

Spektrum

der Wissenschaft

Quantenverschränkte Schwarze Löcher

So wollen Physiker das
Rätsel der Raumzeit knacken

8,50 € (D/A/L) · 14,- sFr. · D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



- MEDIZIN** 120 Jahre alt werden – gesund!
- TECHNIK** Fusionsreaktoren im Miniformat
- NEUROWISSENSCHAFT** Das Gehirn durchsichtig machen

Spektrum gibt es auch digital.



Das Digitalabo von **Spektrum** der Wissenschaft kostet
im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-).

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/digitalabo





EDITORIAL TIEFER BLICK INS GEHIRN

Von Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Für mich als ehemaligen Neurobiologen wird es immer besonders spannend, wenn neue Methoden bisher unmögliche Einblicke in unser Denkorgan erlauben. Ein wahrer Pionier auf diesem Gebiet ist Karl Deisseroth, Professor für Biotechnologie und Psychiatrie an der kalifornischen Stanford University. Bekannt wurde er vor einigen Jahren mit seiner Entwicklung der Optogenetik (siehe **Spektrum** 2/2011, S. 22), vom Fachblatt »Nature Methods« 2010 zur Methode des Jahres gekürt. Diese Technik erlaubt es, spezifische Nervenzellen im lebenden Gehirn gezielt zu aktivieren oder auszuschalten und darüber etwa Verhaltensweisen bei Labormäusen wie auf Knopfdruck auszulösen. Das sorgte über die Neuroszene hinaus für Furore – und für eine Flut an faszinierenden Forschungsergebnissen.

Andere Wissenschaftler hätten sich vielleicht für den Rest ihrer Laufbahn auf das weitere Verfeinern und Optimieren optogenetischer Ansätze beschränkt. Aber Deisseroth ruhte sich nicht auf seinen Lorbeeren aus; stattdessen setzte er eine weitere Idee in die Tat um: Nervengewebe so weit für Licht durchgängig zu machen, dass man einzelne Neurone auch in tieferen Schichten studieren kann.

Denn das Gehirn ist ein ausgesprochen undurchsichtiges Organ – im doppelten Wortsinn. Zum einen rätseln Forscher immer noch über seine genaue Funktionsweise, allen wissenschaftlichen Anstrengungen und internationalen Großprojekten zum Trotz. Es herrscht also dringender Bedarf an innovativen Methoden, die einen frischen Zugang zu seiner Erforschung bieten. Zum anderen ist das Gehirn auch tatsächlich undurchsichtig, also opak. Das stellt für Hirnforscher eine nahezu unüberwindbare Hürde dar, die Abläufe in der Tiefe des lebenden Gehirns zu verfolgen – bis jetzt. Wie es Deisseroth gelang, dieses Problem zu lösen, berichtet er ab S. 34.

Auch im Artikel ab S. 60 geht es um neue Technologien, die für einen Durchbruch sorgen sollen – hier allerdings auf dem Gebiet der Kernfusion. Das Ziel lautet, durch kontrolliertes Verschmelzen von Atomkernen, wie dies in Sternen geschieht, die Energiesorgen der Menschheit ein für allemal zu beseitigen. Da aber die bisherigen Mammutprojekte wie ITER nur äußerst zäh vorankommen, versuchen einige kommerzielle Unternehmen es jetzt mit wesentlich weniger aufwändigen Ansätzen, die vielleicht schneller zum Ziel führen werden. Die ersten Etappenerfolge klingen jedenfalls schon einmal recht viel versprechend.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihr



NEU AM KIOSK AB 27. 1. 2017!

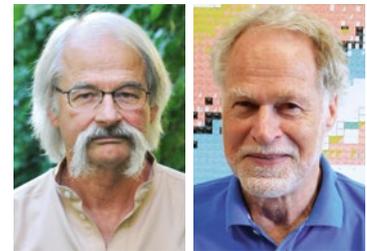
Wie Lebewesen selbst in extremen Umwelten existieren können, erfahren Sie in unserem **Spektrum** Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung 1.17.

AUTOREN DIESER AUSGABE



JUAN MALDACENA

Einflussreiche Arbeiten des Stringtheoretikers prägen seit 1997 die Diskussionen über mögliche Wege zu einer Theorie der Quantengravitation. Ab S. 12 erläutert er seinen neuesten Ansatz.



THOMAS FAESTERMANN GUNTHER KORSCHINEK

Die beiden Kernphysiker untersuchen, inwiefern sich Explosionen relativ naher Sterne in der jüngeren Erdgeschichte niedergeschlagen haben (S. 50).



JOSEF FISCHER

Mit trutzigen Festungen prägte die mykenische Kultur das frühe Griechenland, bis sie um 1200 v. Chr. binnen kurzer Zeit unterging. Der Althistoriker von der Universität Passau stellt ab S. 78 verschiedene Erklärungsmodelle vor und prüft ihre Plausibilität.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Dinofedern in Bernstein

Räuberische Riesenmantas

Zika-Virus attackiert
Gliazellen

Magnetfeld verzerrt
Quantenvakuum

Risikoreicher Wechsel am
Steuer

Verschmähtes Silizium

Extrem alte Muscheln als
Klimaarchive

24 FORSCHUNG AKTUELL

Gefahrensignale aus sterbenden Zellen

Die Körperabwehr attackiert
nicht das Fremde, sondern
das Gefährliche

Schwefelionen statt Dunkler Materie

Rätselhaftes kosmisches
Signal stammt von stark
geladenen Atomkernen

Die ersten Menschen Nordamerikas

Neue Daten aus Umwelt-
DNA und Pollenanalysen in
der Diskussion

Vorteilhafte Vielfalt

Bakterien mit identischem
Erbgut profitieren von
Abweichlern

33 SPRINGERS EINWÜRFE

Überraschungen aus der Handy-Forschung

Wer vom Mobiltelefon
wirklich profitiert

41 FREISTETTERS FORMELWELT

Der goldene Schnitt

... ist die irrationalste Zahl
von allen

58 SCHLICHTING!

Anhänglicher Schnee

Flüssiges Wasser klebt
Eiskristalle aneinander

12 WURMLÖCHER **VERSCHRÄNKTE SCHWARZE LÖCHER**

Die Quantenmechanik ermöglicht seltsame Verknüpfungen zwischen Teilchen, die Relativitätstheorie wiederum gestattet Abkürzungen zwischen Regionen der Raumzeit. Sind beide Phänomene miteinander verwandt?

Von Juan Maldacena

20 GRAVITATIONSTHEORIE **MIT QUANTENBITS ZUR RAUMZEIT**

Astrophysiker und Quantenforscher untersuchen gemeinsam, wie kosmische Phänomene mit subatomaren Gesetzen zusammenhängen. Sie versprechen sich neue Einsichten in die Struktur von Raum und Zeit.

Von Clara Moskowitz

34 NEUROWISSENSCHAFT **DAS DURCHSICHTIGE GEHIRN**

Ein neuer Ansatz, Hirngewebe zu präparieren, gewährt Wissenschaftlern tiefe Blicke ins Zentralnervensystem.

Von Karl Deisseroth

42 GERONTOLOGIE **DER METHUSALEM-EFFEKT**

Serie: Die Zukunft der Menschheit (Teil 2) Mit Medikamenten versuchen Forscher die molekularen Vorgänge zu imitieren, dank derer einzelne Menschen vergleichsweise gesund und geistig frisch weit über 100 Jahre alt werden.

Von Bill Gifford

50 ASTRONOMIE **SUPERNOVA-SPUREN VOR DER HAUSTÜR**

Vor wenigen Millionen Jahren explodierten massereiche Sterne in unserer kosmischen Nachbarschaft und schleuderten Material bis in unser Sonnensystem. Forscher fanden es in langwierigen Analysen im Meeresgrund und in Mondgestein.

Von Thomas Faestermann und Gunther Korschinek

60 ENERGIETECHNIK **KERNFUSION EINMAL ANDERS**

Risikofreudige Physiker – und ein paar Milliardäre dahinter – erproben schnellere und billigere Wege, um eine potenziell unerschöpfliche, saubere Energiequelle nutzbar zu machen.

Von W. Wayt Gibbs

70 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

DAS BEUNRUHIGENDE PARADOXON VON SIMPSON

Manche statistischen Daten führen zu widersprüchlichen Schlüssen je nachdem, wie man sie in Gruppen einteilt. Und leider ist es unmöglich zu sagen, welches Vorgehen das richtige ist.

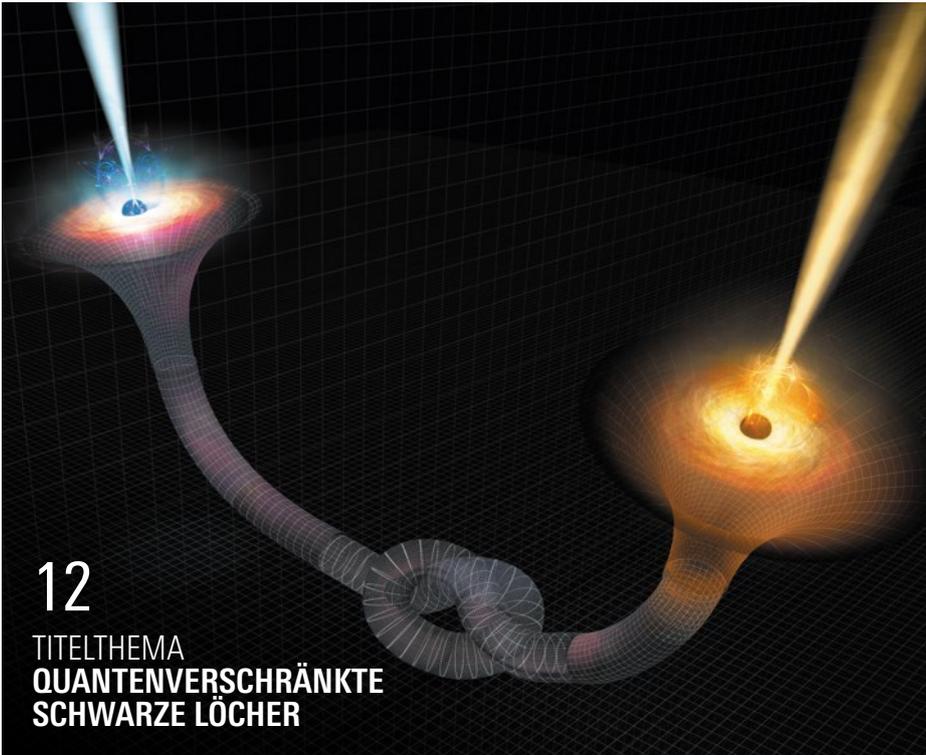
Von Jean-Paul Delahaye

78 KULTURKOLLAPS **ENDE MIT SCHRECKEN**

Die mächtigen Paläste des mykenischen Griechenlands gingen in Flammen auf, Dörfer wurden verwüstet, ganze Landstriche verödeten. Obwohl die Palastbeamten noch bis zum Schluss ihre Arbeit in Linear-B-Texten protokollierten, sind die Gründe des abrupten Untergangs ein Rätsel.

Von Josef Fischer

MALCOLM GODWIN, MOONRUNNER DESIGN



12
TITELTHEMA
QUANTENVERSCHRÄNKTE
SCHWARZE LÖCHER

DESSEROTH LAB, STANFORD UNIVERSITY, SOWIE VIVIAN GRADINARI, KYANCHUN CHUNG UND CHAO WANG/SHIMAN



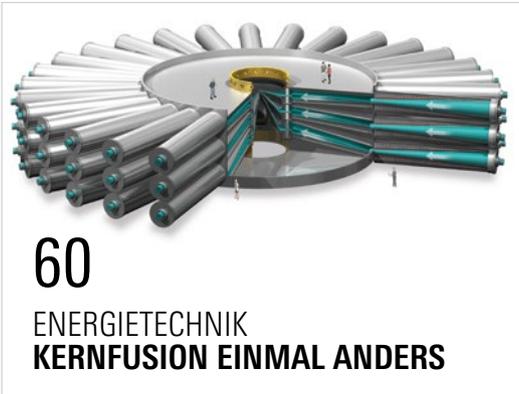
34
NEUROWISSENSCHAFT
DURCHSICHTIGES
GEHIRN

GETTY IMAGES / AFP, SHULA KOPERSHNIK



42
GERONTOLOGIE
DER METHUSALEM-EFFEKT

DOH FOLEY



60
ENERGIETECHNIK
KERNFUSION EINMAL ANDERS

ISTOCK / TUMART



78
KULTURKOLLAPPS
ENDE MIT SCHRECKEN

- 86 REZENSIONEN
 - Judith Magee:** Meisterwerke der Naturgeschichte
 - Daniel Scholten:** Denksport Deutsch
 - Klaus Mainzer:** Information
 - Heinz Scheible:** Melanchthon
 - Anton Grabner-Haider, Manfred Wuketits:** Religion als Zeitbombe?
 - Bernd Bühler, Andreas Hafer:** Von Pythagoras zur Quantenphysik u. a.
- 93 IMPRESSUM
- 94 ZEITREISE
 - Von der Malaria- zur Glatteis-Prophylaxe
- 95 LESERBRIEFE
- 96 FUTUR III
 - Welt der Erwachsenen**
Nanosonden markieren das Ende der Jugendzeit
- 98 VORSCHAU

Titelbild: Malcolm Godwin, Moonrunner Design



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM





DINOFEDERN IN BERNSTEIN

► Der Paläontologe Lida Xing von der Chinesischen Universität für Geowissenschaften hat auf einem Markt in Myanmar einen Bernstein mit einem spektakulären Einschluss aufgestöbert: In dem fossilen, 99 Millionen Jahre alten Harz steckt eine etwa drei Zentimeter lange, gefiederte Schwanzspitze. Diese gehörte nicht etwa einem Vogel, sondern vermutlich einem flugunfähigen, jungen Raubdinosaurier. Das schlossen die Forscher aus Röntgenuntersuchungen der enthaltenen Wirbelknochen. Mikroskopaufnahmen der feinen Verästelungen (Foto) ermöglichen es ihnen nun, mehr über die Rolle und Entwicklung von Federn in der Evolution zu lernen.

Curr. Biol. 10.1016/j.cub.2016.10.008, 2016

ROYAL SASKATCHEWAN MUSEUM / RYAN C. MCKELLAR



Riesenmantas galten bisher als Planktonfresser. Offenbar erbeuten sie aber bevorzugt Fische und Weichtiere.

MEERESBIOLOGIE RÄUBER DER TIEFE

► Riesenmantas (*Manta birostris*) sind anscheinend sehr aktive Raubfische, die in großen Wassertiefen jagen. Das überrascht, denn bisher hatten Forscher vermutet, diese Tiere würden sich hauptsächlich von oberflächennahem Zooplankton ernähren. Neue Isotopenmessungen legen nun aber ein Umdenken nahe.

Mit sieben Meter Spannweite und zwei Tonnen Masse gehören Riesenmantas zu den beeindruckenden Vertretern der Unterwasserfauna. Katherine Burgess von der University of Queensland (Australien) und ihr Team entnahmen Proben aus dem Muskelgewebe von etwa 70 Mantas. Darin bestimmten sie das Verhältnis von schweren zu leichten Kohlenstoff- bezie-

hungsweise Stickstoffisotopen. Dieser Quotient sagt etwas darüber aus, wovon sich die Tiere ernähren und wo sie im Nahrungsnetz stehen. Riesenmantas gelten als gefährdet; man kann also nicht ohne Weiteres ihren Mageninhalt untersuchen.

Die gemessenen Isotopenverhältnisse sprechen dagegen, dass sich die Tiere hauptsächlich von oberflächennahem Plankton ernähren. Stattdessen scheinen sie vor allem Fische und Weichtiere in 200 bis 1000 Meter Tiefe zu erbeuten. Fast drei Viertel ihrer Nahrung stammen offenbar von dort. Bisherige Annahmen dazu, was Mantas fressen, basierten auf Beobachtungen nahe der Wasseroberfläche, wo sie tatsächlich Plankton aus dem Meer filtern.

Ihr aktives Jagen in großen Tiefen bringt die

Riesen womöglich in Gefahr. Denn dort können sie der Hochseefischerei zum Opfer fallen – entweder indirekt wegen Nahrungsmangels, weil ihre Beute abgesammelt wird, oder direkt, indem sie als Beifang verenden. Womöglich sind sie daher noch stärker gefährdet als gedacht.

R. Soc. Open Sci. 3, 160717, 2016

MEDIZIN ZIKA-VIRUS ATTA- CKIERT GLIAZELLEN

► Das Zika-Virus greift im frühkindlichen Gehirn vor allem die so genannten Gliazellen an, die etwa die Hälfte des Organs ausmachen und wichtige, die Neurone unterstützende Funktionen ausüben. Das berichten Forscher um Arnold Kriegstein von der University of California in San Francisco (USA). Sie

brachten Gewebeproben aus menschlichen Hirnen mit Zika-Viren in Berührung. Die Viren attackierten darin bevorzugt neuronale Stammzellen sowie Astrozyten, Oligodendrozytenvorläufer und Mikrogliazellen. Letztere drei gehören zu den Gliazellen; sie unterstützen die Arbeit der Neurone, isolieren sie elektrisch und helfen, Stoffe und Flüssigkeiten im Gehirn zu transportieren. Nervenzellen dagegen wurden relativ selten infiziert.

Diese Beobachtung erkläre manches, das bisher rätselhaft gewesen sei, schreiben die Forscher. Die Kalkablagerungen etwa, die sich im Gehirn infizierter Neugeborener oft nachweisen lassen, gingen vermutlich auf die Zerstörung von Astrozyten zurück, die im Hirngewebe am Flüssigkeits- und Ionenhaushalt mitwirken.

Gliazellen besitzen häufig einen bestimmten Rezeptor mit der Bezeichnung AXL. Er war schon früher als Einfallstor für das Zika-Virus vermutet worden. Blockierten die Forscher ihn mit Antikörpern oder schalteten ihn per genetischem Eingriff aus, kam es tatsächlich zu

deutlich weniger Infektionen. Die Viren scheinen den Rezeptor also zu benötigen, um Gliazellen zu befallen. Ausgehend von dieser Erkenntnis prüfte das Team mehr als 2000 zugelassene Arzneistoffe darauf, wie gut sie sich als Mittel gegen Zika-Infektionen eignen. Es zeigte sich, dass

das Antibiotikum Azithromycin die Vermehrung der Viren behindert und die Gliazellen vor infektionsbedingten Schäden schützt.

Azithromycin ist für die Behandlung sexuell übertragener Infektionskrankheiten bei schwangeren Frauen zugelassen. Die Autoren hoffen deshalb,

dass sich aus ihrer Studie ein Ansatz ergibt, Zika-Infektionen bei werdenden Müttern zu behandeln und ihre Kinder so vor Entwicklungsstörungen wie der Mikrozephalie (Kleinwuchs des Kopfes) zu schützen.

PNAS 10.1073/pnas.1618029113, 2016

PHYSIK MAGNETFELD VERZERRT QUANTENVAKUUM

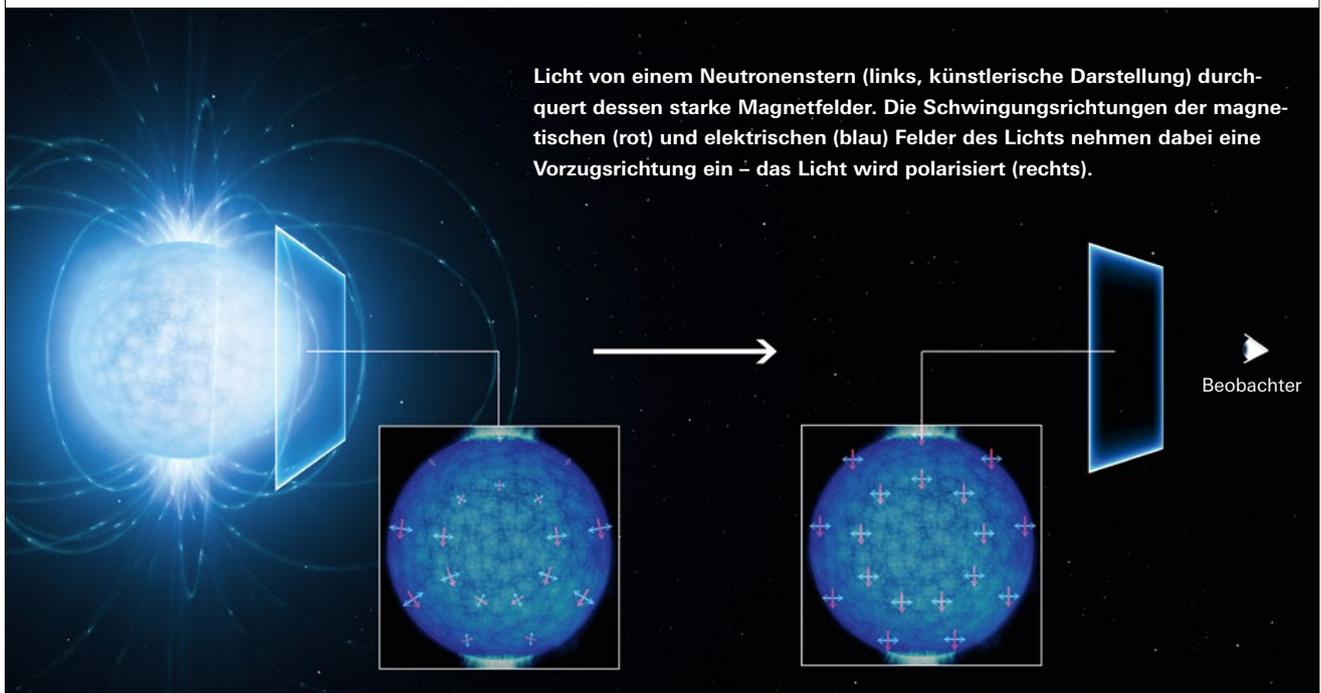
► Extrem starke Magnetfelder beeinflussen Licht, das den leeren Raum durchquert. Das haben Wissenschaftler der europäischen Südsternwarte ESO jetzt möglicherweise erstmals experimentell nachgewiesen. Indem sie mit dem Very Large Telescope (VLT) die Umgebung des erdnächsten Neutronensterns RXJ1856.5-3754 untersuchten, haben sie Hinweise auf einen Quanteneffekt gefunden, der bereits in den 1930er Jahren vorhergesagt, aber noch nie gemessen worden war.

Selbst ein perfektes Vakuum ist nicht völlig leer, sondern in ihm entstehen und verschwinden durch Quanteneffekte ständig »virtuelle Teilchen«. Diese werden von starken Magnetfeldern beeinflusst. Weil sie mit den Photonen des Lichts wechselwirken, sollte

sich ein magnetisiertes Vakuum wie ein Prisma verhalten und das Licht in verschiedenen polarisierte Teile trennen. Um diese so genannte Vakuumdoppelbrechung nachzuweisen, waren künstlich erzeugte Magnetfelder bei irdischen Experimenten bislang jedoch zu schwach.

Die Auswertung der ESO-Wissenschaftler ergab eine lineare Polarisation des Lichts vom Neutronenstern in Höhe von rund 16 Prozent. Diese lässt sich kaum anders erklären als dadurch, dass die gewaltigen Magnetfelder rund um den Neutronenstern eine Vakuumdoppelbrechung hervorrufen, meint Teammitglied Roberto Mignani. Es gebe zwar theoretisch auch andere Prozesse, die Sternenlicht im Raum polarisieren, etwa eine Streuung an Staubkörnern. Die Forscher halten es aber für unwahrscheinlich, dass das von ihnen entdeckte Polarisationsignal auf solche Effekte zurückgeht.

arXiv:1610.08323v1, 2016





Selbstfahrende Kraftfahrzeuge sollen sich autonom bewegen, aber auch manuell zu lenken sein. Der fliegende Wechsel zwischen beiden Betriebsarten birgt Risiken, wie Versuche der Sicherheitsingenieurin Holly Russell jetzt ergaben.

MOBILITÄT RISIKOREICHER WECHSEL AM STEUER

Das Konzept selbstfahrender Kraftfahrzeuge, die sich eigenständig im Verkehr bewegen, stößt in der Praxis auf unerwartete Schwierigkeiten. Forscher um Holly Russell von der Stanford University (USA) haben jetzt ein Szenario getestet, das bei solchen Autos einmal zur Routine gehören soll: Der menschliche Insasse lässt es eine Zeit lang autonom fahren und übernimmt dann wieder die Kontrolle. Die Versuchsteilnehmer taten sich damit überraschend schwer.

Russel und ihr Team schickten 22 Probanden mit einem autonomen Kraftfahrzeug auf eine Teststrecke. Dort lenkten die Teilnehmer es 15 Sekunden

lang über einen geraden Abschnitt und einen Spurwechsel. Hierauf schalteten sie den Autopiloten ein, der sie zurück zum Ausgangspunkt brachte. Nachdem sie diesen Zyklus viermal absolviert hatten, änderten die Forscher die Lenkübersetzung von 15:1 auf 2:1, so dass das Fahrzeug wesentlich stärker auf Steuerbewegungen reagierte. Zu einer ähnlichen Situation käme es, wenn das Auto selbstständig beschleunigen würde und der Insasse dann bei deutlich höherem Tempo wieder die Kontrolle übernehme.

Die Teilnehmer konnten sich auf die empfindlichere Lenkung nur schwer einstellen. Sie neigten deutlich zum Über- oder Untersteuern, obwohl ihnen die Änderung vorher rechtzeitig angekündigt worden war und sie auf dem geraden Streckenabschnitt zudem Gelegenheit hatten, die

neue Übersetzung auszuprobieren.

Neurowissenschaftler erklären dieses Phänomen mit dem Unterschied zwischen dem so genannten expliziten und impliziten Lernen: Menschen können sich zwar bewusst auf eine bevorstehende Veränderung einstellen – das heißt aber nicht, dass ihre großteils unbewusst arbeitende Bewegungskontrolle dies auch tut. Sie passt sich erst durch Erfahrung an die neue Situation an.

Insassen von autonomen Fahrzeugen, die das Steuer vom Autopiloten übernehmen, müssen – insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten – offensichtlich eine Phase der Unsicherheit überwinden, bis sie das Gefährt wieder intuitiv im Griff haben. Im Straßenverkehr berge das beträchtliche Risiken, geben die Forscher zu bedenken.

Science Robotics, im Druck

BIOCHEMIE VERSCHMÄHTES SILIZIUM

Silizium ist – nach Sauerstoff – das zweithäufigste Element in der Erdkruste. Angesichts dessen erscheint es verwunderlich, dass vier Milliarden Jahre Evolution keine Lebewesen hervorgebracht haben, die Silizium in ihren Stoffwechsel einbeziehen. Zumal solche Anpassungen im Hinblick auf Metalle sehr häufig geschehen sind: Rote Blutkörperchen beispielsweise üben ihre physiologische Funktion ganz wesentlich mit Hilfe von Eisen aus, und Pflanzen bauen Magnesium in ihren Farbstoff Chlorophyll ein. Silizium als Halbmetall hingegen scheint nur in anorganischen Zellbestandteilen vorzukommen, etwa in den Hüllen der Kieselalgen (Diatomeen).

Forscher um Frances H. Arnold vom Caltech (USA) haben jetzt eventuell einen Weg gefunden, dieses Rätsel zu lösen. Sie züchteten *E.-coli*-Bakterien, die organische Verbindungen aus Kohlenstoff und Silizium produzieren. Dies gelang ihnen mit Hilfe eines Hämoproteins – eines Enzyms, das eisenhaltige Komplexe bindet. Es kommt normalerweise in Mikroben vor, die in heißen Quellen Islands leben. Hämoproteine sind bekannt dafür, über ihre eigentliche biologische Funktion hinaus verschiedene »nicht natürliche« Reaktionen zu katalysieren, bei denen instabile Kohlenstoffverbindungen namens Carbene als Zwischenstufen auftreten. Das ließ die Forscher vermuten, das

Enzym könne unter Beteiligung von Carbenen auch Siliziumverbindungen entstehen lassen. Arnold und ihr Team isolierten das Gen für das Hämoprotein, schleusten es in *E. coli* ein und brachten die Bakterien so dazu, das Enzym herzustellen. Wurden diese nun noch mit siliziumhaltigen Nährstoffen gefüttert, bauten sie das Silizium tatsächlich in verschiedene organische Moleküle ein.

Im einem zweiten Schritt veränderten die Forscher das Hämoprotein, indem sie Mutationen in seinem Gen erzeugten. Dabei ent-

standen diverse Varianten, unter anderem solche mit deutlich höherer katalytischer Aktivität, also verbessertem Stoffumsatz. Diese sind wesentlich effizienter als bisher verwendete, künstliche Katalysatoren zum Herstellen von organischen Kohlenstoff-Silizium-Verbindungen.

Die Arbeit könnte dazu beitragen, neue Arzneistoffe zu entwickeln. Und sie hilft möglicherweise aufzuklären, warum Lebewesen sich so beharrlich »weigern«, Silizium in ihren Stoffwechsel zu integrieren.

Science 354, S. 1048–1051, 2016

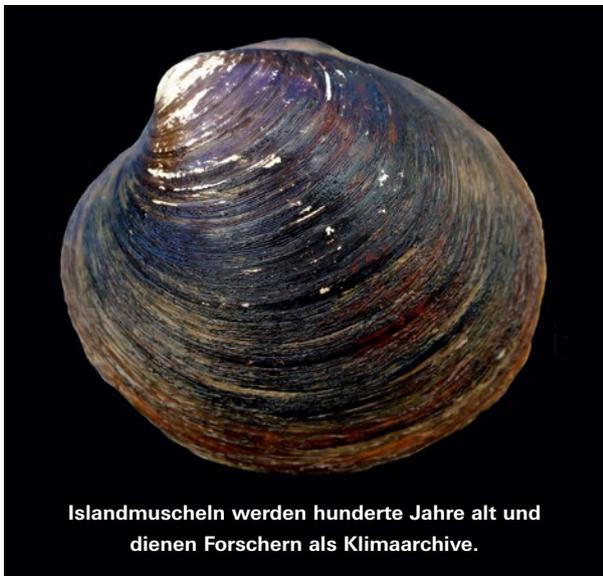


ISTOCK / PHOTIE

In den heißen Quellen Islands lebt unter anderem das Bakterium *Rhodothermus marinus*. Mit einem seiner Enzyme haben Forscher organische Siliziumverbindungen hergestellt.

KLIMAFORSCHUNG EXTREM ALTE MUSCHELN VERRATEN KLIMA FRÜHERER JAHRHUNDERTE

► Klimaforscher haben ein ungewöhnliches Fenster in die Vergangenheit aufgestoßen. Das Team um David Reynolds von der School of Earth and Ocean Sciences (Cardiff, Vereinigtes Königreich) arbeitet mit Islandmuscheln (*Arctica islandica*), die im Nordatlantik leben. Diese erreichen ein extrem hohes Alter; das älteste bekannte Exemplar bringt es auf 507 Jahre. Die Schalen der Tiere besitzen Wachstumsstreifen, ähnlich den



Islandmuscheln werden hunderte Jahre alt und dienen Forschern als Klimaarchive.

Jahresringen von Bäumen. Für jeden Streifen lässt sich ermitteln, welches Verhältnis von schweren zu leichten Sauerstoffisotopen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) er aufweist. Dieser Quotient sagt etwas aus über die Durchschnittstemperatur in dem jeweiligen Jahr. Wenn man ihn für viele aufeinanderfolgende Jahre bestimmt, bekommt man ein Abbild der Klimaentwicklung in früheren Zeiten.

Mit dieser Methode untersuchten die Forscher hunderte Muschelschalen, teils von längst verendeten Tieren. Damit gelang es ihnen, eindeutig datierbare, jährliche Messwerte für das komplette zurückliegende Jahrtausend zu gewinnen – und daraus zu rekonstruieren, wie sich der Ozean in diesem Zeitraum verändert hat. Reynolds und sein Team verglichen ihre Ergebnisse mit historischen Daten zur Sonnenaktivität und zu Vulkanausbrüchen.

Die Wissenschaftler kommen zu dem Ergebnis, dass in der vorindustriellen Zeit, also bis zirka 1800, schwankende Sonnenaktivitäten und vulkanische Eruptionen ganz wesentlich darüber bestimmten, ob sich der Ozean erwärmte oder abkühlte. Seit der Industrialisierung habe sich das jedoch geändert. Nun seien die ozeanischen Durchschnittstemperaturen zunehmend den atmosphärischen Veränderungen gefolgt, die aus der menschengemachten Freisetzung von Treibhausgasen resultierten.

