sonstige Organismen ein mikroskopisches Kunststoffteilchen. Rein vom Gewicht übertreffen diese Abfallreste bereits das gesamte Plankton vor Ort um das Sechsfache. Als Folge davon geraten die Partikel in die Nahrungskette, denn größere Organismen nehmen sie mit dem Plankton auf, ohne sie jedoch verdauen zu können. Und



so wurden Polymere mittlerweile im Gewebe der verschiedensten Tiere nachgewiesen, vom winzigen Ruderfußkrebis bis hin zum großen Meeressäuger.

Im Körper wirken die Kunststoffe auf verschiedene Weise – meist nachteilig. So setzt das Plastik mitunter hormonell wirksame Verbindungen frei, die das Verhalten der Tiere beeinflussen. Wie ein Schwamm saugt das poröse Material zudem im Meer oft weitere Schadstoffe auf, darunter bekannte gesundheitsgefährdende Substanzen wie PCBs (polychlorierte Biphenyle), DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan) oder andere chlororganische Chemikalien. »Diese reichern sich in den Plastikpartikeln auf ein Vielfaches ihrer Konzentration im Meerwasser an. Doch das ist keine Einbahnstraße: Sobald die Kunststoffteilchen von den Organismen aufgenommen und deren Verdauungsenzymen ausgesetzt werden, geben sie die Stoffe wieder ab«, so Lavender Law und Thompson. Unter Laborbedingungen lagerten die kleinen Teilchen Schadstoffe bis zu Konzentrationen an, die eine Million Mal höher waren als im umgebenden Wasser. Auf ihrem Weg durch die Nahrungskette können sich diese Toxine im Fettgewebe weiter anreichern und so auch bis zum menschlichen Endverbraucher gelangen.

Genau Zahlen, inwieweit die festgestellte chemische Belastung der Meerestiere von Mikroplastik herrührt, liegen allerdings noch kaum vor – PCBs gelangen schließlich auf verschiedenste Weise in die Umwelt. Eine Studie von Chelsea Rochman von der University of California in Davis macht immerhin deutlich, was Fischen blüht, die in der Natur heute übliche Mengen an Kunststoffen mit ihren schädlichen Beigaben aufnehmen: Der Gehalt an PCBs in ihrem Fettgewebe liegt etwa doppelt so hoch wie in dem sie umgebenden Milieu, weshalb sie häufiger unter Leberschäden und Entzündungen leiden als Artgenossen in unbelastetem Wasser – was letztlich ihre Lebenserwartung verringert.

Unabhängig davon erstaunt, welche Mengen an Kunststoffmüll die Fische mittlerweile aufnehmen: Schon jedes zehnte Exemplar, das Rebecca Asch von der Princeton University (Kalifornien) und ihre Kollegen während einer Forschungsfahrt im Nordpazifik in Tiefen zwischen 200 und 1000 Metern fingen, hatte Plastikbestandteile in seinem Magen. Zwischen 12000 und 24000 Tonnen Kunststoff jährlich fressen die Tiere dort, schätzt die Biologin. Näher zur Wasseroberfläche hin nehmen die Zahlen noch dramatisch zu: Hier hatte jeder dritte Fisch Plastik intus, den Christiana Boerger 2008 bei einer Expedition der Algalita Marine Research Foundation im kalifornischen Long Beach mit ihrem Team aus dem Wasser zog und obduzierte. Im statistischen Durchschnitt entfielen auf jedes Tier zwei Kunststoffteilchen.

Weiter oben in der Nahrungskette liegt die Menge noch deutlich höher. Das gilt vor allem für Seevögel, die Jagd auf Fische und Weichtiere machen und den treibenden Müll häufig mit diesen verwechseln. Stephanie Avery-Gomm von der University of British Columbia in Vancouver und ihre Kollegen wiesen in 90 Prozent der von ihnen tot am Strand aufgefundenen Eissturmvögel unverdauliche Kunststoffe nach: Zahnbürsten, Verpackungen, Garn oder Styroporstücke – im

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/meere



FOTOLIA / ERMSTOCKMEDIA

Manchmal enden im Meer treibende Polymerteilchen auch als Bestandteil eines neuartigen Gesteinstyps, den Geowissenschaftler Plastiglomerat getauft haben. Darin verkitten die teils geschmolzenen Kunststoffpartikel erstarrte Lava, Korallenfragmente und Sandkörner. Plastiglomerate finden sich etwa an den Küsten Hawaiis inzwischen schon überall.



PATRICIA CORCORAN, UNIVERSITY OF WESTERN ONTARIO

Mittel 36 Teile pro Vogel; beim Rekordhalter waren es 485. Und immer wieder treiben an der Küste Wale mit kiloweise Plastik in ihren Mägen an. So war ein Pottwal, der 2013 in Andalusien angeschwemmt wurde, an 17 Kilogramm Kunststoff verendet, die seinen Magen ausgang verstopften. In den meisten Fällen sterben die Tiere auf hoher See und versinken dort. Deshalb kann man davon ausgehen, dass ein großer Teil der verschwundenen Plastikabfälle in Walen oder Fischen landet, die den Müll schließlich mit hinab in ihr Tiefseegrab nehmen.

nach kommt es wahrscheinlich überall auf der Erde vor, wo Kunststoffe in der Natur aufgeschmolzen werden. Gerät das Mischprodukt ins Wasser, sinkt es zum Grund, da es schwerer als Plastik ist. Dort wird es dann im weiteren Verlauf von anderen Sedimenten überdeckt und auf diese Weise einigermaßen vor Verwitterung geschützt – und kann zukünftigen Geologen oder Archäologen, die unserem Zeitalter nachspüren, als Leitgestein für das so genannte Anthropozän dienen: das vom Menschen dominierte Erdzeitalter. ~

Endstation Gestein

An anderer Stelle passt sich der Plastikmüll sogar einigermaßen in die Umgebung ein. Wenn das Material so stark ausgebleicht und klein gerieben ist, dass es unter den Sandkörnern am Strand kaum mehr auffällt, verschwindet es aus der menschlichen Wahrnehmung. Bis zu 120 Plastikteilchen finden sich hier pro Liter Sediment, wie Lavender Law und Thompson schreiben. Womöglich werden sie im Lauf der Zeit mit ihrer Umgebung schließlich zu einer Art Sandstein verbacken – ein Prozess, der an hawaiianischen Küsten schon weit fortgeschritten ist. Hier entdeckten Patricia Corcoran von der University of Western Ontario im kanadischen London und ihre Kollegen das bislang wohl ungewöhnlichste Endlager: ein neuartiges Gestein, das sie als Plastiglomerat bezeichnen.

Dieses Material entsteht, wenn Plastik beispielsweise in Strandfeuern schmilzt oder als Treibgut mit abgekühlter, aber noch ausreichend heißer Lava in Kontakt gerät. Die Schmelze verkittet die Bestandteile dann zu einer Art Brekzie: einem Gestein, in dem eckige Bruchstücke durch ein feinkörniges Bindemittel miteinander verkittet sind. Teilweise könne man noch den ursprünglichen Müll wie Zahnbürsten, Plastikgabeln oder Schnüre erkennen, so Corcoran.

Die Forscherin hat das Plastiglomerat an allen von ihr untersuchten Stellen auf Hawaii nachgewiesen. Ihrer Ansicht

DER AUTOR



Daniel Lingenhöhl ist promovierter Geograf und Leiter der Onlineredaktion von »Spektrum der Wissenschaft«. Folgen Sie ihm auf Twitter unter @lingenhoehl!

QUELLEN

- Bergmann, M., Klages, M.:** Increase of Litter at the Arctic Deep-Sea Observatory HAUSGARTEN. In: *Marine Pollution Bulletin* 64, S. 2734–2741, 2012
- Corcoran, P.L. et al.:** An Anthropogenic Marker Horizon in the Future Rock Record. In: *GSA Today* 24, S. 4–8, 2014
- Cózar, A. et al.:** Plastic Debris in the Open Ocean. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111, S. 10239–10244, 2013
- Obbard, R.W. et al.:** Global Warming Releases Microplastic Legacy Frozen in Arctic Sea Ice. In: *Earth's Future* 2, S. 315–320, 2014
- Pham, C.K. et al.:** Marine Litter Distribution and Density in European Seas, from the Shelves to Deep Basins. In: *PLoS One* 9, e95839, 2014
- Rochman, C.M. et al.:** Ingested Plastic Transfers Hazardous Chemicals to Fish and Induces Hepatic Stress. In: *Scientific Reports* 3, 3263, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1356013



NACHGIEBIGES DESIGN

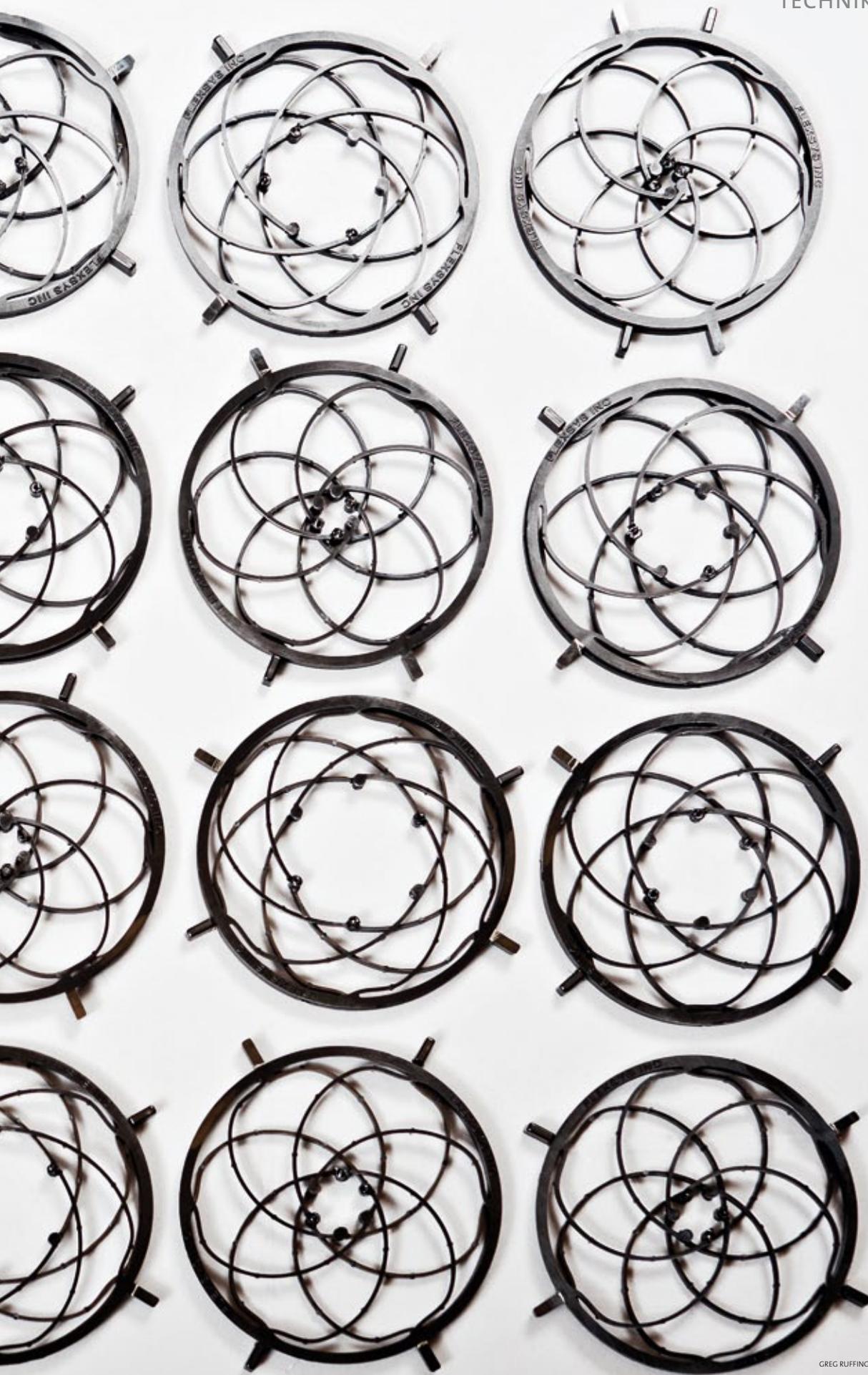
Flexible Maschinen aus einem Guss

Am Stück gefertigte biegsame Geräte könnten heutige Maschinen schon bald vorsintflutlich erscheinen lassen.

Von Sridhar Kota



GREG RUFFING



Diese einteilige Blende erlaubt, die Öffnung durch Druck auf den äußeren Ring stufenlos zu variieren.

GREG RUFFING

Auf der Fahrt zu meinem Labor an der University of Michigan in Ann Arbor an einem regnerischen Tag im Jahr 1995 fiel mein Blick auf die Scheibenwischer. Als Professor für Maschinenbau befasste ich mich mit dem so genannten montagegerechten Konstruieren. Dabei geht es darum, die Zahl der Teile einer Maschine zu verringern, um Kosten für Fertigung und Montage zu sparen.

Als ich nun hinter dem Lenkrad saß, dämmerte mir, dass diese Scheibenwischer eine haarsträubend komplizierte Konstruktion waren. Während sich das Wischerblatt über die ungleichmäßig gewölbte Windschutzscheibe hin- und herbewegt, muss der Wischerrahmen dafür sorgen, dass es stets fest angedrückt bleibt – und das bei einer Vielzahl von Automodellen mit jeweils anderer Scheibenform. Wie wird diesem Zwang zur Flexibilität genügt? Mit einem komplizierten System aus starren Stäben, Verbindungsgliedern und Gelenken.

Damals hatte eine spezielle Technik mein Interesse geweckt: das elastische oder nachgiebige Design. Es zielt darauf ab, flexible und zugleich stabile Maschinen aus möglichst wenigen Komponenten zu bauen. Meinen Mitarbeitern und mir war es vereinzelt schon gelungen, Geräte aus einem Stück zu fertigen – etwa eine Heftzange, die ich zusammen mit meinen Doktoranden G.K. Ananthasuresh und Laxman Saggere konstruierte. Doch der Scheibenwischer erschien mir als perfekter Testfall. Die Lösung einer so anspruchsvollen Aufgabe würde das Potenzial der Methode eindrucksvoll dokumentieren. Und es wäre mehr als eine Übung in minimalistischem Design. Das Teuerste an einem Scheibenwischer ist nämlich seine Montage, weshalb solche Geräte schon seit Langem praktisch nur noch in Niedriglohnländern produziert werden.