Das neue Verfahren füllt die methodische Lücke zwischen instrumentellen Klimamessungen, die ungefähr 100 Jahre zurückreichen, und Analysen an Sedimentbohrkernen, die zwar wesentlich weiter in die Vergangenheit gehen, bei denen aber die Altersbestimmung schwierig ist.

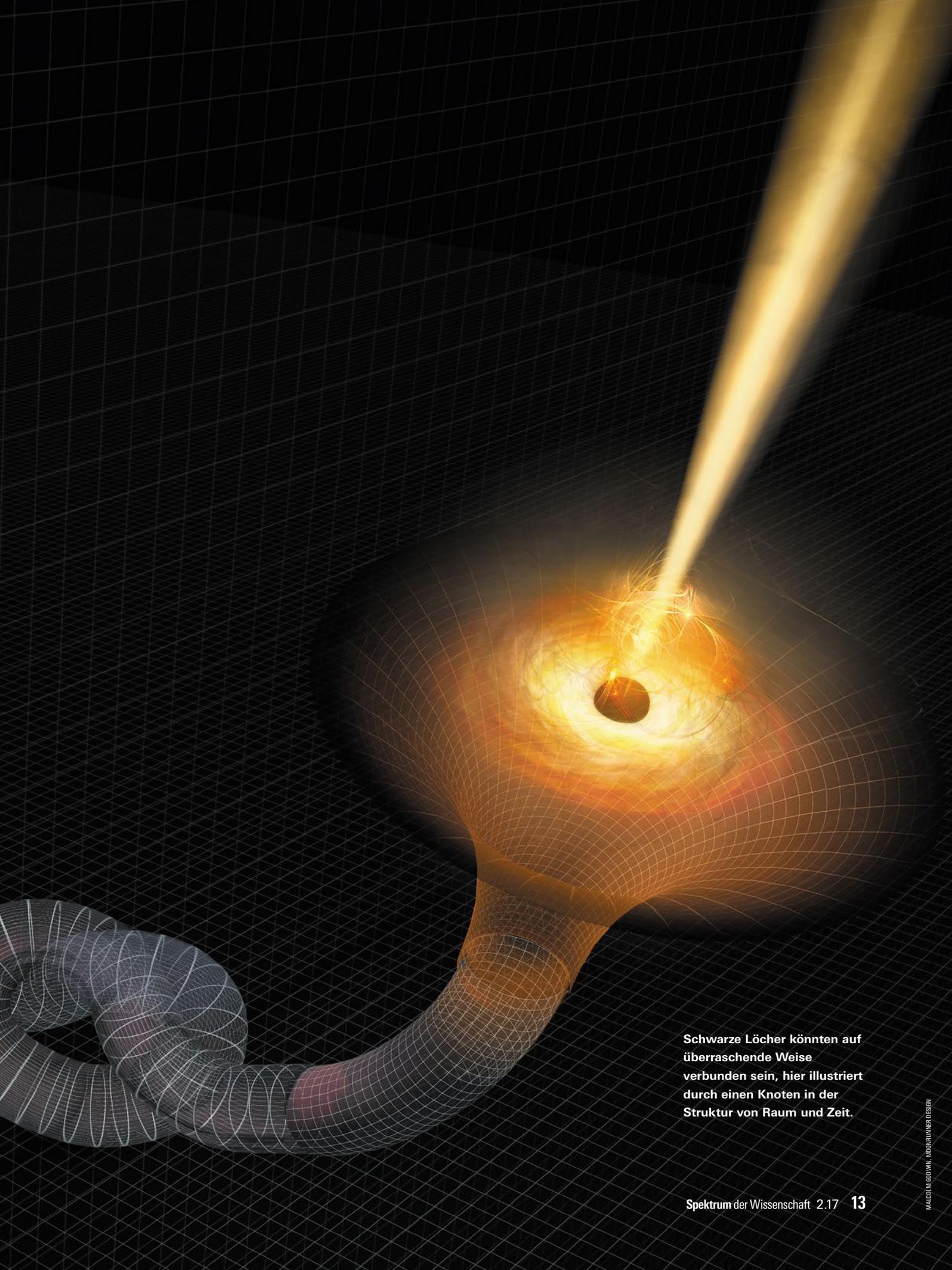
Nat. Comm. 7,13502, 2016



WURMLÖCHER VERSCHRÄNKTE SCHWARZE LÖCHER

Die Quantenmechanik ermöglicht seltsame Verknüpfungen zwischen Teilchen, die Relativitätstheorie wiederum gestattet Abkürzungen zwischen Regionen der Raumzeit. Sind beide Phänomene eng miteinander verwandt?

» spektrum.de/artikel/1432726



Schwarze Löcher könnten auf überraschende Weise verbunden sein, hier illustriert durch einen Knoten in der Struktur von Raum und Zeit.



Juan Maldacena ist Theoretiker am Institute for Advanced Study, einem privaten Forschungsinstitut im US-amerikanischen Princeton. Für seine Arbeiten zu Quantengravitation und Stringtheorie hat er bereits mehrere Preise erhalten, darunter den renommierten Fundamental Physics Prize 2012.

► In der theoretischen Physik gibt es viele kaum vorstellbare Konzepte. Die beiden unglaublichsten sind wohl »Verschränkung« und »Wurmlöcher«. Der erste Begriff stammt aus der Quantenmechanik und beschreibt Objekte – meist subatomare Teilchen –, zwischen denen keine kausale Verbindung besteht, die aber dennoch auf seltsame Art miteinander verknüpft sind. Der zweite begegnet uns bei Überlegungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Hier verbinden Wurmlöcher Regionen von Raum und Zeit. Auf den ersten Blick stammen beide Phänomene aus grundverschiedenen Theorien und haben nichts miteinander zu tun. Allerdings haben in den letzten Jahren ich und viele weitere theoretische Physiker untersucht, ob dahinter nicht vielleicht Gemeinsamkeiten stecken. Als wir die Situation im Umfeld Schwarzer Löcher genauer unter die Lupe nahmen, stellte sich heraus: Beide Effekte sind möglicherweise äquivalent, gewissermaßen zwei Seiten derselben Medaille. Das hätte nicht nur Auswirkungen auf kosmische Extremfälle wie Schwarze Löcher, sondern sogar auf die fundamentale Konstruktion von Raum und Zeit.

Denn womöglich entsteht durch Verschränkungen kleinster Bausteine des Universums erst die Raumzeit selbst. Das ist die Vereinigung der drei Raumdimensionen und der Zeit, mit der Kosmologen seit Albert Einstein das All beschreiben. Die Äquivalenz impliziert umgekehrt, dass verschränkte Objekte doch noch verbunden sein könnten, und zwar unter weitaus weniger mysteriösen Umständen, als Physiker lange angenommen haben.

Mehr noch, die Beziehungen zwischen Verschränkungen und Wurmlöchern könnten endlich zu neuen Ansätzen auf der Suche nach einer Quantengravitation

führen, die alle Vorgänge von subatomaren bis zu kosmischen Größenordnungen beschreibt. Erst mit einer solchen Theorie wird es gelingen, gedanklich zu den Ursprüngen des Universums und ins Innere von Schwarzen Löchern vorzudringen.

Interessanterweise hat sich Albert Einstein zusammen mit einigen Kollegen bereits 1935 in zwei Arbeiten einmal mit der quantenmechanischen Verschränkung und einmal mit dem Konzept von Wurmlöchern beschäftigt. Oberflächlich betrachtet behandeln sie sehr verschiedene Phänomene, und vermutlich hat der Physiker nie an eine Verbindung gedacht. Im Gegenteil, er stand immer auf Kriegsfuß mit den Implikationen der Quantenmechanik, denn er lehnte die für sie wesentlichen Zufälligkeiten und Unbestimmbarkeiten als Naturprinzipien ab. Die Verschränkung war ihm als »spukhafte Fernwirkung« unheimlich. Ironischerweise könnte gerade sie nun eine Brücke zwischen seiner Relativitätstheorie und der Quantenphysik schlagen.

Denn meiner Ansicht nach haben Quantenverschränkung und Wurmlöcher etwas miteinander zu tun. Um diese Aussage zu erläutern, muss ich zunächst einige Eigenschaften von Schwarzen Löchern beschreiben, die dafür zentral sind. Schwarze Löcher sind Bereiche im All mit extrem verzerrter Raumzeit. Sie unterscheiden sich von allen anderen bekannten Körpern im Kosmos und lassen sich geometrisch strikt in zwei Teile trennen. Aus einem Bereich können Licht, Objekte und Informationen der gewaltigen Anziehungskraft prinzipiell noch entkommen. Der andere ist davon durch einen »Ereignishorizont« getrennt. Ab hier gibt es kein Zurück mehr.

Äußerlich getrennt, innerlich vereint

Bereits wenige Monate nachdem Albert Einstein 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht hatte, fand der deutsche Physiker Karl Schwarzschild eine einfache mathematische Lösung der Gleichungen. Er stieß dabei auch auf die Grenzfläche, die wir heute Ereignishorizont nennen. Diese Bezeichnung sowie der Begriff Schwarzes Loch wurden erst in den Jahrzehnten darauf geprägt. Die Wissenschaftler begriffen nur allmählich, welche überraschenden Effekte mit Schwarzschilds Entdeckung verbunden sind und was für Geometrien entstehen können, etwa wenn ein Wurmloch zwei Schwarze Löcher miteinander verbindet. Von außen betrachtet handelt es sich dabei um verschiedene Objekte an weit voneinander entfernten Orten, doch sie teilen sich ein gemeinsames Inneres.

Einstein und sein Kollege Nathan Rosen vom Institute for Advanced Study in Princeton schilderten 1935 schon einige der wichtigsten Implikationen von Wurmlöchern, wenngleich sie noch nicht alle geometrischen Eigenschaften verstanden hatten. Wegen dieser Veröffentlichung werden die Tunnel durch die Raumzeit heute auch Einstein-Rosen-Brücken (ER) genannt.

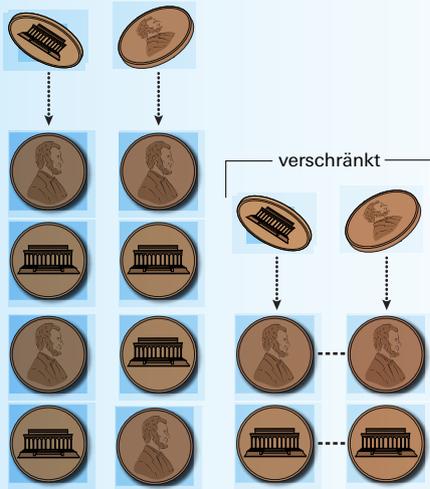
Die Wurmlöcher, die sich aus Schwarzschilds Lösungen ergeben, unterscheiden sich in einem bedeutenden Punkt von den Schwarzen Löchern, die im realen Weltall entstehen. In Ersteren befindet sich keine Materie; sie bestehen nur aus gekrümmter Raumzeit. Da sich Schwarze Löcher in unserer kosmischen Umgebung aus Massen bilden,

AUF EINEN BLICK VERKNOTETE SINGULARITÄTEN

- 1 Nach den Regeln der Quantenmechanik hängen Eigenschaften weit voneinander entfernter Teilchen zusammen, sogar wenn diese sich nach den Regeln der klassischen Physik gar nicht beeinflussen können.
- 2 Die Relativitätstheorie erlaubt eine Abkürzung zwischen zwei Schwarzen Löchern, die mit unseren Vorstellungen von Raum und Zeit bricht.
- 3 Möglicherweise sind beide Effekte nur verschiedene Aspekte desselben Phänomens. Das könnte Hinweise darauf geben, wie sich eine Theorie der Quantengravitation finden lassen könnte.

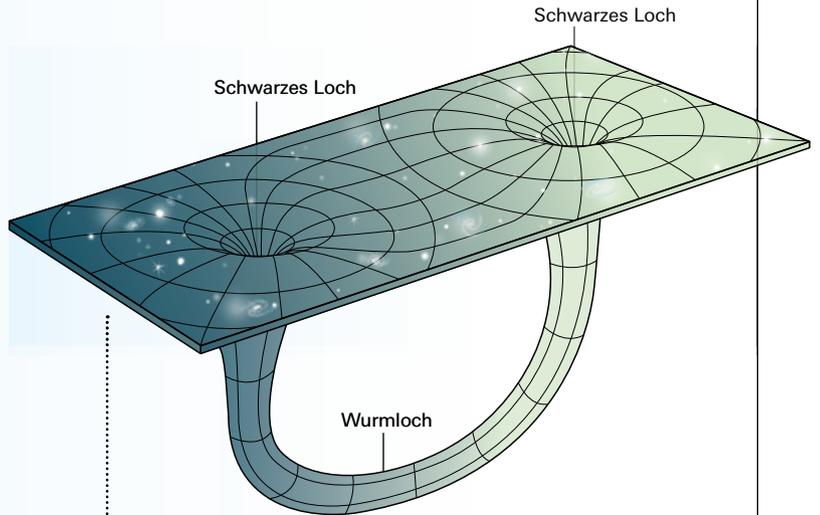
Verschränkung trifft Wurmloch

Bei der Verschränkung handelt es sich um ein Konzept aus der Quantenmechanik, Wurm Löcher sind eine Konsequenz aus der allgemeinen Relativitätstheorie. Manche Physiker vermuten: Diese scheinbar verschiedenen Phänomene könnten dasselbe sein, nur in anderem Maßstab.



Verschränkung

Wirft man normale Münzen, ist jede Kombination möglich und das zweite Ergebnis vom ersten unabhängig. Verschränkte Münzen landen stets auf der gleichen Seite. Mit dem ersten Wurf kennt man daher sofort das Resultat des zweiten.

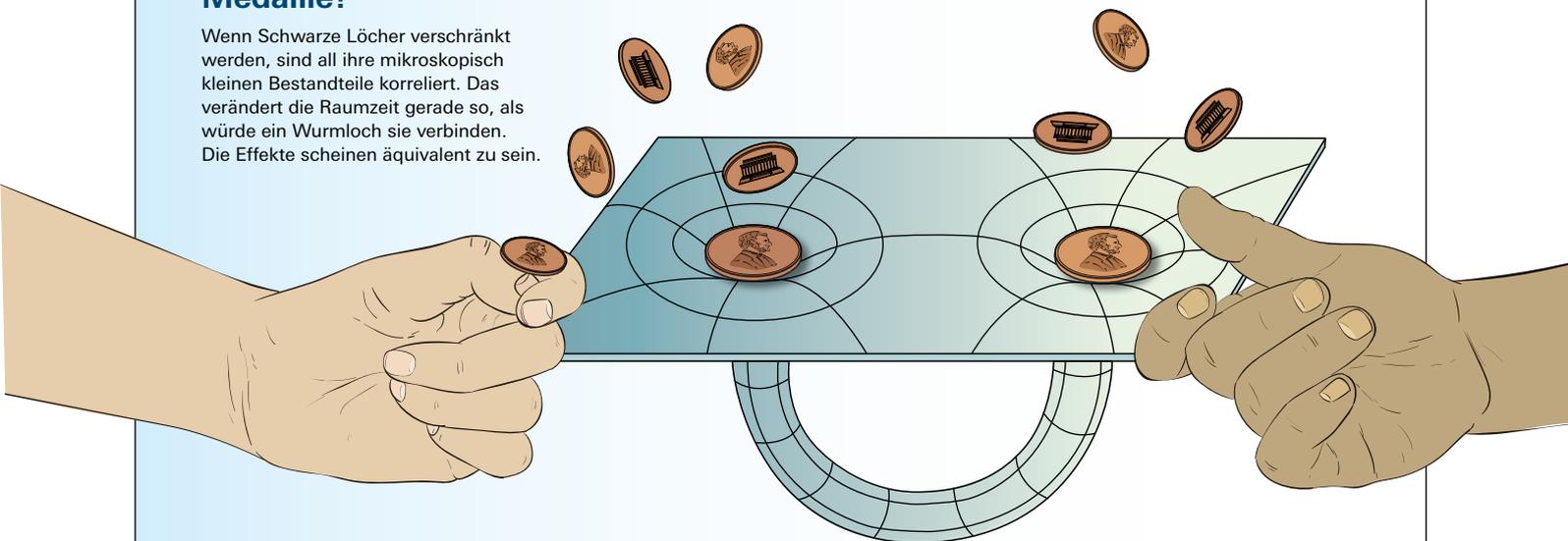


Wurmlöcher

Zwei weit voneinander entfernte Schwarze Löcher können durch eine nach außen unsichtbare Abkürzung verbunden sein, eine Art Brücke durch die Raumzeit. Sie würden wie verschiedene Objekte wirken, sich jedoch ein Inneres teilen.

Zwei Seiten einer Medaille?

Wenn Schwarze Löcher verschränkt werden, sind all ihre mikroskopisch kleinen Bestandteile korreliert. Das verändert die Raumzeit gerade so, als würde ein Wurmloch sie verbinden. Die Effekte scheinen äquivalent zu sein.



Das Paradoxon von Einstein, Podolsky und Rosen

Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (abgekürzt EPR) haben 1935 ein Gedankenexperiment mit zwei Teilchen vorgestellt. Diese haben die gleiche Masse und bewegen sich auf einer Linie in entgegengesetzter Richtung. Nennen wir sie – analog zur Geschichte von Romeo und Julia im Artikel – R und J. Wir präparieren sie so, dass ihr gemeinsames Massenzentrum eine definierte Position hat, die sich aus der Summe der Orte von R und J ergibt, x_R und x_J . Dabei soll sich das Massenzentrum stets am Nullpunkt befinden. Für die Geschwindigkeiten von R und J verlangen wir, dass die Differenz der Einzelgeschwindigkeiten $v_R - v_J$ einen festen Wert v_0 annimmt.

Dabei verletzen wir nicht die »heisenbergsche Unschärferelation«. Dieses Prinzip gibt Paare physikalischer Variablen an, die wir nicht beide beliebig genau messen können. Wenn wir den Ort eines Teilchens sehr präzise bestimmen, wird dessen Geschwindigkeit (genauer gesagt der Impuls, das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit) umso unsicherer und umgekehrt. In dem Beispiel legen

wir zwar einen Ort und eine Geschwindigkeit fest, aber nicht für ein einzelnes Teilchen. Wenn wir zwei Objekte haben, hindert uns nichts daran zu wissen, welche Position das erste und welche Geschwindigkeit das zweite hat. Analog können wir, sobald wir das Massenzentrum festlegen, zwar nichts mehr über seine Geschwindigkeit aussagen, aber sind völlig frei, eine Relativgeschwindigkeit der Teilchen vorzugeben.

Nehmen wir nun an, zwei Beobachter, Romeo und Julia, vermessen eine der Variablen. Nach unseren Vorbereitungen wird eine von Julia bestimmte genaue Position x_J dazu führen, dass Romeo sein Teilchen bei $x_R = -x_J$ auffindet. Julias Ergebnis ist zufällig und wird von Messung zu Messung schwanken. Roméos Wert hingegen ist dadurch jeweils eindeutig festgelegt. Wenn jeder die Geschwindigkeit seines Teilchens misst und Julia ein exaktes Resultat v_J erhält, stellt Romeo sicher die Geschwindigkeit $v_R = v_J + v_0$ fest. Wieder hängt sein Ergebnis komplett von Julias ab. Die beiden entscheiden spontan und ohne sich abzusprechen, welche Variable sie interes-

siert. Insbesondere werden die einzelnen Ergebnisse zufällig und unkorreliert sein, wenn Julia die Position und Romeo die Geschwindigkeit wählt oder umgekehrt.

Falls beide jedoch die Position bestimmen, wird Romeo für sein Exemplar einen exakten, durch Julias Messung festgelegten Ort sehen. Gleiches gilt für die Geschwindigkeiten. Es scheint, als »wüsste« Roméos Teilchen augenblicklich, welchen Wert es haben muss. Das wirkt wie eine überlichtschnelle Übertragung von Informationen über Julias Messung. Allerdings gibt es bei dieser Interpretation einen Haken: Romeo kann nicht wissen, ob sein Teilchen wirklich den entsprechenden (und nicht etwa irgendeinen zufälligen) Wert hat, ohne das Resultat von Julias Messung zu kennen.

Heute wissen wir durch Laborversuche: Es gibt diese Korrelationen tatsächlich. Doch ihre Auswirkungen offenbaren sich erst nach einem Abgleich der Ergebnisse. Darum übermittelt quantenmechanische Verschränkung, so unbegreiflich sie erscheint, letztlich keine Informationen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit.

etwa aus kollabierenden Sternen, haben sie nur noch eine Grenzfläche nach außen. Darum sind Wurm Löcher für die meisten Wissenschaftler kaum mehr als interessante mathematische Kuriositäten, die uns nichts über die astronomische Wirklichkeit verraten. Trotzdem versuchen einige Physiker, etwas von ihnen zu lernen.

Ein Wurmloch sollte sich mit der Zeit verändern. Ähnlich wie ein auseinandergezogener Teig wird es allmählich länger und dünner. Die Ereignishorizonte der beiden Schwarzen Löcher, die sich zu Beginn berührt haben, entfernen sich voneinander. Das passiert so rasend schnell, dass wir ein Wurmloch nicht benutzen könnten, um von einer Seite zur anderen zu reisen. Die Brücke bräche zusammen, bevor wir sie überqueren.

Die Wurm Löcher, über die wir hier reden, vertragen sich übrigens hervorragend mit der allgemeinen Relativitätstheorie. Das ist wichtig zu erwähnen, denn diese verbietet Bewegungen, die schneller sind als das Licht. Mit fantas-

tischen Gebilden aus der Sciencefiction, durch die Raumfahrer nahezu augenblicklich an einen anderen Ort gelangen, haben unsere Überlegungen nichts zu tun.

Wollte man sich stattdessen eine physikalisch passende Geschichte ausdenken, wäre folgende angemessener: Zwei jungen Liebenden, Romeo und Julia, ist es nicht gestattet, sich zu treffen. Sie werden in unterschiedliche Galaxien verbannt und dürfen sie nicht verlassen. Die beiden sind allerdings sehr erfindungsreich und schaffen es, ein Wurmloch zwischen sich aufzubauen. Dessen Eingänge sehen aus wie normale Schwarze Löcher, eines in Roméos Galaxie und eines in Julias. Unsere Helden springen hinein – für die Verwandtschaft muss das aussehen wie Selbstmord. Man hört nie wieder etwas von ihnen. Tatsächlich haben Romeo und Julia das Wurmloch geometrisch klug eingerichtet und begegnen sich darin! Sie leben eine (sehr kurze) Zeit lang glücklich beisammen, bis die Verbindung zusammenbricht und das Paar tötet.

Um zu erläutern, was das mit dem Phänomen der Verschränkung zu tun hat, komme ich auf die bereits erwähnte weitere Arbeit von Einstein aus dem Jahr 1935 zurück. Er sowie Rosen und ihr Institutskollege Boris Podolsky beschäftigten sich mit seltsamen und auf den ersten Blick paradoxen Korrelationen zwischen weit voneinander entfernten Objekten – eine Eigenschaft, die später Verschränkung genannt wurde. Die Argumentation des Trios dient heute noch oft als Ausgangspunkt für Diskussionen; dabei kürzt man die drei Physiker meist einfach entsprechend der Anfangsbuchstaben ihrer Nachnamen mit EPR ab.

Abschied von einer klassisch begreifbaren Welt

Korrelationen gibt es auch in der vertrauten Realität. Nehmen wir an, Sie haben einen Ihrer beiden Handschuhe zu Hause vergessen, wissen aber nicht, welchen. Sobald Sie in Ihre Tasche schauen, ist klar, ob Sie den rechten oder den linken mitgenommen haben und welcher daheim liegen muss. Das Ergebnis ist freilich schon vor der Messung festgelegt, Sie können es nur noch nicht wissen. Bei der quantenmechanischen Verschränkung ist das bis zuletzt anders. Hier befinden sich beide Objekte in einem gemeinsamen Zustand und nehmen bei einer Messung zufällig einen der möglichen Werte an. Als würde sich erst in dem Moment, in dem Sie hineinschauen, entscheiden, welcher Handschuh sich in der Tasche befindet.

EPR fragten sich, was bei über eine große Strecke getrennten, aber verschränkten Teilchen geschieht (siehe »Das Paradoxon von Einstein, Podolsky und Rosen«, links). Sie konstruierten eine Situation, in der man durch eine Messung eine Eigenschaft eines Parterteilchens bestimmt und damit augenblicklich auch den entsprechenden Wert des anderen Teilchens festlegt, obwohl dieses für eine Wechselwirkung viel zu weit entfernt ist. Das war für die Wissenschaftler paradox und galt ihnen als Beleg dafür, dass die Quantenmechanik unsere physikalische Wirklichkeit unvollständig beschreibt. Doch moderne Versuche zeigen: Einstein, Podolsky und Rosen hatten mit ihrer Annahme Unrecht, die Welt müsse sich vollständig klassisch beschreiben lassen. Die seltsamen Effekte der Verschränkung sind als zentrale Eigenschaft quantenmechanischer Systeme inzwischen experimentell gut untersucht und haben bereits zu ersten Anwendungen in dem jungen Forschungsfeld rund um Quantenkryptografie und Quantencomputer geführt.

Wie könnten nun diese beiden bizarren Phänomene, Wurm Löcher und Verschränkung, miteinander verwandt sein? Auf der Suche nach einer Antwort schauen wir uns die Schwarzen Löcher noch einmal genauer an. In den 1970er Jahren zeigte Stephen Hawking, wie sie auf Grund von Quanteneffekten Strahlung abgeben. Theoretiker mussten damit die einfache Vorstellung aufgeben, nichts würde ein Schwarzes Loch verlassen. Den Objekten lässt

Spektrum
der Wissenschaft

SCHREIB- WERKSTATT

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

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

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

Telefon: 06221 9126-743 | service@spektrum.de
spektrum.de/schreibwerkstatt

sich wegen dieses Verhaltens sogar eine Temperatur zuschreiben – und das hat weit reichende Implikationen.

Seit dem 19. Jahrhundert führen Physiker die Temperatur eines Körpers auf die Bewegung seiner unzähligen mikroskopischen Bestandteile zurück. Ein Gas ist umso wärmer, je wilder die Moleküle darin umherfliegen. Wenn auch ein Schwarzes Loch eine Temperatur hat, sollte es analog aus zahlreichen Einzelteilen bestehen, die viele verschiedene so genannte Mikrozustände annehmen können. Außerdem sollten auch für Schwarze Löcher die Gesetze der Quantenmechanik gelten, zumindest wenn man sie von außen beobachtet.

Da Schwarze Löcher aussehen wie normale Quantenobjekte, hindert uns nichts daran, ein verschränktes Paar von ihnen zu betrachten. Stellen wir uns dazu zwei weit voneinander entfernte Exemplare mit sehr vielen Mikrozuständen vor. Wenn jeder von diesen mit einem zugehörigen Mikrozustand des anderen Schwarzen Lochs korreliert ist, dann können wir die Eigenschaften des ersten Lochs vermessen und wissen sofort, welche das zweite hat.

Man kann ausgehend von einigen Überlegungen aus der Stringtheorie – einer der mathematischen Herangehensweisen an eine Theorie der Quantengravitation – herleiten, wie ein solches Paar Schwarzer Löcher die Raumzeit verzerren würde. Das passiert auf eine Weise, die beide Objekte durch ein Wurmloch verknüpft. Ein überraschendes Ergebnis, denn bislang dachten wir, eine Verschränkung würde Korrelationen ohne eine echte physikalische Verbindung bedeuten. Doch hier gibt es durch das Wurmloch genau so eine.



Spektrum der Wissenschaft / DANIELA LEITNER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Quantenphysik finden Sie unter spektrum.de/t/quantenphysik

Leonard Susskind von der Stanford University und ich haben diese Äquivalenz von Verschränkung und Wurmloch ER = EPR genannt, da sie beide Arbeiten von Einstein und dessen Kollegen aus dem Jahr 1935 verbindet: Ein Szenario ähnlich zu dem von EPR erzeugt eine Einstein-Rosen-Brücke. Aus der Sicht von EPR sind die Beobachtungen am Ereignishorizont korreliert, da sich die Schwarzen Löcher in einem Zustand der Quantenverschränkung befinden. Laut ER sind sie korreliert, weil ein Wurmloch beide Systeme verbindet.

Kehren wir jetzt zurück zur Sciencefiction-Variante von Romeo und Julia. Inzwischen wissen wir, welche Vorbereitungen die beiden treffen müssen. Zunächst sollten sie sehr viele Paare verschränkter Teilchen ähnlich denen aus dem Beispiel von EPR erzeugen. Romeo und Julia behalten davon je einen der Partner. Dann brauchen sie hoch entwickelte Quantencomputer, um diese Teilchen zu

manipulieren und zu verschränkten Schwarzen Löchern zu kombinieren. Das dürfte rein praktisch unvorstellbar schwierig sein, unsere physikalischen Gesetze verbieten es aber nicht.

Die Ideen, die zu diesen Gedankengängen führten, haben viele Theoretiker jahrzehntelang entwickelt. Es begann 1967 mit einer Arbeit des Kanadiers Werner Israel von der University of Alberta über die fundamentalen Eigenschaften Schwarzer Löcher. 2006 haben Shinsei Ryu und Tadashi Takayanagi von der University of California die Beziehungen zwischen Verschränkung und Raumzeit-Geometrien untersucht. Susskind und mich motivierte zuletzt eine seltsame Entdeckung, die Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski und James Sully von der University of California 2012 machten. Sie kamen zu dem Schluss, am Ereignishorizont müssten nach einiger Zeit wegen Verschränkungseffekten zwischen dem Schwarzen Loch und den emittierten Teilchen gewaltige Energien freigesetzt werden (siehe den Artikel von Polchinski »Die Feuerwand am Horizont« in **Spektrum** September 2015, S. 34). Die Interpretation in ER = EPR, das Innere des Schwarzen Lochs wäre mit einem anderen System verknüpft, löst einige problematische Aspekte dieses Gedankens.

Es ist eine anregende Überlegung, dass der Zusammenhang von noch allgemeinerer Natur sein könnte und mit jeder quantenmechanischen Verschränkung zugleich auch eine geometrische Verbindung vorliegt, selbst im einfachsten Fall zweier Teilchen. Unter solchen Umständen haben wir es dann womöglich mit einem neuen Typ von Geometrie und Quantenstrukturen zu tun, die sich mit heutigen Formeln nicht mehr beschreiben lassen. Und obwohl wir noch keine mathematischen Werkzeuge dafür haben, gibt es bereits Überlegungen, solche Gebilde könnten Ursache der Raumzeit selbst sein (siehe den folgenden Artikel ab S. 20). Wenn wir uns eine Verschränkung als eine Art Faden vorstellen, dann weben sehr viele von ihnen vielleicht die Raumzeit. In diesem Bild bestimmen Einsteins Gleichungen die Verknüpfungen der Fäden und das großflächige Muster, während die Quantenmechanik nicht bloß so etwas wie eine Ergänzung der Relativitätstheorie liefert, sondern den eigentlichen Stoff, aus dem die Raumzeit ist.

Das sind bislang freilich Spekulationen, aber inzwischen gehen zahlreiche Physiker davon aus, dass darin ein wahrer Kern steckt. Viele von uns folgen den Hinweisen. Am Ende des Wegs, der uns über Jahrzehnte von den ersten theoretischen Untersuchungen Schwarzer Löcher zu den subtilen Effekten in Wurmlöchern geführt hat, liegt vielleicht die lang gesuchte Vereinigung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik. ◀

QUELLEN

Einstein, A. et al.: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: *Physical Review* 47, S. 777–780, 1935

Einstein, A., Rosen, N.: The Particle Problem in the General Theory of Relativity. In: *Physical Review* 48, S. 73–77, 1935

Maldacena, J., Susskind, L.: Cool Horizons for Entangled Black Holes. In: *Fortschritte der Physik* 61, S. 781–811, 2013



IT-Onlinestudium - Ihr Weg zum Bachelor

Wirtschaftsinformatik |
Web- & Medieninformatik

Bleiben Sie jederzeit flexibel und erwerben Sie mit den Online-Studiengängen von Springer Campus den „Bachelor of Science“ (B.Sc) Web- und Medieninformatik bzw. Wirtschaftsinformatik, der von der Fachhochschule Dortmund verliehen wird.

- **Optimale Flexibilität:** Ihr Studienbeginn ist jederzeit möglich, Sie studieren wann, wo und wie viel Sie wollen.
- **Persönlicher Studienplan:** Sie passen den Studienplan an Ihre Bedürfnisse an. Sie wählen die Reihenfolge der Module.
- **Individuelle Betreuung:** Online-Tutoren unterstützen Sie beim Studieren und sind jederzeit für Ihre Fragen da.
- **Innovative E-Learning-Didaktik:** Lernen Sie aktiv und mit Erfolgskontrolle und stellen Sie so Ihr Vorankommen im Studium sicher.

Zwei ideale Studiengänge für Berufstätige, Fachinformatiker, IT-Quereinsteiger!
Fordern Sie noch heute unser kostenloses Infopaket an: www.springer-campus.de

Jetzt
informieren!

Ausführliche Infos unter springer-campus.de

Part of **SPRINGER NATURE**

GRAVITATIONSTHEORIE MIT QUANTENBITS ZUR RAUMZEIT

Astrophysiker und Quantenforscher untersuchen gemeinsam, wie kosmische Phänomene mit subatomaren Gesetzen zusammenhängen. Sie versprechen sich neue Einsichten in die grundlegende Struktur von Raum und Zeit.



Clara Moskowitz ist Redakteurin bei »Scientific American«.

» spektrum.de/artikel/1432727

► In der klassischen Physik war der Raum lange bloß eine Art Bühne, auf der Materie, Felder und Kräfte wirken. Er selbst bestand aus nichts und trug nichts zu diesem Spiel bei. Albert Einstein veränderte den Gedanken und verband Raum und Zeit zu einem untrennbaren Gebilde, der Raumzeit, die sich abhängig von den darin vorhandenen Objekten verformt und ihrerseits die Bahnen von Objekten beeinflusst. Theoretiker können ihre Geometrie und somit die Gravitation mit den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben, aber sie stellen sich neue Fragen: Ist die Raumzeit mitsamt ihren

Krümmungen fundamental, oder besteht sie selbst aus etwas anderem? Inzwischen glauben einige Physiker an einen neuen Weg zu einer Antwort. Ihre Vermutung: Alles lässt sich auf die Wechselwirkungen kleinster Stücke von Information zurückführen.

Unter den Anhängern dieses Ansatzes herrscht Aufbruchsstimmung. Hunderte von ihnen arbeiten im Rahmen eines 2015 gegründeten internationalen Gemeinschaftsprojekts zusammen, um mit ihren Ideen eine neue Fachdisziplin ins Leben zu rufen. Das Vorhaben heißt »It from Qubit« (IfQ). Die Physiker wollen »es« – gemeint ist die Raumzeit – aus Qubits ableiten. Das ist die Kurzform für Quantenbits, ein Begriff aus der Quanteninformatik. Analog zu den elektronischen Bits bei herkömmlichen Computern sind Qubits ein Maß für quantenphysikalisch gespeicherte Information. Die Idee hinter IfQ ist die Vorstellung, kosmische Vorgänge könnten mit einer Art Kode programmiert sein. Wenn es gelänge, diesen zu knacken, würde sich die quantenphysikalische Natur der Gravitation offenbaren. Im Juli 2016 fand ein Treffen am Perimeter Institute im kanadischen Ontario statt, bei dem die IfQ-Veranstalter etwa 90 Anmeldungen erwartet hatten. Es wurden mehr als 200, und das Team organisierte schließlich Parallelveranstaltungen an weiteren Universitäten, um alle Interessenten zusammenzubringen.

Das Projekt spricht Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachgebieten an, einerseits beispielsweise Entwickler von Quantencomputern, andererseits solche, die sich mit der Relativitätstheorie beschäftigen. Forscher, die von sich aus kaum darauf kämen, miteinander zu arbeiten, suchen hier gezielt nach einem gemeinsamen Nenner. Die

AUF EINEN BLICK DAS UNIVERSUM ALS COMPUTER

- 1 Einige Wissenschaftler postulieren Verbindungen zwischen der allgemeinen Relativitätstheorie und dem quantenmechanischen Effekt der Verschränkung.
- 2 Das Gemeinschaftsprojekt »It from Qubit« bringt Theoretiker der verschiedenen Disziplinen zusammen. So profitieren etwa Experten für Stringtheorie von Erkenntnissen aus der Quanteninformatik und umgekehrt.
- 3 Bei einigen offenen Fragen haben die Physiker erste viel versprechende Ansätze. Sie hoffen, damit schneller einer Theorie näher zu kommen, die Quantenmechanik und Relativitätstheorie vereint.

Simons Foundation in New York, eine private Fördereinrichtung des US-amerikanischen Mathematikers und Multimilliardärs James Simons, gründete IfQ im August 2015 und stattete das Projekt mit insgesamt rund zehn Millionen Dollar über eine Laufzeit von mindestens vier Jahren aus, um die regelmäßigen Treffen sowie die Arbeit der koordinierenden Wissenschaftler zu finanzieren. Seit her gewinnt IfQ stetig an Aufmerksamkeit in der Forscher-gemeinde und vernetzt sich dort immer besser. »Wir sind auf eine intensive Zusammenarbeit angewiesen«, erläutert der Physiker Beni Yoshida, der am Perimeter Institute und für das IfQ arbeitet. »Das Vorhaben beschäftigt sich mit extrem wichtigen, aber höchst komplizierten Fragen. Eine einzelne Person könnte das nicht bewältigen.« Auch Experten ohne Verbindung zu IfQ äußern sich hoffnungsvoll. So meint der Stringtheoretiker Brian Greene: »Wenn die Arbeit in dem Bereich so erfolgreich vorangeht, wie einige erwarten, könnte Quanteninformation die nächste Revolution in unserem Verständnis von Raum und Zeit auslösen. Das ist äußerst aufregend.«

Der Gedanke, Raumzeit könnte aus etwas bestehen, erweitert das Bild der allgemeinen Relativitätstheorie. Dort ist die Geometrie eine fundamentale Eigenschaft. Wenn sie nun durch etwas anderes hervorgerufen wird, nämlich die Qubits, verschiebt sich die Fragestellung: Was sind die Bits, und welche Art Information tragen sie genau? Die

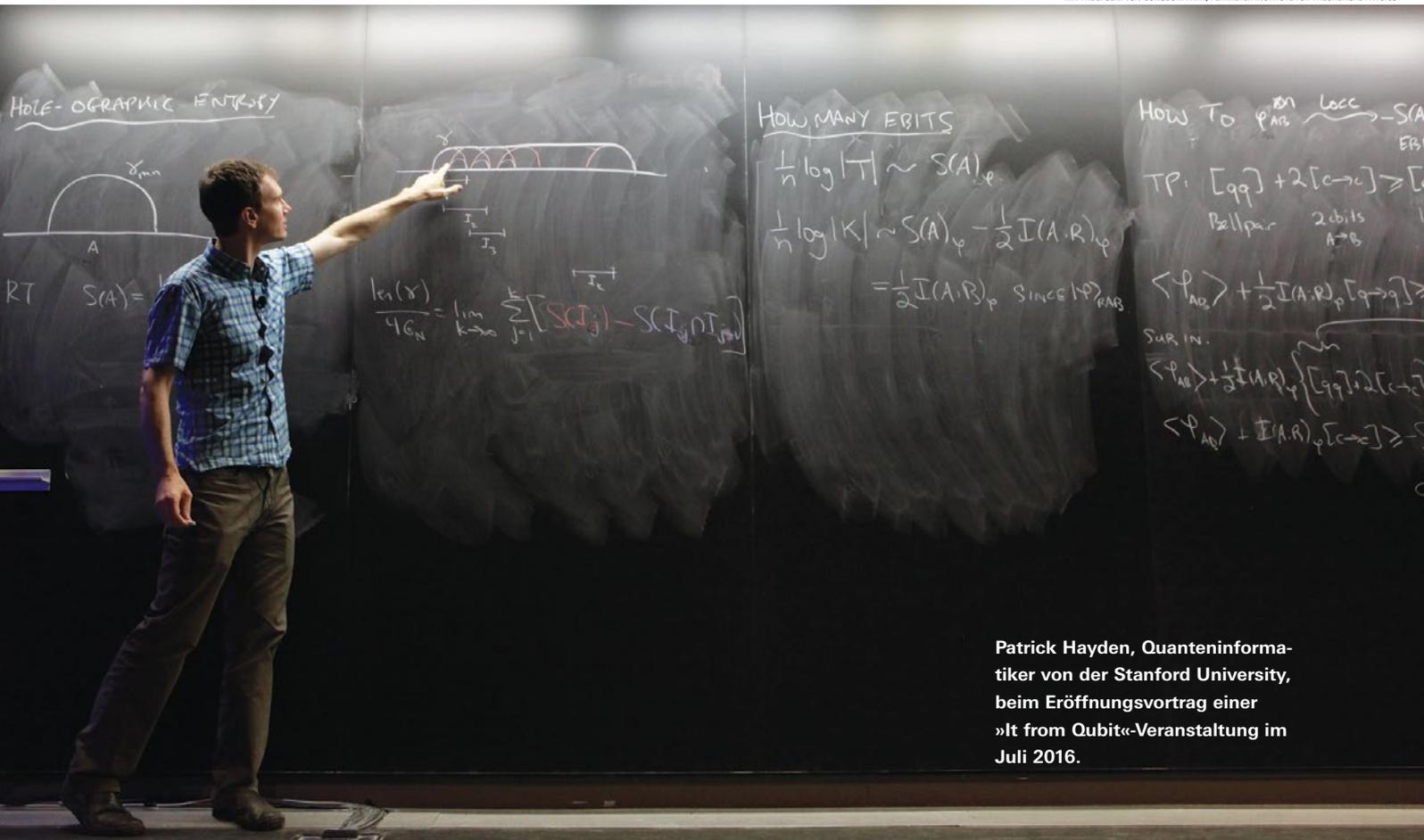
Physiker wissen es nicht. Erstaunlicherweise scheint sie das nicht sonderlich zu stören. Brian Swingle vom Stanford Institute for Theoretical Physics und ebenfalls Teil des IfQ-Teams erläutert: »Die Beziehungen zählen. Es geht weniger um die Eigenschaften der Einzelteile als vielmehr darum, wie diese sich organisieren.«

Verschränkung als Baumeister der Raumzeit

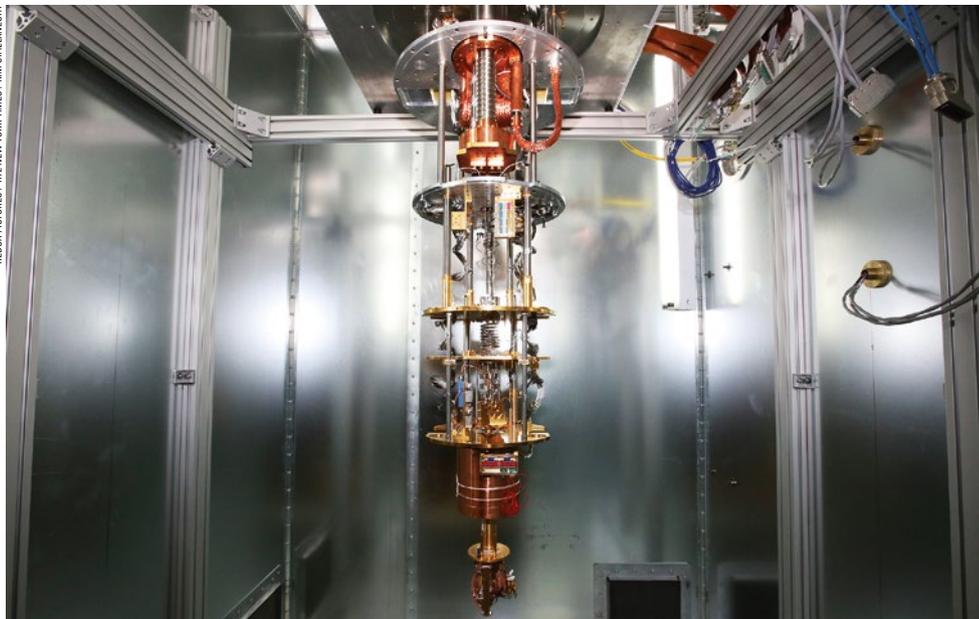
Der Schlüssel zu einer solchen Organisation ist das Quantenphänomen der Verschränkung, bei dem zwei Teilchen miteinander verknüpft sind, sogar noch über große Distanzen. Jedes von ihnen kann verschiedene Zustände annehmen; aber bestimmt man mit einer Messung den Wert von einem der beiden Objekte, ist damit augenblicklich auch der des anderen klar. Einer der leitenden Wissenschaftler des Projekts, Vijay Balasubramanian von der University of Pennsylvania, erläutert den darauf basierenden Ansatz: »Wie auch immer die kleinsten Bausteine aussehen, erst die Verschränkungen zwischen ihnen spannen gewissermaßen das Tuch der Raumzeit auf. Das ist eine relativ neue und absolut faszinierende Vorstellung.«

Die Idee geht auf diverse Entdeckungen zurück, die theoretische Physiker im Lauf des letzten Jahrzehnts gemacht haben. In einer viel beachteten Arbeit bemerkten Juan Maldacena und Leonard Susskind 2013, dass zwei verschränkte Schwarze Löcher ein Wurmloch verursachen

MIT FROL. GEN. VON JONGBUM PARK, PERIMETER INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS



Patrick Hayden, Quanteninformatiker von der Stanford University, beim Eröffnungsvortrag einer »It from Qubit«-Veranstaltung im Juli 2016.



Quantencomputer, wie der abgebildete des kommerziellen Herstellers D-Wave Systems, benötigen neben hoch entwickelter Hardware auch ausgefeilte mathematische Verfahren für Berechnungen mit verschränkten Zuständen. Dieser Zweig der Informatik hilft nun bei der Suche nach einer Quantengravitation.

können, eine Art Abkürzung durch Raum und Zeit (siehe den vorhergehenden Artikel von Maldacena ab S. 12). Wegen solcher Befunde untersuchen immer mehr Physiker Phänomene aus Quantenmechanik und Relativitätstheorie gezielt auf mögliche fundamentale Gemeinsamkeiten.

Um zu verstehen, wie Verschränkung Strukturen in der Raumzeit erzeugen könnte, müssen sie zunächst die Natur dieser seltsamen Korrelation begreifen. Dazu befassen sie sich neuerdings auch mit ungewohnten Umständen. Üblicherweise denken Physiker bei Verschränkung an eine quantenmechanische Messgröße, etwa den so genannten Spin, sowie einen gemeinsamen Zustand zweier Teilchen, die weit voneinander entfernt sind und bei denen man den Wert schließlich bestimmt. Aber »diese konventionelle Sichtweise ist nicht genug«, wie Balasubramanian sagt: »Ich bin inzwischen davon überzeugt, dass es noch andere Formen der Verschränkung gibt, die von entscheidender Bedeutung für unser Projekt sein könnten.« So lässt sich beispielsweise ein Teilchen an einem Ort mit einem ganz anderen Typ Teilchen an derselben Stelle korrelieren – eine Verschränkung also, die sich nur auf einem Punkt abspielt. Darüber hinaus beschäftigen sich Theoretiker zunehmend damit, wie sich die höchst komplizierten Verhältnisse rechnerisch beherrschen lassen, die auftreten, sobald man eine große Zahl von Objekten verschränkt statt nur zwei oder relativ wenige.

Die Physiker glauben, bei der Raumzeit handle es sich um ein so genanntes emergentes Phänomen. Emergent bezeichnet Eigenschaften eines Systems, die erst aus einem komplexen Zusammenspiel auf kleineren Skalen hervorgehen. Beispielsweise erzeugen in einem Gas die Wechselwirkungen zwischen unzähligen einzelnen Atomen und Molekülen auf makroskopischer Ebene dessen Temperatur oder Druck. Die IfQ-Wissenschaftler wollen analog die Gravitation aus einer Quantenperspektive beschreiben. Theoretiker suchen seit einem Jahrhundert nach einer solchen Quantengravitation; bereits Einstein hat bis zu

seinem Tod erfolglos daran gearbeitet. Die Forscher von It from Qubit indes setzen auf einen Trick, um ihre Arbeit zu vereinfachen: das holografische Prinzip.

Einige physikalische Phänomene lassen sich viel einfacher beschreiben, indem man sie auf eine geringere Zahl von Dimensionen reduziert. Es ist etwa möglich, die dreidimensionale Information für ein räumlich wirkendes Hologramm in der Struktur einer zweidimensionalen Oberfläche zu kodieren. Da es so schwerfällt, eine Quantengravitation für unser Universum zu entwickeln, gelingt es vielleicht eher, eine Theorie zu formulieren, die mit weniger Dimensionen auskommt und anschließend wieder in unsere gewohnte Raumzeitgeometrie übersetzbar ist.

Eines der aufsehenerregendsten holografischen Prinzipien ist die »AdS-CFT-Dualität«. Dabei steht AdS für ein spezielles Modelluniversum, den so genannten Anti-de-Sitter-Raum, und CFT ist die Abkürzung für konforme Feldtheorie (conformal field theory), wobei sich das Attribut konform auf bestimmte Symmetrieeigenschaften bezieht. Die AdS-CFT-Dualität wird nach ihrem Entdecker auch Maldacena-Dualität genannt. Juan Maldacena hat 1997 bei Arbeiten über die Stringtheorie erkannt, dass sich ein Anti-de-Sitter-Raum, in dem Gravitation herrscht, vollständig durch eine konforme Feldtheorie beschreiben lässt, die sich auf dessen Hülle abspielt und in der es keine Gravitation gibt (siehe Maldacenas Artikel »Schwerkraft – eine Illusion?« in *Spektrum* März 2006, S. 36).

Mit diesem Werkzeug könnten die Physiker eine Theorie entwickeln, die zu einer Quantengravitation äquivalent ist, dabei aber die Schwerkraft ausspart und somit einfacher zu handhaben ist. Vielleicht ist das, was wir als Gravitation wahrnehmen, in der neuen Perspektive in Form von Verschränkung auf einer Hülle aus Qubits kodiert.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben Theoretiker zahlreiche Feinheiten und Konsequenzen der AdS-CFT-Dualität ausgearbeitet. Heute ist klar: Sie funktioniert. Eine Theorie kann die Vorgänge in einem höherdimensionalen

Raum beschreiben. Die Physiker verstehen aber noch nicht wirklich, warum das so ist. Brian Swingle hofft, das mit IfQ zu ändern: »Eines der sehr wahrscheinlichen Ergebnisse unseres Projekts ist mindestens ein gehöriger Fortschritt oder sogar eine eindeutige Antwort auf die Frage, wie solche Dualitäten entstehen.«

Hier kommt die Quanteninformatik ins Spiel. Um in der Praxis mit verschränkten Zuständen zu kommunizieren und zu rechnen, brauchen die Wissenschaftler spezielle Fehlerkorrekturverfahren. Denn Verschränkung in der realen Welt ist zerbrechlich. In jedem Quantencomputer gibt es ein Hintergrundrauschen aus Teilchen, die mit den Qubits wechselwirken und diese vorzeitig in gewöhnliche Zustände mit eindeutigen Werten verwandeln, womit sie für Berechnungen verloren gehen. Darum verteilen Quantenalgorithmen eine bestimmte Information auf verschränkte Systeme vieler Qubits. Dann können einzelne Fehler erkannt und ausgeglichen werden.

Faszinierenderweise taucht die Mathematik, die für eine derartige Quantenfehlerkorrektur nötig ist, auch bei der AdS-CFT-Dualität auf. Das Innere eines Schwarzen Lochs lässt sich durch ein Netzwerk von Verschränkungen auf dessen Oberfläche beschreiben, das zugleich ein Korrekturcode ist. Die israelische Physikerin Dorit Aharonov von der Hebräischen Universität Jerusalem, eine Expertin für Quantenalgorithmen und eine der leitenden Wissenschaftlerinnen bei IfQ, wundert sich über den Zusammenhang: »Warum bloß findet man Quantenfehlerkorrekturen bei Schwarzen Löchern? Die Erkenntnis kam vollkommen unerwartet.«

Gehversuche in einem Spielzeuguniversum

Es gibt allerdings noch einen Haken, selbst wenn es gelingen sollte, die Mechanismen der AdS-CFT-Dualität zu ergründen und eine niedrigdimensionale Theorie zu formulieren, die zu einer Quantengravitation äquivalent ist: Die Dualität an sich funktioniert nur in einem Modelluniversum. Diesem fehlen einige Eigenschaften unseres Kosmos, insbesondere funktioniert die Schwerkraft anders. »Das All steckt sozusagen in einer Flasche«, illustriert Swingle das Problem. »Schickt man einen Lichtstrahl hindurch, prallt er von den Wänden ab. In unserem expandierenden Universum würde das nicht passieren.« Für Swingle ist das Modell dennoch ein nützlicher Rahmen für Theoretiker, um erste Ideen auszuprobieren. »Vermutlich brauchen wir solche Zwischenschritte, bevor wir uns an eine realistischere Quantengravitation wagen können.«

Doch wenn IfQ auf so unsicheren Fundamenten steht, so wenden einige Kritiker ein, wie kann man dann überhaupt erwarten, am Ende etwas Brauchbares zu erhalten? Die Physiker hoffen, einer ersten einfachen Theorie schrittweise die nötige Komplexität hinzufügen zu können, bis sie die Wirklichkeit beschreibt. Selbst wenn das nicht gelingt, glauben viele Experten – auch solche außerhalb des Projekts –, dass sich bereits der Versuch lohnt. Raphael Bousso von der University of California hat intensiv am holografischen Prinzip und der Verbindung von Quanteninformation und Gravitation gearbeitet. »Ich finde es fantastisch, wie sich nun zahlreiche hochkarätige

Wissenschaftler auf Fragen stürzen, die mich schon seit Jahren beschäftigen. Wir sollten gemeinsam sehen, wohin uns das führt«, kommentiert er. Die Stringtheoretikerin Eva Silverstein von der Stanford University hingegen hat Bedenken, das Projekt würde die Sichtweise der Beteiligten einschränken: »Fraglos spielt Information eine Rolle. Aber um eine Quantengravitation zu entwickeln, sind mehrere Aspekte wichtig. Wenn man zu viel Energie auf einen einzelnen davon konzentriert, kommt das Forschungsfeld insgesamt nicht so gut voran.«

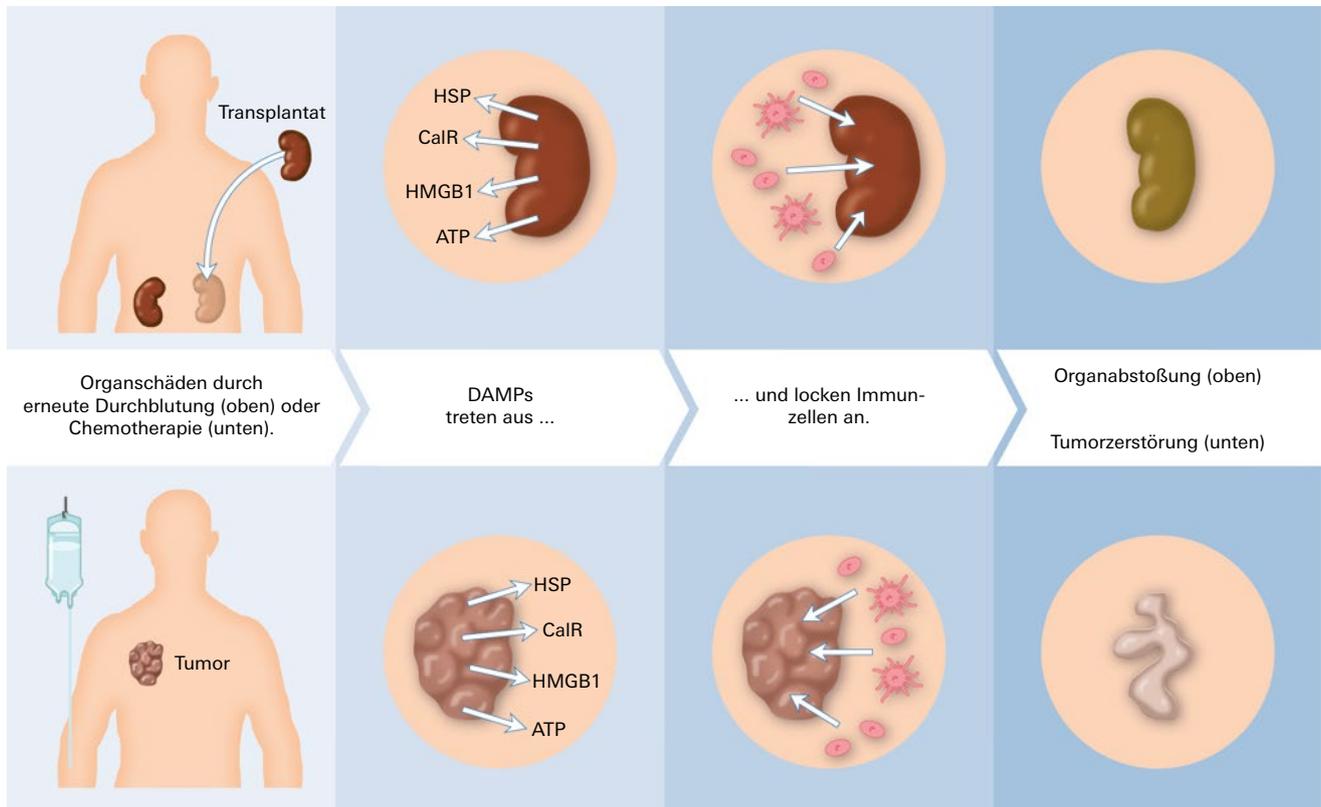
Falls das Projekt nicht der erhoffte große Wurf ist, bringt es wohl zumindest Fortschritte in den Einzelbereichen. Die Experten aus der Stringtheorie und der allgemeinen Relativitätstheorie etwa geben den Entwicklern von Quantencomputern neue Impulse, wie sich die verschiedenen Typen von Verschränkung interpretieren lassen. Umgekehrt hilft die Quanteninformatik dabei, Effekte der Raumzeit besser zu verstehen. »Wenn man mit Werkzeugen aus einem Bereich an einen anderen herangeht, führt das oft zu neuen Erkenntnissen. Es gibt bereits erste Fortschritte bei Problemen, die seit vielen Jahren ungelöst sind«, kommentiert Aharonov. Beispielsweise sieht es so aus, als könnte sich die Zeit in Wurmlöchern messen lassen, indem man diese als eine Art Qubit-Schaltkreis begreift.

Methoden aus der Quanteninformatik können auch bei der Entscheidung helfen, ob eine Theorie – sofern sie denn aufgestellt wird – das richtige Maß an Komplexität aufweist, ob sie gewissermaßen zu unserer Welt passt. Wie ein Computer gibt jede Theorie Werte für einen messbaren Zustand in der Zukunft aus, wenn man sie mit Daten eines Anfangszustands füttert. Ähnlich wie einige Computer leistungsfähiger sind als andere, kann man mit den Mitteln der Quanteninformatik nach der Rechenleistung einer Quantengravitation fragen. »Diese kann zu groß sein«, erläutert Aharonov. »Dann würde das Modell Dinge voraussagen, von denen wir nicht glauben, dass sie in der realen Welt existieren. Das würde die Theorie selbst in Frage stellen. Damit hätten wir ein unabhängiges Instrument, um ihre Sinnhaftigkeit zu überprüfen.«

Das Projekt It from Qubit erinnert viele Physiker an euphorische Phasen in der Vergangenheit, als andere radikale Ideen Fahrt aufgenommen, neue Forschungszweige begründet und Studierende nachhaltig inspiriert haben. Der Stringtheoretiker Hiroshi Ōguri vom California Institute of Technology vergleicht es mit Ereignissen aus seiner Studienzeit: »1984 begann die so genannte erste Superstring-Revolution. Damals wurde die Stringtheorie innerhalb kurzer Zeit zu einem heiß diskutierten Kandidaten für die Vereinigung aller Naturkräfte. Einen ähnlichen Enthusiasmus bemerke ich heute wieder. Es zeichnen sich spannende Zeiten ab – für Veteranen wie uns ebenso wie für die jungen Forscher, die zum ersten Mal mit den neuen Gedanken in Kontakt kommen.« ◀

QUELLE

Maldacena, J.: The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. In: International Journal of Theoretical Physics 38, S. 1113–1133, 1999 (online erstmals 1997 unter <https://arxiv.org/abs/hep-th/9711200> veröffentlicht)



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE NACH EMMANUELE VANET

HSP: Hitzeschockproteine, CaIR: Calreticulin, HMGB1: High-Mobility-Group-Protein B1, ATP: Adenosintriphosphat

Schadensassoziierte molekulare Strukturen (DAMPs) spielen bei Organverpflanzungen und in der Tumormedizin eine große Rolle.

IMMUNOLOGIE GEFAHRENSIGNALE AUS STERBENDEN ZELLEN

Vor 20 Jahren postulierten ein deutscher Chirurg und eine amerikanische Immunologin, das Immunsystem reagiere auf Gefahrensignale, die von beschädigten Geweben ausgehen. Onkoimmunologen haben jetzt neue Belege dafür gefunden.

1987 startete am Klinikum Großhadern in München eine Studie, die klären sollte, ob die Gabe eines Antioxidans (einer Substanz, die oxidativem Stress entgegenwirkt) Nierentransplantationen erfolgreicher macht. Es ging darum, herauszufinden, ob das Antioxidans den so genannten Reperfusionsschaden mindert – jene Gewebeschädigung, die unvermeidbar entsteht, wenn das verpflanzte Organ im Empfänger wieder frisch durchblutet wird. Dabei steigt die Sauerstoffkonzentration in dem Organ plötzlich an, und es entstehen große Mengen an reaktiven Sauerstoffspezies (ROS), die das Transplantat teils zerstören und sein Versagen herbeiführen können. Inspiriert durch die Beobachtung, das antioxidative Enzym

Superoxid-Dismutase könne die ROS abfangen, sponserte ein großer Pharmakonzern die Studie in Großhadern, einem der größten Transplantationszentren Europas. Doch nach knapp zwei Jahren und 180 Patienten, die zusammen mit der neuen Niere entweder die Superoxid-Dismutase oder eine Placebosubstanz erhalten hatten, war klar: Das antioxidative Enzym verbesserte weder das Anwachsen des verpflanzten Organs noch seine Frühfunktion, also das Infunktionsretreten nach dem Eingriff. Prompt stieg die Pharmafirma aus, und das Interesse an der Superoxid-Dismutase in diesem Zusammenhang erlosch genauso schnell, wie es aufgeflammt war.

Jahre später ließ der deutsche Chirurg Walter Land, der die Nierentransplantationen vorgenommen hatte, die Studiendaten in eine Langzeitanalyse einfließen. Dabei kristallisierte sich ein überraschendes Muster heraus. Zwar hatte die Superoxid-Dismutase die Frühfunktion der Nieren nicht verbessert, doch auf längere Sicht dazu geführt, dass nur etwa halb so viele Empfänger das verpflanzte Organ abstoßen wie normal. Land vermutete daraufhin, das Abstoßen des Transplantats gehe nicht, wie gemeinhin angenommen, auf die Unverträglichkeit von Gewebemerkmalen des Spenders und des Empfängers zurück, sondern resultiere in erster Linie aus oxidativen Schäden, die reaktive Sauerstoffspezies im Transplantat anrichten.

Die Superoxid-Dismutase habe diese Zerstörungen teils verhindert, und das sei der Grund dafür gewesen, dass die Empfänger die verpflanzten Nieren besser toleriert hätten. Jene Schäden, argumentierte Land weiter, würden das Immunsystem des Empfängers alarmieren und eine Immunreaktion gegen das eingesetzte Organ auslösen. Das erkläre auch die Beobachtung, dass frische Nieren von gesunden Spendern, deren Gewebemerkmale nicht zu denen des Empfängers passen, viel besser toleriert würden als länger konservierte Organe von Verstorbenen, die hinsichtlich der Gewebemerkmale zwar passen, aber stärker beschädigt sind.

Wird nicht das Fremde attackiert, sondern das Gefährliche?