Meine Mitarbeiter und ich kamen zwar nicht sofort dazu, einen »Monoform«-Scheibenwischer zu entwerfen; denn in den vergangenen zwei Jahrzehnten galt mein Hauptinteresse den allgemeinen Prinzipien des nachgiebigen Designs, das heißt der Entwicklung theoretischer Methoden für den Entwurf und Bau elastischer Geräte. Doch am Ende konstruierten wir nicht nur den einteiligen Scheibenwischer, sondern etliche weitere monoforme Geräte wie einen Miniaturbewegungsverstärker, flexible Tragflächen für Flugzeuge und bewegliche Roboterschlangen. Zusammen stehen sie für ein neues Paradigma im Maschinenbau.

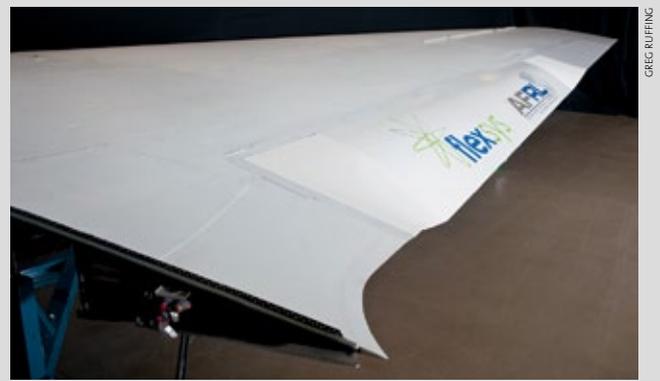
AUF EINEN BLICK

ELASTISCH UND ELEGANT

1 Heutige Maschinen oder Geräte sind oft in komplizierter Weise aus vielen starren Teilen aufgebaut, da angeblich nur so die nötige **Festigkeit** zu erreichen ist.

2 **Nachgiebiges Design** setzt dagegen die **Elastizität von Werkstoffen** gezielt ein, um Spannungen gleichmäßig über biegsame Strukturen zu verteilen und mit möglichst wenig Einzelteilen auszukommen.

3 Das spart nicht nur Montagekosten, sondern erhöht oft auch die **Haltbarkeit** und **Effizienz** – etwa bei verformbaren Tragflächen für Flugzeuge.



Ein nachgiebiges Design ermöglicht es, einteilige Versionen von Objekten zu konstruieren, die normalerweise aus bis zu

Tatsächlich sind uns nachgiebige Geräte viel vertrauter, als man meint. Vielleicht das älteste und eleganteste ist der Bogen. Dieses biegsame und dennoch stabile Instrument speichert beim Spannen elastische Energie, die es beim Loslassen schlagartig freisetzt und auf den Pfeil überträgt. Ein neueres Beispiel ist die Kappe von Shampooflaschen. Sie kombiniert einen leicht zu öffnenden Klappdeckel mit einem Schraubverschluss, ohne ein mechanisches Drehgelenk zu enthalten. Oder denken Sie an eine Einmalpinzette, wie sie in Krankenhäusern verwendet wird. Sie erfüllt ihren Zweck beim Operieren und ist billig genug, um aus hygienischen Gründen nach Gebrauch einfach weggeworfen zu werden.

Lebende Maschinen

Die erfolgreichsten elastischen Designs finden sich in der Natur. Das ging mir auf, als ich 1995 die Publikationen von Steven Vogel von der Duke University in Durham (North Carolina) zu lesen begann. In Büchern wie »Cats' Paws and Catapults: Mechanical Worlds of Nature and People« (deutscher Titel: »Von Grashalmen und Hochhäusern: Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik«) schildert der renommierte Biologe die technischen Meisterleistungen der Natur und zieht Parallelen zu Werken der Ingenieurskunst. Die Äste von Bäumen, Flügel von Vögeln, Beine von Krebsen und Rüssel von Elefanten sind alle flexibel und fest zugleich. Ihre Bestandteile wachsen entweder auseinander heraus oder sind über starke, sich selbst erneuernde Grenzflächen miteinander verbunden. Anders als Systeme aus Zahnrädern, Spannfedern und Gleitelementen biegen, krümmen und verdrehen sie sich dank ihrer inhärenten Elastizität.

Wir Menschen haben jahrtausendlang Erfahrung im Entwerfen starrer Strukturen wie Brücken und Gebäuden. In der Regel verwenden wir dazu steife Werkstoffe. Wenn die Konstruktionen höhere Belastungen aushalten müssen, nehmen wir einfach mehr Material, das die zusätzliche Spannung aufnimmt oder die Steifigkeit erhöht. Denn auf Letztere kommt es an; Flexibilität ist schlecht: Starre Werkstoffe dürfen sich unter Spannung nicht verformen, außer bei Erdbeben.



GREG RUFFING

20 Komponenten bestehen: Tragflächen, Scheibenwischer und Heftzangen zum Beispiel.



GREG RUFFING

Das nachgiebige Design dagegen arbeitet gerade mit dem Verbiegen. Wenn die Spannung an einer Stelle zu groß wird, machen wir sie dünner statt dicker, damit das Material sich genau dort verformt. Auf diese Weise benutzen wir die Elastizität als Mittel, um eine mechanische oder kinematische Funktion zu erreichen.

Im Fall der Verschlusskappe etwa wird die gesamte Spannung auf die dünne Kunststoffflasche zwischen dem Klappdeckel und dem Schraubsockel geleitet. In solchen Fällen spricht man von konzentrierter Nachgiebigkeit. Untersuchungen dazu gibt es schon seit den 1950er Jahren. Bedeutende Beiträge aus jüngerer Zeit stammen von Ashok Midha von der Missouri University of Science and Technology in Rolla, Larry Howell von der Brigham Young University in Provo (Utah), Shorya Awtar von der University of Michigan in Ann Arbor und Martin L. Culpepper vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. Diese Forscher haben insbesondere gezeigt, dass sich das Prinzip der konzentrierten Nachgiebigkeit auch auf Präzisionsinstrumente sowie auf Geräte zur nanometergenauen Positionierung anwenden lässt.

Der Bogen verfügt dagegen über keine lokalisierte Biegezone; er wird über seine gesamte Länge verformt. Eine solche »verteilte Nachgiebigkeit« ist entscheidend für flexible Geräte, die Schwerarbeit zu leisten haben – beispielsweise Tragflächen von Flugzeugen oder Motoren, die Millionen von Taktzyklen ausführen müssen. Als ich mich mit elastischem Design zu beschäftigen begann, konnte ich keine theoretischen Hintergründe oder allgemeinen Methoden zur Konstruktion von Maschinen mit verteilter Nachgiebigkeit finden. Deshalb hakte ich hier ein und machte diesen Aspekt zu meinem Forschungsschwerpunkt.

Besondere Anforderungen an Mikrogeräte

Dabei stellte ich fest, dass es auf bestimmten Gebieten gar keine Alternative zu flexiblen einteiligen Maschinen gab. Zu Beginn meiner Karriere untersuchte ich gewöhnliche mechanische Systeme wie Fahrzeuggetriebe. In den frühen 1990er Jahren aber kam ich im Zuge der allgemeinen Entwicklung dazu, stattdessen absolut winzige Maschinen zu

entwerfen: so genannte mikroelektromechanische Systeme (MEMS). Telekommunikationsfirmen begannen damals optische Schalter für Glasfasernetze zu entwickeln. Diese benötigten klitzekleine Motoren, die sehr schnell Spiegel drehten, um Lichtsignale in die eine oder andere Richtung zu lenken. Monoforme Geräte schienen dafür perfekt geeignet.

Schon bald nach der Lektüre von Vogels Buch und meinen ersten Gehversuchen im nachgiebigen Design beteiligte ich mich deshalb an einem Projekt von Steven Rogers und seinem Team in der Mikrosystemabteilung der Sandia National Laboratories in Albuquerque (New Mexico). Gesucht war ein Linearmotor, der eine Verschiebung um mindestens zehn Mikrometer bewirkte. Fertigungsbedingungen beschränken die Bewegung elektrostatischer Motoren jedoch auf zwei Mikrometer. Ich wusste, dass ich nicht einfach ein makroskopisches Getriebe verkleinern konnte. Selbst wenn sich jemand fände, dessen Hand ruhig genug war, Zahnräder, Scharniere und Achsen mit Abmessungen von ein bis zwei Mikrometern zusammenzusetzen, wäre die resultierende Maschine zu ungenau. Im Größenbereich mikroelektromechanischer Systeme taugt ein Getriebe mit einem zehntel Millimeter Spiel allenfalls als Spielzeug. Außerdem werden MEMS-Geräte ähnlich wie integrierte Schaltungen in so genannter Losfertigung hergestellt – Zehntausende auf einer Fläche von der Größe eines Fingernagels. Vor diesem Hintergrund entwarf ich einen einteiligen Bewegungsverstärker, der in Verbindung mit einem elektrostatischen Motor Verschiebungen um 20 Mikrometer erzeugt.

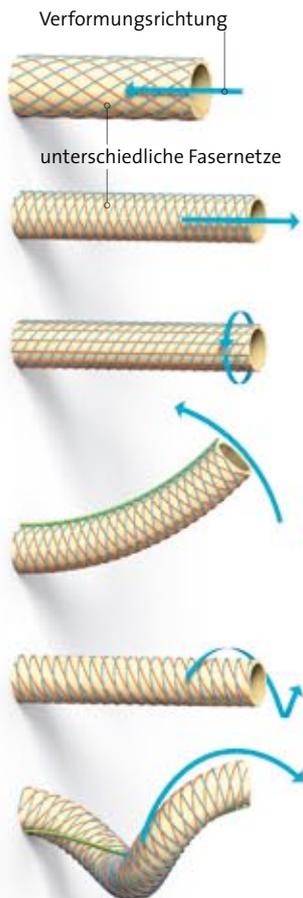
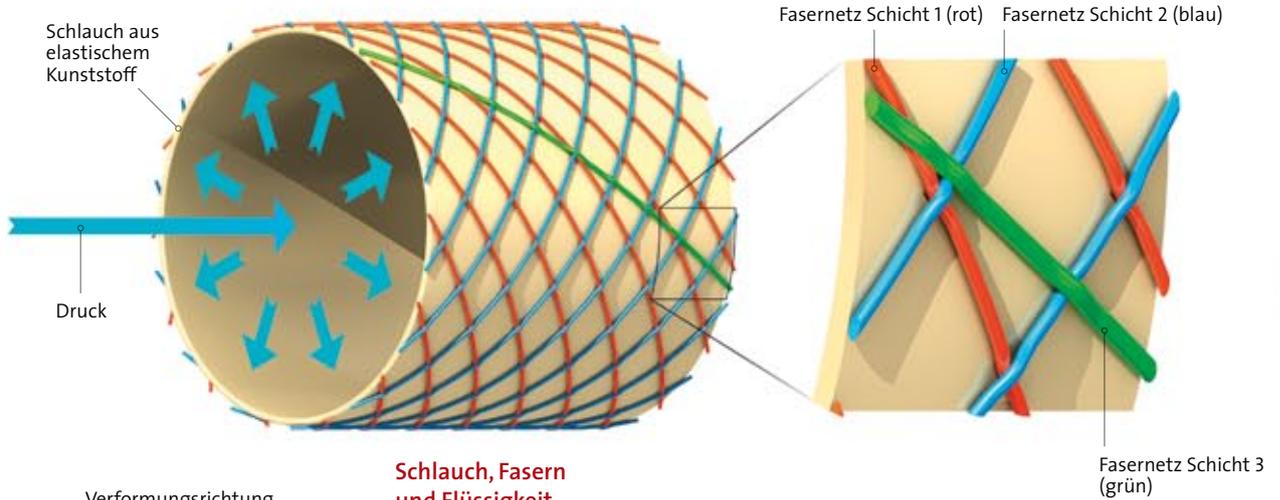
1998 lag das erste fertige Exemplar vor (siehe Bild S. 82). Ich erinnere mich deutlich, wie ich im Labor stand und bewundernd auf das winzige, vor sich hin surrende Gerät blickte. Es hatte nun schon über zehn Milliarden Zyklen hinter sich und schien noch endlos weiterlaufen zu können. Doch am meisten erstaunte mich noch immer, dass es trotz seiner Komplexität nur aus einem einzigen Stück polykristallinen Siliziums bestand.

Unter all den Besonderheiten nachgiebiger Geräte finde ich ihre anpassungsfähige Form am bestechendsten. Biologische »Maschinen« sind deshalb so erstaunlich effizient, weil

Bauanleitung für Roboterschlängen

Würmer, Tintenfische und andere Weichtiere kommen ohne starres Knochengerüst aus. Sie nutzen stattdessen die Prinzipien der Elastofluidität. Ihre Körper bestehen aus flüssigkeitsgefüllten Röhren, die von Muskel- und Bindegewebsfasern umschlossen sind. Diese Fasern fungieren als Gegenspieler des durch Muskelkontraktion erzeugten Drucks im Innern des Hohlraums, und ihre Orientierung bestimmt die Spanne der möglichen Bewegungen.

Ingenieure an der University of Michigan in Ann Arbor entwickeln künstliche Schlangen, die nach diesem Prinzip funktionieren. Mögliche Anwendungen sind orthopädische Hilfsmittel, welche die Bewegung von Gliedmaßen unterstützen, sowie Roboter, die gefahrlos mit zerbrechlichen Objekten hantieren und sanft mit Menschen umgehen könnten.