Lands Hypothese, die er erstmals 1994 publizierte, blieb zunächst weitgehend unbeachtet. Das änderte sich jedoch Mitte der 1990er Jahre, als Polly Matzinger, amerikanische Immunologin vom National Cancer Institute in Bethesda, ihrerseits das »Gefahrenmodell« (»Danger Model«) postulierte – ohne von Lands Arbeiten zu wissen. Es besagt, die Immunabwehr reagiere nicht grundsätzlich auf Fremdes – seit den 1960er Jahren eine Grundannahme der Immunologie, sondern vielmehr auf Gefahr. Dies könnte zum Beispiel erklären, warum unser Organismus krank machende Bakterien intensiv bekämpft, die zahllosen Bakterienstämme des Mikrobioms dagegen problemlos duldet. Oder warum eine Mutter ihren Fötus, der zur Hälfte aus fremdem genetischen Material besteht, nicht abstößt. »Diese Fremdkörper«, sagt Matzinger, »werden nicht angegriffen, weil sie keine Gefahr für den Körper darstellen.« Erleiden Zellen allerdings Schaden oder sterben ab, etwa während einer Virusinfektion, dann werden Zellbestandteile freigesetzt, die Immunreaktionen provozieren. Jene als »Gefahrensignale« wirkenden Moleküle locken spezielle Immunzellen an, die dendritischen Zellen, und veranlassen sie dazu, Material aus dem beschädigten Gewebe aufzunehmen. Die dendritischen Zellen präsentieren ihre Fracht sodann anderen Immunzellen, vor allem den T-Lymphozyten, was diese dazu bringt, entsprechende Strukturen zu attackieren.

In Analogie zu PAMPs (»Pathogen Associated Molecular Patterns«, pathogenassoziierte molekulare Muster), die auf Mikroben vorkommen und ohne Weiteres von der Immunabwehr erkannt werden, prägte Matzinger 2003 den Begriff DAMPs (»Danger Associated Molecular Patterns«, gefahrenassoziierte molekulare Muster). Damit meint sie jene gefahrensignalvermittelnden Moleküle, die aus beschädigten Geweben austreten. In dieses Konzept fügt sich Lands These aus der Transplantationsmedizin passend ein: Demnach setzen oxidative Schäden DAMPs aus den Zellen des verpflanzten Organs frei, die das Immunsystem dazu anstacheln, das Organ anzugreifen.

Land glaubte mittlerweile, bei den von Transplantaten abgesonderten DAMPs handle es sich um Hitzeschockproteine – Eiweißmoleküle, die Zellen unter Stress produzieren und auf ihrer Oberfläche präsentieren. Der Chirurg

Glossar

DAMPs Danger Associated Molecular Patterns; gefahrensignalvermittelnde Moleküle, die aus beschädigten Geweben austreten

ICD Immunogenic Cell Death; immunantwortauslösender Zelltod

Lymphozyten Immunzellen, die im Körper zirkulieren und Fremdstoffen erkennen sowie beseitigen

bevorzugte allerdings den allgemeineren Begriff Damage Associated Molecular Patterns (»schadensassoziierte molekulare Strukturen«), um zu verdeutlichen, dass die Moleküle auch bei bloßer Schädigung ohne weitergehende Gefahr frei werden. Diese Benennung setzte sich durch, und Hitzeschockproteine wurden zu den ersten akzeptierten DAMPs. Es dauerte nicht lang, bis Forscher zwei weitere DAMP-Typen entdeckten, die infolge einer Nekrose (des krankhaften Absterbens einer Zelle) auftreten – ein Zellkernprotein Namens HMGB1 sowie das Stoffwechselprodukt Harnsäure, das erwiesenermaßen immunstimulierend wirkt. Dennoch blieben das Gefahrenmodell und die zugehörigen DAMPs lange Zeit weitgehend hypothetisch. Die Wende kam, als französische Krebsforscher das Konzept für sich neu entdeckten.

Abgetötete Tumorzellen impfen Mäuse gegen Krebserkrankungen

Bis vor Kurzem nahmen Onkologen an, gängige Krebsbehandlungen entfalteten ihre therapeutische Wirkung aus sich selbst heraus, ohne dass sich die Immunabwehr des Patienten daran beteilige. Dafür sprach unter anderem, dass Chemo- und Strahlentherapien das Blut bildende System samt Immunzellen stark beeinträchtigen. Doch Laurence Zitvogel, Bruno Kroemer und ihre Kollegen am Institut Gustave Roussy in Villejuif (bei Paris) machten, nach ersten Hinweisen in den Jahren 2007 bis 2009, eine erstaunliche Entdeckung. Sie stellten fest, dass Tumorzellen, die mit bestimmten Chemotherapeutika behandelt werden, das Immunsystem von Mäusen anstacheln können. Doxorubicin, der verwendete Arzneistoff, tötete nicht nur die Krebszellen ab, sondern rief auch zytotoxische T-Zellen (»T-Killerzellen«) auf den Plan und steigerte so den therapeutischen Effekt der Chemotherapie. Noch erstaunlicher: Behandelten die Forscher gesunde Mäuse mit Tumorzellen, die mit Doxorubicin abgetötet worden waren, stießen die Tiere daraufhin eingeschleuste lebende Krebszellen ab. Wie bei einer Impfung hatte die Konfrontation mit den abgetöteten Zellen das Immunsystem so geprägt, dass es später eindringende Tumorzellen erkannte und vernichtete.

Zwar sind nicht alle Chemotherapeutika dazu in der Lage, jenen besonderen Zelltod herbeizuführen, den Zitvogel und Kroemer Immunogenic Cell Death (ICD, deutsch: immunantwortauslösender Zelltod) taufen. Doch immerhin ist dies außer für Doxorubicin auch für Epirubicin, Cyclophosphamid und Oxaliplatin belegt. Darüber

hinaus stellte man fest, dass die Strahlentherapie, die fotodynamische Therapie (die Licht zusammen mit einer lichtaktivierbaren Substanz einsetzt, um den Tumor zu schädigen) sowie einige onkolytische (tumorzelltötende) Viren einen ICD induzieren können.

In den zurückliegenden Jahren haben die Forscher drei zelluläre Vorgänge identifiziert, die eine Therapie auslösen muss, damit ein ICD eintritt. Im ersten Schritt muss infolge eines Schadens am endoplasmatischen Retikulum (ER, die Proteinfabrik der Zelle) das dort sitzende Protein Calreticulin auf die äußere Seite der Zellmembran wechseln. Dort signalisiert es in der Nähe befindlichen dendritischen Zellen »Friss mich«, was diese dazu anregt, die betroffene Zelle in sich aufzunehmen. Während die Zelle sich zersetzt, gelangt im zweiten Schritt der Energieträger ATP nach außen, was mehr Immunzellen auf den Plan ruft, denn Makrophagen und dendritische Zellen interpretieren ATP als »Finde mich«-Signal. Im dritten Schritt schließlich, wenn sich die Membranen der betroffenen Zelle auflösen, werden Proteine des Zellkerns frei, die an Rezeptoren der dendritischen Zellen andocken – was wiederum Signalkaskaden zur Steigerung der Immunreaktion in Gang setzt. Das Wichtigste dieser Zellkernproteine ist HMGB1, eines der ersten identifizierten DAMPs. Im Licht dieser Erkenntnisse erwiesen sich Calreticulin und ATP als jene DAMPs, deren Existenz Matzinger und Land bereits Jahre zuvor angenommen hatten.

Die Art des Zelltods ist von entscheidender Bedeutung

Mittlerweile kennt man um die 50 DAMPs, die meisten davon aus der Krebsforschung, wo der immunantwortauslösende Zelltod eine immer wichtigere Rolle spielt. Im Einklang mit dem Gefahrenmodell zeichnet sich ab: Damit das Immunsystem einen Tumor attackiert, muss dieser so geschädigt werden, dass er DAMPs freisetzt.

Insgesamt häufen sich die Hinweise darauf, dass das Auslösen eines ICD bei Krebspatienten mit einem günstigen Therapieverlauf einhergeht. Laut Studien der zurückliegenden Jahre wirken Chemotherapien bei Brust- und Darmkrebspatienten umso effektiver, je mehr zytotoxische T-Zellen in die Tumoren eindringen. Darüber hinaus hängt der Erfolg solcher Therapien bei zahlreichen Tumorarten mit der Anwesenheit bestimmter DAMPs zusammen, etwa Calreticulin oder HMGB1.

Einige Arzneistoffe, beispielsweise Herzglykoside wie Digitalis, haben sich als besonders effiziente Auslöser eines ICD entpuppt. Sie fördern die Freisetzung der drei DAMPs Calreticulin, ATP und HMGB1 – und verlängern, wenn sie zusammen mit bestimmten Chemotherapeutika verabreicht werden, die Überlebenszeit von Brust- und Darmkrebspatienten. Zudem macht das Auslösen eines ICD es möglich, Krebsimpfungen zu verbessern. Forscher um Patrizia Agostinis von der Universität Leuven (Belgien) haben 2016 erste Ergebnisse veröffentlicht von Versuchen an Mäusen, welche an einem Gliom, einem bestimmten Typ von Hirntumoren, erkrankt waren. Die Forscher beluden dendri-

tische Zellen der Tiere mit Material aus Tumorzellen, die per ICD abgetötet worden waren, und spritzten die solcherart veränderten dendritischen Zellen den Tieren wieder zurück. Die auf diese Weise geimpften Mäuse überlebten dreimal so lang wie Nager, die nur eine Chemotherapie erhalten hatten; zudem waren ihre Hirntumoren mit Lymphozyten durchdrungen, deren Vorhandensein erwiesenermaßen mit einer besonders günstigen Prognose einhergeht.

Doch den größten Nutzen erhoffen sich die Forscher aus der Kombination mit so genannten Immuncheckpoint-Inhibitoren (siehe **Spektrum** August 2014, S. 30). Diese Substanzen lösen bestimmte Bremsen, mit denen Tumoren die Immunreaktion unterdrücken, und entfesseln so die Körperabwehr. Bislang schlagen sie nur bei rund 20 Prozent der Krebspatienten an – vor allem deshalb, weil sie nur wirken, wenn Lymphozyten in den Tumor eingedrungen sind, was bei vielen Patienten nicht der Fall ist. Mit dem ICD kann man hier offenbar Abhilfe schaffen, wie Mikael Pittet von der Harvard Medical School und sein Team in Tierversuchen gezeigt haben. Die Forscher experimentierten mit Mäusen, die an einer bestimmten Form von Lungenkrebs litten, welcher sich nicht mit Immuncheckpoint-Inhibitoren behandeln ließ. Verabreichten sie den Tieren eine Mischung aus den ICD-Auslösern Oxaliplatin und Cyclophosphamid, sprachen die Tumoren anschließend auf die Therapie an.

Das Konzept der ICD stammt aus der Krebsforschung, doch der Prozess spielt offensichtlich auch bei vielen anderen krankhaften Zuständen eine Rolle. So fanden Forscher heraus, dass HMGB1, Hitzeschockproteine und mitochondriale DNA bei schweren Traumen oder bei Blutvergiftungen den Körper überfluten und starke Immunreaktionen provozieren. Oft ist ihre Konzentration im Blut umgekehrt korreliert mit der Überlebenswahrscheinlichkeit. Es kann also nicht nur von medizinischem Interesse sein, den ICD herbeizuführen, wie bei einer Krebsbehandlung, sondern ebenso, ihn zu unterdrücken.

Bezüglich der Transplantationsmedizin, wo das Gefahrenmodell seine Wurzeln hat, sind sich Matzinger und Land einig: Den lebenslangen und teils mit schweren Nebenwirkungen verbundenen Einsatz von Immunsuppressiva, die eine Abstoßung des fremden Organs verhindern, dabei aber die gesamte Körperabwehr unterdrücken, könnte man eines Tages durch gezielte Hemmung von DAMPs ersetzen. ◀

Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

QUELLEN

Garg, A. D. et al.: Molecular and Translational Classifications of DAMPs in Immunogenic Cell Death. In: *Frontiers in Immunology* 6, 588, 2015

Garg, A. D. et al.: Dendritic Cell Vaccines Based on Immunogenic Cell Death Elicit Danger Signals and T Cell-Driven Rejection of High-Grade Glioma. In: *Science Translational Medicine* 8, 328ra27, 2016

ATOMPHYSIK

SCHWEFELIONEN STATT DUNKLE MATERIE

Eine rätselhafte Strahlung aus diversen Regionen im All ließ Physiker über neue Teilchen spekulieren. Laborexperimente untermauern nun eine einfachere Erklärung: Das Signal stammt von Elektronenübergängen bei stark positiv geladenen Ionen.

► Eine große offene Frage unseres physikalischen Weltbilds ist die nach der Natur der Dunklen Materie. Diese dient als gängige Erklärung dafür, dass sich Sterne und ganze Galaxien nicht so bewegen, wie allein auf Grund der sichtbaren Masse zu erwarten wäre. Es weiß allerdings niemand, woraus Dunkle Materie besteht. Einige der vorgeschlagenen Kandidaten sind Teilchen, die von Zeit zu Zeit zerfallen und dabei Licht aussenden könnten. Aus diesem Grund suchen Astronomen in den Spektren von Objekten im Weltall nach verdächtigen Signalen.

Besitzergreifender Schwefelkern

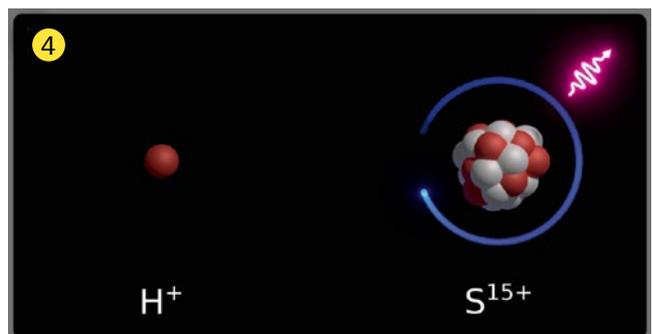
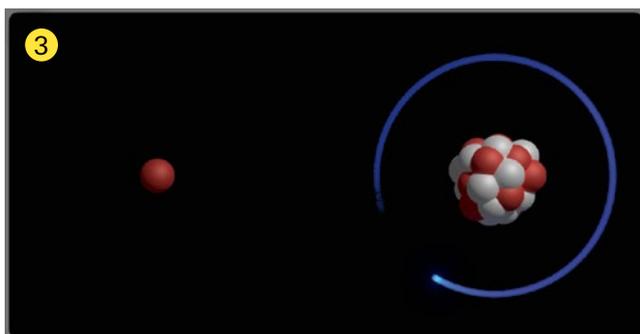
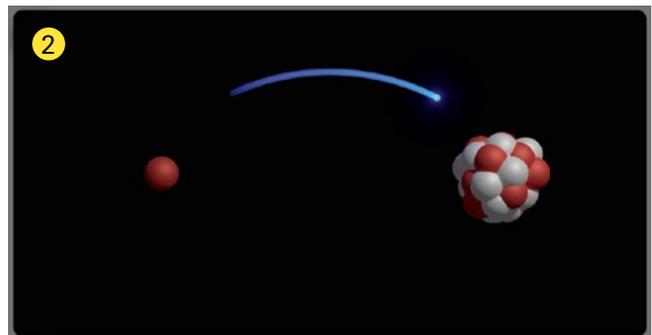
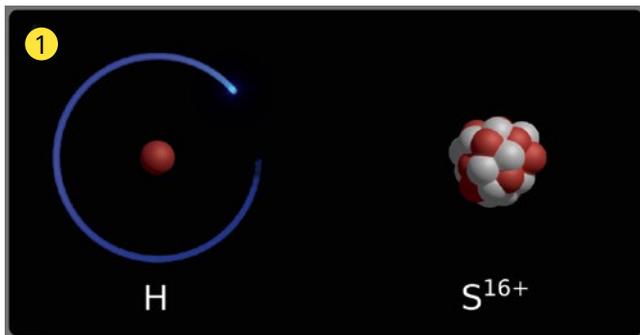
Entreißt man einem Schwefelatom alle Elektronen, ist es vollständig ionisiert und 16-fach positiv geladen. Wenn atomarer Wasserstoff in seine Nähe kommt (1), zieht es dessen Elektron an und übernimmt es (2). Das Teilchen landet zunächst in einem hohen Energieniveau des Schwefelions (3). Dieses befindet sich nach

Astrophysiker um Alexey Boyarsky von der niederländischen Universität Leiden entdeckten 2014 eine solche bislang unbekannt Emission in den Röntgenspektren der Andromedagalaxie sowie des Perseus-Galaxienhaufens. Die gleiche Beobachtung machten im selben Jahr Esra Bulbul vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und Mitarbeiter der NASA, als sie 73 einzelne Galaxienhaufen untersuchten. Stets gab es eine unerklärliche Linie bei etwa 3,5 Kiloelektronvolt, also ein verstärktes Auftreten von Photonen mit dieser Energie.

Die Nachricht stieß in der wissenschaftlichen Gemeinschaft auf außerordentliches Interesse. Handelte es sich um den Nachweis strahlender Dunkler Materie? Die beobachtete Energie passte obendrein zu hypothetischen Teilchen, die als sterile Neutrinos bezeichnet werden. Inzwischen mehren sich jedoch Zweifel. Beispielsweise stimmt die räumliche Verteilung der beobachteten Emissionen nicht mit den Orten überein, an denen Astronomen viel Dunkle Materie erwarten. Vor allem aber scheint die Methode problematisch zu sein, mit der die Linie ursprünglich aufgespürt wurde.

Die Röntgenspektren astrophysikalischer Quellen sind komplex und enthalten eine Vielzahl von Emissions- und

dem Ladungsaustausch also in einem angeregten Zustand mit überschüssiger Energie. Das Ion geht nach kurzer Zeit in den Grundzustand über und strahlt intensives Röntgenlicht ab (4). Dessen Energie entspricht einem mysteriösen Signal, das zuvor bei mehreren astronomischen Objekten gemessen worden war.



Absorptionslinien. Diese stammen von Atomen und Molekülen, aber zu einem großen Teil auch von positiv geladenen Ionen – Letztere sind Atome, denen ein Teil ihrer Elektronen entrissen wurde. Sie finden sich zum Beispiel in den Plasmen von Sternen oder im heißen Medium zwischen den Galaxien eines Galaxienhaufens. Nachdem die Wissenschaftler aus den beobachteten Spektren alle bekannten Linien subtrahiert hatten, verblieb eine erhöhte

Viele Prozesse, bei denen Röntgenlicht entstehen könnte, wurden noch nie untersucht

Intensität bei 3,5 Kiloelektronvolt. Da sie keinem bekannten Prozess zugeordnet werden konnte, interpretierten einige Forscher sie als mögliche Strahlung zerfallender Dunkler Materie.

Allerdings führen die gängigen Tabellen und Datenbanken zahlreiche atomphysikalische Prozesse, bei denen Röntgenlicht entsteht, nicht oder nur unvollständig auf. Viele davon wurden bisher experimentell noch nicht untersucht. Darum konnten ihre Signale aus den beobachteten Spektren nicht abgezogen werden und kämen dementsprechend ebenfalls als Ursache in Frage.

Theoretisch berechneter Prozess experimentell bestätigt

Unsere niederländischen Kooperationspartner Liyi Gu vom SRON Netherlands Institute for Space Research in Utrecht und Jelle Kaastra von der Universität Leiden haben 2015 berechnet, dass ionisierter Schwefel unter bestimmten Umständen Strahlung mit der passenden Energie abgeben kann. Ein Ion, dem viele seiner Elektronen abhandgekommen sind, hat eine starke positive Ladung. Kommt ein neutrales Atom oder Molekül einem solchen »hochgeladenen« Ion zu nahe, so zerrt dieses an den Elektronen und verleiht sich von Zeit zu Zeit eines ein. Nach einem solchen Ladungsaustausch befindet sich das jetzt um ein Elektron reichere Ion in einem angeregten Zustand mit viel überschüssiger Energie. Diese gibt es in Form von Röntgenstrahlung ab.

Laut den niederländischen Physikern könnte eben diese Strahlung für die Linie bei 3,5 Kiloelektronvolt verantwortlich sein, wenn sich vollständig ionisierter, 16-fach positiv geladener Schwefel Elektronen von atomarem Wasserstoff aneignet. Beide Elemente sind häufig im interstellaren Medium anzutreffen.

Um zu zeigen, dass Ladungsaustausch tatsächlich die fragliche Emission hervorrufen kann, haben meine Kollegen und ich in der Arbeitsgruppe von José Crespo am Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik den Prozess jetzt im Labor nachgestellt. Dazu verwendeten wir eine so genannte Elektronenstrahl-Ionenfalle. Darin kom-

primiert ein starkes Magnetfeld einen Strahl beschleunigter Elektronen auf weniger als den Durchmesser eines menschlichen Haars. Treffen diese Elektronen auf ein Atom, so können sie in ihm gebundene Elektronen heraus schlagen, wodurch es zu einem positiv geladenen Ion wird. Der negativ geladene Elektronenstrahl zieht es daraufhin an und hält es gefangen. Der Vorgang wiederholt sich, und das Ion verliert mehr und mehr von seinen Elektronen.

Um nun gezielt 16-fach positiv geladene Schwefelionen zu erzeugen, ließen wir ein Gas aus schwefelhaltigen Kohlenstoffdisulfid-Molekülen in die Falle strömen. Der Elektronenbeschuss zerlegte sie in ihre atomaren Bestandteile und ionisierte den freigesetzten Schwefel schrittweise. Das gesuchte, vergleichsweise schwache Signal durch den Ladungsaustausch wäre in diesem Umfeld jedoch nicht nachweisbar gewesen, da andere Elektronen aus dem Strahl die Ionen in der Falle unentwegt angeregt und dadurch zur Abgabe von Röntgenlicht veranlasst haben.

Darum schalteten wir den Elektronenstrahl aus, sobald die Schwefelionen produziert waren. Diese blieben durch das starke Magnetfeld mehrere Sekunden gefangen und konnten dabei mit dem weiterhin einströmenden Gas wechselwirken. Die Schwefelionen entrissen den neu hinzukommenden Kohlenstoffdisulfid-Molekülen Elektronen, und ein Detektor zeichnete das Spektrum der dabei abgegebenen Strahlung auf. Ergebnis: Es zeigte sich unter anderem eine Emission bei 3,47 Kiloelektronvolt. Sie stimmt gut mit den berechneten Werten und mit den astronomischen Beobachtungen überein. Dass sich in unserem Versuchsaufbau die Schwefelionen Elektronen von Molekülen und nicht von Wasserstoff aneigneten, spielt keine Rolle – die Energie der abgestrahlten Röntgenphotonen wird ausschließlich durch die Vorgänge im Schwefel bestimmt.

Unsere Messungen zeigen eindrücklich, wie eng verbunden Astronomie und Atomphysik sind. Offenbar sahen wir im Labor einen Prozess, der auch im All ablaufen könnte und der bei der ersten Interpretation der Spektren von Röntgensatelliten nicht berücksichtigt wurde. Ladungsaustausch muss nicht zwingend, kann aber sehr wohl für die Spektrallinie bei 3,5 Kiloelektronvolt verantwortlich sein.

Ein Ursprung im Zerfall Dunkler Materie wird auf jeden Fall unwahrscheinlicher. Solange unser Wissen von den Prozessen in gewöhnlicher Materie unvollständig ist, sollten wir aus einer unverständenen Beobachtung nicht gleich auf eine exotische Ursache schließen. ◀

Sven Bernitt ist Physiker und forscht an der Spektroskopie hochgeladener Ionen an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.

QUELLE

Shah, C. et al.: Laboratory Measurements Compellingly Support Charge-Exchange Mechanism for the »Dark Matter« ~3.5 keV X-Ray Line. In: The Astrophysical Journal 833, 52, 2016

UMWELT-DNA WANN ERREICHTEN DIE ERSTEN MENSCHEN NORDAMERIKA?

Zwei Forscherteams rekonstruieren die Lebensbedingungen auf der Bering-Landbrücke. Dabei kommen sie jedoch zu unterschiedlichen Einschätzungen, ab wann dort Menschen leben konnten.

► Gegen Ende der letzten Eiszeit war der Nordwesten Amerikas von zwei riesigen Eiskappen bedeckt. Als sie sich voneinander trennten, entstand ein eisfreier Korridor, der lange als die wahrscheinlichste Route galt, auf der von Sibirien kommende Jäger- und Sammlergruppen amerikanischen Bodens betreten. Doch mit rund 1500 Kilometer Länge musste sich dieser Weg erst einmal zu einem Lebensraum entwickeln, der ausreichend Nahrung bot. Ab wann solche Voraussetzungen gegeben waren, haben Mikkel W. Pedersen und seine Kollegen des Centre for GeoGenetics der Universität Kopenhagen vor Kurzem gemeinsam mit amerikanischen und kanadischen Kollegen untersucht.

Dazu nahmen sie Sedimentproben aus Seen in den kanadischen Provinzen British Columbia und Alberta den Überresten eines großen Schmelzwassersees. Sie liegen in einem Bereich des Korridors, der nach heutiger Kenntnis erst spät bewohnbar wurde. Anhand so genannter Umwelt-DNA, Pollen und Pflanzenresten rekonstruierten die Wissenschaftler den zeitlichen Ablauf und das Muster der Besiedlung durch Pflanzen und Tiere.

Lange glaubte man, die ersten Amerikaner hätten den Kontinent erstmals im Westen Kanadas betreten. Wo heute die Beringstraße Amerika von Asien trennt, existierte damals eine Landverbindung. Als das Eis sie freigab, seien Jäger, den Herden ihrer Beutetiere folgend, auf diesem Weg eingewandert. Inzwischen ist sicher, dass Menschen bereits vor rund 14 700 Jahren in Südamerika lebten, die Eisschilde jedoch frühestens vor 15 000 Jahren die Landbrücke allmählich freigaben. 300 Jahre dürften kaum genügt haben, um den Doppelkontinent zu durchqueren. Viele Fachleute nehmen deshalb an, die Immigration sei schon früher erfolgt – entlang der Pazifikküste, sobald Wasserflächen und Küstenstreifen eisfrei wurden.

Dennoch bleibt der IFC (»ice-free corridor«) im Gespräch, denn Amerikas Besiedlung kann in mehreren Einwanderungswellen erfolgt sein. Insbesondere für die Clovis-Kultur, die in Nordamerika vor 13 400 bis 12 800 Jahren auftrat, scheint die Landroute realistisch. Das

Anzeige

Hintergrundinfos

zu Trends und Entwicklungen aus Forschung, Lehre und Wissenschaftsmanagement

Nachrichten

aus dem nationalen und internationalen Hochschul- und Wissenschaftsgeschehen

Praxisberichte

von Expertinnen und Experten zum Forschen, Lehren und Leiten

... und die besten Jobs

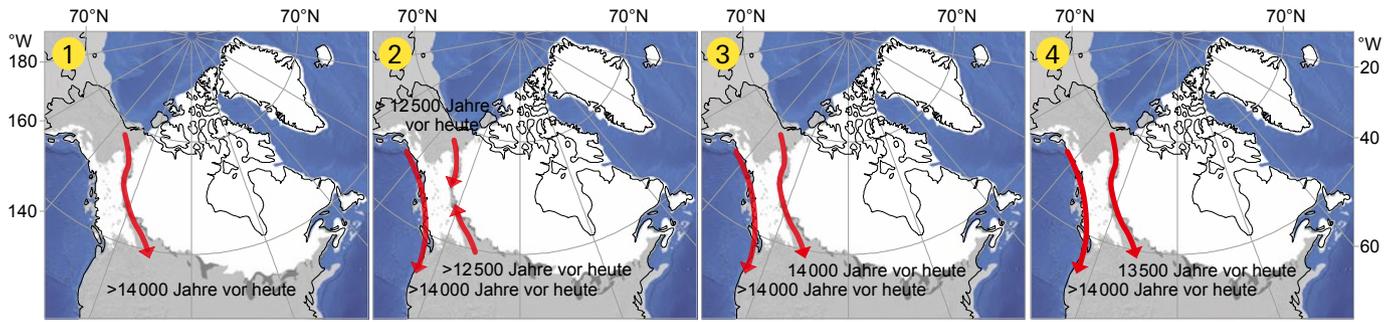
für Nachwuchswissenschaftler, Fach- und Führungskräfte im großen akademischen Stellenmarkt



PROBEABO ZUM KENNENLERNEN

Online: www.duz.de/abo
E-Mail: kundenservice@duz-medienhaus.de
Telefon: 030 21 29 87 - 0

Für Hochschulen und sonstige größere Einrichtungen ist eine Campus-Lizenz verfügbar.



PEDERSEN, M.W. ET AL.: POSTGLACIAL VIABILITY AND COLONIZATION IN NORTH AMERICA'S ICE-FREE CORRIDOR. IN: NATURE 537, S. 45-49, 2016, FIG. 4. MIT FRDL. GEN. VON MIKKEL W. PEDERSEN

Die Einwanderung der Menschen nach Amerika

Eine mutmaßliche Route der ersten Siedler führte von Sibirien aus über einen eisfreien Korridor (IFC), der sich im Nordwesten Nordamerikas zwischen zwei Eiskappen öffnete (1). Manche Forscher gehen davon aus, dass die ersten Menschen entlang den Küsten reisten und erst später auch

in den Korridor einwanderten (2). Zwei andere Modelle postulieren ebenfalls beide Routen; sie unterscheiden sich in der Annahme, wann der IFC benutzt wurde (3 und 4). Nur Modell 2 entspricht den Schätzungen von Mikkel W. Pedersen, ab wann im IFC ausreichend Beutetiere lebten.

dänisch-kanadische Team versuchte nun herauszufinden, ab wann in dem tausende Kilometer langen Korridor eine Tier- und Pflanzenwelt existierte, die genug Nahrung bot.

Für ihre Studie analysierten die Forscher bis zu 12900 Jahre alte Sedimente aus besagten Schmelzwasserseen. Mit mikroskopischen Verfahren spürten sie Pollen und Pflanzenreste auf, um die damalige Vegetation zu rekonstruieren. Außerdem suchten sie nach prähistorischer Umwelt-DNA (»environmental DNA«) von Pflanzen und Tieren. Bei Tieren können sie etwa von Hautpartikeln und Fäkalien stammen. Die Radiokohlenstoffmethode erlaubte es, die Proben zu datieren.

Das Zeitfenster öffnet sich

Auf diese Weise lassen sich längst vergangene Ökosysteme mitsamt ihren Mikroorganismen und Kreisläufen nachvollziehen. In diesem Fall zeigten Pollenreste, dass der IFC noch vor 12700 Jahren allenfalls dürrtig mit Süßgräsern und Seggen bewachsen war. Dann erst verbreitete sich eine Steppenvegetation mit Beifuß, Birken und Weiden. Doch schon vor 12600 Jahren ernährte das Land bereits Bisons, wie Umwelt-DNA verrät. 200 Jahre später gab es kleinere Säugetiere wie Hasen und Wühlmäuse, wenig später Mammuts und Elche. Dass Bison und Mammut den Korridor gefunden hatten, ist bedeutsam, denn diese Großtiere wurden von den Clovis gejagt. Sogar Weißkopfseeadler gab es. Die Anwesenheit solcher Raubvögel, die weit oben in der Nahrungskette stehen, spricht für ein produktives Ökosystem.

Die Forscher kommen daher zu dem Schluss, dass es Menschen vor 12600 Jahren möglich war, die Landroute zu nehmen, jedoch nicht früher. Für die Clovis kommt dieser Weg somit nicht in Frage. Das Zeitfenster schloss sich andererseits vor etwa 10000 Jahren wieder, denn jetzt breiteten sich Nadelwälder aus, eine für Menschen damals undurchdringliche Wildnis ohne die gewohnte Beute. Doch diese Einschätzung ist umstritten. Insbesondere kam

eine Gruppe kanadischer und kalifornischer Wissenschaftler kürzlich zu anderen Ergebnissen. Sie hat unter Leitung von Peter D. Heintzmann vom Department of Ecology and Evolutionary Biology der University of California in Santa Cruz mitochondriale DNA aus Knochen und Zähnen vorgeschichtlicher Bisons nach genetischen Hinweisen für deren Herkunft untersucht. Das Ergebnis: Schon vor 13400 Jahren zogen Bisons aus dem Süden nach Norden, 400 Jahre später begann auch eine Gegenbewegung. Demnach hätte der IFC doch schon einige Jahrhunderte früher Menschen ernähren können.