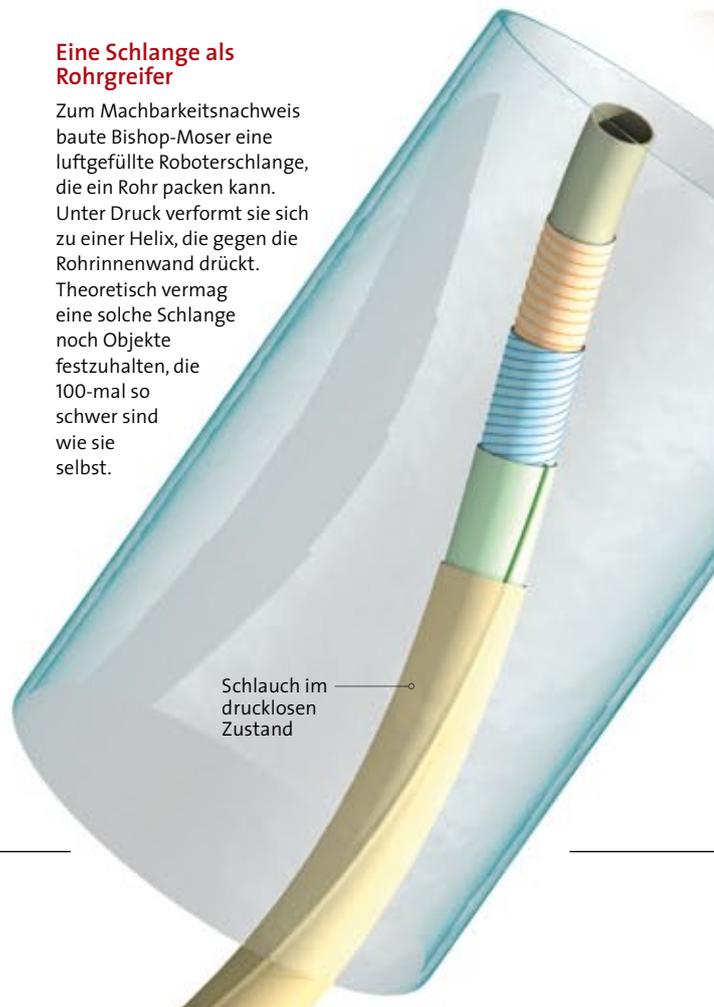


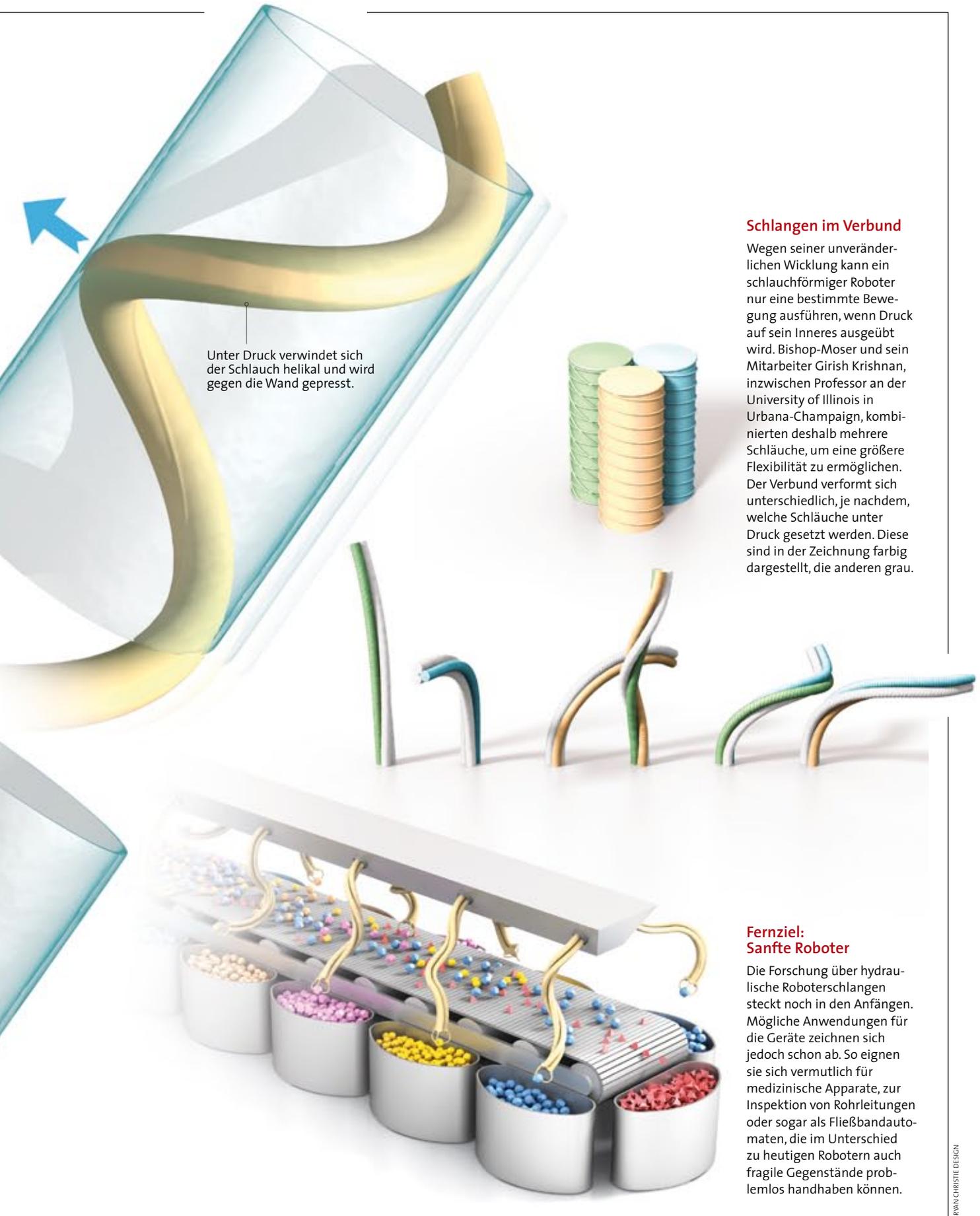
Schlauch, Fasern und Flüssigkeit

Traditionell konstruieren Forscher Roboterschlängen als segmentierte Körper, die aus langen Ketten einzeln angesteuerter Elemente bestehen. Der Autor und Joshua Bishop-Moser von der University of Michigan nutzen dagegen eine unter Druck stehende Flüssigkeit innerhalb eines elastischen Kunststoffschlauchs, der von zwei bis drei Fasernetzen umgeben ist. Der Winkel, unter dem die Fasern spiralförmig um den Schlauch gewickelt sind, entscheidet darüber, wie dieser sich verwindet, wenn Druck auf die Flüssigkeit im Innern ausgeübt wird.

Eine Schlange als Rohrgreifer

Zum Machbarkeitsnachweis baute Bishop-Moser eine luftgefüllte Roboterschlange, die ein Rohr packen kann. Unter Druck verformt sie sich zu einer Helix, die gegen die Rohrwand drückt. Theoretisch vermag eine solche Schlange noch Objekte festzuhalten, die 100-mal so schwer sind wie sie selbst.





Unter Druck verwindet sich der Schlauch helikal und wird gegen die Wand gepresst.

Schlangen im Verbund

Wegen seiner unveränderlichen Wicklung kann ein schlauchförmiger Roboter nur eine bestimmte Bewegung ausführen, wenn Druck auf sein Inneres ausgeübt wird. Bishop-Moser und sein Mitarbeiter Girish Krishnan, inzwischen Professor an der University of Illinois in Urbana-Champaign, kombinierten deshalb mehrere Schläuche, um eine größere Flexibilität zu ermöglichen. Der Verbund verformt sich unterschiedlich, je nachdem, welche Schläuche unter Druck gesetzt werden. Diese sind in der Zeichnung farbig dargestellt, die anderen grau.

Fernziel: Sanfte Roboter

Die Forschung über hydraulische Roboterschlangen steckt noch in den Anfängen. Mögliche Anwendungen für die Geräte zeichnen sich jedoch schon ab. So eignen sie sich vermutlich für medizinische Apparate, zur Inspektion von Rohrleitungen oder sogar als Fließbandautomaten, die im Unterschied zu heutigen Robotern auch fragile Gegenstände problemlos handhaben können.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

sie ihre äußere Gestalt in Echtzeit verändern können. Diese Flexibilität steht in krassem Gegensatz zu den starren Geometrien, die überall in der Welt der Technik vorherrschen – bei Motoren, Tragflächen, Triebwerken, Kompressoren, Gebläsen und so weiter. Solche Maschinen erreichen nur unter sehr speziellen Bedingungen einen hohen Wirkungsgrad. In allen anderen Fällen arbeiten sie suboptimal. Ein Flugzeug zum Beispiel unterliegt auf seinem Weg vom Start zum Ziel sehr unterschiedlichen Bedingungen, was Höhe, Geschwindigkeit oder – durch den Verbrauch von Treibstoff – auch das Gewicht angeht. Das bedeutet, dass es die meiste Zeit nicht mit maximaler Effizienz fliegt. Vögel dagegen können mühelos abheben, landen, in der Luft schweben und sich pfeilschnell in die Tiefe stürzen, indem sie einfach die Form ihrer Flügel passend abwandeln.

Seinerzeit, in den 1990er Jahren, fragte ich mich, ob wohl irgendein Ingenieur jemals auf die Idee gekommen war, die Form der Tragflächen während des Flugs zu verändern, um eine höhere Leistung zu erzielen. Erstaunt erfuhr ich, dass sich schon beim Originalflugzeug der Gebrüder Wright die Flügel immerhin verwinden ließen. Seither aber war eine adaptive Tragfläche, die ihre Form flexibel an die momentanen Flugbedingungen anpasst, ein bloßer Wunschtraum geblieben. Die Sache ließ mir keine Ruhe, und so setzte ich mich eines Nachts an den Schreibtisch und fing an zu zeichnen.

Einige Monate später stieß ich in der Zeitung auf eine kurze Notiz, wonach in den späten 1980er Jahren an der Luftwaffenbasis Wright-Patterson in Ohio über flexible Tragflächen geforscht worden sei. Die Ingenieure dort hatten ihr Projekt »mission-adaptive wing« (MAW) genannt. Ich wusste nicht, was dabei herausgekommen war. Kurzerhand rief ich die Forscher in Ohio an und erkundigte mich nach ihrer Arbeit.

Sie berichteten, dass sie ebenso wie vermutlich alle Ingenieure, die sich an der Konstruktion formveränderlicher Tragflächen versucht hatten, ganz selbstverständlich von starren Strukturen ausgegangen waren. Doch das erzwang komplizierte, schwere Vorrichtungen mit Unmengen an Stellgliedern, damit der Flügel unterschiedliche Wölbungen annehmen konnte. Eine entsprechende Modifikation der Tragflächen des Kampfflugs F111 zum Beispiel war deshalb zwar aerodynamisch viel versprechend, erwies sich jedoch als zu schwer und komplex für den praktischen Einsatz.

Das überraschte mich nicht. Eine alltagstaugliche Tragfläche mit variabler Geometrie stellt viele widersprüchliche Anforderungen. Die Struktur hat leicht zu sein, aber stabil genug, um dem Druck der vorbeiströmenden Luft standzuhalten und Hunderttausende von Flugstunden unbeschadet zu überstehen. Zudem muss sie einfach herzustellen und zu

warten, beständig gegen Korrosion und unempfindlich gegenüber ultravioletter Strahlung sowie stetigen großen Temperaturschwankungen sein. Derart widerstreitende Bedingungen lassen sich mit Anordnungen starrer Teile nicht erfüllen.

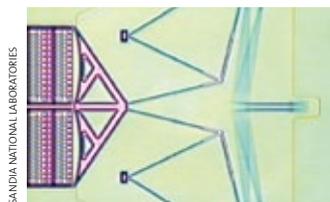
Dagegen nutzte mein Entwurf einer flexiblen Tragfläche, den ich bei der Luftwaffenbasis einreichte, die Elastizität der Komponenten aus – bei denen es sich im Übrigen um völlig normale, für die Luftfahrt geeignete Materialien handelte. Die Tragfläche verfügte über eine innere Gerüststruktur, die dafür sorgte, dass sie sich mühelos verformte, sobald ein kompakter interner Motor eine Kraft darauf ausübte. Dennoch blieb sie starr, wenn sie im Windkanal starken externen Luftströmungen ausgesetzt war. Die Ingenieure der Luftwaffenbasis Wright-Patterson waren beeindruckt. Das ermutigte mich, im Dezember 2000 die Firma FlexSys zu gründen, deren Geschäftsfeld darin bestehen sollte, kommerzielle Anwendungen für das nachgiebige Design zu erschließen.

Sechs Jahre später, nach einer Menge Entwicklungsarbeit und mehreren erfolgreichen Tests im Windkanal, waren wir so weit, eine erste Version der flexiblen Tragfläche an der Unterseite eines Flugzeugs vom Typ White Knight der Firma Sealed Composites für Flugtests in der Mojave-Wüste zu befestigen. Der Flügel war mit Instrumenten zur Messung von Auftrieb und Luftwiderstand bestückt. Wie sich zeigte, variierte sein Auftriebskoeffizient zwischen 0,1 und 1,1 bei unverändertem Widerstandsbeiwert. Das bedeutet eine Treibstoffersparnis von zwölf Prozent. Werden existierende Tragflächen nachträglich mit unserer neuen, flexiblen Flügelklappe ausgerüstet, beträgt die Einsparung immerhin noch gut vier Prozent. Bedenkt man, dass die Luftfahrt täglich mehr als eine Milliarde Liter Kerosin verbraucht, so summieren sich diesen kleinen Prozentzahlen durchaus zu erheblichen Geldbeträgen.

Da die flexible Tragfläche aus einem Stück besteht, ist sie zudem weniger störanfällig und auch leichter als herkömmliche Systeme mit separaten Klappen. Zudem sollte sie leiser sein. Nach Aussage der amerikanischen Luft- und Raumfahrtbehörde NASA rührt der größte Teil des Lärms beim Landen eines Flugzeugs nämlich von Wirbeln her, die sich an den Spalten zwischen der eigentlichen Tragfläche und den ausgefahrenen Landeklappen bilden. Solche Spalten gibt es bei unserem Flügel natürlich nicht.

Die Vorteile der Elastofluidität

In den vergangenen Jahren habe ich zusammen mit meinen Doktoranden Joshua Bishop-Moser und Girish Krishnan Untersuchungen zum nachgiebigen Design begonnen, die von den flexibelsten Maschinen in der Natur inspiriert sind: wirbellosen Tieren. Die Fortbewegungsmechanismen selbst der primitivsten unter ihnen – etwa Ringel- und Fadenwürmer – sind schon so kompliziert, dass wir sie erst ansatzweise verstehen. Höher entwickelte Vertreter wie Tintenfische bedeuten für Ingenieure auf dem Feld des nachgiebigen Designs eine echte Herausforderung, an der sie ihre Kunst beweisen können.



Winzige Geräte wie dieser mikroelektromechanische Bewegungsverstärker lassen sich grundsätzlich nur am Stück fertigen.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES



Eine hydraulisch bewegte künstliche Schlange kann beispielsweise ein Rohr von innen festhalten.

GREG RUFFING

Solche Weichtiere verfügen über keinerlei Skelett und können sich dennoch kraftvoll und höchst anmutig bewegen. Größtenteils erreichen sie das durch so genannte Elastofluidität. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht sind ihre Körper Hydraulikmotoren: Sie bestehen aus Bindegewebs- und Muskelfasern, die einen flüssigkeitsgefüllten Hohlraum umschließen. Im Allgemeinen verlaufen diese Fasern spiralförmig und überkreuzen sich dabei. Dieses äußere Netz bildet den Gegenspieler zu dem Druck im Innern, der über die Kontraktion der Muskeln ausgeübt wird. Die Orientierung der Fasern bestimmt dabei die Spanne der möglichen Bewegungen. Solche Hydraulikmotoren finden sich teils auch bei Wirbeltieren, etwa bei Aalen oder im Elefantenrüssel.

Unsere Forschungsarbeiten zur Elastofluidität stecken noch in den Anfängen, doch meiner Ansicht nach lassen sich damit »weiche« Roboter und andere Gerätschaften konstruieren, die sanft mit Menschen und ihrer Umwelt umgehen. Die ersten Anwendungen sind auf dem Gebiet der Orthopädie zu erwarten. Patienten mit einer Gelenkkontraktur auf Grund einer Muskelverhärtung oder mit verformten oder versteiften Gelenken könnten ein flexibles orthopädisches Gerät erhalten, das ihre Gliedmaßen mit sanftem Druck wieder in die normale Position bringt beziehungsweise durch vorsichtiges Bewegen funktionsfähig macht.

Dank der Arbeit vieler talentierter Doktoranden am Compliant Systems Design Laboratory der University of Michigan ist aus der 1992 gestarteten Grundlagenforschung eine Fülle von nützlichen Erkenntnissen und systematischen Konstruktionsmethoden hervorgegangen. Ein Teil dieser Nachwuchswissenschaftler führt inzwischen eigene Untersuchungen über nachgiebiges Design an den verschiedensten Universitäten und Forschungsstätten durch. Und was wir in Jahrzehnten ersonnen haben, setzen die Ingenieure bei

FlexSys in die Praxis um, so dass schon bald die ersten kommerziellen Produkte auf den Markt kommen werden.

Das gilt etwa für den einteiligen Scheibenwischer. Die Regentests sind abgeschlossen, und die Gießform ist fertig gestellt. Derzeit laufen Gespräche mit Autoherstellern und Zulieferern über den Einsatz des Geräts für Rückfenster. Unser Monoform-Scheibenwischer besteht aus einem glasfaserverstärkten thermoplastischen Polymer und verrichtet seinen Dienst bei frostigen Temperaturen ebenso wie in brütender Hitze. Er bricht oder verbiegt sich selbst dann nicht, wenn das Fenster vereist oder zugeschnitten ist. Insgesamt sollte er haltbarer, zuverlässiger und preiswerter sein als alle herkömmlichen Typen.

Die flexible Tragfläche ist gleichfalls bereit zum Einsatz. Das nahtlose FlexFoil-System senkt den Treibstoffverbrauch um zwölf Prozent. Doch auch wenn nur die hinteren 15 Prozent einer normalen Flügelklappe durch eine Konstruktion mit veränderlicher Form ersetzt werden, lassen sich bereits bis zu fünf Prozent an Kerosin einsparen. Es mag zwar noch ein paar Jahre dauern, bis wir die Zulassung der US-Luftfahrtbehörde FAA bekommen. Aber wir erwarten, dass die Flugzeughersteller unsere flexible Tragfläche in alle künftigen Modelle einbauen, sobald sie deren Vorzüge erkannt haben.

Bei Automobilen, Haushaltsgeräten, Medizinprodukten und Verbrauchsgütern bestehen massenhaft Möglichkeiten, durch nachgiebiges Design die Anzahl der Komponenten drastisch zu senken. Die schwierigste Aufgabe ist es, die Konstrukteure in den Unternehmen mit dem neuen Prinzip vertraut zu machen. Erst wenn ein Massenprodukt wie unser einteiliger Scheibenwischer in viele Kraftfahrzeuge eingebaut ist, dürfte der Paradigmenwechsel allmählich ins allgemeine Bewusstsein dringen. ~

DER AUTOR



Sridhar Kota ist Professor für Maschinenbau an der University of Michigan in Ann Arbor. Im Jahr 2000 gründete er die Firma FlexSys.

QUELLEN

Krishnan, G. et al.: A Metric to Evaluate and Synthesize Distributed Compliant Mechanisms. In: Journal of Mechanical Design 135, 011004, 2012

Krishnan, G. et al.: Building Block Method: A Bottom-up Modular Synthesis Methodology for Distributed Compliant Mechanisms. In: Mechanical Sciences 3, S. 15–23, 2012

Oh, Y. S., Kota, S.: Synthesis of Multistable Compliant Mechanisms Using Combinations of Bistable Mechanisms. In: Journal of Mechanical Design 131, 021002, 2009

Trease, B. P., Kota, S.: Design of Adaptive and Controllable Compliant Systems with Embedded Actuators and Sensors. In: Journal of Mechanical Design 131, 111001, 2006

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1356014

1915

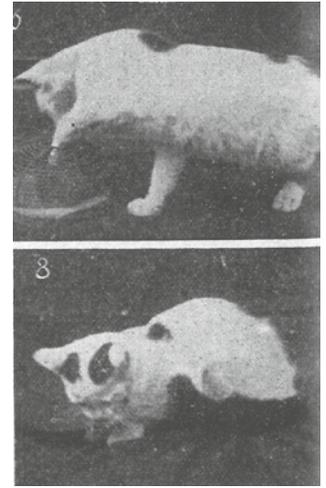
Katz und Maus

»Bei tierversychologischen Versuchen ist es oft nicht möglich, einzelne wichtige Versuchsmomente gedächtnismäßig scharf festzuhalten. Diese Überlegung führte

mich dazu, die Kamera bei solchen Untersuchungen zu verwenden. Als Aufgabe hatte ich mir gestellt, das Verhalten einer Katze bei der Darreichung einer gefangenen Maus zu beobachten. Ich arbeitete mit einem Anastigmat von Hugo Meyer & Co., Görlitz, verwandte die gewöhnliche Agfaplatte und belichtete 1/20 Sekunde. Zu meinem Erstaunen greift die Katze in die Fangöffnung

der Falle, um die Maus zu erreichen. Daß sie zu dieser scheinbar überlegten Handlung kommt, ist um so mehr zu verwundern, als sie noch niemals in der Lage gewesen war, an solchen Fallen Erfahrungen zu sammeln.« Kosmos 9, 1915, S. 303–305

Die Bilderserie zeigt, dass eine Katze ihre Beute untersucht, bevor sie zugreift.



Die empfindlichste Waage

»Für genaue Messungen bedürfen die modernen Naturwissenschaften außerordentlich empfindlicher Wägevorrichtungen. Für diese Zwecke sind sog. »Mikrowagen« konstruiert worden, die auf Bruchteile eines Gewichtsunterschiedes von 1/10 Milligramm reagieren. Neuerdings ist eine noch empfindlichere Waage von Riesenfeld und Möller gebaut worden. Die Empfindlichkeit ist bis auf die Differenz von 33 millions-

tel Milligramm abgestuft worden. Die Höchstbelastung darf nicht mehr als 5 Milligramm betragen. Diese Waage ist eine Torsionswaage. Die Schwingungen sind sehr gedämpft, so daß man ablesen kann, wenn die Waage zur Ruhe gekommen ist, was etwa drei Minuten dauert. Man stellt sie in einen Keller, dessen Wände hermetisch abgedichtet sind.« Central-Zeitung für Optik und Mechanik 25, 1915, S. 238 (Anm. d. Red.: Heutige Waagen messen auf das Quadrillionstel eines Gramms genau.)

Außerirdische Schriftzeichen

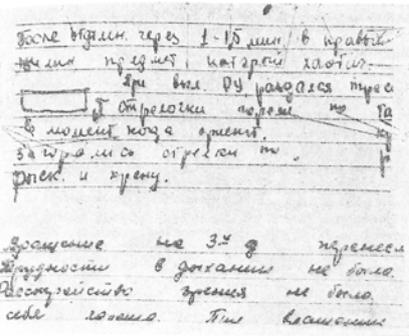
»Bei Durchsicht der von russischen Astronauten geführten Bordjournale, in die sie

während ihrer Erdumkreisungen Eintragungen zu machen hatten, zeigte es sich, daß sich die Handschrift wesentlich veränderte. Die Untersuchungen enthalten kein Material über Funktionsstörungen des zentra-

len Nervensystems, die bei Raumflügen auftreten können. Auch wurde weniger Wert auf eine sinngemäße Betrachtung der Eintragungen gelegt als vielmehr auf die motorische Seite: Tempo, Koordination, Schriftbild, Wortanordnung, Größe und Abstand, Gebundenheit und Form von Buchstaben, Worten und Satzfolgen. Wie stark die Veränderung sich auswirkt, läßt wichtige Schlüsse über die Arbeitsfähigkeit der

1965

Astronauten zu. Das starke Absinken der Koordination beim Schreiben ist in der ersten Phase des Fluges zu verzeichnen. Innerhalb von 24 Stunden tritt eine Adaption ein. Aber am Ende des Fluges verschlechtert sie sich aufs neue.« Naturwissenschaftliche Rundschau 9, 1965, S. 368–369



Bordtagebuch einer Astronautin: Der obere Teil entstand in den ersten 24 Stunden ihres Fluges, der untere Teil auf der Erde.

Auf dem Weg zum Antimaterie-Antrieb

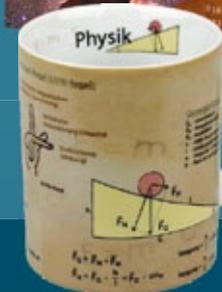
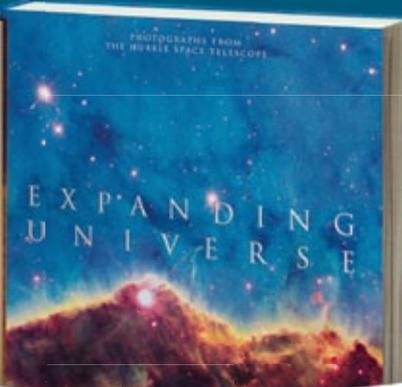
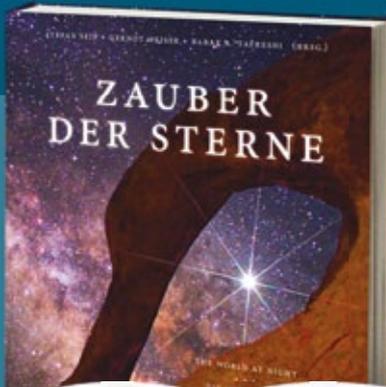
»Eine Gruppe von Physikern der Columbia-Universität in New York hat erstmals einen zusammengesetzten Anti-Atomkern experimentell nachweisen können, und zwar das Antideuteron, das aus einem Antiproton und einem Antineutron besteht. Seit man schwere Antiteilchen kennt, gilt es als sicher, daß sich aus ihnen auch ganze Atomkerne aufbauen können. Derartige Antimaterie würde sich physikalisch und chemisch wie gewöhnliche Materie verhalten, mit der

Ausnahme, daß sie bei Berührung mit gewöhnlicher Materie unter ungeheurer Energiefreisetzung zerstrahlen würde. Die Forscher fanden das neue Gebilde, indem sie unter den zahllosen Teilchen, die beim Aufprall der energiereichen Protonen des großen Synchrotrons im Brookhaven-Laboratorium auf ein Stück Materie entstehen, nach negativen Teilchen der Masse 2 suchten. Unter vielen Milliarden anderer Partikelchen fanden sich etwa 200 der gesuchten Teilchen.« Kosmos 9, 1965, S. 298

Über 1.000 Geschenkideen für kluge Köpfe:

9-3591-9

9-4232-3



9-4703-3



9-3169-7

9-3630-6



9-3788-6

9-3788-8

9-3589-1

Video
im Shop
ansehen.

9-3169-8

€ 5,- Gutschein

Gutscheincode: BUUAP
www.Science-Shop.de

Der Gutschein über 5 Euro ist bis zum **31.10.2015** gültig. Einfach im Bestellprozess im Feld „Gutscheinnummer“ den Code **BUUAP** eingeben. Bitte haben Sie verständnis, dass bei einer Bestellung von ausschließlich preisgebundenen Büchern der Gutschein nicht einlösbar ist. 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.)





Christian Kreiß
Gekaufte Forschung
Wissenschaft im Dienst der Konzerne
 Europa, München 2015
 238 S., € 18,99

WISSENSCHAFTSPOLITIK

Drittmittelforschung – ein Fluch?

Es ist gefährlich, wenn Unternehmen die Hochschulforschung mitfinanzieren.

Das Buch beleuchtet, wie Wirtschaftsvertreter und Lobbyisten die angeblich unabhängige Hochschulforschung beeinflussen. Christian Kreiß, Professor für Finanzierung und Wirtschaftspolitik an der Hochschule Aalen, steigt mit der Frage ein, was denn eigentlich schlecht daran sei, wenn die Industrie den Hochschulbetrieb mitfinanziert. Und liefert gleich die Antwort darauf, indem er konkrete Fallbeispiele aus verschiedenen Branchen präsentiert, an denen er zeigt, »wohin einseitig interessegeleitete Forschung auf der Basis von Industriegeldern führen kann«.

Eines dieser Beispiele ist der schwedische Wissenschaftler Ragnar Ryländer, der im Dienst der Tabakindustrie die Gefahren des Passivrauchens vor-

Public Management und Bologna-Prozess) seien die europäischen Universitäten zunehmend auf Drittmittel angewiesen, schreibt der Autor. Also auf Gelder, »die nicht aus den der Hochschule zur Verfügung stehenden Haushaltsmitteln, sondern aus Mitteln Dritter finanziert werden« (§ 25 Absatz 1 Hochschulrahmengesetz). In Absatz 4 dieses Paragraphen heißt es, dass die Mittel »für den vom Geldgeber bestimmten Zweck zu verwenden und nach dessen Bedingungen zu bewirtschaften« seien. Darin sieht Kreiß eine große Gefahr für die Glaubwürdigkeit und Integrität der Forschung. Industrievertretern sei es beispielsweise möglich, im Rahmen von Stiftungsprofessuren erheblichen Einfluss auf die Hochschulforschung zu

Die Drittmittelfinanzierung von Forschungsprojekten durch die Industrie sei eine verdeckte Subvention, meint Kreiß

sätzlich verschleierte. Ein anderes ist die Publikationspraxis in der Pharmaforschung, insbesondere in Form des Vertuschens unerwünschter Studienergebnisse. Auch über Genfood-, Atomenergie- und Pestizidforschung weiß Kreiß Skandalöses zu berichten. Seine Fallbeispiele sind traurig und zeugen von erschreckender Skrupellosigkeit.