Die Diskrepanz könnte erklären, dass Umschichtungen und Abbauprozesse in den eiszeitlichen Seen die Sedimentablagerung verfälschten, weshalb die gesuchte Umwelt-DNA in den ältesten Schichten fehlen. Zudem zeigen archäologische Befunde aus einer von Menschen genutzten Höhle im Untersuchungsgebiet, dass Fische und Wasservögel bereits vor 12700 Jahren wichtige Ressourcen waren – genetische Belege solcher Tiere fanden sich in Seesedimenten jedoch nicht.

Somit bleibt die Frage nach den mutmaßlichen Besiedlungsrouten offen. Ein interessanter Nebenaspekt der Umweltstudie: Pollenfunden zufolge waren Pappeln und Weiden vor 12400 Jahren häufiger als bislang angenommen. Während manche Menschengruppen zu Fuß gen Süden zogen, könnten andere mit einfachen Booten auf den riesigen Gletscherseen unterwegs gewesen sein. ◀

Suzanne McGowan ist Paläoölmnologin an der School of Geography der University of Nottingham.

QUELLEN

Heintzmann, P.D. et al.: Bison Phylogeography Constrains Dispersal and Viability of the Ice Free Corridor in Western Canada. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 29, S. 8057–8063, 2016

Pedersen, M.W. et al.: Postglacial Viability and Colonization in North America's Ice-Free Corridor. In: Nature 537, S. 45–49, 2016

MIKROBIOLOGIE

VORTEILHAFT VIELFALT

Bakterien mit gleichem Erbgut sollten sich unter identischen Bedingungen auch ähnlich verhalten – eigentlich. Manchmal können aber Abweichler für einen klaren Wachstumsvorteil sorgen.

► Gelangt ein Bakterium an einen Ort mit günstigen Umweltbedingungen, beginnt es sich zu teilen. Innerhalb kürzester Zeit entsteht so eine Gemeinschaft aus Lebewesen mit identischem Erbgut. In der gleichen Situation sollten sich diese Klone eigentlich ähnlich verhalten. Dass dies in der Natur nicht immer so ist, und warum das seine Vorteile hat, zeigten Wissenschaftler um Frank Schreiber von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Sie untersuchten eine Mikrobe, die gasförmigen Stickstoff (N_2) aus der Luft aufnehmen und in ihre Zellbausteine einbauen kann. Diese Fähigkeit bietet einen Überlebensvorteil bei knappem Nährstoffangebot, denn Stickstoff ist unentbehrlich für den Aufbau von Eiweißen und der Erbsubstanz DNA. Während Tiere und Pilze das Element in Form von organischen Verbindungen mit der Nahrung aufnehmen müssen, können Pflanzen und die meisten Bakterien zusätzlich anorganische Substanzen wie Ammoniumionen (NH_4^+) nutzen. Deren Verfügbarkeit ist in der Natur allerdings begrenzt und schwankt zudem – ein wachstumsbegrenzender Faktor für die davon abhängigen Lebewesen. Stickstofffixierer sind da im Vorteil, denn N_2 gibt es immer genug in der Luft.

Allerdings ist die Dreifachbindung zwischen den beiden Atomen des Stickstoffmoleküls sehr stabil, ihr Aufbrechen dementsprechend energieintensiv. Das nach den deutschen Chemikern Fritz Haber und Carl Bosch benannte industrielle Verfahren benötigt 400 bis 500 Grad Celsius und 150 bis 300-fachen Atmosphärendruck, damit aus molekularem Stick- und Wasserstoff Ammoniak (NH_3) entstehen kann. Die Bakterien führen im Prinzip die gleiche Reaktion, aber unter physiologischen Bedingungen durch, und zwar mit Hilfe eines Enzymkomplexes namens Nitrogenase. Sie bezahlen dafür in der Energiewährung der Zelle, dem Adenosintriphosphat (ATP), von dem 16 Moleküle pro gespaltenem N_2 verbraucht werden. Wie bei allen teuren Sachen empfiehlt sich der Verzicht, solange eine billigere Alternative zur Verfügung steht. Und wirklich verwenden ebenfalls solche Mikroben bevorzugt gelöste Stickstoffsalze. Deren Gegenwart unterdrückt die Bildung der Nitrogenase, was einen weiteren Spareffekt zur Folge hat, nämlich bei den Aminosäuren für den Aufbau der Enzymmoleküle.

Versiegt der Nachschub an leicht verfügbarem Stickstoff, stehen aber auch die prinzipiell zur Stickstofffixierung fähigen Mikroben erst einmal vor einem Problem. Um überleben zu können, müssen sie ihren Stoffwechsel schnellstmöglich umschalten. Dummerweise benötigen

sie dazu ausgerechnet das fehlende Molekül, und zwar für die Herstellung der Nitrogenase – ein Teufelskreis, den Bakterien der Art *Klebsiella oxytoca* auf clevere Weise umgehen, wie die Schweizer Forscher zeigten. Und zwar reagieren die Mikroorganismen auf ein versiegendes Ammoniumangebot, indem einzelne Zellen innerhalb der Gemeinschaft ihre Maschinerie für die Spaltung des Luftstickstoffs bereits anwerfen, wenn das noch gar nicht notwendig ist. Für diese Individuen bedeutet so eine Reaktion zunächst unnötige Kosten und verringert daher ihre Wettbewerbsfähigkeit. Dafür können sie aber schneller als ihre Nachbarn mit der Verwertung von N_2 beginnen, was ihnen im Bedarfsfall einen Wachstumsvorteil einbringt. Die Investition ist ein Risiko, zahlt sich aber wohl meist aus, vor allem für eine Population aus eng verwandten Mitgliedern.

Um das heterogene Verhalten innerhalb der Mikrobengemeinschaft nachzuweisen, kooperierten die Züricher mit Wissenschaftlern der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne und dem Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie in Bremen. In Letzterem steht eines von weltweit nur etwa 40 NanoSIMS-Geräten, mit denen sich die elementare Zusammensetzung einer Probe auf einer Skala von Nanometern (millionstel Millimeter) messen lässt.

Die Abkürzung SIMS steht für Sekundärionen-Massenspektrometer. Dabei handelt es sich um ein Gerät, das die Oberfläche einer Probe mit energiereichen Ionen (den Primärionen) beschießt und die sich dadurch aus der Probe lösenden Sekundärionen analysiert. Das NanoSIMS hat eine Auflösung von rund 30 Nanometern, was es erlaubt, den aus der Luft aufgenommenen Stickstoff präzise in einem einzelnen, winzigen Bakterium messen zu können. Da eine typische *Klebsiella*-Zelle 10- bis 30-fach größer ist, lassen sich sogar mehrere Messpunkte pro Zelle aufnehmen.

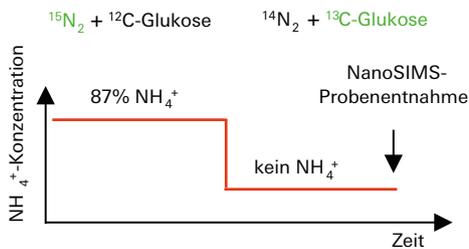
Ausgeklügelte Fütterungsexperimente zeigen die Abweichungen zwischen einzelnen Bakterienzellen

Die Mikroorganismen erhielten in einer Reihe von Fütterungsversuchen unterschiedlich zusammengesetzte Gemische aus gelösten Ammoniumionen und Stickstoffgas. Letzteres war durch die Verwendung eines Isotops markiert, so dass die Forscher verfolgen konnten, aus welcher Verbindung die von dem untersuchten Individuum aufgenommenen und eingebauten Atome stammten, die das NanoSIMS am Ende des Experiments nachwies. Dadurch ließ sich nicht nur für jede einzelne Zelle die N_2 -Aufnahmerate errechnen, sondern auch der über die gesamte Population gemittelte Wert sowie das Ausmaß an Heterogenität innerhalb der Population (siehe »Stickstoffdiät mit Isotopen«, S. 32).

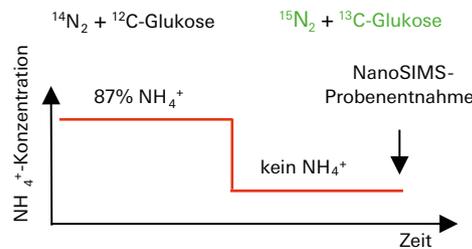
Wie erwartet verwerteten die Bakterien mit steigender Ammoniumkonzentration insgesamt weniger Luftstickstoff. Gleichzeitig nahmen jedoch die Unterschiede zwischen den einzelnen Zellen zu, und damit wuchs die Heterogenität innerhalb der Gruppe. Dazu passte, dass die Produktion des Nitrogenasekomplexes in der Gesamt-

Stickstoffdiät mit Isotopen

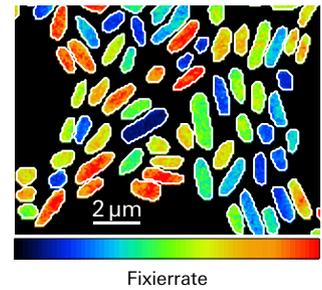
Nach einer Phase mit (beschränkter) Stickstoffversorgung per Ammonium mussten die Bakterien ganz ohne den Nährstoff auskommen und stattdessen mühsam Luftstickstoff fixieren. Mittels NanoSIMS ließ sich auf Grund der jeweils hinzugegebenen Isotope die Herkunft des eingebauten Stick- und Kohlenstoffs für jede einzelne Mikrobe bestimmen – und damit neben dem Ausmaß an Heterogenität in der Population auch der Wettbewerbsvorteil einer vorzeitigen Umstellung auf Stickstofffixierung.



Hinzugegebenes markiertes Stickstoffgas erlaubt zu bestimmen, wie viel eine Mikrobe davon während der ersten Phase fixiert hat. Markierter Kohlenstoff zeigt, wie stark sie in der zweiten Phase gewachsen ist.



Bei diesem Experiment wurden erst in der zweiten Phase gleichzeitig markierter Stickstoff und markierter Kohlenstoff dazugegeben, um herauszufinden, ob die schon zuvor N₂-fixierenden Zellen einen Vorteil haben.



Wie sehr einzelne Klebsiella-Zellen Luftstickstoff fixieren, wenn neben N₂ auch NH₄⁺ vorhanden ist, schwankt stark (blau: wenig; rot: viel).

SCHREIBER, F. ET AL.: PHENOTYPIC HETEROGENEITY DRIVEN BY NUTRIENT LIMITATION PROMOTES GROWTH IN FLUCTUATING ENVIRONMENTS. IN: NATURE MICROBIOLOGY 1, ART. 1655, 10.1038/nmicrobiol.2016.55, 2016. HG. 31 JUNI UND PG. 20 (RECHTS). MIT FOL. GEN. VON FRANK SCHREIBER

population gemittelt ebenfalls abnahm, wie die Ableserate eines dafür kodierenden Gens zeigte, die Schwankungen der Genexpression zwischen einzelnen Zellen dagegen anstiegen. Warum die gleiche Ammoniumkonzentration die Bildung der Nitrogenase bei genetisch identischen Zellen unterschiedlich stark unterdrückt und über welchen molekularen Mechanismus das geschieht, lässt sich leider auf Einzelzebene noch nicht untersuchen.

Je größer die individuellen Unterschiede, desto erfolgreicher die Populationen

Die Experimente bestätigten also, dass manche der Mikroben schon mit dem Fixiervorgang begannen, obwohl noch Ammonium verfügbar war. Aber brachte das den Zellen wirklich einen Wettbewerbsvorteil, wenn die Ammoniumquelle versiegt? Um diese Frage zu beantworten, mussten die Forscher gleichzeitig die N₂-Aufnahmerate vor diesem Zeitpunkt und die Wachstumsrate danach messen – eine knifflige Aufgabe, da die SIMS-Messung die Zelle zerstört. Durch einen geschickten Schachzug meisterten sie diese Herausforderung. In einer ersten Phase boten sie den Mikroben markiertes Stickstoffgas im Gemisch mit reichlich Ammoniumionen an. Nach einer Weile tauschten sie dies gegen reines, unmarkiertes N₂ aus. Damit war der bis zum Ende der ersten Phase aus der Luft aufgenommene Stickstoff für die NanoSIMS-Messung sozusagen eingefroren, auch wenn die Zellen danach weiter Stickstoff aufnahmen.

Im zweiten Versuchsabschnitt bekamen die Bakterien dann markierten Kohlenstoff zugeführt, dessen Aufnahme ins Zellinnere ein Maß für das Wachstum lieferte. Am Ende des Experiments ließ sich so in einer einzigen Mes-

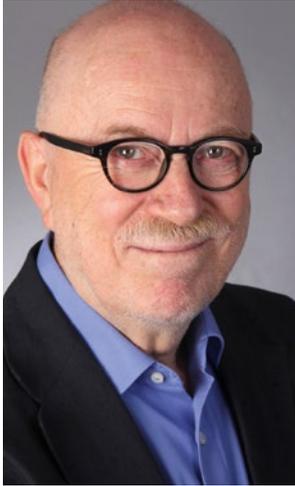
sung an der gleichen Zelle nachweisen, wie viel Stickstoff sie in der ersten Phase aufgenommen hatte und wie viel Kohlenstoff in der zweiten Phase. Das Ergebnis war eindeutig: Mikroben, die bereits in Anwesenheit von Ammonium in die Spaltung des N₂-Moleküls investiert hatten, wuchsen besser als andere, wenn das Stickstoffsalz wegfiel. Der Grund dafür liegt in höheren Fixierungsraten der vorangepassten Individuen nach dem Versiegen der Ammoniumzufuhr. Das bewies ein weiteres Experiment, bei dem erst in der zweiten Wachstumsphase, nach Entfernen des Ammoniums, gleichzeitig markierter Stickstoff und markierter Kohlenstoff zugegeben wurde.

Computermodellierungen auf der Basis der vorgestellten Daten bestätigten einen Zusammenhang zwischen der Heterogenität in der Mikrobengemeinschaft und ihrem Wachstum unter Mangelbedingungen. Populationen mit der gleichen durchschnittlichen Fixierungsrate bauten umso mehr Biomasse auf, je größer die individuellen Unterschiede dabei waren. Eine gewisse phänotypische Diversität scheint also einen Überlebensvorteil in Ökosystemen mit wechselnden Umweltbedingungen zu liefern. Anders gesagt: Bei größerer Vielfalt ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass zumindest einer durchkommt – wie es ja auch bei der genetischen Diversität der Fall ist. ◀

Larissa Tetsch ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Maisach bei München.

QUELLE

Schreiber, F. et al.: Phenotypic Heterogeneity Driven by Nutrient Limitation Promotes Growth in Fluctuating Environments. In: Nature Microbiology 10.1038/nmicrobiol.2016.55, 2016



SPRINGERS EINWÜRFE ÜBERRASCHUNGEN AUS DER HANDY-FORSCHUNG

Auch in Entwicklungsländern hat inzwischen fast jeder ein Mobiltelefon – doch die Menschen profitieren davon ganz anders als erwartet.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftsredakteur. Seit seiner Promotion in theoretischer Physik pendelt er zwischen den »zwei Kulturen«.

» spektrum.de/artikel/1432735

In Wartezimmern, Cafés und öffentlichen Verkehrsmitteln sahen die Leute früher aus dem Fenster, in die Zeitung, manchmal in ein Buch. Heute sind fast alle mit ihrem Handy oder Smartphone beschäftigt. Oft sitzen im Restaurant ganze Familien um einen Tisch, die kaum ein Wort miteinander wechseln, sondern jeweils das private Display mustern. Binnen weniger Jahre hat sich ein enormer Wandel des Kommunikationsverhaltens vollzogen.

Während Kulturpessimisten nun den Verfall von Buch- und Gesprächskultur beklagen, erwarten Technikoptimisten vom neuen Medium eine ungeahnte Ausweitung demokratischer Teilhabe. Jede Person kann alles wissen, jede sich mit jeder austauschen – vorausgesetzt, sie hat ein Handy und Zugang zum Netz.

Diese Bedingung wird in den Industrieländern weitgehend erfüllt: Mobiltelefone sind erschwinglich, das Internet ist allgemein zugänglich. Ein Team von europäischen Politologen und Informatikern um Nils B. Weidmann von der Universität Konstanz erinnert allerdings mit einer aufwändigen Studie daran, dass der Internetzugang in vielen Entwicklungsländern vom Staat kontrolliert wird und bestimmten ethnisch definierten oder politisch privilegierten Gruppen vorbehalten bleibt. Wenn ein autoritäres Regime Widerstand aus einer bestimmten Ecke befürchtet, wird es zu verhindern suchen, dass sich Unruhen über das Netz organisieren. Eine Entwicklungshilfe, die einem Staat kommunikationstechnische Modernisierung ermöglicht, führt damit keineswegs automatisch demokratische Strukturen herbei (*Science 353, S. 1151–1155, 2016*).

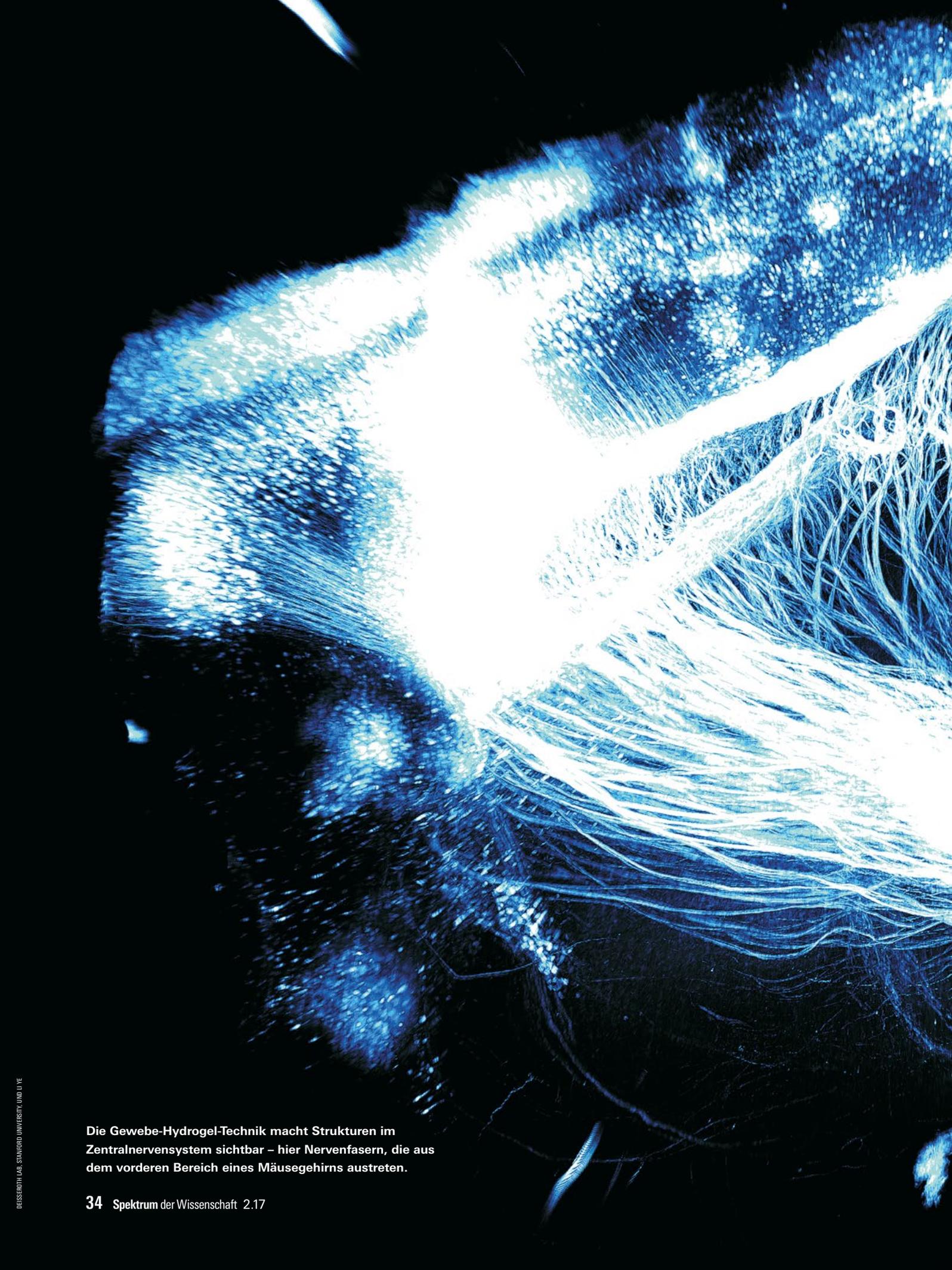
Damit ist das Mobiltelefon nun leider doch kein Wundermittel für politische Emanzipation, doch dafür kann es überraschend effektiv wirtschaftliches Elend und soziale Benachteiligung lindern. Der Armutsforscher Tavneet Suri vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) und der Ökonom

William Jack von der Georgetown University in Washington haben untersucht, wie sich »mobiles Geld« – ein Form des Bezahlens mittels Handy – auf arme Haushalte und insbesondere auf die Stellung der Frauen auswirkt (*Science 354, S. 1288–1292, 2016*).

In einem Entwicklungsland wie Kenia gibt es wenige Bankfilialen und -automaten, aber dafür besitzt praktisch jeder noch so bettelarme Haushalt mindestens ein Mobiltelefon – und regelt seine Finanzen zunehmend bargeldlos, indem er von speziellen Prepaidkarten Guthaben im Handy speichert, die er bei Bedarf per Textnachricht an andere Nutzer übertragen kann. Durch wiederholtes Befragen von 3000 Haushalten zwischen 2008 und 2014 ermittelten die Forscher, dass der Übergang zu Mobilmittel nicht nur akute Finanzprobleme schneller lösen hilft, sondern langfristig fast 200 000 Haushalte Kenias dauerhaft aus drückender Armut befreit hat.

Besonders deutlich macht sich der Effekt bei Frauen bemerkbar. Sie kommen bargeldlos leichter an Kredite, um sich von Subsistenzlandwirtschaft und Gelegenheitsjobs zu befreien und ein eigenes Geschäft aufzumachen. Die wirtschaftliche Emanzipation wirkt sich wiederum positiv auf andere Entwicklungsfaktoren aus: Schon bei bescheidenem Wohlstand gebären Frauen weniger Kinder und können sie zur Schule schicken statt zur Feldarbeit.

Während in Deutschland noch das Bargeld dominiert, breitet sich weltweit der Zahlungsverkehr per Mobilfunk aus. Ende 2015 wurde er in 93 Ländern angeboten, von Argentinien bis Sambia – Tendenz steigend. Obwohl das nun auch in Entwicklungsländern allgegenwärtige Handy also nicht direkt die politischen Strukturen demokratisiert, eröffnet es via Mobilmittel den sozial Schwachen bessere Chancen, aus der Armutsfalle zu entkommen. Und der Abbau sozialer Ungleichheit beeinflusst indirekt auch die politischen Verhältnisse vorteilhaft.



Die Gewebe-Hydrogel-Technik macht Strukturen im Zentralnervensystem sichtbar – hier Nervenfasern, die aus dem vorderen Bereich eines Mäusehirns austreten.



NEUROWISSENSCHAFT DAS DURCHSICHTIGE GEHIRN

Ein neuer Ansatz, Hirngewebe zu präparieren,
gewährt Wissenschaftlern tiefe Einblicke
ins Zentralnervensystem.

» [spektrum.de/artikel/1432728](https://www.spektrum.de/artikel/1432728)



Karl Deisseroth ist Professor für Biotechnologie und Psychiatrie an der Stanford University (Kalifornien).

► Unser Zentralnervensystem ist ein überaus verworrenes Netzwerk aus zahllosen parallel verlaufenden und sich überkreuzenden Fäden. Diese dünnen Zellfortsätze, Axone genannt, übertragen elektrische Signale zwischen Neuronen. So wie die lang gestreckten Kettfäden eines Textilgewebes dessen Schussfäden überschneiden, kreuzen auch die ausgedehnten Axone der Projektionsneurone die Fortsätze zahlreicher anderer Nervenzellen.

Um die Funktionsweise des Gehirns zu verstehen, müssen Forscher entschlüsseln, wie sich diese neuronalen Knäuel auf der Ebene individueller Zellen organisieren. Zugleich dürfen sie dabei nicht die Gesamtperspektive vernachlässigen, die das ganze Hirn in den Blick nimmt. Für solche Einblicke brauchen wir spezielles Rüstzeug, denn unser Gehirn ist weder flach wie ein Textilgewebe noch durchsichtig. Im gesamten Organ, insbesondere in den Membranen der Nerven- und Gliazellen, streuen Fettmoleküle (Lipide) einfallende Lichtstrahlen in alle möglichen Richtungen. Das ist der Grund, warum wir nicht in es hineinblicken können. Bildgebende Verfahren bilden in aller Regel nur seine obersten Zellschichten ab, aber nicht die darunterliegenden Bereiche.

Eine neue Technik ermöglicht es Wissenschaftlern nun, tief in das intakte Gehirn mit seinem verworrenen Nervengeflecht hineinzusehen – es quasi durchsichtig zu machen. Sie hilft sowohl, einzelne Zellfortsätze nachzuverfolgen, als auch, deren molekulare Eigenschaften zu ermitteln. Die Methode stützt sich auf so genannte Hydrogele: wasserunlösliche Polymere, die sich zu einem dreidimensionalen

Netzwerk zusammenlagern und dabei wässrige Zellstrukturen einschließen und konservieren.

Hydrogele können Hirngewebe mit einem räumlichen Innenskelett aus Kunststoff ausstatten. Das geschieht in drei Schritten. Zunächst bringt man in das Gehirn eines Versuchstiers oder eines verstorbenen Menschen ein durchsichtiges Gel ein, das sich mit wichtigen Schlüssel-molekülen verbindet – allen voran Proteinen und Nukleinsäuren – und ihre räumliche Lage sowie ihre Struktur stabilisiert. Im zweiten Schritt entfernt man alle Gewebestandteile, die für die strukturelle Erforschung des Gehirns uninteressant sind oder einfallendes Licht streuen, beispielsweise Lipide. Drittens tränkt man das Präparat mit verschiedenen Fluoreszenzfarbstoffen und anderen Markern, um Zellfortsätze und relevante Moleküle besser sichtbar zu machen – das Gel ist nicht nur durchsichtig, sondern erlaubt auch, solche Substanzen rasch einzubringen.

Diese Technik eröffnet zahlreiche neue Möglichkeiten. Wissenschaftler nutzen sie, um den Zusammenhang zwischen dem Aufbau eines Nervengewebes und seiner Funktion zu erforschen – egal ob es um Handlungen oder Wahrnehmungen, Bewegungen oder Gedächtnis geht. Sie hilft zudem aufzuklären, wie Parkinson, Alzheimer, multiple Sklerose, Autismus, Drogensucht oder Angststörungen entstehen. Und vermutlich kann sie auch die Krebsdiagnostik verbessern. Weil die Methode so viele Vorzüge hat, wenden Forscher sie mittlerweile auch an anderen Organen und Geweben des gesamten Körpers an.

Ein durchsichtiges Gehirn hervorzubringen, ist so schwierig, dass es selbst in hunderten Millionen Jahren der Evolution großer Tiere nicht auftrat. Dabei kann Unsichtbarkeit einen großen Selektionsvorteil bedeuten; sie erleichtert es beispielsweise, Raubtieren zu entgehen. Bestimmten Fischen fehlt etwa das rötliche Protein Hämoglobin, was ihnen eine gewisse Durchsichtigkeit verleiht. Dies bedeutet allerdings, dass die Tiere ohne typisches Wirbeltierblut zurechtkommen müssen – ein hoher Preis, den es sich offenbar trotzdem zu zahlen lohnt. Doch selbst diese Tiere haben kein optisch transparentes Zentralnervensystem entwickelt, trotz immensen evolutionären Drucks: Ihr Gehirn ist nur teilweise lichtdurchlässig. Anscheinend findet die Evolution keinen Weg, ein großes lebendes Gehirn durchsichtig zu machen.

Wenn Licht ein Nervenzellgewebe passiert, wird es gestreut, denn an der Oberfläche der Zellen existieren Fett-Wasser-Grenzflächen. Sie brechen hindurchtretende Lichtstrahlen, weil sich die Photonen in lipidhaltigen Phasen langsamer bewegen als in wässrigen. Das kompliziert aufgebaute Hirngewebe weist zahllose Grenzflächen auf – es lenkt das Licht also schon nach kurzer Wegstrecke in alle möglichen Richtungen ab, und zwar in praktisch nicht vorhersagbarer Weise. Dieser Effekt lässt sich nicht einfach technisch oder per Evolution aufheben. Die Lipidschichten, aus denen die Membranen der Hirnzellen bestehen, spielen eine überaus wichtige Rolle als elektrische Isolatoren, die Ionenflüsse kanalisieren. Ohne sie würden sich die elektrischen Impulse der Zelle nicht entlang ihrer Axone fortpflanzen, und es gäbe keine elektrische Signalübermittlung im Gewebe. Ironischerweise ist

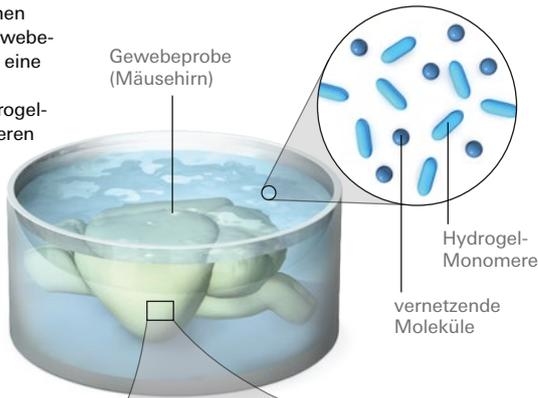
AUF EINEN BLICK TIEFE EINSICHTEN

- 1** Das Gehirn lässt sich funktionell nur verstehen, indem man seine individuellen Zellen analysiert und dies mit übergreifenden Betrachtungen des ganzen Organs kombiniert.
- 2** Wasser-Lipid-Grenzflächen im Hirngewebe streuen einfallendes Licht in alle möglichen Richtungen, was das Gewebe undurchsichtig macht.
- 3** Neue Gewebe-Hydrogel-Techniken stabilisieren wichtige Hirnstrukturen wie Proteine und Nukleinsäuren und entfernen dann die Lipide. Dabei entsteht ein Präparat, das tiefe Einblicke in die Hirnanatomie erlaubt.

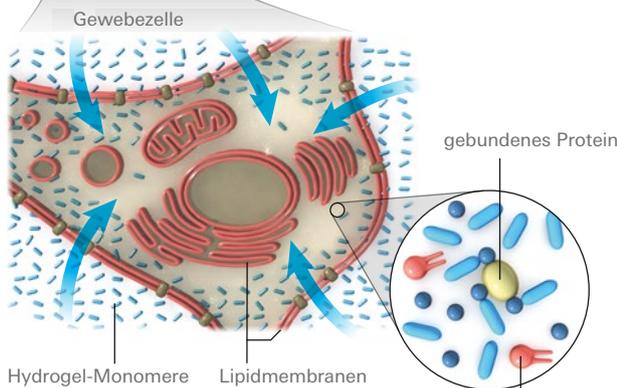
Gewebe-Hydrogel-Präparate

Forscher bringen Hydrogele in Hirngewebe ein, um Neurone und Moleküle zu fixieren und zu stabilisieren, bevor sie die sichtbehindernden Lipide aus dem Gewebe lösen. Methoden, die auf diesem Verfahren gründen, sind inzwischen in neurowissenschaftlichen Laboren auf der ganzen Welt etabliert und erlauben es, intaktes Gewebe auf bisher nicht mögliche Weise zu untersuchen.

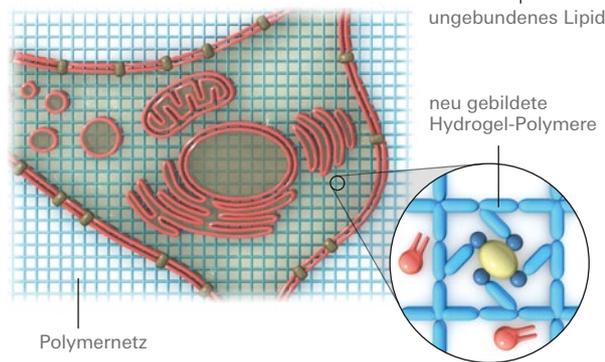
1 Eintauchen einer Gewebeprobe in eine Lösung mit Hydrogel-Monomeren



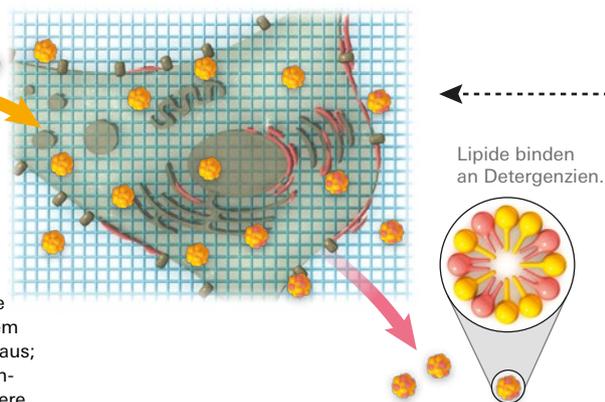
2 Die Monomere diffundieren in die Zellen des Gewebes und binden dort an Proteine sowie Nukleinsäuren, nicht aber an Lipide.



3 Danach wird die Temperatur auf 37° Celsius erhöht, worauf die Hydrogel-Monomere polymerisieren und sich vernetzen.



4 Detergenzien waschen Lipide und andere nicht gebundene Moleküle aus dem Polymernetz heraus; Proteine, Nukleinsäuren und weitere gebundene Biomoleküle bleiben darin zurück.



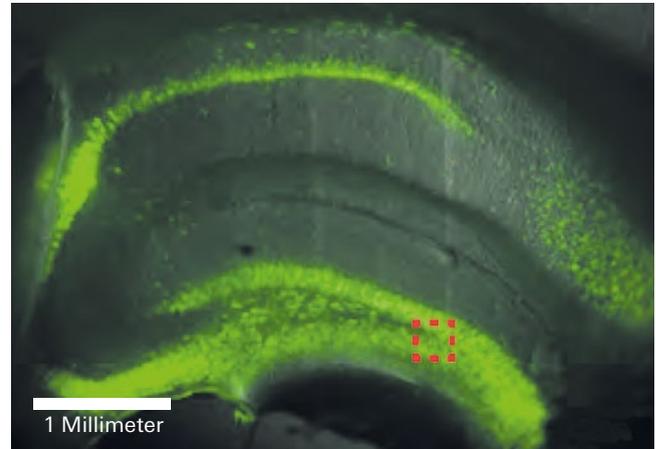
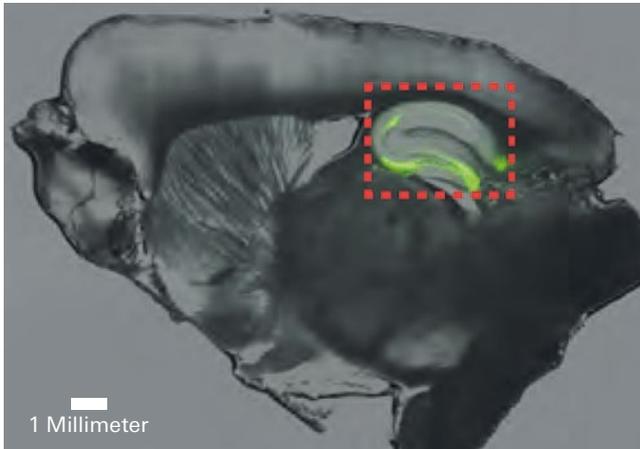
5 Falls gewünscht, erfolgt eine Behandlung des Gewebe-Hydrogel-Präparats mit (Fluoreszenz-) Farbstoffen, um Proteine oder Nukleinsäuren sichtbar zu machen.



6 Untersuchung des Präparats mittels konfokaler oder Lichtscheiben-Mikroskopie oder einer anderen 3-D-Technik



7 Gegebenenfalls wäscht man die Farbstoffe aus Schritt 5 wieder mit Detergenzien aus, um das Präparat mit anderen Substanzen neu zu färben. Dies lässt sich mehrmals wiederholen.



DESSBROTH LAB, STANFORD UNIVERSITY, SOWIE
YVYANA, GRADINARU, AVANGHUN CHONG UND CHAOU HANARISHIAN

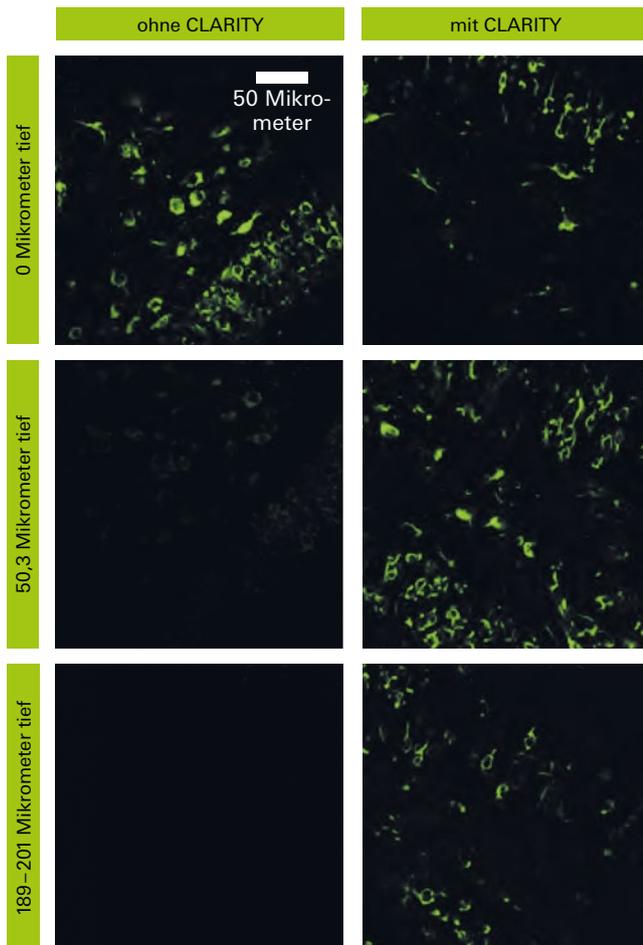
Gewebe-Hydrogel-Präparate von Mäusehirnen, aus denen die Licht streuenden Substanzen ausgewaschen wurden, erscheinen nach dem Anfärben mit einem fluoreszierenden Protein grün. Zoomt man in die Gesamtansicht des Hirns (oben) hinein, erkennt man zunächst die Unterstruktur des Hippocampus (oben rechts) und kann schließlich Nahansichten individueller Zellen (unten) betrachten. Vor Einführung des CLARITY-Verfahrens, das dies ermöglicht, waren Zellen, die tiefer als 50 Mikrometer (tausendstel Millimeter) im Gewebe lagen, wegen der Lichtbrechung nicht zu erkennen. CLARITY erlaubt es, Zellen bis zu einer Tiefe von 200 Mikrometern oder mehr abzubilden.

ausgerechnet das Gehirn, das wir für funktionelle Untersuchungen am wenigsten stören dürfen, zugleich jenes Organ, das optische Einblicke am massivsten erschwert.

Im Jahr 2009 wandte ich mich der bislang ungelösten Herausforderung zu, das intakte reife Säugerhirn durchsichtig zu machen – und zugleich zu ermöglichen, diverse Moleküle in dem Organ anzufärben. Hunderte von Laboren weltweit hatten damals damit begonnen, eine Technik anzuwenden, die meine Kollegen und ich zwischen 2004 und 2009 entwickelt hatten. Sie erlaubt es, ausgewählte neuronale Strukturen im Gehirn mit Licht ein- und auszuschalten. Diese Methode, die so genannte Optogenetik, kombiniert Laser, Glasfaseroptik und Genetik, um spezifische Nervenzellen im lebenden Gehirn zu aktivieren oder zu deaktivieren. Möglich wird das durch lichtempfindliche Proteine namens Opsine, die von Algen und Bakterien stammen. Die Technik ermöglicht, Hirnaktivitäten zu steuern, während die Versuchstiere rennen, springen, schwimmen, miteinander kommunizieren oder andere komplexe Verhaltensweisen zeigen. Im Sommer 2009 waren die größten Herausforderungen der Optogenetik im Wesentlichen bewältigt und die Technik einsatzbereit. Sie half dabei, tausende neue Erkenntnisse über die neuronalen Mechanismen des Verhaltens zu gewinnen – doch sie vermochte es nicht, eine andere wichtige Information zu liefern: ein hochauflösendes Bild nämlich, das die gehirnweite »Verkabelung« ausgewählter Hirnneurone darstellt.

Ein zentrales Ziel von Forschern ist es, zu erkennen, inwiefern sich die Gesamterscheinung eines Systems auf seine Grundbausteine zurückführen lässt. Dazu nehmen sie einzelne Teile aus einem komplexen System heraus und untersuchen sie isoliert. Denn das ermöglicht Aussagen darüber, welche Eigenschaften des jeweiligen Teils ihm selbst zu eigen (intrinsisch) sind und nicht von anderen Elementen abhängen. Aber bei einem derart stark vernetzten System wie dem Gehirn stößt diese Strategie an Grenzen, denn Erkenntnisse über seine einzelnen Elemente erlauben häufig keinen Rückschluss auf die Gesamtfunktion. Auch bei einem Orientteppich geht das Muster verloren, wenn man die Fäden herauszieht, um sie separat zu betrachten.

Weil das adulte Säugerhirn undurchsichtig ist, behalf man sich lange Zeit damit, es für Untersuchungen ausein-



DESSBROTH LAB, STANFORD UNIVERSITY, SOWIE YVYANA, GRADINARU, AVANGHUN CHONG UND CHAOU HANARISHIAN

anderzunehmen – typischerweise, indem man es zerschneidet. Dabei zerteilen Forscher das dreidimensionale Gewebe in hunderte oder tausende Scheibchen. Dies ist enorm zeitraubend und kostenintensiv, vor allem dann, wenn viele Gehirne untersucht werden müssen, um statistisch bedeutsame Ergebnisse zu erhalten (was bei Verhaltensstudien an Säugern die Regel ist). Überdies gehen dabei wichtige Informationen unwiederbringlich verloren. Bereits die Optogenetik hatte hier für große Verbesserungen gesorgt, denn sie half, die Funktionsweise des intakten Gehirns zu erforschen. 2009 begann ich intensiver darüber nachzudenken, was mein Team und ich auf diesem Gebiet noch tun könnten.

Die Idee, die ich dabei verfolgte, war bereits 15 Jahre zuvor entstanden. Mitte der 1990er Jahre war ich davon fasziniert gewesen, neuronale Schaltkreise ähnlich denen des Gehirns im Labor nachzubauen, ausgehend von einzelnen Nervenzellen. Möglich wäre das, überlegte ich, indem man neuronale Stammzellen auf Polymergerüsten aussät und dort, biochemisch gesteuert, zu Nervenzellen ausdifferenzieren lässt. Während ich diesen Ansatz verfolgte, arbeitete ich mich in die Fachliteratur über Hydrogele ein. Hydrogele schienen mir als Gerüstmaterial besonders gut geeignet, da sie bioverträglich und zudem durchsichtig sind.

Polymer in Neuronennetzen statt Neuronennetze im Polymer

Leider gelang es mir nie, hirnähnliche Neuronennetze aus einzelnen Zellen herzustellen: Das Projekt erwies sich als verteuftel anspruchsvoll. Dennoch schleppte ich meine Dokumentensammlung über Hydrogele in den folgenden 15 Jahren von Labor zu Labor, obwohl sie langsam einstaubte und meine Karriere sich in eine ganz andere Richtung entwickelte. Doch die Hydrogele gingen mir nicht aus dem Kopf, und über die Jahre reifte allmählich ein Gedanke in mir, der Gestalt annahm, als einige sehr begabte Leute in meine Arbeitsgruppe an der Stanford University kamen. Wir entwickelten eine tragfähige Strategie, Gehirne optisch transparent und zugleich für Biomarker zugänglich zu machen.

Im Februar 2010 skizzierte ich die Grundidee des Verfahrens. Es war die Umkehrung des ursprünglichen Konzepts: Statt ein Hydrogelgerüst zu konstruieren und darin hirnähnliche Neuronennetze zu züchten, würden wir Gehirne nehmen und darin das Hydrogel einfügen. Es würde das Zellgewebe stützen und die räumliche Anordnung der Proteine und Nukleinsäuren erhalten, zugleich aber erlauben, alles aus dem Gewebe zu entfernen, was die Sicht versperrt. Mit anderen Worten, das Hydrogel sollte verhindern, dass das Gehirn in eine formlose Masse zusammenfällt, während wir die sichtbehindernden Strukturmoleküle herauslösen.

Zwei Wissenschaftler aus meinem Team – Viviana Gradinaru und Laborleiter Charu Ramakrishnan – wagten es als Erste, sich mit diesem riskanten Projekt zu befassen. Anfang 2010 versuchten sie, Neurone so zu verändern, dass sie den Reagenzien widerstehen, die bei unserem Verfahren die Gewebefeinstruktur und die Zellmembranen

auflösen sollten. Theoretisch – so nahmen wir an – sollte das gelingen, indem wir die Zellen mit einem haltbaren Polymer ausfüllen. Gradinaru und Ramakrishnan testeten verschiedene Ansätze hierfür. Sie brachten beispielsweise Gene in die Zellen ein, die für dauerhafte Polymere wie Chitin und Zellulose kodieren. Als bester Ansatz erwies es sich, die Zellen zur Herstellung des Biopolymers Keratin zu befähigen. Schon in vorangegangenen Versuchen hatte sich gezeigt, dass Keratin neuronale Zellstrukturen vor Zerstörung bewahren kann. Gradinaru zog daraus den Schluss: Aus intaktem Hirngewebe, dessen Nervenzellen von innen mit Keratin und außen mit Hydrogel stabilisiert sind, könne man die Lipide auswaschen, um die interessierenden Strukturen frei zu legen – und zwar ohne dabei die Gewebestruktur zu zerstören.

Um den Fortschritt der Arbeiten zu beschleunigen, entschied ich mich, einen erfahrenen Chemieingenieur hinzuzuziehen. Ich suchte daher nach Postdocs, die sich mit Hydrogelen auskennen, und stolperte über den Namen Kwanghun Chung – damals am Georgia Institute of Technology. Ich nahm telefonisch Kontakt mit ihm auf und tat dann etwas für mich Einmaliges: Ohne je ein Vorstellungsgespräch mit ihm geführt zu haben, stellte ich ihn ein.

Nach seiner Ankunft in meinem Labor startete Chung denn auch gleich durch. Bis Ende 2010 hatten er, Gradinaru und Ramakrishnan bereits durchsichtige Blöcke aus Mäusehirnen erzeugt, in denen die keratinhaltigen und in Hydrogel eingebetteten Zellen klar und deutlich zu erkennen waren. Man konnte mehrere hundert Mikrometer tief in diese Präparate hineinschauen, viel weiter, als dies zuvor möglich gewesen war (siehe Bild links unten).

Das erste voll funktionstüchtige Hydrogel, das Chung erzeugte, basierte auf Acrylamid. In die Gewebe-Hydrogel-Präparate, die meine Mitarbeiter daraus anfertigten, konnten wir Fluoreszenzfarbstoffe und andere Biomarker direkt einbringen. Das erlaubte uns, Proteine und ganze Zellstrukturen wie Axone anzufärben und sichtbar zu machen – und dies sogar viele Male hintereinander mit jeweils unterschiedlichen Markern. Dabei stellten wir auch fest, dass wir das Keratin gar nicht brauchten, um die Zellstrukturen zu stabilisieren: Das Hydrogel allein reichte hierfür völlig aus.

Unsere Gewebe-Hydrogel-Präparate, die auf Acrylamid basierten (inzwischen gibt es viele andere Varianten), taufte wir auf den Namen CLARITY für »Clear Lipid-exchanged Acrylamide-hybridized Rigid Imaging/Immunostaining/In situ hybridization compatible Tissue-Hydrogel«. Seit wir unsere Gewebe-Hydrogel-Technik 2013 veröffentlicht hatten, haben zahlreiche Arbeitsgruppen sie angewendet – nicht nur in der Grundlagenwissenschaft, sondern auch in Kliniken, etwa um Gehirne verstorbener Autismus- und Alzheimerpatienten zu untersuchen. Andere Forscher haben das Verfahren benutzt, um neue Einblicke in Rückenmarkstrukturen zu erhalten. Mittlerweile sind etliche Studien veröffentlicht, die mit diesem Ansatz den Aufbau von Nervensystemen offenlegen – häufig in Verbindung mit der Optogenetik.

Die Optogenetik hat in den ersten fünf Jahren ihrer Anwendung zahlreiche Innovationen angestoßen und dabei ihre Nützlichkeit bewiesen. Genauso ergeht es auch

der Gewebe-Hydrogel-Technik. In einer ihrer frühesten Versionen war es beispielsweise noch nötig, ein elektrisches Feld anzulegen, um fettlösende Substanzen und daran gebundene Lipide aus dem Präparat zu entfernen. Das erforderte einige Übung und barg zudem die Gefahr, das Präparat infolge zu hoher Spannung zu beschädigen. Drei meiner Mitarbeiter – Raju Tomer, Brian Hsueh und Li Ye – entwickelten ab 2014 ein vereinfachtes Verfahren, das als passives CLARITY bekannt wurde und ohne elektrische Felder auskommt. Tomer war auch maßgeblich daran beteiligt, ein spezielles Bildgebungsverfahren für Gehirn-Hydrogel-Präparate zu entwickeln, das auf der Lichtscheiben-Fluoreszenzmikroskopie beruht. Hierbei beleuchtet man die Probe schichtweise, wodurch man pro Zeiteinheit viel größere Volumina scannen und abbilden kann als bei punktförmiger Beleuchtung.

Gradinaru und Chung leiteten schon bald eigene Arbeitsgruppen am Caltech und am MIT, mit denen sie die



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Hirnforschung finden Sie unter spektrum.de/t/hirnforschung

Methodik vorantrieben. Gradinaru entwickelte die passive CLARITY weiter, um sie auf ganze Organismen anzuwenden; das dabei entstehende Verfahren wird als PARS bezeichnet («Perfusion Assisted Agent Release in Situ»). Gemeinsam entwickelten Gradinaru und Chung neue Hydrogel-Rezepturen. Labore in aller Welt haben mittlerweile diverse Präparationsarten beschrieben. Trotzdem stehen wir in der Forschung noch ganz am Anfang. Im Jahr 2013 präsentierten Chung und ich eine sehr lange Liste möglicher Hydrogel-Zusammensetzungen, von Acrylaten bis zu Alginaten. Meine Gruppe und unsere Kooperationspartner arbeiten derzeit an aktivierbaren Polymeren, deren elektrische Leitfähigkeit oder chemische Reaktivität sich regulieren lässt; dies würde neue experimentelle Möglichkeiten eröffnen.

Daneben optimieren wir die Methodik weiter. So dehnt sich das in dem Hydrogel eingebettete Gewebe deutlich aus. Das kann durchaus von Vorteil sein – beispielsweise für die Bildgebung mit hohen Auflösungen. Doch damit wir unsere optisch transparenten Hirnpräparate mit den Darstellungen in wissenschaftlichen Hirnatlantanten vergleichen können, müssen wir die biologischen Strukturen möglichst ungestört und genau abbilden. Daher haben wir einen optionalen Verfahrensschritt entwickelt, um das aufgequollene Gewebe in den Präparaten auf die ursprüngliche Größe zu schrumpfen.

Meine Arbeitsgruppe hat zudem eine automatisierte Bilderfassungs- und Analysesoftware entwickelt. Interes-

sierte können sie kostenfrei aus dem Internet herunterladen und damit arbeiten (siehe www.clarityresourcecenter.org). Zudem haben wir es 2016 methodisch in den Griff bekommen, im Gewebe-Hydrogel-Präparat viele RNAs gleichzeitig mit Fluoreszenzfarbstoffen zu markieren. Das ist experimentell von großer Bedeutung, denn es eröffnet uns das riesige Gebiet der Genexpressionsanalyse.

Mit der Gewebe-Hydrogel-Technik zielen wir ursprünglich stark darauf ab, optogenetische Untersuchungen des Zentralnervensystems zu ergänzen, indem wir Informationen zur Struktur des intakten Gehirns liefern. Dieses Ziel ist mittlerweile vielfach erreicht worden. Eine der jüngsten Veröffentlichungen hierzu befasst sich mit dem präfrontalen Kortex, der wichtig ist für das Regulieren höherer kognitiver Prozesse und Emotionen. Wissenschaftler hoffen zu verstehen, wie die Struktur jener Hirnregion diverse Verhaltensweisen steuert. Das könnte ein neues Licht auf psychiatrische Störungen wie Autismus und Schizophrenie werfen.

Zum Beispiel grenzten meine Kollegen und ich mit Hilfe der Optogenetik eine Zellpopulation im präfrontalen Kortex ein, die bei anregenden, positiven Erfahrungen – etwa dem Verzehr besonders schmackhafter Nahrung oder dem Genuss von Drogen – aktiv ist. Später fanden wir in diesem Areal eine entgegengesetzt wirkende Neuronenpopulation, die an negativen Erfahrungen mitwirkt. Schließlich demonstrierten wir mit Gewebe-Hydrogel-Techniken, dass diese beiden Zellgruppen im Gehirn unterschiedlich verdrahtet sind: Die positiven entsenden ihre Ausläufer bevorzugt in eine tiefe Hirnregion namens Nucleus accumbens, die negativen hingegen sind stärker mit den lateralen Habenulae verknüpft, Teilen des Zwischenhirns. Gewebe-Hydrogel-Technik und Optogenetik erlauben es gemeinsam also, intakte Körpergewebe in noch nie da gewesener Weise zu untersuchen.

Neurowissenschaftler können jetzt enorme Datenmengen sammeln, die Organstrukturen, molekulare Komponenten und zelluläre Aktivitäten im Detail wiedergeben. Als Resultat davon verstehen wir das Gehirn und seine Funktionen immer besser. Wir erhalten gewissermaßen eine globale Sicht auf das Organ, die aber dennoch lokal hoch aufgelöst ist. Sie ist enorm wichtig, denn emergente Eigenschaften komplexer Systeme erwachsen oft aus örtlich begrenzten Wechselwirkungen. Erst aus der übergeordneten Perspektive wird die Funktion klar, die jeder einzelne Faden im Gewebe erfüllt. ◀

QUELLEN

Deisseroth, K., Chung, K.: Methods and Compositions for Preparing Biological Specimens for Microscopic Analysis. U.S.-Patent Nr. 20150144490, erteilt am 28. Mai 2015 (www.google.com/patents/US20150144490)

Deisseroth, K.: Optogenetics: 10 Years of Microbial Opsins in Neuroscience. In: Nature Neuroscience 18, S. 1213–1225, 2015

VIDEOTIPP

CLARITY Process

www.youtube.com/watch?v=L3bSx4TBs6M

Unterstützt von *Bewegt Bildern* erläutert Karl Deisseroth in diesem Interview die Hydrogel-Technik (auf Englisch).



FREISTETTERS FORMELWELT DER GOLDENE SCHNITT

Die irrationalste Zahl von allen dient sowohl als Symbol für Ordnung als auch für das Chaos.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1432737](http://spektrum.de/artikel/1432737)

Der goldene Schnitt beschreibt das Teilungsverhältnis einer Strecke: Das Verhältnis des Ganzen zum größeren Teil entspricht genau dem Verhältnis des größeren Teils zum kleineren. Dieses Verhältnis ist eine Zahl, die ebenfalls goldener Schnitt heißt und mit dem griechischen Buchstaben ϕ (sprich: phi) bezeichnet wird. Es gibt mehrere Möglichkeiten, den Zahlenwert von ϕ anzugeben. Die verbreitetste ist $(1+\sqrt{5})/2$ oder als Dezimalzahl 1,618034... Mir persönlich gefällt diese hier am besten.

FLORIAN FREISTETTER

$$\phi = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}$$

So eine Abfolge von Brüchen nennen Mathematiker einen Kettenbruch. Sie ist etwas ungewohnt und erscheint umständlich – aber sie zeigt eine der wichtigsten Eigenschaften des goldenen Schnitts ganz besonders gut.

ϕ ist eine irrationale Zahl. Das bedeutet, dass sie nicht durch das Verhältnis zweier ganzer Zahlen angegeben werden kann, so wie das etwa auch bei der bekannteren Kreiszahl π der Fall ist. Man kann aber ϕ wie jede andere irrationale Zahl durch eine Bruchzahl annähern. Dabei macht man zwangsläufig einen Fehler, der sich dann wiederum in eine Bruchzahl umwandeln und mit der ursprünglichen Näherung kombinieren lässt. Setzt man das Spiel fort, ergibt sich eine Abfolge ineinander verschachtelter Brücher: ein Kettenbruch.

Der Fehler bei jeder einzelnen Approximation steht dabei immer unter dem Bruchstrich. Ist er klein, müssen die im Kettenbruch auftauchenden Zahlen logischerweise groß sein, und umgekehrt. Der goldene

Schnitt ist nun aber genau der Kettenbruch, der nur aus der Zahl 1 gebildet wird, der kleinstmöglichen ganzen und positiven Zahl. Das bedeutet nichts anderes, als dass der Fehler bei der Approximation hier immer groß ist: ϕ ist von allen irrationalen Zahlen diejenige, die sich am schlechtesten durch Brücher annähern lässt!

Eigentlich gilt ja der goldene Schnitt als besonders harmonisches Verhältnis und wird deswegen angeblich von Künstlern bevorzugt bei der Komposition ihrer Werke verwendet – neueren Forschungen zufolge trifft das allerdings gar nicht zu. Ich persönlich habe den goldenen Schnitt jedoch in einem ganz anderen Zusammenhang kennen gelernt: Das erste Mal begegnete mir diese Zahl in der Chaostheorie. Das Kolmogorow-Arnold-Moser-Theorem (KAM-Theorem) bildet dort das mathematische Fundament für die Behandlung von Systemen mit komplizierter Dynamik, wie man sie zum Beispiel bei der Bewegung von Himmelskörpern findet. Das KAM-Theorem beschreibt, wie robust ein stabiler Zustand gegenüber äußeren Störungen ist und wann er sich zu chaotischem Verhalten wandelt. Störungen können immer dann sehr stark wirken, wenn Resonanzen auftreten – wenn also die Perioden zweier Bewegungen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen. Oder anders gesagt: Resonanzphänomene treten umso stärker auf, je besser sich dieses Verhältnis durch eine rationale Zahl annähern lässt. Systeme, die durch den goldenen Schnitt beschrieben werden können, sind demnach besonders stabil.

Aus mathematischer Sicht ist der goldene Schnitt so irrational, wie es nur geht. Er widersetzt sich jeder »ordentlichen« Beschreibung durch einen simplen Bruch. Aber gerade diese Irrationalität macht die Zahl zum Inbegriff der Stabilität. Der goldene Schnitt weist also eine maximale Widersprüchlichkeit auf: Er symbolisiert gleichermaßen Chaos und Ordnung.

GERONTOLOGIE DER METHUSALEM- EFFEKT

SERIE: DIE ZUKUNFT DER MENSCHHEIT Könnten Medikamente die biologische Lebensspanne verlängern? Forscher versuchen die Vorgänge in Zellen zu imitieren, dank derer einzelne Menschen vergleichsweise gesund und geistig frisch weit über 100 Jahre erreichen.



Bill Gifford ist Wissenschaftsautor in New York. Unter anderem schreibt er für renommierten Zeitungen und Zeitschriften über Gesundheitsthemen, auch über die Geheimnisse für ein hohes Lebensalter.

► [spektrum.de/artikel/1432729](https://www.spektrum.de/artikel/1432729)

Im März 2016 besuchten Mitarbeiter von Guinness World Records den einstigen Auschwitz-Häftling Israel (Yisrael) Kristal, der in Haifa lebt. Er wurde am 16. September 1903 im damaligen Russischen Reich (heutigen Polen) geboren und gilt seit 2014 als ältester Holocaust-

überlebender und derzeit ältester lebender Mann. Für Jungen in seiner Heimat betrug die Lebenserwartung Anfang des 20. Jahrhunderts etwa 45 Jahre. Der Zuckerbäcker und Konfektspezialist hat viel Schweres durchgemacht. Er verlor früh die Mutter und kurz nach dem Ersten Weltkrieg den Vater. Seine beiden Kinder aus erster Ehe starben im Zweiten Weltkrieg im Ghetto, seine damalige Frau in Auschwitz. 1950 emigrierte er mit seiner neuen Familie nach Israel.

Nur etwa zwei von 10 000 Menschen erreichen ihren 100. Geburtstag, wobei Frauen bei den über 100-Jährigen stark in der Überzahl sind. Den Altersrekord von Männern hält der Japaner Jiroemon Kimura, der 2013 mit 116 Jahren starb, den von Frauen die Französin Jeanne Calment, die bis 1997 lebte und 122 Jahre alt wurde. Im Prinzip kann der Mensch also durchaus über 100 Jahre alt werden. Doch die Lebenserwartung, also der kalkulierte Durchschnittswert, für heute geborene Jungen beträgt in den westlichen Ländern knapp 80 Jahre und auch die für Frauen liegt nur wenige Jahre höher.

Einige Wissenschaftler glauben inzwischen, dass einzelne Individuen einfach langsamer altern. Die biologischen Hintergründe dafür möchten sie ergründen und nachahmen. Verschiedenen Beobachtungen und Studien zufolge scheinen Hungerphasen lebensverlängernd zu wirken. Extremen Nahrungsmangel erlitt auch Israel Kristal. Als er in Auschwitz befreit wurde, soll er 36 Kilogramm gewogen haben. Offenbar steigert Hungern die Lebenszeit von Körperzellen. Diesen Effekt möchten die Forscher imitieren, allerdings nicht mit Diätempfehlungen, sondern mit speziellen Medikamenten.

SERIE

Die Zukunft der Menschheit

Teil 1: Januar 2017

Eine vielschichtige Angelegenheit
von Jan Zalasiewicz

Teil 2: Februar 2017

Der Methusalem-Effekt
von Bill Gifford

Teil 3: März 2017

Reiche Welt – arme Welt
von Mara Hvistendahl

Teil 4: April 2017

Keimbahntherapie durch die Hintertür
von Stephen S. Hall

Teil 5: Mai 2017

Gespaltene Gesellschaft
von Angus Deaton

Teil 6: Juni 2017

Der unsterbliche Mensch
von Hillary Rosner

Apokalypse oder Aufbruch?
von David Grinspoon



Israel Kristal (Jahrgang 1903) wurde trotz eines extrem schweren Schicksals uralt. Heute lebt er in Haifa.