Infolge verschiedener Reformprozesse seit den 1980er Jahren (etwa New

nehmen: wenn nämlich die Professur mit einer branchen- oder gar unternehmensnahen Person besetzt wird.

Unter anderem geht Kreiß auf das »Carisma«-Forschungsprojekt der Technischen Hochschule Ingolstadt ein. Dessen Ziel lautet, die Verkehrssicherheit zu erhöhen. An dem Projekt beteiligt sich massiv die Automobilindustrie. Bislang, schreibt der Autor, hätten solche Vorhaben zu technischen Neuerun-

gen geführt, die die Fahrzeuge teurer machten und somit die Gewinne der Industrie erhöhten. Zwar, räumt er ein, seien die Autos tatsächlich sicherer geworden. Allerdings würden derart industriennahe Projekte bestimmte Ansätze gar nicht erst verfolgen – etwa den, das Fahrzeugaufkommen zu mindern. Kreiß fragt, warum in Gremien, die über die Vergabe entsprechender Forschungsgelder entscheiden, kaum umweltschutznahe Nichtregierungsorganisationen vertreten seien. Seine Erklärung: weil diese den Interessen der Unternehmen entgegenstehen.

Auch die EU-Förderprogramme hätten Schiefelage, da es ihr erklärtes Ziel sei, die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft zu stärken. Kreiß sieht hierin eine einseitige Entwicklung, die von der breiten Gesellschaft finanziert wird, aber überwiegend der Privatwirtschaft nützt. Für hochgradig bedenklich hält der Autor den Einfluss der Industrie auf Schulen und Kitas. Dort sollen durch so genanntes Deep Lobbying (Tiefeneinflussnahme) die Kinder von heute zu Konsumenten von morgen herangezogen werden. So ist es Kreiß zufolge alles andere als ein Zufall, dass viele Computer in deutschen Klassenzimmern von bekannten Herstellern gesponsert werden.

Die Drittmittelfinanzierung von Forschungsprojekten durch die Industrie sei eine verdeckte Subvention, meint der Autor, da die Industriepartner die Kosten meist nur zum Teil selbst übernehmen. Die übrig bleibenden Finanzierungslücken schließe größtenteils der Staat und subventioniere damit im Grunde die Forschung der Industrie – ein marktverzerrender Eingriff seitens der Politik, der häufig intransparent und demokratisch nicht legitimiert beschlossen werde.

Wenn Industrievertreter in die Hochschulforschung investieren, so der Tenor des Buchs, dann hat das Folgen für die Gesellschaft. Laut Kreiß vertraut das breite Publikum immer weniger in die Unabhängigkeit und Integrität von Wissenschaftlern. Er unterbreitet verschiedene Lösungsvorschläge, wie das Problem in den Griff zu bekommen sei. Bei-

spielsweise spricht er sich gegen direkte Geldflüsse aus und wirbt für Fondslösungen sowie für die Einbindung zivilgesellschaftlicher Organisationen.

Der Autor beleuchtet ein wichtiges Thema, was ihm hoch anzurechnen ist. Allerdings muss man sich als Leser da-

rüber im Klaren sein, dass drittmittel-finanzierte Vorhaben in Deutschland nur einen kleinen Teil aller Forschungsprojekte ausmachen. Vor diesem Hintergrund einen breiten Einfluss der Industrie zu postulieren, ist gewagt. Unterm Strich wirkt Kreiß' Plädoyer gegen

die Drittmittelforschung daher recht stark meinungsgefärbt.

Markus Neurohr

Der Rezensent hat Physik und Geologie studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Karlsruhe.



Paul M. Cobb

Der Kampf ums Paradies

Eine islamische Geschichte der Kreuzzüge

Aus dem Englischen von Michael Sailer

Philipp von Zabern, Darmstadt 2015

432 S., € 29,95

GESCHICHTE

Zwischen Widerstand und Kollaboration

Die Kreuzzüge aus muslimischer Sicht.

Der arabische Geograf und Reise-schriftsteller Ibn Dschubayr (1145–1217) kritisierte seine Landsleute, wenn er im Hinblick auf die Herrschaft der Kreuzfahrer im Nahen Osten schrieb: »Das ist eines der Missgeschicke, die die Muslime befallen. Die muslimische Gemeinschaft beklagt die Ungerechtigkeit eines Grundherrn ihres eigenen Glaubens und preist das Vorgehen ihres Gegners und Feindes, des fränkischen Grundherrn, und gewöhnt sich daran, von ihm gerecht behandelt zu werden.« Unzufrieden mit den eigenen Herrschern, scheinen sich Teile der muslimischen Bevölkerung in den Gebieten, die die christlichen Kreuzfahrer erobert hatten, mit den neuen Machthabern arrangiert zu haben.

Dies muss umso mehr verwundern, da die Kreuzfahrer brutale Plünderungen und grauenhafte Massaker unter den Einheimischen verübten. Oft werden die Kreuzzüge daher als Zusammenprall zweier Weltreligionen – des Christentums und des Islams – beschrieben.

Bis heute ist die Geschichtsschreibung dieser Kriege von der europäischen Sichtweise dominiert. Islamische Quellen wurden vernachlässigt, unter anderem wegen des Fehlens verlässlicher Übersetzungen.

Paul Cobb, Professor für islamische Geschichte an der University of Pennsylvania (USA), wechselt in seinem Buch die Perspektive und fragt, wie Muslime die europäischen Invasionen im Nahen Osten zwischen dem 11. und 13. Jahrhundert wahrnahmen. Er beschreibt etwa deren Kenntnisse über Europa und seine Bewohner. Dabei zeigt sich ein Phänomen, das auch von europäischen Kulturen bekannt ist: Abgesehen von den islamischen Gebieten auf der Iberischen Halbinsel zählte Europa für die meisten Muslime des Nahen Ostens bis zum 11. Jahrhundert zur Peripherie der Welt – ein Kontinent, dessen Bild geprägt war durch eine Vermischung von Fakten und Fantasie.

Das Christentum galt in der islamischen Glaubensgemeinschaft als unter-

legen. Die Europäer, so die verbreitete Auffassung, lebten in unwirtlichen Klimazonen, seien barbarisch und rückständig. Gott habe die klimatisch angenehmen Gebiete den zivilisierten Völkern vorbehalten. Ähnlich wie mittelalterliche Autoren Europas die muslimischen Völker häufig verallgemeinernd als Sarazenen bezeichneten, galten den Muslimen die Europäer durchweg als Franken – deren kriegerische Tapferkeit man durchaus bewunderte.

Nach klassischer Zählung unternahm das christliche Abendland zwischen dem 11. und 13. Jahrhundert sieben Feldzüge in den Nahen Osten, um das Heilige Land von der muslimischen Herrschaft zu befreien. Dazu aufgerufen hatte jeweils der Papst, den die Muslime häufig mit einem Kalifen gleichsetzten. Cobb stellt in seinem Buch heraus, dass die christlichen Kreuzfahrer im Nahen Osten keineswegs auf einen einheitlichen Kultur- und Herrschaftsraum trafen. Religiös war er in Schiiten, Sunniten und deren diverse Splittergruppen gespalten, politisch untergliederte er sich in ver-

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen

schiedene Reiche mit multikultureller Bevölkerung, zu der auch Juden und Christen zählten. Die europäischen Eroberer standen vor dem Problem, mangels Arbeitskräften auf die aus ihrer Sicht eigentlich unerwünschte muslimische

und erzielten daher auch nur begrenzte Wirkung. Laut dem Autor galt das sogar für die bekanntesten Anführer der Muslime: Zangi (regierte 1127–1146), dessen Sohn Nur al-Din (regierte 1146–1174) sowie Saladin (regierte 1174–1193),

Die Muslime reagierten uneins auf die Kreuzzüge

mische Bevölkerung und deren Verwaltung angewiesen zu sein – und sie entsprechend integrieren zu müssen.

Cobb argumentiert, dass es aus diesem Grund keine einheitliche muslimische Antwort auf die europäischen Invasionen und Besetzungen gab. Zwar entstand das Ideal eines muslimischen »Gegenkreuzzugs«, doch alle islamischen Führer, die zum Heiligen Krieg (Dschihad) aufriefen, taten das letztlich aus politisch-taktischer Berechnung heraus. Zwar behaupteten sie, im Sinn der islamischen Umma zu handeln, verfolgten letztlich aber eigene Interessen

der 1187 Jerusalem von den Kreuzfahrern zurückeroberte.

Die Muslime reagierten auf die christlichen Invasionen beileibe nicht nur mit Widerstand, sondern auch mit Auswanderung (zumindest bei den Eliten), mit Akzeptanz der neuen Herren und bisweilen sogar, indem sie mit den Kreuzfahrern kollaborierten. Zeitgenössische arabische Schriftsteller warnten folgerichtig vor muslimischer Uneinigkeit, prangerten den Stolz und die Tyrannei der Franken an und beschworen die Gefahren durch religiöse Minderheiten.

Cobbs Buch richtet sich an Leser mit Vorkenntnissen, welche die europäische Geschichtsschreibung mit alternativen Sichtweisen vergleichen und bereichern möchten. Er deutet die Kreuzzüge nicht als Konflikt zwischen Christentum und Islam, sondern als machtpolitisch und wirtschaftlich geprägte Auseinandersetzungen, an denen konkrete Akteure ein Interesse hatten. Damit leistet er einen Beitrag, um das Verhältnis zwischen christlichem und muslimischem Kulturkreis aufzuarbeiten, das heute spannungsgeladener denn je erscheint. Allerdings übernimmt er in seiner Wortwahl unkritisch die Wertungen mittelalterlich-arabischer Autoren, indem er die Europäer durchgängig als Franken bezeichnet. Hier wäre eine stärkere Distanzierung von den Quellen angemessen gewesen.

Martin Schneider

Der Rezensent ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.



Nick Reimer

Schlusskonferenz

Geschichte und Zukunft der Klimadiplomatie

Oekom, München 2015

208 S., € 14,95

ÖKOLOGIE

Letzte Chance?

Auf der Pariser UN-Klimakonferenz Ende dieses Jahres soll ein neuer Weltklimavertrag beschlossen werden. Doch der Erfolg des Vorhabens scheint zweifelhaft.

Wer Weltklimapolitik verstehen will, sollte dieses Buch lesen. Es gewährt einen Blick über den Tellerrand deutscher Klimapolitik hinaus und richtet sich an alle, die sich nicht damit begnügen möchten, auf die eigenen guten Klimataten zu verweisen – etwa in Form neuer deutscher Anlagen zum Erzeugen grüner Energie, die (bei aller

Wertschätzung) nicht mehr als einen winzigen Beitrag leisten, um dem globalen Klimawandel entgegenzuwirken.

Nick Reimer, Umweltverfahrenstechniker, Journalist und viele Jahre Wirtschaftsredakteur bei der »taz«, hat ein brillantes Buch vorgelegt. Es fasst unterhaltsam, anschaulich und für Laien gut verständlich die äußerst komplexe Ge-

schichte der Klimadiplomatie und Klimapolitik zusammen. Gleichzeitig vermittelt es alle wesentlichen Informationen darüber, wie es zum Klimawandel kommt, weshalb er sich verstärkt und was man dagegen unternehmen kann. Reimer beschreibt packend die großen Momente in 20 Jahren Weltklimadiplomatie:

► Die großen Hoffnungen, geweckt von der UNCED (Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung) 1992 in Rio de Janeiro, in deren Verlauf 154 Staaten die Klimarahmenkonvention UNFCCC unterschrieben.

► Die Eröffnung der ersten Weltklimakonferenz 1995 durch die junge und engagierte Umweltministerin Angela Merkel im Berliner ICC. Das »Berliner Mandat«, an dem sie maßgeblichen Anteil hatte, brachte den »Klima-Konferenz- und Verhandlungszirkus« (Zitat des deutschen Journalisten Franz Alt) mit zuletzt über 20 000 Teilnehmern in Gang.

► Die klimadiplomatischen Sternstunden, als 1997 das Kyoto-Protokoll abgeschlossen wurde: der erste, völker-

rechtlich prinzipiell bindende Klimavertrag. Auch diesen hatte Merkel als deutsche Umweltministerin in zähen Tag- und Nachtverhandlungen maßgeblich mit durchgesetzt.

➤ Die »Schande von Kopenhagen« 2009, als der große Traum von einer echten Verbesserung der bis dato wirkungslosen Weltklimapolitik platzte.

➤ Das »Wunder von Cancun« im Jahr 2010, also die von Wissenschaftlern lange geforderte Fixierung einer Obergrenze der anthropogenen Erderwärmung von zwei Grad.

Eindrucksvoll schildert Reimer, wie Diplomaten das »Paris-Protokoll«, das im Dezember dieses Jahres beschlossen werden soll, in intensivster Arbeit vorbereiten. Sein betrübliches Fazit: Diese Übereinkunft, die das im Ergebnis wirkungslose Kyoto-Protokoll ersetzen soll, habe alle Chancen, sich als noch weniger wirksam zu erweisen.

An dieser Stelle sollte man den Text besonders aufmerksam lesen. Für das

Paris-Protokoll ist vorgesehen, das von der Weltgemeinschaft anerkannte Zwei-Grad-Ziel durch die Summe der freiwilligen »beabsichtigten national festgelegten Beiträge« zum Klimaschutz aller Einzelstaaten zu realisieren. Im Klartext: Das Kyoto-Protokoll mit seinen ohnehin schon unzureichenden Minimalverpflichtungen allein der Industriestaaten soll in Paris durch nichtverpflichtende, jederzeit widerrufbare Beiträge aller Staaten ersetzt werden.

Es handelt sich um ein Versagen der Weltklimapolitik, das auch ein Versagen der Klimawissenschaft ist. Konkrete Klimaschutzkonzepte und -empfehlungen seitens Politik und Wissenschaft liegen kaum vor, geschweige denn, dass sie energisch verfolgt werden. Die Weltklimadiplomatie kann daher beim besten Willen nicht mehr leisten, als das wenige auszuschöpfen, was Politiker ihr an Entscheidungsfreiheit zugestehen und Klimawissenschaftler ihr an konkreten Vorschlägen zuliefern. Ange-

sichts dessen schreibt Reimer ohne Ironie, dass sich die Hoffnungen der Klimawissenschaftler auf eine »Weltbürgerbewegung für den Klimaschutz« richten, die die Verfehlungen der Weltklimapolitik ausbügeln solle.

Aus dem Buch geht hervor: Alle klimadiplomatischen Anstrengungen in Richtung des Paris-Protokolls verhindern nicht, dass international weiterhin das Motto »business as usual« gilt. Und das impliziert 3,7 bis 4,8 Grad Celsius anthropogene Erwärmung bis zum Ende dieses Jahrhunderts, wie etwa der deutsche Ökonom Ottmar Edenhofer stellvertretend für den Weltklimarat zitiert.

Reimer schreibt packend und überwiegend deskriptiv-erzählend. Konzeptionelle Vorschläge, wie sich Weltklimapolitik und -diplomatie aus der Sackgasse befreien können, präsentiert er nur am Rand. Ebenso geht er nicht auf eine Frage ein, die sich förmlich aufdrängt: Hat die Weltklimapolitik, da sie so gut wie ohne wissenschaftliche Bera-

ANZEIGE

**DU DENKST
ZUKUNFT**



... ein multimediales
fachübergreifendes
Projekt zur Berufs-
orientierung und
Nachwuchsförderung
in der Sekundarstufe II

**Heute denken,
was morgen wichtig ist!
Projekttag: Morbus Alzheimer**

Projekttag in der Schule

Der multimediale und interaktive Projekttag zum Thema Alzheimer bietet ein neues Lernerlebnis in der Schule. Über eine Online-Plattform erhalten Schulen das Konzept für einen fachübergreifenden Projekttag (sechs Zeitstunden) sowie didaktisch und methodisch einsatzbereites Unterrichtsmaterial.

Schülerinnen und Schüler erarbeiten anhand der Demenzform Alzheimer eigenständig neurobiologische Vorgänge und Fehlfunktionen. Im Laufe des Tages entwickeln sie ein grundsätzliches Verständnis von Demenz und setzen sich mit dem Thema auf verschiedenen Ebenen auseinander: naturwissenschaftlich, gesellschaftlich und persönlich.



Praxistage an authentischen Orten

Leistungsbereite Schülerinnen und Schüler können im Anschluss an den Projekttag authentische Lernerfahrungen im Bereich Grundlagenforschung, Wirtschaft oder in sozialen Einrichtungen machen.

Anmeldung

Sie möchten einen Projekttag an Ihrer Schule durchführen und Zugang zu dem Unterrichtsmaterial erhalten:

carmen.schulz@dudenkstzukunft.de
www.dudenkstzukunft.de

Das Pilotprojekt
wurde gefördert von:





Melvyn Little

Antikörper in der Krebsbekämpfung – Grundlagen, Prinzipien und Anwendungsmöglichkeiten

Springer, Berlin, Heidelberg 2015. 93 S., € 24,99

Krebsmediziner richten große Hoffnungen auf monoklonale Antikörper: Proteine, die gezielt an bestimmte Molekülstrukturen binden (etwa auf Tumorzellen) und eine Immunreaktion dagegen auslösen können. Den Forschungsstand auf diesem Gebiet beleuchtet der Biochemiker Melvyn Little. Der ehemalige Krebsforscher und Gründer zweier Biotechfirmen legt etwa dar, dass man solide Tumoren bis jetzt nur schwer mit Antikörpern bekämpfen kann – teils mangels spezifischer Zielstrukturen, teils wegen ihrer kompakten Form. Immer ausgefeiltere Antikörper sollen dem abhelfen, etwa solche, die auf mehrere Strukturen zugleich zielen und/oder Killerzellen der Immunabwehr rekrutieren. Das Buch richtet sich an Fachleute mit Vorkenntnissen, auch wenn Little es versteht, komplexe Sachverhalte auf den Punkt zu bringen und das Interesse der Leser mit Anekdoten aufrechtzuerhalten. EMMANUELLE VANIET



Stefan Xenakis

Gewalt und Gemeinschaft – Kriegsknechte um 1500

Ferdinand Schöningh, Paderborn 2015. 408 S., € 46,90

Gewalt war und ist eine Handlungsoption des Menschen. In Gruppen sinkt die Hemmschwelle, sie auszuüben, wie das menschenverachtende Treiben des »Islamischen Staats« aktuell belegt. Was hält solche Gewaltgemeinschaften zusammen und wie sind sie aufgebaut? Inwieweit fördert kollektive Brutalität die Ausprägung einer gemeinschaftlichen Gesinnung? Wird Gruppengewalt kalkuliert eingesetzt? Solche Fragen beantwortet der vorliegende Band am Beispiel frühneuzeitlicher Kriegsknechte, die Töten zu ihrem Beruf machten. Er nimmt gruppenspezifische Prozesse ebenso in den Blick wie Handlungs- und Denkmuster der Täter, indem er Zeugenberichte und Korrespondenzen aus dem frühen 16. Jahrhundert mit Methoden der neueren Gewaltforschung erschließt. Ein durchaus lesenswertes Werk, das sich allerdings an ein fachnahes Publikum richtet. THEODOR KISSEL



Mara Grunbaum

Liebe Evolution, ist das dein Ernst?!

Aus dem Englischen von Antonia Zauner. Knauer, München 2015. 265 S., € 9,99

Die Entwicklung des Lebens hat allerlei Wesen hervorgebracht, die uns bizarr erscheinen. Da wäre der Dumbo-Oktopus, ein Knubbel mit Stummelärmchen, oder die Spiegelspinne, die eine Art Diskokugel als Hinterleib spazieren trägt. Nicht zu vergessen die Saiga-Antilope mit Minielefantentrüssel. Auf rund 260 Seiten mit Farbfotos stellt die amerikanische Wissenschaftsautorin Mara Grunbaum dutzende Lebewesen vor, die umwerfend hässlich, absurd dysfunktional oder äußerst komisch anmuten. In witzigen Dialogen fragt sie die personifizierte Evolution entgeistert, was diese sich dabei nur gedacht habe. Mitunter wirft sie ihr vor, merkwürdige Pillen eingeworfen zu haben oder etwas wirr im Kopf zu sein. Die launischen Antworten, die jene darauf gibt, reichen von naiv-unbeschwert über kindisch-fies bis eingeschnappt. Ein Buch, bei dem es auf jeder Seite etwas zu lachen gibt. STEFANIE REINBERGER



Edelgard Seggewiße, Hans-Peter Wymann

Schmetterlinge entdecken, beobachten, bestimmen – Die 160 häufigsten tagaktiven Arten Mitteleuropas

Haupt, Bern 2015. 376 S., € 29,90

Das handliche Nachschlagewerk eignet sich für frischgebackene wie fortgeschrittene Schmetterlingsliebhaber. Beide Autoren haben langjährige Beobachtungserfahrung und stellen 160 tagaktive Falter auf je doppelseitigen Porträts vor, sortiert und farblich gekennzeichnet nach Familien. Jedes Porträt enthält Zeichnungen der adulten Tiere beider Geschlechter, manchmal auch Farbfotos. Darunter findet man Angaben zu Vorkommen, Jahres- und Tageszeitaktivität, Ernährung, Eiablage, Revierpräferenz und typischen Erkennungsmerkmalen. Zudem gehen die Autoren auf Raupenstadien und Überwintungsformen ein. Eine kurze Einführung in die wichtigsten Schmetterlingsfamilien und -unterfamilien nebst deutschem und lateinischem Register vervollständigen das Buch sowie den guten Gesamteindruck. Die »Begleit«-App zum Werk ist mit diesem weitgehend deckungsgleich, schlägt allerdings noch einmal mit € 9,99 zu Buche. Ob Buch oder App: Wer Schmetterlinge beobachten möchte, ist mit beiden gut gerüstet. ARNE BAUDACH

tung auskommen musste, sich nicht von Anfang an auf den Holzweg einzelstaatlicher Verpflichtungen und Beiträge begeben? Allerdings kann man von Reimer auch keine Wunder verlangen. Es ist ihm schwerlich vorzuhalten, kein Patentrezept gegen den Klimawandel

zu haben: Die weltweite Klimawissenschaft liefert es trotz multimilliardenschwerer Finanzierung seit Jahren nicht.

»Schlusskonferenz« ist ein packendes Werk und allen zu empfehlen, die sich für den Klimaschutz engagieren.

Lutz Wicke

Der Rezensent ist Direktor des Instituts für Umweltmanagement an der privaten Wirtschaftshochschule ESCP Europe in Berlin und ehemaliger Staatssekretär im Land Berlin (Senator für Stadtentwicklung und Umweltschutz).



Ralf Bürglin

Sie sind wieder da

Bär, Luchs und Wolf erleben

Kosmos, Stuttgart 2015

160 S., € 29,99

BIOLOGIE

Rückkehr der großen Räuber

Ein Journalist und Biogeograf beschreibt, wo Bären, Luchse und Wölfe in Europa vorkommen – und wo sie sich wieder ansiedeln.

Der Buchtitel gilt für ganz Europa, aber nicht für Deutschland und mehrere andere Länder, in denen das Überleben von Bär, Luchs und Wolf keineswegs sichergestellt ist, weil die breite Akzeptanz dieser Tiere in der Bevölkerung (noch) fehlt. Bär »JJ1«, besser bekannt als »Bruno«, kam aus der Nähe von Trient bis ins Grenzgebiet zwischen Österreich und Deutschland. Seine beachtliche Schadensbilanz (er schlug Haus- und Nutztiere, vor allem Schafe) machte ihn zum »Problembären«, und er wurde erlegt. Bruno war seit mehr als 170 Jahren der erste Braunbär gewesen, der in Deutschland wieder in freier Wildbahn auftrat. Nicht viel besser sieht die Bilanz für Wölfe und Luchse aus: Von den Ersten wurden seit 1998 zwischen Schleswig-Holstein und Polen etwa 300 Individuen gezählt, inklusive aller Jungtiere; die Letzten sind noch

seltener und auf einige Mittelgebirge beschränkt.

Ralf Bürglin, Biogeograf, Journalist und Fotograf, wirbt im vorliegenden Buch für »Die Großen Drei«, ohne die Probleme zu verschweigen, die mit ihrer Wiederkehr künftig zu erwarten sind. Laut einem Interview, das am

Ende des Werks abgedruckt ist, möchte er die Begeisterung weitergeben, die er bei seinen Begegnungen mit diesen Tieren an vielen Orten in Europa und Nordamerika erlebt hat. Seine Erlebnisse und Fotos davon machen den Hauptteil des Buchs aus.

Zunächst beschreibt Bürglin die wichtigsten Kennzeichen dieser drei Tierarten, dann ihre Lebensweisen und Jagdmethoden. Außerdem geht er darauf ein, wie sich ihre Fußspuren, Losungen und Risse lesen und deuten lassen, was für ihr Auffinden unerlässlich ist. Hier zeigt sich die enorme Erfahrung des Autors, und man erfährt vieles, das in anderen Büchern völlig fehlt. Die Abbildungen dazu sind beeindruckend und ergänzen den Text hervorragend.

Sodann befasst sich der Journalist mit einer wesentlichen Frage: Wie kommen Mensch und Tier zu einer Koexistenz? Beim Luchs ist sicher kaum Widerstand zu erwarten – außer seitens der Jäger, denn ein Weibchen mit Jun-



Wölfe sind raffinierte Jäger. Im Winter versuchen sie Huftiere auf Eisflächen zu treiben, wo diese leicht ausrutschen.



Wilde Braunbären (links) ernähren sich überwiegend pflanzlich. Doch sie fressen auch große Säugetiere, die sie durch Hiebe mit

ihren Tatzen (rechts) auf Kopf oder Nacken töten. Die Beutetiere tragen dabei häufig Schädel- oder Wirbelsäulenbrüche davon.

gen schlägt rund 60 Rehe pro Jahr. Diese Raubkatzen wirken selbst ausgewachsen noch geradezu niedlich mit ihrem kuscheligen Fell, den Schnurrhaaren und Pinselohren. Zudem sind sie sehr scheu und meiden den Menschen, wo immer es geht. Sogar wenn sie im Gehege aufgezogen wurden, verlieren sie nach dem Auswildern schnell ihre Zutraulichkeit. Begegnungen mit ihnen sind in freier Wildbahn also extrem unwahrscheinlich.

Ganz anders sieht das beim Wolf aus. Die tief sitzende Abneigung gegenüber diesen wunderbaren Tieren stammt aus einer Zeit, als eine echte Nahrungskonkurrenz zwischen ihnen und armen, hungernden Menschen bestand, weil das Wild knapp war und die Wölfe daher massenhaft Nutztiere rissen. Heute gibt es zwar wieder reichlich Wild, aber Schafe auf einer Weide sind für *Canis lupus* eine viel leichtere Beute. Mitten in der Kulturlandschaft und nahe der Stadt Diepholz hat im März dieses Jahres ein Wolf 60 Schafe getötet. Der Schaden wird zwar ersetzt, aber das ist keine befriedigende Lösung.

Der Naturschutzbund Deutschland (NABU) wirbt seit 2005 mit einer Kampagne unter dem Motto »Willkommen Wolf«. Die hat der aber wahrscheinlich gar nicht nötig, denn er breitet sich selbstständig weiter aus und braucht nach Erfahrungen aus anderen europäischen Ländern auch keine dünn besiedelten Gebiete, um reproduktionsfähige Populationen aufzubauen. Wölfe

sind gesetzlich streng geschützt, doch für »Risikotiere«, also Individuen, die ein gefährliches Verhalten an den Tag legen, wird es nach Ansicht des Autors keine Alternative zum Abschuss geben. Auch die sorgfältige Kontrolle der Bestände und das unverzügliche Vergrämen (Verscheuchen) der Tiere, wenn sie Menschen begegnen, seien erforderlich. Sonst verlören sie die Scheu und näherten sich menschlichen Siedlungen, so dass »am Ende viel mehr Wölfe getötet werden müssen«, zitiert Bürglin den amerikanischen Verhaltensforscher David Mech, den wohl besten Wolfskenner der Welt.