Ein TOR zur Langlebigkeit

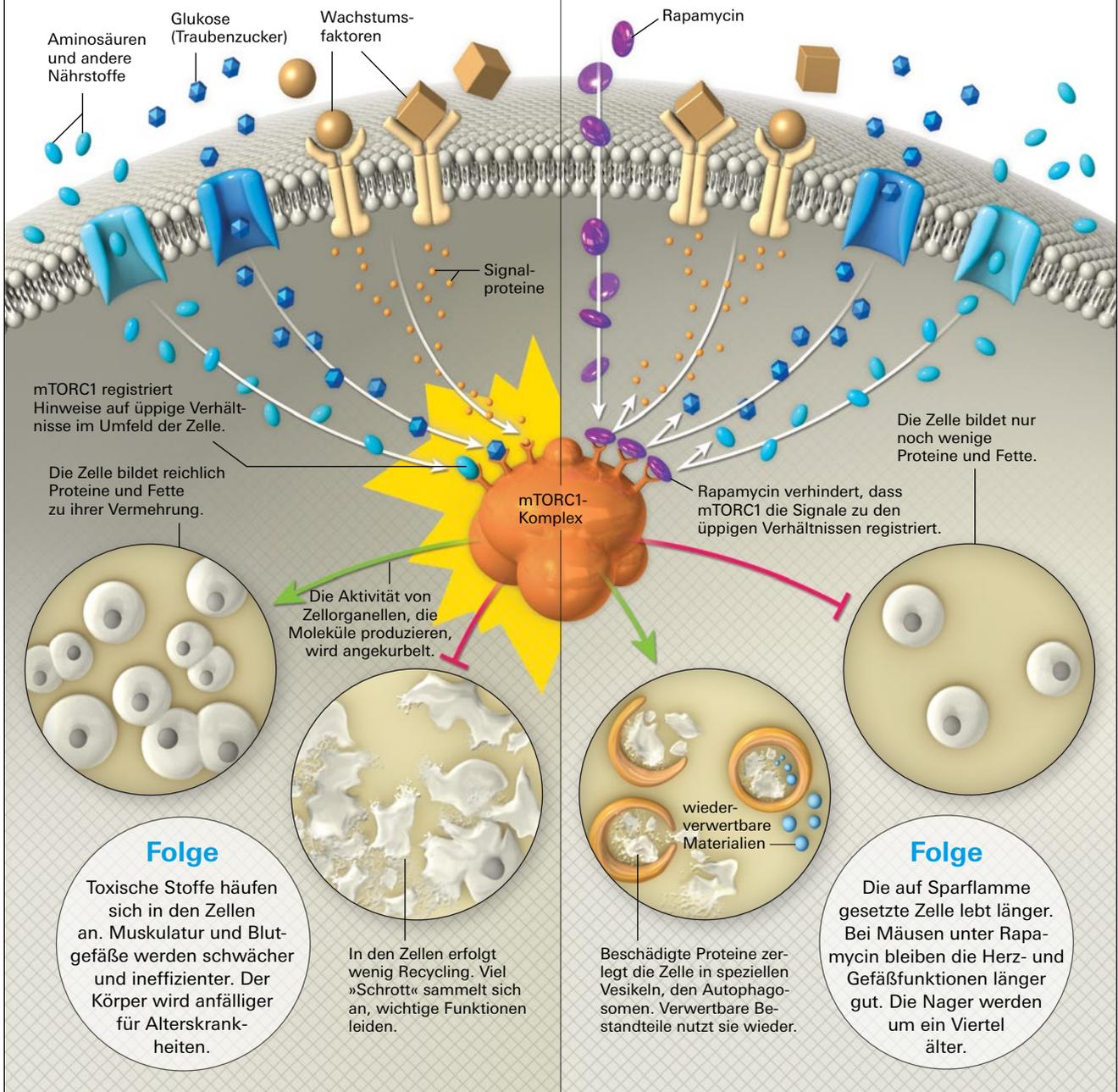
In den 1970er Jahren fand sich in Bodenproben von der Osterinsel ein bakterieller Wirkstoff, der das Wachstum von Pilzzellen stoppt. Nach dem einheimischen Wort für die Insel, Rapa Nui, bekam die Substanz den Namen Rapamycin. Dieses stört das für das Wachstum und die Vermehrung von Zellen essenzielle Enzym TOR (beziehungsweise mTOR bei Säugern). Der reduzierte Stoffwechsel erhöht ihre Lebensdauer – und offenbar auch die des gesamten Organismus.

TOR in Aktion

mTOR existiert in zwei Komplexen. Einer davon, mTORC1, arbeitet wie ein Umweltsensor. Bei einem guten Nahrungsangebot bringt er den Zellstoffwechsel auf Hochtouren. Die Zellen nehmen mehr Zucker und andere Stoffe auf, wachsen und teilen sich.

TOR ausgeschaltet

Rapamycin blockiert den mTORC1-Komplex, so dass er ein reiches Stoffangebot nicht erkennt. Auf diese Situation reagiert die Zelle wie auf eine Hungerphase, fährt Stoffwechselprozesse herunter und spart mit Ressourcen. Wachstum und Vermehrung stoppen.



EMILY COOPER/SCIENTIFIC AMERICAN/SEPTEMBER 2016

Ein paar in dieser Hinsicht viel versprechende Wirkstoffe sind gegen bestimmte Krankheiten sogar bereits in Gebrauch. Diese Substanzen verbessern anscheinend zelleigene Reparaturmechanismen. Einige davon, die an Mäusen und anderen Labortieren erprobt wurden, darunter ein Krebsmittel, erhöhten sowohl das erreichte Durchschnitts- als auch das Höchstalter der Tiere. Eine klinische Studie zur möglicherweise lebensverlängernden Wirkung von Metformin, das vielfach bei Altersdiabetes verschrieben wird, lief in den USA 2016 an – die erste ihrer Art.

Solche Befunde stimmen manche renommierten Altersforscher optimistisch. Sie können sich durchaus vorstellen, dass viele von uns noch eine Zeit erleben werden, in der man Pillen für langsames Altern schluckt. Einer dieser Experten ist der Biogerontologe Matt Kaeberlein von der University of Washington in Seattle. Er meint: »Vor all dem dummen Gerede über Unsterblichkeit und Aufhalten der Alterung werden die tatsächlichen wissenschaftlichen Fortschritte oft nicht gesehen. Ich schätze, in 40 oder 50 Jahren sind wir so weit, die gesunde Lebenszeit von Menschen um ein Viertel bis die Hälfte verlängern zu können.« Ähnlich zuversichtlich klingt Nir Barzilai vom Albert Einstein College of Medicine in New York City, einer der Leiter der Metformin-Studie. Von den klinischen Tests mit der Substanz verspricht er sich gute Ergebnisse – und noch bessere von weiteren Medikamenten.

Gerontologen beobachteten seit den 1930er Jahren, dass eine reduzierte Ernährung das Leben von Labortieren deutlich verlängern kann, in einigen Versuchen um bis zu 40 Prozent. Selbst Kristal glaubt, dass sein hohes Alter auch mit dem Hungern während und nach dem Zweiten Weltkrieg zusammenhängen könnte. Und in einem Interview sagte er: »Ich esse, um zu leben, aber ich lebe nicht, um zu essen. Man braucht wirklich nicht viel. Alles, was zu viel ist, schadet nur.«

Warum Hungern die Lebensdauer steigert und wie sich der Effekt anders erzielen lässt

Studien, bei denen Affen deutlich weniger Kalorien bekamen, als sie normalerweise fressen würden – teils um ein Viertel –, brachten widersprüchliche Resultate (siehe »Länger leben bei karger Kost«, **Spektrum** März 1996, S. 74–80). Zwar schien sich die These zu bestätigen, dass eine verringerte Nahrungszufuhr den gewünschten Effekt hat. Aber in einer anderen Versuchsserie erhielten Affen statt des üblichen Futters schlicht eine hochwertigere, natürlichere Kost mit wenig Zucker. Unabhängig von der Kalorienzufuhr wurden diese Tiere um ebenso viel älter und blieben ähnlich lange fit wie auf Hungerdiät gesetzte Affen.

Allerdings haben Experimente mit niederen Tieren gezeigt, dass Nährstoffmangel in den Körperzellen vorteilhafte Stoffwechselprozesse in Gang setzt. Dies dürfte eine evolutionäre Anpassung sein, um längere Hungerphasen zu überstehen. Die Forscher fragen nun: Lassen sich die gleichen Mechanismen mit bestimmten zugeführten Wirkstoffen, also regelrechten Anti-Aging-Medikamenten, aktivieren, ohne dafür hungern zu müssen?

Beispielsweise dient das Enzym AMPK (AMP-aktivierte Proteinkinase) als eine Art zellulärer Treibstoffanzeiger. Es

AUF EINEN BLICK DAS ALTERN BEZWINGEN

- 1 Wie lässt sich die Zahl der gesunden Lebensjahre erhöhen? Bei Mäusen verzögert Hungern das Altern werden. Für den Menschen ist das noch nicht belegt.
- 2 Allerdings lässt sich bereits mit Hilfe bestimmter Wirkstoffe, die in Stoffwechselprozesse eingreifen, nachahmen, wie sich die Körperzellen bei Nahrungsmangel umstellen.
- 3 Unter anderem entpuppten sich einige Antidiabetika, Krebsmedikamente und Immunsuppressiva im Tierversuch als lebensverlängernd. Erste Studien dazu am Menschen laufen gerade an.

tritt bei Nährstoffmangel in Aktion – also etwa bei intensivem Sport oder einer Abmagerungskur. Dann sorgt es dafür, dass die Zellen vermehrt Glukose aufnehmen und empfindlicher auf Hormone wie Insulin reagieren, welche die Zuckeraufnahme fördern. Zudem unterstützt AMPK den Abbau von Energie liefernden Fetten. Und bei körperlichem Training stimuliert das Enzym die Bildung von zusätzlichen Mitochondrien, den »Kraftwerken« in Zellen. All dies ist der Gesundheit zuträglich.

Überhaupt spricht vieles dafür, dass Alterungsprozesse an die Stoffwechselrate gekoppelt sind. Wie Cynthia Kenyon von der University of California in San Francisco bereits 1993 entdeckte, wird der winzige Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* bei einem mutierten *DAF-2*-Gen doppelt so alt wie sonst. Dieses so genannte Langlebigkeits- oder Gerontogen hemmt den Transkriptionsfaktor *DAF-16*, der wiederum Erbfaktoren beeinflusst, deren Produkte unter anderem die Stoffwechselrate, also auch den Energiedurchsatz, steuern.

Insgesamt ist das Wissen über die genetischen Grundlagen des Alterns jedoch noch recht begrenzt. Daher kümmern sich Forscher bisher hauptsächlich um andere molekulare Vorgänge in den Zellen.

Einen der vielversprechendsten Anti-Aging-Mechanismen entdeckte Valter Longo von der University of Southern California in Los Angeles 2001 rein zufällig. Vor einem Wochenende hatte er vergessen, Hefekulturen zu füttern, die er für ein Experiment angesetzt hatte.

Überraschenderweise bekam ihnen die Hungerkur hervorragend, denn diese Zellen lebten wesentlich länger als normalerweise. Wie sich herausstellte, hing das mit einer molekularen Kaskade zusammen, deren zentrales Enzym mTOR heißt (siehe »Ein TOR zur Langlebigkeit«, links).

Diesen wichtigen Signalweg hatten andere Forscher schon in den 1990er Jahren aufgespürt. Sie suchten nach der Zielstruktur für das Immunsuppressivum Rapamycin, auch Sirolimus genannt, das man bei Bodenbakterien



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Altern finden Sie unter spektrum.de/t/altern

ISTOCK / DRUVO

gefunden hatte. Der Wirkstoff wird nach Organtransplantationen eingesetzt und mittlerweile auch bei Krebs, denn er kann die Zellvermehrung verlangsamen oder sogar aufhalten. Das Enzym mTor entpuppte sich als jene Zielstruktur. Es fungiert in Zellen quasi wie ein Hauptschalter. Ist es aktiv, arbeitet die Maschinerie der Zellen tüchtig: Diese bilden dann neue Proteine, wachsen und teilen sich schließlich. Wird mTor aber blockiert – etwa durch Rapamycin oder kurzzeitigen Nährstoffmangel – werden die Prozesse gedrosselt oder kommen zum Stillstand.

Longos Beobachtung brachte die Bedeutung des Enzyms für die Alterung ans Licht. Wenn Nahrungsknappheit die Aktivität von mTOR hemmt, schaltet die Zellfabrik in einen Sparmodus um. Alte Proteine werden recycelt, Reinigungs- und Reparaturmechanismen gesteigert. Auch die Vermehrung der Zellen wird zurückgestellt. So vermag der Organismus Hungerphasen eher durchzuhalten.

»Gewissermaßen verspürt mTOR die aktuellen Lebensbedingungen der Zelle«, erklärt Kaeberlein. »Bei reichlich Nahrung schaltet das Enzym hoch. Einfache Organismen gedeihen dann prächtig und vermehren sich. Klar – denn in guten Zeiten sollte man auf Nachwuchs setzen.« Tatsächlich findet sich dieses maßgebliche Protein quer durch den Stammbaum: bei der einzelligen Hefe ebenso wie bei den höheren Tieren und beim Menschen.

Rapamycin: Ein Medikament, das quasi wie ein Jungbrunnen wirkt?

Dass das oben erwähnte Rapamycin bei Mäusen lebensverlängernd wirkt, erregte 2009 einiges Aufsehen (siehe **Spektrum** Juli 2012, S. 22–29). Damals wies eine größere Studie den Effekt bei drei genetisch unterschiedlichen Labormausstämmen nach. Bis dahin kannte man keinen Wirkstoff mit ähnlichen Folgen für Säugetiere in streng kontrollierten Experimenten. Bei allen drei Mäusestämmen erhöhte die Substanz sowohl die Durchschnitts- als auch die Höchstlebensdauer der Tiere, was einige Forscher als Anzeichen dafür bewerteten, dass Rapamycin die Alterung verlangsamt.

Denn die behandelten Mäuse wirkten länger jugendlich und insgesamt gesünder als unbehandelte Altersgenossen. Ihr Bewegungsapparat wie auch Herz und Blutgefäße erschienen elastischer. Selbst die Leber machte einen besseren Eindruck. Und mit zunehmendem Alter blieben diese Mäuse aktiver als Kontrolltiere. Die Effekte traten sogar dann noch auf, wenn die Tiere erst ab einem für sie recht hohen Alter von 20 Monaten behandelt wurden.

Andere Arbeitsgruppen haben jene Befunde reproduziert – und sogar noch übertroffen. Erhielten Mäuse ihr

ganzes Erwachsenenleben hindurch Rapamycin, stieg die Lebensdauer um bis zu einem Viertel – ähnlich viel wie bei verminderter Kalorienzufuhr. Natürlich wissen die Forscher, dass solche Erkenntnisse nicht zwangsläufig auch auf Menschen zutreffen müssen. Die Ergebnisse lassen aber zumindest ahnen, dass es Möglichkeiten geben könnte, unsere Alterung mitsamt dem Auftreten altersbedingter Erkrankungen hinauszuzögern. Brian Kennedy vom Buck Institute for Research on Aging in Novato (Kalifornien) kommentiert die Studien so: »Rapamycin war der erste wirkliche Treffer. Alle sagten, diese Substanz könnte es bringen.«

Allerdings hat Rapamycin teils unerwünschte Nebenwirkungen. So bekommen manche Patienten davon Entzündungen der Mundschleimhaut. Wegen der gehemmten Immunreaktionen steigt das Infektionsrisiko. In den Mäusestudien gab es bei den Männchen Anzeichen für eine Verkleinerung der Hoden. Dergleichen mag für Krebspatienten und Organempfänger hinnehmbar sein. Doch als Anti-Aging-Pille für gesunde Menschen sind solche Begleiterscheinungen kaum akzeptabel.

Denkbar ist immerhin, dass sich für diesen Zweck eine geringere Dosierung von Rapamycin oder eine andere Verabreichungsform besser eignet. Das untersuchen Matt Kaeberlein und sein Kollege Daniel Promislow gegenwärtig an Hunden mittleren Alters, die bei Menschen leben – da diese Tiere nicht nur die gleiche Umwelt haben wie wir, sondern auch oft die gleichen Alterskrankheiten bekommen.

Tatsächlich besagen laut Kaeberlein die ersten noch vorläufigen Ergebnisse, dass sich die in Ultraschallaufnahmen gemessene Herzfunktion schon nach wenigen Wochen unter niedrig dosiertem Rapamycin gewissermaßen verjüngt hat. Das Herz von behandelten Hunden kontrahiert sich ganz klar besser als das von Kontrolltieren – schließlich sei eine schlechter werdende Durchblutung wahrscheinlich eine der Ursachen für abnehmende Organfunktionen im Alter.

Als Alterungsbremse könnte sich das Mittel auch deswegen eignen, weil es bei niedriger Dosierung die Immunkräfte weniger zu unterdrücken als vielmehr nur zu modulieren scheint. Bestimmte Funktionen verstärkt es wohl sogar. In einer kleinen Studie des Pharmaunternehmens Novartis zum Krebsmedikament Afinitor (einem Rapamycin-Abkömmling) kam heraus, dass ältere Patienten dadurch auf eine Grippeimpfung besser ansprechen als sonst. Interessant ist in dem Zusammenhang auch das Ergebnis einer niederländischen Untersuchung: Demzufolge zeichnet sich das von Rapamycin unterdrückte Enzym mTOR bei gesunden über 90-Jährigen durch verringerte Aktivität aus.

Als Nächstes möchten Kaeberlein und seine Kollegen eine längere Untersuchung durchführen, in der sie diesmal ältere Hunde fortlaufend mit Rapamycin behandeln. Sollten die Effekte ähnlich beeindruckend sein wie bei den langlebigen Mäusen, könnte das eine erste Studie am Menschen rechtfertigen. Schon in fünf Jahren, meint der Forscher, würden sie wissen, inwieweit sich die Substanz bewährt.

Das Entscheidende bei Ansätzen wie diesem ist allerdings nicht die längere Lebensdauer an sich, sondern deren Verknüpfung mit mehr gesunden Jahren. Mit unserer heutigen relativ hohen Lebenserwartung geht eine ebenfalls verlängerte Phase mit Krankheit und Gebrechlichkeit im Alter einher.

Laut einer 2002 erschienenen Arbeit der Bevölkerungswissenschaftler James W. Vaupel und James E. Oeppen, die unter anderem am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock tätig sind, ist die Lebenserwartung in den langlebigsten Bevölkerungen seit Mitte des 19. Jahrhunderts ziemlich gleichmäßig gestiegen. Die gesunde Lebenszeit ist aber nicht in gleichem Maß angewachsen.

Lediglich der Anteil der Krankheitsarten an der Sterblichkeit hat sich verschoben. Während die Rate von Herz- und Kreislauf- sowie Krebserkrankungen zurückgeht, nimmt etwa die von neurodegenerativen Störungen wie Alzheimer zu. So leidet in den USA inzwischen jeder neunte über 65-jährige Mensch an einer Demenz – und jenseits des 80. Lebensjahrs steigt die Anfälligkeit dafür nochmals drastisch.

Das große Ziel:

Den Alterungsprozess an sich verlangsamen

»Genau das war zu erwarten«, sagt der Demograf S. Jay Olshansky von der University of Illinois in Chicago. »Alzheimer tritt eben erst ab Ende 70 ziemlich häufig auf. Ich denke, wenn die Lebenserwartung weiter steigt, wird der Demenzanteil noch mehr zunehmen. Es sei denn, es gelingt, den Alterungsprozess an sich zu verlangsamen und damit auch zu erreichen, dass sich der letzte krankheitsbehaftete Lebensabschnitt verkürzt.«

Israel Kristal, der immer noch über einen scharfen Verstand verfügt und ein geistreicher Gesprächspartner ist, erscheint wie ein Musterbeispiel dieser Vision. Die tödlichen Klippen des Alterns hat er umschifft – ob Krebs oder Herzkrankheiten, die Alzheimerdemenz oder Diabetes, die zusammen die Hälfte aller Todesfälle in den Industrienationen verursachen. Die Phase des Siechtums dauert bei rüstigen über 100-Jährigen meist viel kürzer als bei im achten Lebensjahrzehnt Verstorbenen. Ähnliche Auswirkungen wünscht sich Olshansky von einem idealen Anti-Aging-Mittel.

Bisher stand vor der Entwicklung eines solchen Medikaments jedoch ein großes Hindernis: Da die amerikanische Arzneimittelbehörde FDA Altern nicht als Krankheit einstuft, sah sie sich außer Stande, entsprechende Mittel und deren klinische Prüfung zuzulassen. Wie rasch jemand normalerweise altern wird, kann man schließlich nicht einfach so messen, etwa an Blutwerten. Woran soll man also die Wirkung einer Substanz festmachen? Vor diesem Hintergrund schreckten Pharmaunternehmen bislang davor zurück, in Forschung über Anti-Aging-Wirkstoffe zu investieren.

Doch 2015 genehmigte der FDA eine klinische Studie zu Effekten von Metformin auf den Alterungsprozess. Dieses Mittel, das die Empfindlichkeit von Zellen für das Blutzuckerhormon Insulin erhöht, wird seit Jahrzehnten bei

Altersdiabetes verschrieben und zählt mittlerweile zu den weltweit am häufigsten verordneten Medikamenten. Die Weltgesundheitsorganisation WHO stuft es als »unverzichtbares« Arzneimittel ein; es gibt davon auch ein billiges Generikum.

Wegen der großen Zahl an Patienten, die es nehmen, vermochten Forscher unerwartete Effekte der Substanz zu erkennen. Beispielsweise scheinen epidemiologischen Studien zufolge die Betroffenen seltener an Krebs zu erkranken. Andere Untersuchungen lassen günstige Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System vermuten.

Unerwartete Ergebnisse brachte 2014 eine Studie an britischen Patienten: Während die Diagnose Altersdiabetes die Lebenserwartung normalerweise um mehrere Jahre vermindert, lebten ältere Diabetiker, die das Mittel nahmen, im Durchschnitt sogar 18 Prozent länger als Nichtdiabetiker einer Kontrollgruppe. Auch im Vergleich zu Zuckerkranken, die nicht Metformin einnahmen, sondern einen Sulfonylharnstoff, schnitten sie in dieser Hinsicht besser ab.

Demnach kann die höhere Lebenserwartung nicht mit dem regulierten Zuckerhaushalt zusammenhängen, sondern muss auf das Metformin selbst zurückgehen. Am genauen Wirkmechanismus der Substanz wird zwar seit Jahrzehnten geforscht, doch im Einzelnen ist vieles daran noch unklar. Als gesichert gilt, dass sie den vorn erwähnten AMPK-Signalweg aktiviert, wodurch die Zellen Zucker besser aufnehmen und weitere Vorteile gewinnen. Anscheinend wirkt sich Metformin auf Insulinmechanismen günstig aus, indem es die Empfindlichkeit der Zellen für das Zuckerkhormon erhöht, und es hemmt sogar etwas

»Bei rüstigen über 100-Jährigen dauert die Phase des Siechtums meist viel kürzer als bei im achten Lebensjahrzehnt verstorbenen Menschen«

das oben genannte Enzym mTOR. Außerdem verringert es die Zuckerproduktion in der Leber.

Zu den Alternsforschern, deren Aufmerksamkeit dieses Medikament weckte, zählt Nir Barzilai. Als Leiter einer großen Studie an über 100 Jahre alten aschkenasischen Juden war ihm bekannt, dass hochbetagte Menschen selten unter einem zu hohen Blutzuckerspiegel oder unter Diabetes leiden. Ein besonders guter Glukosestoffwechsel gilt sogar als ein Aushängeschild von Langlebigkeit. Seiner Ansicht nach könnte man sich mittels Metformin diesem Zustand weiter annähern. Denn vieles an dessen Wirkung als Antidiabetikum helfe zugleich gegen Alterung, indem es Zellfunktionen und die Insulinempfindlichkeit verbessere. Der 60-Jährige erzählt, er nehme das Mittel vorbeugend selbst, denn beide Eltern seien Diabetiker gewesen. Nicht nur er hält Metformin für eine hochwirksame Sub-

stanz, die wahrscheinlich auf zahlreiche Vorgänge rund um die Alterung Einfluss nimmt. James L. Kirkland von der Mayo-Klinik in Rochester (Minnesota), der bei Metformin-Studien mitarbeitet, ergänzt: »Mittlerweile haben wir von Menschen Daten aus sechs Jahrzehnten. Demnach bewirkt dieses Metformin vielerlei, was, zusammengenommen, einfach dafür spricht, dass es in fundamentale Alterungsprozesse eingreift.«

Herauszufinden, ob ein Medikament Menschen tatsächlich langsamer älter werden lässt, würde jahrzehntelange Beobachtungen erfordern. Die 2015 zugelassene TAME-Studie (für Targeting Aging with Metformin) ist wesentlich kürzer angelegt. Statt schlicht die Lebensdauer anfangs gesunder Personen zu erfassen, von denen nur ein Teil den Wirkstoff erhält, registrieren die Forscher, ob und wann bei den einzelnen Teilnehmern zu einer schon vorhan-

Sollte die TAME-Studie mit Metformin erfolgreich verlaufen, bekäme endlich wohl auch die Pharmabranche Interesse an Anti-Aging-Medikamenten

denen Alterskrankheit weitere hinzukommen. Typischerweise leiden viele Ältere zunehmend an mehreren chronischen Krankheiten. Zum hohen Blutdruck kommt irgendwann vielleicht Diabetes hinzu, zu einer Herzschwäche eine Demenz, und so weiter.

Bei der neuen Studie machen ältere Menschen mit, die anfänglich nur eine Alterskrankheit haben, allerdings ausdrücklich nicht Diabetes. Die Forscher möchten wissen, ob sich unter Metformin weitere Erkrankungen weniger oder später einstellen. Die Checks der Doppelblindstudie sollen jeweils über fünf bis sieben Jahre laufen.

Bei diesen Versuchen könnte also klar werden, ob sich Metformin zur Vorbeugung gegen typische Alterskrankheiten eignet, ob es also letztlich mehr relativ gesunde Lebensjahre ermöglicht. Kirkland vergleicht das unter anderem mit früheren Tests von Blutdrucksenkern an Personen, die noch keinen Herzinfarkt hatten. Es gab Zeiten, da waren solche Studien nicht leicht durchzusetzen.

Verläuft die TAME-Studie erfolgreich und sollten daraufhin Untersuchungen an Menschen von Substanzen, die Alterungsprozesse verzögern könnten, offiziell genehmigt werden, bekäme nach Barzilai's Einschätzung endlich auch die Pharmabranche Interesse an solchen Medikamenten. Mit dabei wäre sicherlich die von Google 2013 ins Leben gerufene Firma Calico in San Francisco, die sich auf Alterung fokussiert. Cynthia Kenyon, die einst bei dem Fadenwurm *C. elegans* das Langlebigkeitsgen *DAF-2* entdeckte, ist dort Vizepräsidentin. Es wird gemunkelt, dass die Firma mehr als eine Milliarde Dollar in die Suche nach Wirkstoffen investieren würde, welche die gesunde Lebenszeit

verlängern können – was dem Gesamtbudget des National Institute on Aging der USA nahe käme. »Und wenn als Nebenwirkung die Lebensdauer insgesamt zunimmt, werden wir uns dafür entschuldigen«, scherzt Barzilai.

Inzwischen beginnen sich noch mehr mögliche Medikamente gegen das Altern abzuzeichnen. Zum Beispiel verlängert das Antidiabetikum Acarbose bei männlichen Mäusen die Lebensspanne signifikant. Da es wie Metformin beim Menschen zum Behandeln von Alterszucker längst erprobt und zugelassen ist, böte es sich ebenfalls als Kandidat für eine klinische Studie zur menschlichen Alterung an.

Auch das schwache Hormon alpha-Östradiol (Alfatradiol) käme dafür vielleicht in Frage. Es hilft bei Männern wie Frauen gegen manche Formen von Haarausfall und wird zudem für die Behandlung verschiedener Demenzen erprobt. Eine neuere Studie an älteren Mäusemännchen zeigte, dass es viele Stoffwechselprozesse, darunter den Zuckerhaushalt, günstig beeinflusst, ohne einen verweiblichenden Effekt zu haben.

Eine vielleicht noch potentere Gruppe viel versprechender Anti-Aging-Kandidaten könnte gealterte (senescente) Zellen beseitigen, die zwar noch nicht absterben, aber ihre Teilung bereits eingestellt haben. Quasi aus dem Hintergrund setzen seneszente Zellen so genannte Zytokine frei, kleine Signalproteine, die das Wachstum und die Differenzierung von Zellen regulieren. Laut Kirkland dient das wohl eigentlich zur Krebsabwehr, indem potenziell bösartige Nachbarzellen abgetötet werden.

Auch bei der Wundheilung spielen vergreiste Zellen eine Rolle, denn ihre Zytokine tragen dazu bei, Immunvorgänge zu justieren. Allerdings reicht ihr schädlicher Einfluss weit über ihre nächste Nachbarschaft hinaus. Daher sind sie mitverantwortlich für die typischen unterschwelligen Entzündungen eines alternden Organismus. Paradoxerweise steigt durch sie auch das Risiko für Krebs im umliegenden Gewebe.

Wieso vergreiste Zellen dem jungen Körper nützen ... und warum sie dem alten Organismus schaden

Manche Forscher zählen die seneszenten Zellen sogar zu den Hauptakteuren im Alterungsprozess. Mit zunehmenden Jahren häufen wir sie im Körper an. Wie Experten der Mayo-Klinik nachwiesen, unter ihnen Kirkland und Jan M. van Deursen, scheinen genetisch veränderte Mäuse, die derartige Zellen leichter loswerden, tatsächlich länger in besserer Verfassung zu bleiben und älter zu werden als sonst.

Beim normalen Organismus ist es allerdings sehr schwierig, die überalterten Zellen aufzuspüren, denn sie stecken überall zwischen gesunden Zellen. Noch schwerer ist es, sie gezielt abzutöten, da sie überraschend widerstandsfähig sind.

2015 berichteten Wissenschaftler unter anderem von der Mayo-Klinik sowie vom Scripps Research Institute mit Hauptsitz in La Jolla (Kalifornien) von ihrer Suche nach Substanzen, die seneszente Zellen zum Selbstmord – Apoptose genannt – bringen. Sie fanden drei interessante Wirkstoffe, darunter die beiden Krebsmedikamente Dasa-



Diese Greisin lebt und arbeitet in einem Bergdorf vom Shan-Plateau bei dem 1300 Meter hoch gelegenen Städtchen Kalaw im Osten Myanmars, einem früheren Luftkurort der Briten.

ISTOCK / HADYNYAH

tinib und Navitoclax. Der dritte war der gelbe Pflanzenfarbstoff Quercetin – ein antioxidativ wirkendes Flavonoid, das reichlich etwa in Obstschalen und Grüngemüsen vorkommt.

Bei Krebspatienten finden sich nach einer Bestrahlung oder Chemotherapie in den Muskeln viele seneszente Zellen. Das Gleiche beobachteten die Forscher, als sie jeweils ein Bein von Mäusen durch Bestrahlung praktisch außer Gefecht setzten, um einen altersbedingten Muskelschwund zu imitieren. Danach genügte eine kurze Behandlung der Tiere mit obigen Medikamenten, um die Funktionsfähigkeit der Gliedmaße fast vollständig wiederherzustellen.

Schon eine einzige Dosis, berichtet Kirkland, habe die Ausdauer der Nager auf dem Laufrad erheblich verbessert, und dieser Zustand habe über die nächsten sieben Monate angehalten. Er führt das darauf zurück, dass besagte Substanzen anscheinend überwiegend seneszente Zellen vernichten. Vielleicht müssen die vergreisten Zellen ja sterben, wenn wir länger leben wollen. ◀

QUELLEN

Bannister, C. A. et al.: Can People with Type 2 Diabetes Live Longer than Those Without? A Comparison of Mortality in People Initiated with Metformin or Sulphonylurea Monotherapy and Matched, Non-Diabetic Controls. In: *Diabetes, Obesity and Metabolism* 16, S. 1165–1173, 2014

Harrison, D. E. et al.: Rapamycin Fed Late in Life Extends Lifespan in Genetically Heterogeneous Mice. In: *Nature* 460, S. 392–395, 2009

Lamming, D. W. et al.: Rapalogs and mTOR Inhibitors as Anti-aging Therapeutics. In: *Journal of Clinical Investigation* 123, S. 980–989, 2013

Laplante, M., Sabatini, D. M.: mTOR Signaling at a Glance. In: *Journal of Cell Science* 122, S. 3589–3594, 2009

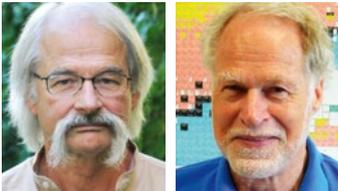
LITERATURTIPPS

Gifford, B.: Jung bleiben. Warum wir altern – und was wir wirklich dagegen tun können. Wilhelm Heyne Verlag, München 2016
Überblick über wissenschaftliche Erkenntnisse zum Altern

Stipp, D.: Ein neuer Weg zu längerem Leben. In: *Mensch 2.0. Können wir unsere biologischen Fesseln sprengen? Spektrum Spezial: Biologie, Medizin, Hirnforschung* 3/14: S. 50–57
Die Entdeckung und Erforschung von Rapamycin und TOR

ASTRONOMIE SUPERNOVA-SPUREN VOR DER HAUSTÜR

Vor wenigen Millionen Jahren explodierten mehrere massereiche Sterne in unserer kosmischen Nachbarschaft als Supernova – das haben Forscher jetzt nachgewiesen. In langwierigen Analysen fanden sie im Meeresgrund und in Mondmaterial radioaktive Isotope, die bei den Explosionen ausgestoßen wurden und bis in unser Sonnensystem gelangten.