Wilde Bären sind bislang kein Thema in Deutschland. Aber das kann sich ändern. In Slowenien, etwa ein Drittel so groß wie Bayern, leben etwa 450 dieser Tiere. Um den Bestand zu regulieren, werden jährlich 80 bis 100 zum Abschuss freigegeben und zu Wurst und Schinken verarbeitet. Westliche EU-Länder protestieren dagegen, was die dortige Forstbehörde lapidar reagieren lässt: »Da kommen Länder wie die Niederlande und Deutschland mit dicken Papieren, wie wir unsere Bären managen sollen. Aber der Unterschied ist: Wir machen das seit 100 Jahren so und haben viele Bären. Und sie? Sie haben Papiere, aber keinen einzigen Bären.«

Wenn der Autor seine Begegnungen mit den »Großen Drei« beschreibt, gibt er Tipps zum Beobachten und Fotografieren und erzählt von Wildbiologen, die sich professionell mit diesen Tieren

beschäftigen, etwa um deren genetische Merkmale über DNA-Analysen sowie deren Verhalten zu dokumentieren. Zudem schildert Bürglin seine Recherchen und präsentiert Einzelheiten zu bestimmten Beobachtungsorten und Landschaften. Manchmal weicht er vom Thema ab, beispielsweise wenn er über Vielfraße und Eisbären berichtet. Seine oft fantastischen Bilder nehmen einen großen Raum im Buch ein; man sieht ihnen an, dass sie in freier Natur unter schwierigsten Bedingungen entstanden sind und nicht in »kontrollierter« Umgebung wie Gehegezonen oder Tierparks. Den Abschluss bildet eine Karte mit allen Beobachtungsorten, die der Autor im Werk beschreibt, mit nützlichen Internetadressen und einer Sammlung von 13 QR-Codes, über die man Tonaufnahmen der Tiere mit Hilfe einer kostenlosen App anhören kann.

Einen Wermutstropfen gibt es: Das verantwortliche Layout hat ganze sieben Doppelseiten (für die Gliederung des Buches nach Kapiteln) für richtig große Abbildungen verschwendet, indem es über die Bilder dort einen farbigen Filter legte und darauf noch ein diagonales Raster aus weißen Linien. Warum glaubt man, dass man die wundervolle Natur so noch »schöner« machen kann?

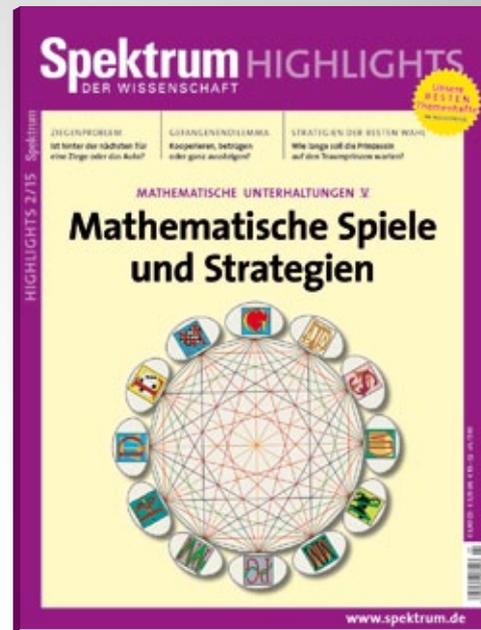
Jürgen Alberti

Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.

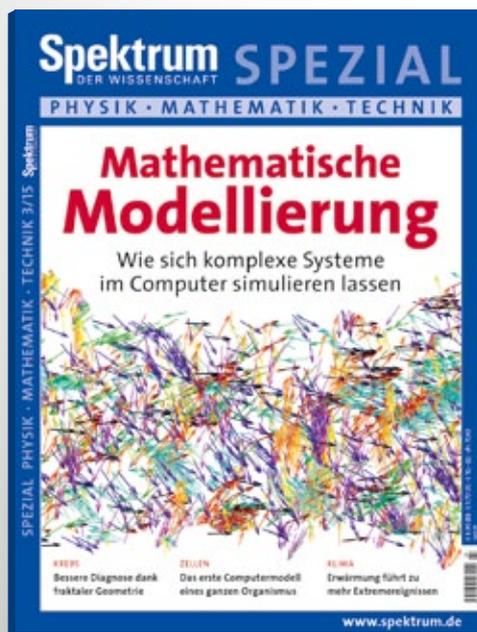
Unsere Neuerscheinungen



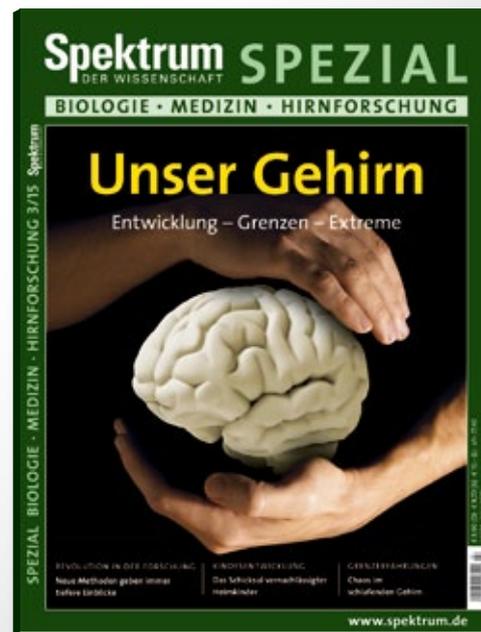
Warum Intimität Grenzen braucht • Online-Partnerbörsen: Chancen und Gefahren • Von Hetero bis Homo: Wie wir unsere sexuelle Orientierung finden • € 8,90



Neidfreies Teilen: Gerechtigkeit unter Gaunern • Fehler korrigierender Code: Das Hutproblem • Iteriertes Gefangenendilemma: Altruismus mit Kündigungsmöglichkeit • € 8,90



Strömungstechnik: Der Weg zum schwimmenden Nanoroboter • Molekulardynamik: Die Geheimnisse des Lebens simulieren • Krebs: Berechnung eines Tumors • € 8,90



Die Sprache des Gehirns • Im Kopf herrscht niemals Ruhe • Hirnstimulation: Unter Strom • Die genetische Kartierung des menschlichen Gehirns • € 8,90

Alle Hefte auch im Handel erhältlich!

So einfach erreichen Sie uns:

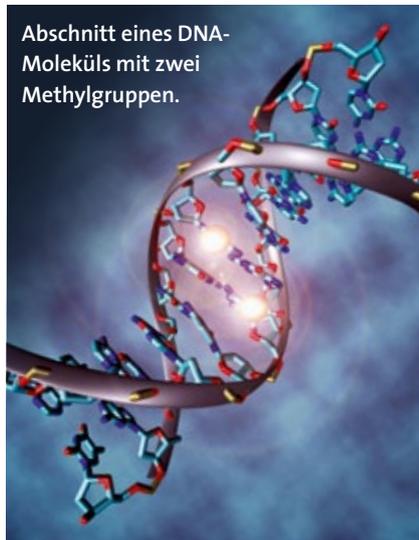
Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!





Abschnitt eines DNA-Moleküls mit zwei Methylgruppen.

Wo sitzt die Methylgruppe?

Der Biologe Michael K. Skinner erklärte, wie Chemikalien, Stress und andere Einflüsse über Generationen das Erbgut verändern können («Vererbung der anderen Art», Juli 2015, S. 18).

Christine Stichel-Günkel, Bergisch-Gladbach: In der Abbildung auf S. 18 wird die Methylierung direkt in der Base Cytosin gezeigt, in der Abbildung

auf S. 22 sitzt die Methylgruppen jedoch an dem Phosphat-Desoxyribose-Rückgrat. Was ist richtig?

Antwort der Redaktion: Tatsächlich wird die Base Cytosin selbst methyliert, wie es die detailliertere Grafik S. 18 darstellt. Die Grafik S. 22 ist schematisch und vereinfachend und soll nur das Prinzip zeigen; aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde dort die Methylierung an den Rand der Helix gezeichnet, so dass der falsche Eindruck entstehen könnte, das Rückgrat würde methyliert.

Kryoelektronentomografie als Alternative

Laut dem Quantenphysiker Joachim Schulz können sehr kurze intensive Röntgenpulse hoch aufgelöste Bilder einer lebenden Zelle liefern («Mit Röntgenblitzen ins Zellinnere blicken», Forschung aktuell, Mai 2015, S. 17).

Harald Engelhardt, Martinsried: Joachim Schulz vergleicht die Möglichkeiten des Freie-Elektronen-Lasers (FEL) mit der Abbildung durch die Lichtmikroskopie und stellt die mit 75 bis 130

Nanometern erzielte Auflösung eines Zyanobakteriums als Schritt auf dem Weg zur atomaren Rekonstruktion komplexer biologischer Objekte dar. Der Autor verkennt leider völlig, dass natürlich auch Elektronen biologische Zellen wie Bakterien durchstrahlen können und unmittelbar interpretierbare Bilder (ohne Phasenproblem) liefern.

Die Zellen werden mit geringem Aufwand schockgefroren und bieten eine Momentaufnahme eines lebensnahen Zustands. Mehr noch, mit der Technik der Kryoelektronentomografie (CET) erzielt man heute 3-D-Rekonstruktionen intakter Zellen von einigen hundert Nanometern Dicke mit einer Auflösung von unter zwei Nanometern und kann die Struktur von Proteinkomplexen im Zellinneren erkennen und identifizieren.

Auch potenziell atomare Auflösung hilft letztlich nicht viel, wenn nur eine Aufnahme in Strahlrichtung aufgezeichnet wird. Denn hier überlagern sich die Moleküle und liefern kein interpretierbares Signal. Um Strukturen in der Rekonstruktion räumlich voneinander trennen zu können, ist die Kombination von Aufnahmen aus ver-

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

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer

Art Direction: Karsten Kramarzik

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

Redaktionsassistentz: 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 Black

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit:

Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer,

Dr. Manfred Stern, 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 gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Prof. Dr. Carsten Könneker.

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

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

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

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

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

sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart,

IBAN: DE5260100700022706708, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und

Biomedizin in Deutschland (VBIO) und von Mensa e. V. erhalten

sDw zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe

Handelsblatt GmbH, Gesamtanzeigenleitung: Michael

Zehentmeier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887-97-8550;

Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg,

Tel. 040 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk:

Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67,

40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 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 Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven

Inchcombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice

President and Associate Publisher, Marketing and Business

Development: Michael Voss



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



schiedenen Richtungen notwendig. Und die müssen gleichzeitig aufgezeichnet werden, denn für einen weiteren »Schuss« gibt es die Zelle nicht mehr (destruction after diffraction). Bleibt die atomare 3-D-Zellrekonstruktion mit dem FEL deshalb Illusion? Das wird die Zukunft zeigen. Jedenfalls ist es nützlich zu wissen, dass es in Deutschland mehr Transmissionselektronenmikroskope mit CET-Anwendung gibt als weltweit Synchrotron-Strahlquellen mit geeignetem FEL.

Vage Befürchtungen

Bedroht das geplante Handelsabkommen TTIP zwischen den USA und der EU die Unabhängigkeit der wissenschaftlichen Forschung? Das fragte unser Kolumnist Michael Springer (Springers Einwüfe, Juli 2015, S. 16).

Horst Maess, Schorndorf: Michael Springer setzt sich mit TTIP auseinander, wofür noch kein Vertragstext vorliegt. Eingangs wiederholt er vage Befürchtungen, die schon oft von interessierten Seiten vorgebracht und größtenteils von Fachleuten zerstreut wurden. Neu ist, dass er in den USA Tendenzen zu einer Unterordnung der Wissenschaft unter die Wirtschaft feststellt, die über TTIP auch auf Europa übergreifen könnten. Konkret nennt er in diesem Zusammenhang zum einen die Verteilung der Gelder in der National Science Foundation. Er legt aber keine Zahlen vor, die eine Beurteilung der Tendenz ermöglichen würden. Dass man über die Verteilung öffentlicher Gelder diskutiert, halte ich für eine Selbstverständlichkeit.

Zum anderen weist er auf Bestrebungen hin, die das wissenschaftliche Beratergremium der US-Umweltbehörde EPA verändern wollen. Auch hier fehlt eine konkrete Information, wie das Gremium bisher besetzt ist und wie es verändert werden soll. Eine »feste Quote« für die Wirtschaft ist meines Erachtens kein Grund zur Beunruhigung. Wenn 15 US-Forscher deswegen Alarm schlagen, ist das wenig Besorgnis erregend, weil die Zahl eher im Promillebereich

aller amerikanischen Forscher liegen dürfte. Und über die Qualität dieser Forscher ist damit nichts ausgesagt.

Natürlich steht es einer wissenschaftlichen Zeitschrift gut an, intensiv über so ein wichtiges Abkommen wie TTIP zu informieren. Allerdings sollte das dann auch wissenschaftlichen Maßstäben gerecht werden und zumindest von Fakten ausgehen, die in einem Vertragstext festgelegt sind, der erst Monate später von den Parlamenten beschlossen oder abgelehnt wird.

Kein Kunstwort

Der Chemie-Nobelpreisträger Roald Hoffmann erzählte, wie es der Alchemist Johann Friedrich Böttger schaffte, Porzellan herzustellen (»Meißner Chymie«, Juli 2015, S. 74).

Udo Becker, Marburg: Folgende Bemerkung hat mich irritiert: »Die Wissenschaftshistoriker William R. Newman von der Indiana University in Bloomington und Lawrence M. Principe von der Johns Hopkins University in Baltimore haben für den damaligen Zustand des Fachs das hübsche Kunstwort Chymie vorgeschlagen.«

Der weltweit erste universitäre Lehrstuhl für Chemie wurde 1609 in Marburg/Lahn eingerichtet. Lehrstuhlinhaber war Johannes Hartmann, sein Laboratorium chymicum publicum war in einem säkularisierten Franziskanerkloster untergebracht. Ich selbst besitze ein Buch mit dem Titel »Lehrbuch des chymischen Teils der Physik« von I.K.P. Grimm, Professor der Physik in Breslau, 1798. Wenn man nach dem Begriff im Internet sucht, wird man bald sehen, dass das Wort Chymie keineswegs ein Kunstwort ist.

Errata

»Die verkannte Schwester der Fibonacci-Folge«, Mai 2015, S. 64

In der Abbildung g, S. 68 muss die Zahl unterhalb von 3/11 (links unten) 3/14 heißen, nicht 3/4, und die Zahl unterhalb von 9/2 muss 11/2 heißen, nicht

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

11/12. Thomas Schirmer aus Darmstadt hat uns darauf hingewiesen.

»Besser als die Erde«, Juli 2015, S. 42

Auf S. 44 rechte Spalte oben muss es heißen: »Während des Karbon etwa, der Zeit vor 350 Millionen Jahren bis vor 300 Millionen Jahren, ...«.

»Das Orakel«, August 2015, S. 56

Auf S. 59, rechte Spalte, erster Absatz nach der Zwischenüberschrift muss es heißen »Primzahlpotenzen, darunter 29, 17³ und 23⁶« (nicht »173 und 236«). Fritz Diem aus München hat uns auf den Fehler aufmerksam gemacht.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

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

FIREWALL UMS HERZ

VON J. J. ROTH

Zora weiß es noch nicht, aber ich werde ihr Herz befreien.

Es liegt in einem verschlüsselten Käfig gefangen, dessen Kode in ihr Nervensystem eingebaut wurde und sie vor Schurken, Emporkömmlingen und allen anderen schützen soll, die nach Meinung ihres Vaters ihrer Zuneigung unwürdig sind. Ungeeignet als Ehemann. So wie ich.

Nach der Vorlesung in Verfassungsrecht hole ich Zora auf der Treppe der Langdell Hall ein. Leichter Schneefall legt weiße Schleier über den Innenhof.

Eine Bö weht ein Ende von Zoras kamelfarbigem Kaschmirschal über die gepolsterte Schulter ihres Mantels und enthüllt den rasierten Fleck auf ihrem Nacken.

Ihr Haar wächst wieder nach – bis auf die dünne silbrige Narbe unten am Hinterkopf. Ein kleiner kreisförmiger Stecker markiert ihren Mittelpunkt.

Vor einem Monat – bevor ihr Vater von unserer Verlobung erfuhr und drei muskulöse Angestellte in dunklen Anzügen losschickte, um Zora aus der Vorlesung über Kartellrecht zu zerren und in eine Limousine zu stoßen – hatte sie keinen rasierten Fleck, keine Narbe, keinen Stecker.

Vor einem Monat duckten wir uns während der Vorlesungen über Firmenrecht auf den hinteren Bänken, hielten Händchen und machten uns lustig über die riesigen Ölgemälde an der Wand hinter dem Professor. Berühmte alte Männer, die noch immer dort hängen –

fünf Jahrzehnte, nachdem die juristische Fakultät erstmals einen weiblichen Dekan bestellt hatte. Männer wie Zoras Vater, dem halb Massachusetts gehört und der noch viel mehr kontrolliert.

»Kann ich dir helfen, Peter?«

Sie schenkt mir nicht das ironische, verschwörerische Lächeln, das ich so liebe. Streckt nicht ihre sommersprossige Hand nach mir aus, deren Nägel kurz geschnitten sind, damit ihr Mozarts Klaviersonaten leichter aus den Fingern perlen. Besucht mich nicht wie so oft in den vergangenen zwei Jahren in meiner winzigen Studentenbude in der Summer Street, damit wir uns lieben, bevor wir miteinander Gesetze büffeln. Sie wird in ihre vorbestimmte Welt zurückkehren, wird vergessen, dass wir je ein Wort gewechselt haben, und mich allein in meiner elenden Leere zurücklassen.

»Nein, es ist ...«

»Was?«

»Es ist kalt. Du verlierst dein Halstuch. Komm.«

Auf die Chance habe ich gewartet. Ich ordne ihren Schal, der wolkenweich, warm von Zoras Haut und nach Gardinen duftend um ihren Hals liegt. Heimlich taste ich nach dem Stecker. Es dauert nur einen Augenblick, das in meiner Hand versteckte winzige Gerät einzustöpseln, seinen Inhalt zu laden und es wieder zu entfernen.

»Liebst du mich?« Ausnahmsweise brenne ich darauf, kein Ja zu hören. Denn alles außer Ja aktiviert den Wurm.

»Du siehst müde aus, Peter. Geh heim.«

Zoras linke Braue zuckt zweimal, während sich die Software in ihr System gräbt. Ich reibe mir die übermäßigen Augen. »Klar, das mache ich.«

Sie entschuldigt sich und geht in Richtung Harvard Square davon. Ich spüre in ihrer höflichen, distanzierten Abschiedsbemerkung eine leichte magnetische Abstoßung. Wir sind zwei positiv geladene Enden eines seltenen Metalls, die sich nahekommen.

Das war nicht Zora, die da gesprochen hat. Ein digitaler Keuschheitsgürtel wählt ihre Worte, diktiert das kühle Timbre ihrer Stimme. Sie steckt in einem inneren Gefängnis. Dessen Kode flüstert ihr bloß ein, dass sie meint, was sie sagt.

Der Schnee fällt dichter, als ich meinen Bus besteige. Über dem Union Square erhebt sich das Prospect Hill Monument wie eine mittelalterliche Burg. Als das Gemäuer im vereisten Busfenster auftaucht, denke ich: Seit mächtige Männer auf Erden wandeln, haben sie mit allen Mitteln die Sehnsucht ihrer Töchter kontrolliert, um passende Bündnisse zu knüpfen und die politischen Folgen zu beherrschen: Krieg, Eroberung, Verfolgung, religiöse Bekehrung, den wirklichen oder eingebildeten Sturz ihrer Reiche.

Sie sind so sehr damit beschäftigt, Fallen zu stellen, ihr Territorium gegen wilde Horden zu verteidigen, dass sie den einzelnen Krieger im Schatten

übersehen. Er wartet, bis sich die Zugbrücke senkt, und schleicht hinein, während die Kavallerie mit Getöse ausreitet.

Jetzt muss ich den Schild dieses einsamen Kriegers ergreifen.

Mein Bus hält. Ich stapfe durch den Matsch zum Haus in der Summer Street und steige in den ersten Stock. Mein schäbiges Zimmer war früher fröhlich, erhellt von Zoras Gegenwart. Jetzt ist es düster, leer, wie tot.

Ich setze meine Virtual-Reality-Brille auf und mache mich auf eine weitere lange Nacht gefasst.

Ohne Zoras und ihres Vaters Wissen bin ich Omega, der selbst ernannte Fluch aller Netzsicherheitssysteme und internationalen Virenschutzagenturen.

Omega verschwand, als ich mit dem Jurastudium begann. Vor einem Monat tauchte er wieder auf, tippte Nacht für Nacht bis zum Morgengrauen auf sein Touchpad und konstruierte einen Wurm. Das erklärt meine Übermüdung – und den Schraubstock, der mein Herz jedes Mal zusammenpresst, wenn ich an Zora denke.

Der Wurm ermöglicht einen Frontalangriff auf den Algorithmus, den Zoras Vater zum Preis einer kleinen Insel bestellt hat, auf die Festung, in der Zoras Wesen versteckt ist, ihr Gemüt. Jede Zeile, die ich tippe, jedes Portal, das ich öffne, bringt mich dem Ort näher, an dem sie sich des Gefühls erinnert, das ich niemals vergessen kann.

Ich lenke den Wurm und denke: Wir definieren die Tiefe der Liebe als die

Entschlossenheit, mit der wir um sie kämpfen, mögen die Chancen noch so schlecht stehen. Ich habe keine andere Wahl als den Kampf. Scheitern kommt nicht in Frage.

Zoras Nervensystem erscheint als ein langer Flur mit vielfarbigen Türen. Ich laufe den Gang entlang und stoße unterwegs Türen auf. Hinter einer werde ich ihr Gehirn finden. Die Gefangeneninsel. Wo Striatum und Hippocampus schmachten.

Dann beginn die eigentliche Arbeit.

Hinter einer goldenen Tür pulsieren und summen in Säulen aus Kristall Zoras Hirnstrukturen, die Sehnsucht, Liebe und Gedächtnis steuern.

Fragmentarische Bilder und Töne wirbeln durch ihre Gedächtnissäulen. Undeutlich taucht mein Ebenbild auf. Ich sitze unter einem Baum während der Einführungsveranstaltung zum Jurastudium und kichere über Zoras klischeehafte Witze; einer handelt von einem Anwalt und einem Hai.

Ich lausche ihren erinnerten Überlegungen.

»Peter ist recht lustig. Und warum nicht? Eine Affäre mit ihm würde Papa so richtig auf die Palme bringen.«

Die Worte treffen mich wie ein Schlag. Einen Augenblick später begreife ich. Und fälle einen Entschluss. Wen kümmert, wie wir angefangen haben? Auf das Ende kommt es an.

Zora weiß es noch nicht, aber heute werde ich ihr Herz befreien.

Sie schuldet mir eine Erklärung. 

DIE AUTORIN

J.J. Roth ist das Pseudonym einer Harvard-Absolventin, die mit ihrem Freund und zwei Söhnen im kalifornischen Silicon Valley lebt. Sie arbeitet als Anwältin für eine große Technikfirma.

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.

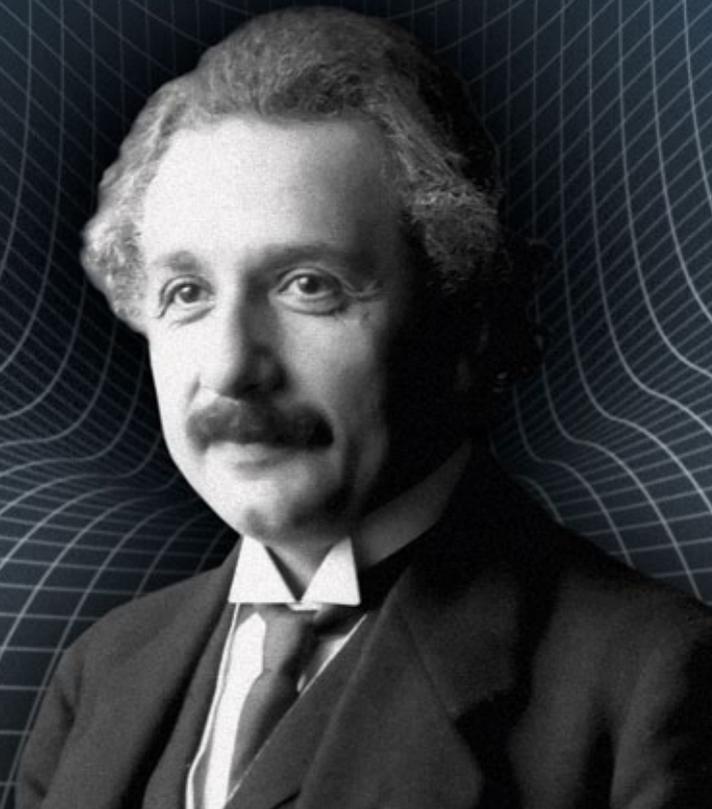
© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 522, S. 512, 25. Juni 2015

Einsteins Raumzeit wird 100

Im November 1915 stellte Albert Einstein seine allgemeine Relativitätstheorie vor, in der er die Gravitation als Krümmung der Raumzeit auffasste. Bis heute hielt sie jeder Überprüfung stand – doch einige ihrer Vorhersagen geben Physikern noch immer Rätsel auf.



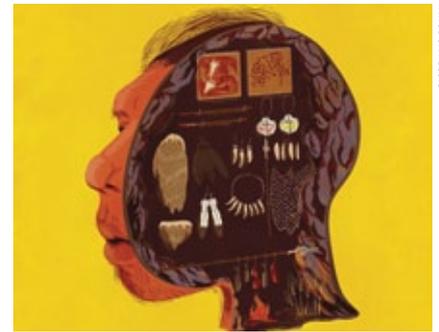
EINSTEIN: FERDINAND SCHMUTZER, 1927 / PUBLIC DOMAIN; GKRÜMMTE FLÄCHE: ISTOCK / BEHOLDINGEYE [M]; COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Biologische Zeitmesser

Die innere Uhr im Gehirn ist der wesentliche Taktgeber unseres Körpers. Doch auch in Leber, Bauchspeicheldrüse und anderen Organen finden sich biologische Zeitmesser – bis hinunter zu zellulären Uhren. Ist deren Synchronisation mit dem Gehirn gestört, steigt das Risiko, schwer zu erkranken.

Tierische Transplantate

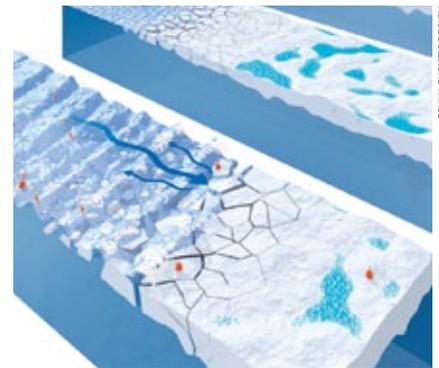
Im Labor wurden fremde Organzellen bereits in Mäusen, Ratten und anderen Tieren gezüchtet. Bald wird es möglich sein, eine menschliche Niere in einem Schwein wachsen zu lassen. Dieses »Organ-Farming« erzeugt Mischwesen zwischen Mensch und Tier. Wie sind solche Entwicklungen ethisch zu beurteilen?



GORDANO POUINI

Die unterschätzte Kultur der Neandertaler

Offenbar besaßen sie mehr Geist als bisher angenommen. Auch steigerten sie manche Fertigkeiten nicht erst nach dem Kontakt mit dem *Homo sapiens*. Warum aber unterlagen sie dann in der Konkurrenz mit Letzterem?



BRIAN CHRISTIE DESIGN

Wellen als arktische Eisbrecher

Das Meereis am Nordpol schwindet schneller, als die Modelle der globalen Erwärmung vorhersagen. Der Grund könnten zerstörerische Wellen sein, die es hier früher nie gab. Sie entwickeln sich in den offenen Wasserflächen, welche durch die Eisschmelze entstehen.

NEWSLETTER

Möchten Sie immer 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!



Buch »Die verborgene Wirklichkeit«:

Brian Greene zeigt hier, dass die Idee des Multiversums nicht nur Stoff für Sciencefiction-Romane ist, sondern ein wichtiges Forschungsfeld der Physik, das unseren Blick auf die Welt und unser Verständnis der Wirklichkeit erweitert.

JAHRES- ODER GESCHENKABO

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger als der 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. Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM

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

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!



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