Thomas Faestermann (links) und **Gunther Korschinek** forschen an der Technischen Universität München. Sie experimentieren hauptsächlich am Beschleuniger des Maier-Leibnitz-Labors in Garching bei München; Faestermann außerdem an Beschleunigern der GSI in Darmstadt. Dabei studiert er Eigenschaften der Atomkerne auch im Hinblick auf astrophysikalische Fragestellungen, Neutrinoeigenschaften und fundamentale Wechselwirkungen. Korschinek beschäftigte sich mit Beschleunigern sowie Erzeugung von Strahlung durch hochenergetische Elektronen und war am Aufbau des großen Neutrino-Experiments Borexino beteiligt.

► spektrum.de/artikel/1430284

► Auch wenn der Blick an den nächtlichen Sternenhimmel eine Ahnung von Ewigkeit hervorruft: Die Lebensdauer von Sternen ist begrenzt, wobei sie je nach deren Masse stark variiert. Während unsere Sonne nach 4,6 Milliarden Jahren erst knapp die Hälfte ihres Lebens vollendet hat, sind andere, sehr viel massereichere Exemplare bereits nach wenigen Millionen Jahren erloschen.

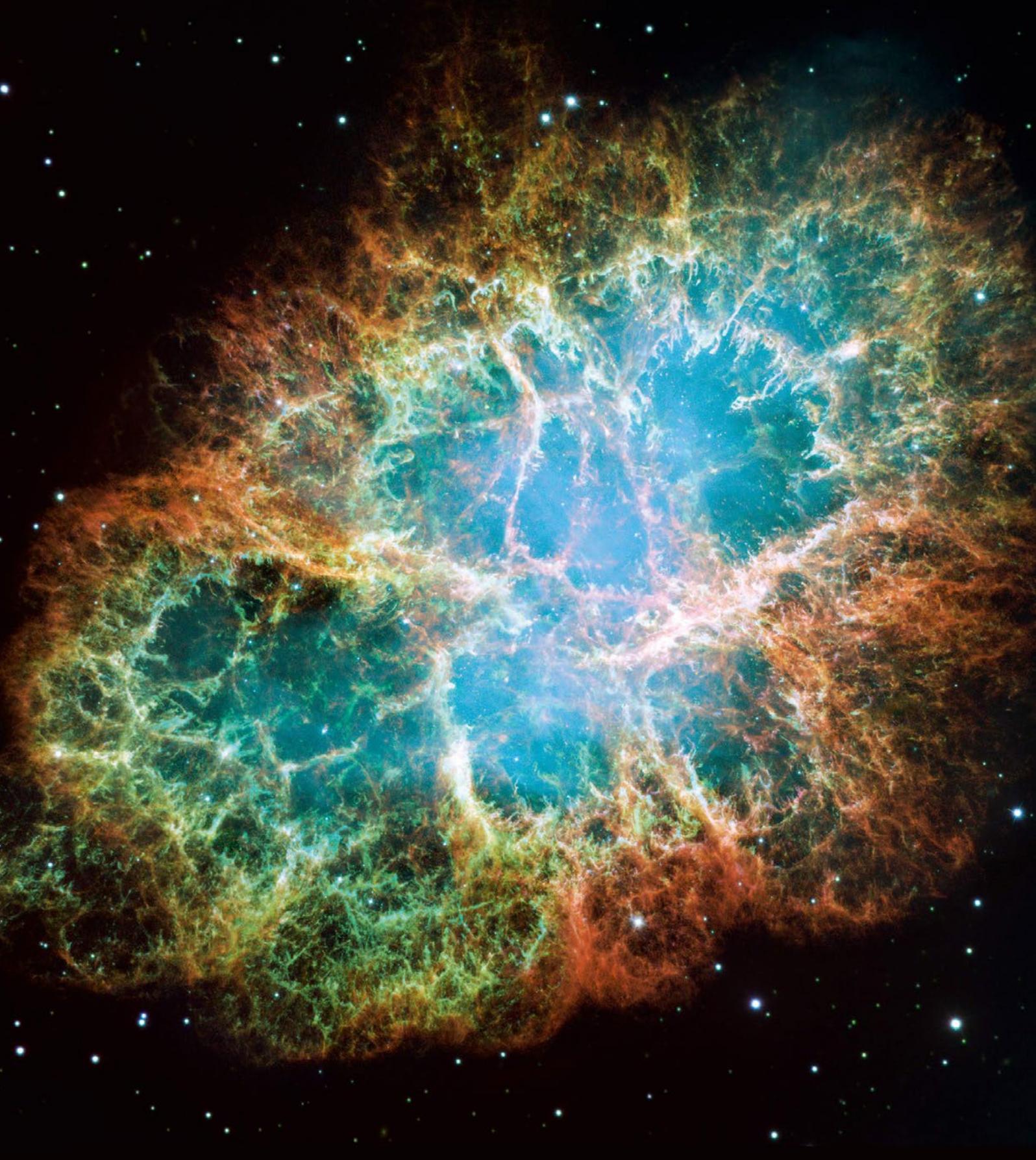
AUF EINEN BLICK ASTRONOMIE IM MEER

- 1** Das Sonnensystem befindet sich in einer lokalen Blase aus interstellarer Materie. Dass diese durch eine Supernova-Explosion geformt wurde, vermuten Astronomen schon lange.
- 2** Verschiedene Forschergruppen sind der Sache nun auf den Grund gegangen und haben nach Radionukliden, speziell dem Eisen-60 in ozeanischen Krusten und in Mondproben gesucht.
- 3** Die Anreicherung von Eisen-60 fand offenbar vor rund zwei bis drei Millionen Jahren statt. Zu dieser Zeit ereigneten sich laut Computersimulationen mehrere Sternexplosionen in einem nahen Sternhaufen.

Anfangs fusionieren im Sterninneren Wasserstoffatome zu Heliumkernen. Die dabei freigesetzte Energie hält den Stern stabil. Der thermodynamische Druck wirkt nach außen der eigenen Schwerkraft entgegen. Ist der Wasserstoff im Zentrum aufgebraucht, verschmilzt Helium zu schwereren Elementen, später folgen Kohlenstoff, Sauerstoff, Neon und Silizium. Bei Eisen oder Nickel bricht die Kernfusion ab, da ab einer Nukleonenzahl von ungefähr 60 bei der Fusion mehr Energie verbraucht als frei würde.

Diese Prozesse laufen umso rascher ab, je höher Temperatur und Druck im Sterninneren sind. Da diese beiden Größen mit steigender Masse der Sterne zunehmen, haben massereichere ihr Kernmaterial früher verbraucht als masseärmere. Und auch das Ende eines Sterns hängt von seiner Anfangsmasse ab. Anders als die Sonne, die einmal recht unspektakulär ihre äußere Hülle abstoßen und dann als Weißer Zwerg enden wird, explodieren Sterne von mehr als acht Sonnenmassen in einer Supernova.

Denn kommt die Energieproduktion in deren Zentrum zum Erliegen, reduziert sich dort der Druck, der der Schwerkraft entgegenwirkt. Ist der Eisenkern schwer genug, kollabiert er, bis er die Dichte von Atomkernen erreicht. Dabei fangen die Protonen die bisher freien Elektronen ein und wandeln sich unter Aussenden jeweils eines Neutrinos in Neutronen um. Einen Großteil der bei dem Kollaps freigesetzten Energie transportieren die Neutrinos nach außen. Ihr Impuls reißt die äußeren Schichten des Sterns explosionsartig mit.



Die bei einer Supernova innerhalb weniger Sekunden freigesetzte Energie ist vergleichbar mit jener, die unsere Sonne über mehrere Milliarden Jahre aussendet. Der bekannteste Überrest einer Supernova ist der Krebsnebel; er entstand vor rund 7300 Jahren. Wegen der Entfernung erreichte das Licht der Sternexplosion die Erde erst im Jahr 1054.

Bei so einer Kernkollaps-Supernova, wie Astrophysiker sie nennen, entstehen auch neue Elemente, und ein großer Teil davon wie etwa Schwefel und Eisen wird herausgeschleudert. Übrig bleibt ein Neutronenstern von ein bis zwei Sonnenmassen mit einem Radius von nur etwa zehn Kilometern oder gar ein Schwarzes Loch. Während sich das ausgestoßene Material mit einer Geschwindigkeit von 1500 Kilometer pro Sekunde ausbreitet, sammelt es im interstellaren Raum bereits vorhandene Materie auf. Dadurch bildet sich eine Stoßfront, in der die Teilchendichte viel höher ist als innerhalb davon. So entstehen in der interstellaren Materie blasenartige Strukturen, unter anderem die so genannte lokale Blase, in der sich unser Sonnensystem befindet. Sie ist vermutlich durch mehrere Supernova-Explosionen während der letzten 10 bis 20 Millionen Jahre entstanden (siehe Bild S. 56).

Sollte von einer nahen Supernova-Explosion nicht auch Material in das Sonnensystem gelangt sein? Und wie

Allerdings entstehen auf der Erde – wie in sämtlichen anderen Himmelskörpern des Sonnensystems auch – laufend neue Radionuklide, und zwar durch die kosmische Strahlung. Letztere besteht im Wesentlichen aus hochenergetischen Protonen, die stabile Atomkerne durch Kernreaktionen in leichtere, instabile umwandeln können. In der Erdatmosphäre bilden sich so vor allem aus Stickstoff, Sauerstoff und Argon radioaktive Isotope. Zusätzlich steuern Meteoriten auf der Erde Radionuklide bei. Da die schwersten darin vorkommenden Elemente Eisen und noch deutlich weniger Nickel sind, werden hier vor allem Radionuklide, die leichter sind als Eisen, durch die kosmische Strahlung erzeugt.

Auf Grund der Häufigkeiten ist ein langlebiges Eisenradioisotop der beste Kandidat, um nach jüngst von einer Supernova produziertem Material zu suchen: nämlich das radioaktive Isotop ^{60}Fe (Eisen-60) mit einer Halbwertszeit von 2,6 Millionen Jahren. Als wir uns danach auf die Suche machten, war letztlich noch nicht sicher, ob dieses Radionuklid überhaupt bei Sternexplosionen entstand. Jedenfalls sollte auf der Erde der Beitrag von ^{60}Fe aus Meteoriten klein sein und sich durch einen Vergleich mit dem viel häufigeren Manganisotop ^{53}Mn auch quantifizieren lassen. In Meteoriten entsteht ^{60}Fe und ^{53}Mn ausschließlich kosmogen. Um aus einer Supernova stammende Staubkörnchen gravitativ zu binden, ist ihre Masse zu gering.

Ungefähr zur selben Zeit veröffentlichten die theoretischen Physiker John Ellis vom CERN, David Schramm von der University of Chicago und Brian Fields von der University of Notre Dame (USA) ihre Überlegungen zu einer möglichen Ablagerung von in Supernovae produzierten Radionukliden in irdischen Reservoiren. Allerdings gingen sie von einer größeren Vielfalt an Isotopen aus, die aus einer Supernova stammten und auf der Erde nachweisbar sein sollten, da sie verschiedene Effekte vernachlässigten. So übersahen sie etwa die Produktion von Radionukliden durch kosmische Strahlung zum einen in Meteoriten, die beim Eintritt in die Erdatmosphäre verdampfen und dann in Form von interplanetarem Staub auf die Erde niedergehen, sowie die analoge Produktion in den obersten Schichten des Erdbodens.

Gelangten die Isotope aus einer Supernova bis an den Grund der Ozeane?

Um das ^{60}Fe auf der Erde aufzuspüren, schienen uns Materialproben von so genannten Ferromangankrusten dafür am besten geeignet. Diese Formationen wachsen flächig am Ozeanboden und bauen ähnlich wie Manganknollen im Meerwasser gelöste Elemente ein. Sie sind ein Endprodukt der komplexen Prozesse ozeanischer Sedimentation in den Tiefseegebieten und haben äußerst niedrige Wachstumsgeschwindigkeiten von wenigen Millimetern pro Millionen Jahre. Damit lassen sich die einzelnen Schichten gut datieren.

Das in einer (jüngeren) Supernova produzierte ^{60}Fe sollte über die Atmosphäre in die Ozeane ausgeregnet worden sein und sich schließlich in deren Boden in den Ferromangankrusten eingelagert haben. Das Verhältnis von Eisen zu Mangan darin ist bekannt und liegt zwischen



ESD / LUIS CALÇADA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Kosmologie finden Sie unter spektrum.de/t/kosmologie

würde sich deren Spuren etwa auf der Erde bemerkbar machen? Das fragten wir uns bereits vor gut 20 Jahren, als wir die Methode der Beschleuniger-Massenspektrometrie (BMS) am Beschleuniger der Technischen Universität München in Garching so weit perfektioniert hatten, dass wir ein Atom eines Radioisotops unter zehn Billionen (10^{16}) Atomen des gleichen Elements nachweisen konnten.

Tatsächlich sind die schwereren Elemente, die in unserem Sonnensystem vorkommen, in Sternexplosionen entstanden. Das lässt sich aus ihrer Häufigkeitsverteilung schließen. Allerdings entsprach das Material, aus dem vor 4,6 Milliarden Jahren Sonne und Planeten hervorgegangen sind, bereits weitgehend der heutigen Zusammensetzung. Womöglich hat damals sogar eine relativ nahe Supernova den letzten Anstoß zur Bildung des Sonnensystems gegeben, indem sie das interstellare Medium in ihrer Umgebung verdichtete.

Ob diese schweren Elemente schon zur Zeit der Bildung des Sonnensystems vorhanden waren oder erst später dazukamen, lässt sich anhand von sehr langlebigen Radionukliden feststellen. Diese instabilen Isotope bestimmter Elemente zerfallen mit der Zeit unter Aussendung radioaktiver Strahlung in stabile Kerne. Abgesehen von den besonders langlebigen mit Halbwertszeiten von mindestens 100 Millionen Jahren sind die in der Entstehungsphase des Sonnensystems vorhandenen schon längst zerfallen. Nur wenige wie etwa das Isotop Kalium-40 (Schreibweise: ^{40}K) mit einer Halbwertszeit von 1,28 Milliarden Jahren haben überdauert.

0,4 und 1,2. Nun galt es herauszufinden, ob das Isotop ^{60}Fe tatsächlich enthalten war und wann es eingebaut wurde.

Zunächst untersuchten wir mit der BMS-Methode (siehe »Die Beschleuniger-Massenspektroskopie«) drei Proben einer Ferromangankruste aus dem Südpazifik aus 1300 Meter Tiefe, die uns die Universität Kiel zur Verfügung stellte. Das Material stammte jeweils von der obersten Krustenschicht (0 bis 3 Millimeter), von einer

tieferen (5 bis 10 Millimeter) und einer noch weiter darunter liegenden (10 bis 20 Millimeter), deren Alter zwischen 0 und 2,8, 3,7 und 5,9 sowie 5,9 und 13 Millionen Jahren lag. Ihre Wachstumsrate ließ sich mittels des Radioisotops ^{10}Be bestimmen, das kontinuierlich durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre entsteht und mit einer Halbwertszeit von 1,4 Millionen Jahren zerfällt. Insgesamt konnten wir zwar nur 23 ^{60}Fe -Atome nachweisen, diese

Die Beschleuniger-Massenspektrometrie

Mit der Garching Anlage lassen sich andere Atome und Moleküle, selbst mit gleicher Massenzahl,

von Eisen-60 separieren. Zunächst wird das Material in Form von negativen Ionen in einer Kombina-

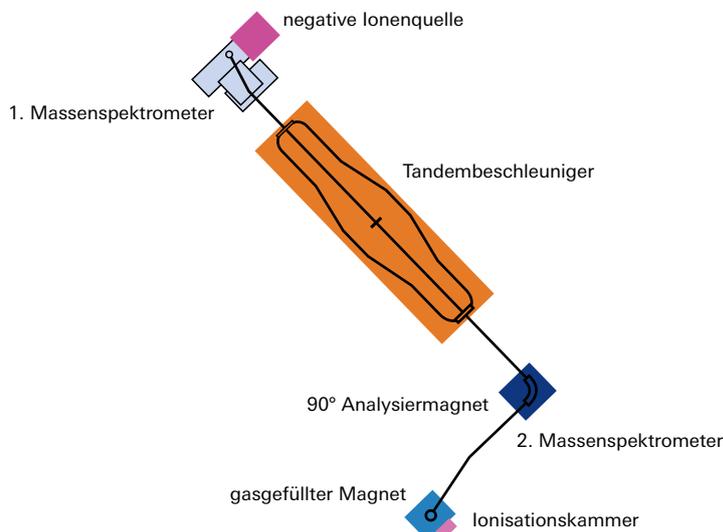
tion aus magnetischen und elektrischen Feldern nach Masse und Energie gefiltert (siehe Schema: 1. Massenspektrometer). Danach durchlaufen die Ionen in einem Tandembeschleuniger (orangefarbene Kammer) eine positive Spannung von etwa zwölf Millionen Volt. Dabei passieren sie eine dünne Kohlenstofffolie und verlieren Elektronen. Außerdem zerbrechen sämtliche Molekülbindungen.

Die nun mehrfach positiv geladenen Ionen werden weiter bis auf sieben Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Bei diesen hohen Energien lässt sich auch das Isotop Nickel-60 (28 Protonen, 32 Neutronen) abtrennen, dessen Kern dieselbe Massenzahl wie Eisen-60 (26 Protonen, 34 Neutronen) aufweist. In einer mit wenig Stickstoff gefüllten Magnetkammer werden die Ionen durch Stöße vielfach umgeladen, bis sich ein mittlerer, elementspezifischer Ladungszustand einstellt.

Wegen seiner höheren mittleren Ladung werden Nickel-60-Ionen im Magnetfeld stärker abgelenkt als Eisen-60-Ionen. Ein nachfolgender Detektor stoppt die Teilchen.

Anhand der dort in verschiedenen Tiefen deponierten Energien sowie des Ortes und des Winkels der eintreffenden Ionen lässt sich Eisen-60 eindeutig identifizieren sowie zählen und ein instabiles Eisen-60-Atom unter mehr als 10^{16} stabilen Eisenatomen nachweisen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, MACH, KLAUS/KNIE, TU MÜNCHEN



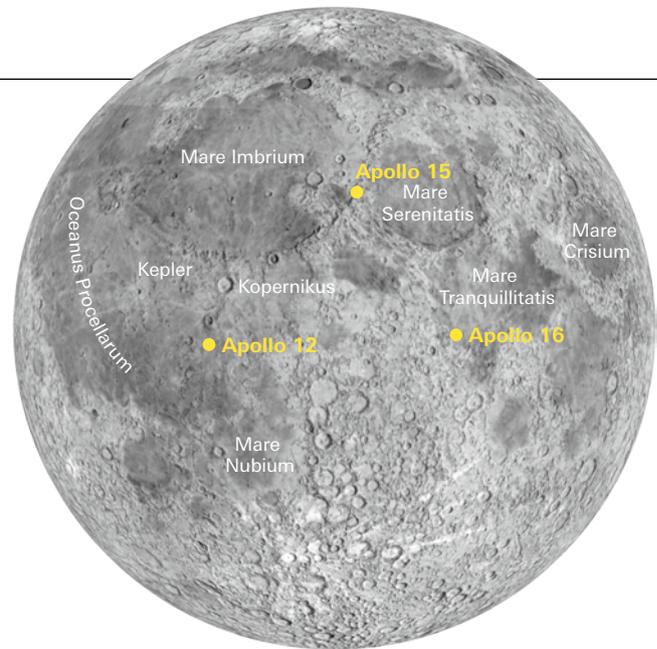
THOMAS PRESTERMANN



Mit dem Tandembeschleuniger in Garching lassen sich verschiedene Ionen mit ähnlichen Massen voneinander trennen. Die Grafik oben zeigt den schematischen Aufbau der Anlage.

Suche auf Mond und Erde

Thomas Faestermann und Gunther Korschinek haben mit ihren Kollegen Materialproben vom Meeresgrund und vom Mond analysiert. Das Material war bei den Apollo-Missionen 12, 15 und 16 eingesammelt worden (rote Beschriftungen auf der Mondkarte) oder stammte aus Ferrromangan-krusten und Sediment im Meer (rote Kreise auf der Erdkarte; irdisches Material von den gelb gekennzeichneten Stellen wurde von einer anderen Forschergruppe untersucht). In den verschiedenen Proben stellten sie einen erhöhten Eintrag dieses Radionuklids fest, den sie auf ein Alter zwischen zwei und drei Millionen Jahren datierten. Anhand des Mondmaterials konnten sie ihre Messungen bestätigen.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT

verteilt sich jedoch vor allem auf die beiden oberen Schichten. Vergleichsmessungen an Meteoriten zufolge war dieser Überschuss höher als allein durch Reaktionen der kosmischen Strahlung in interplanetarem Staub zu erklären ist. Daraus folgerten wir 1999, dass in den letzten fünf Millionen Jahren mindestens eine Supernova in einer Entfernung von etwa 100 Lichtjahren explodiert sein sollte.

Damit hatten wir uns weit aus dem Fenster gelehnt. Da es damals weltweit keine andere Forschergruppe gab, die dieses Isotop mit der nötigen Empfindlichkeit nachweisen konnte, standen wir nun selbst in der Pflicht, diese Aussage mit noch besseren Daten zu überprüfen. Hierzu überließ uns Ulrich von Stackelberg von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ein Stück einer Ferrromangankruste namens 237KD. Sie war 1976 vom Forschungsschiff Valdivia 2000 Kilometer südöstlich von Hawaii aus einer Tiefe von 4830 Metern geborgen worden.

Von dieser Kruste untersuchten wir 34 ein bis zwei Millimeter dünne Schichten über ein kontinuierliches Tiefenprofil, das eine Zeitspanne von 0 bis 13 Millionen Jahren abdeckte. Im Mittel ergab sich ein $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ -Verhältnis von etwa $3 \cdot 10^{-16}$. Doch drei Messwerte in einer Tiefe von sechs bis acht Millimeter – das entspricht einem Alter von 2,2 bis 3 Millionen Jahren – lagen beinahe zehnmal höher. Diese Ergebnisse deuteten wir 2004 ebenfalls als Indiz für eine Supernova-Explosion. Um sicherzugehen, dass dies kein lokales Phänomen war, analysierten wir später noch eine Kruste, die das Forschungsschiff Sonne am Midway Atoll 2000 Kilometer westnordwestlich von

Hawaii entnommen hatte. Auch hier ergab sich eine erhöhte ^{60}Fe -Konzentration für die Zeitspanne von vor zwei bis drei Millionen Jahren.

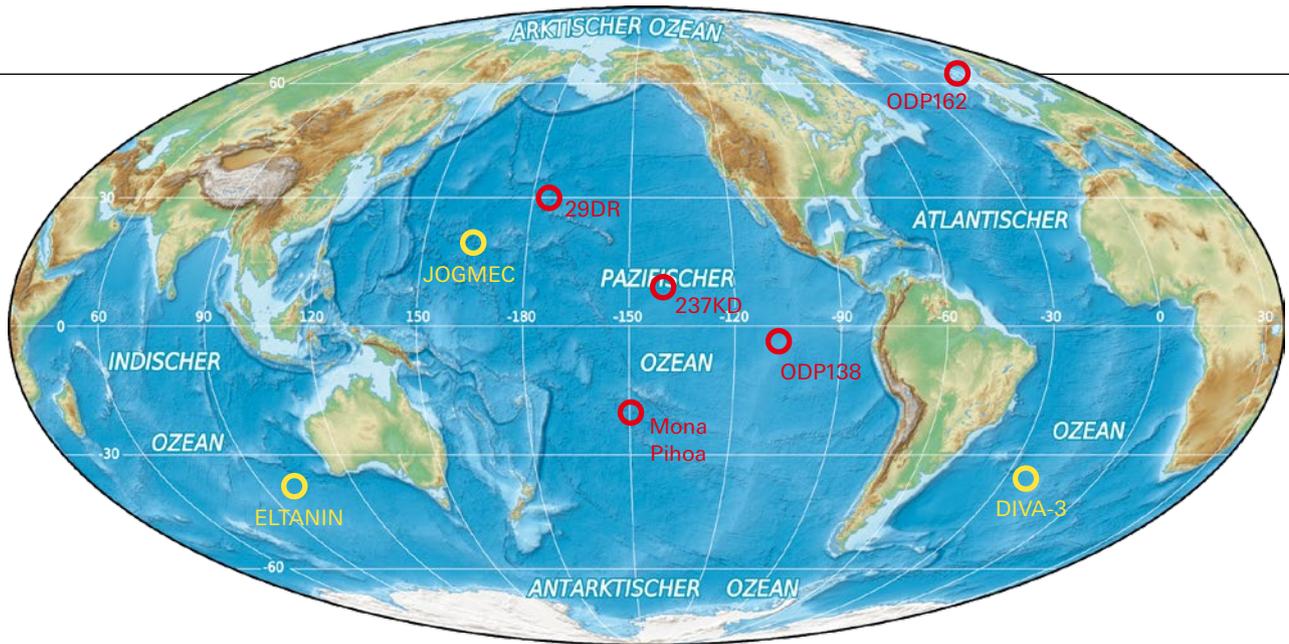
Nun hatten wir drei unabhängige Tiefenprofile, die alle vor grob zwei bis drei Millionen Jahren einen erhöhten Gehalt an ^{60}Fe aufwiesen. Wir wollten aber noch mehr über den Eintrag des Isotops von außerhalb des Sonnensystems wissen. So interessierte uns etwa der zeitliche Ablauf dieses Prozesses. Um ihn nachvollziehen zu können, brauchte man ein Reservoir mit deutlich schnellerer Wachstumsrate als die ozeanischen Krusten, denn damit erhält man eine feinere zeitliche Auflösung. Diese Voraussetzungen bieten Sedimente, die pro Million Jahre viele Meter wachsen.

Mit vereinten Kräften zu einem genaueren Nachweis

Für die Untersuchung von Sedimenten taten wir uns mit unseren französischen Kollegen von der Université Paris-Sud in Orsay zusammen. Sie waren eigentlich auf der Suche nach einem anderen Radioisotop, nämlich Jod (^{129}I mit einer Halbwertszeit von 16 Millionen Jahren), das ebenfalls bei einer Sternexplosion in den Raum geschleudert werden kann. Sie übersahen jedoch, dass die ^{129}I -Konzentration aus irdischen Quellen zu hoch ist gegenüber dem Iod von einer Sternexplosion und Letzteres damit nicht nachweisbar ist. Mit ihrem speziellen Ätzverfahren zur Extraktion von Jod aus dem Sediment konnten sie außerdem Eisen herauslösen. Aber um dieses auch in den vorliegenden geringen Mengen nachweisen zu können, war ihr Beschleuniger nicht leistungsfähig genug. So vereinten wir unsere Kräfte.

Unsere Sedimentprobe stammte diesmal aus dem Nordatlantik rund 400 Kilometer nordöstlich von Island und war mit einer Rate von 30 Metern pro Million Jahre etwa 10000-mal rascher gewachsen als die von uns zuvor untersuchten Krusten. Zwar rührt das meiste Eisen im

Keine andere Gruppe konnte das Isotop genau genug nachweisen. Wir standen selbst in der Pflicht, die Aussagen zu überprüfen



Sediment von Erosion der Erdoberfläche her, doch unseren französischen Partnern gelang es, nur jenes Eisen herauszuätzen, das direkt aus dem Meerwasser ins Sediment eingebaut wurde und deswegen an der Oberfläche der Sedimentpartikel sitzt.

Wir analysierten etwa 50 Proben in einem Altersbereich von 1,7 bis 3,2 Millionen Jahren. In der Zeitspanne zwischen 2,4 und 2,8 Millionen Jahren fanden wir eine erhöhte ^{60}Fe -Konzentration. Allerdings zögerten wir, dies als Beweis für eine Supernova zu interpretieren. Denn in diesem Fall hätten wir bei der im Sediment möglichen Zeitauflösung einen kurzen intensiven Eintrag des Eisenisotops über etwa 10000 bis 15000 Jahre erwartet, und nicht einen mäßigeren Anstieg über einige hunderttausend Jahre wie hier gemessen. Dies veröffentlichten wir 2008.

Bald darauf begeisterte sich der Professor für nukleare Astrophysik Shawn Bishop, der 2008 an unsere Fakultät berufen worden war, für unsere Studien. Im Austausch mit Geologen von der Ludwig-Maximilians-Universität erfuhr er von Bakterien, die in Sedimenten leben und aus dem verfügbaren Eisen in ihrer Umgebung Mikrokristallite von Magnetit (Fe_3O_4) in ihrem Körper bilden. Damit orientieren sie sich im Erdmagnetfeld. Sterben diese »magnetotaktischen« Bakterien, verbleibt der Magnetit im Sediment. Auch in diesen Überresten sollte ^{60}Fe eingelagert sein, wenn es einmal einen Eintrag von einer Supernova gegeben hat.

So analysierten wir diesbezüglich Proben von Bohrkernen des Ocean Drilling Program (ODP Leg 138, vom äquatorialen Pazifik) mit Altern zwischen 1,6 und 3,7 Millionen. In beiden Bohrkernen fanden wir für den Bereich zwischen etwa 1,5 bis 3 Millionen Jahren ebenfalls eine erhöhte ^{60}Fe -Konzentration. Diese Zeitdauer stimmte also gut mit unseren anderen Messungen überein und bestätigte unsere Analysen aus dem Nordatlantik.

Unabhängig davon bestätigte unser Kollege Anton Wallner mit seiner Gruppe an der Australian National Uni-

versity in Canberra unsere Ergebnisse aus den Eisenmangankrusten und Sedimenten. Erstaunlich ist, dass der ^{60}Fe -Eintrag auch hier nicht, wie von einer einzigen Supernova erwartet, kurzzeitig (innerhalb von weniger als 100000 Jahren) passierte, sondern über einen Zeitbereich von 1,5 Millionen Jahren. Also muss er wohl von mehr als einer Supernova stammen, und das Material muss während einer größeren Zeitspanne eingetragen worden sein. Des Weiteren hat diese Gruppe auch Proben einer Mangankruste vermessen, die ebenfalls einen Peak zeigen, dessen Schwerpunkt aber eher jünger als zwei Millionen Jahre alt ist.

Neben der Datierung eines ^{60}Fe -Eintrags interessierte uns vor allem, welche Gesamtmenge des Radionuklids überhaupt an der Erde ankam. Anhand der irdischen Proben war diese Größe schwer zu bestimmen, da sich der Transport von der oberen Atmosphäre bis in die Kruste hinein wegen der vielfältigen atmosphärischen und ozeanischen Prozesse nur sehr indirekt abschätzen lässt. Die Sedimente scheinen unterschiedlich viel vom ^{60}Fe aufgenommen zu haben. Außerdem ist es fraglich, ob die verschiedenen Ätzverfahren auch wirklich alles ^{60}Fe aus den Proben herausgelöst haben.

Wir hofften, in dieser Frage mit der Analyse von Mondmaterial weiterzukommen, welches die Apollo-Missionen zur Erde gebracht hatten. Denn auf dem Erdtrabanten gibt es weder Atmosphäre noch Ozeane, so dass alles Material, das auf seine Oberfläche gelangt, auch dort bleibt und in seinen Mengenverhältnissen weitgehend unverändert anzutreffen ist.

Zudem sahen wir uns wiederholt mit dem Einwand konfrontiert, das von uns beobachtete Eisenisotop stamme gar nicht von Supernova-Explosionen, sondern aus Mikrometeoriten oder interplanetarem Staub. Dem konnten wir zwar entgegen, dass bei unseren bisherigen Messungen nur ein einziger Meteorit ein ähnlich hohes $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ -Verhältnis hatte, wie die höchsten Werte in den Ferromangan-

krusten. Aber nun wollten wir auch dieses Gegenargument durch Messungen an Mondproben widerlegen.

Allerdings besitzt das Mondmaterial mit Hinblick auf unsere Analyse auch einige potenzielle Nachteile. So wird ^{60}Fe darin auch über Kernreaktionen der kosmischen Strahlung mit schweren Nickelisotopen erzeugt (kosmogenes ^{60}Fe), weil dort anders als auf der Erde die atmosphärische Schutzschicht fehlt. Um den Supernovabeitrag des ^{60}Fe vom kosmogenen zu unterscheiden, bestimmten wir in den Proben neben der Konzentration von ^{60}Fe ebenso die von ^{53}Mn (Radioisotop mit 3,7 Millionen Jahren Halbwertszeit), sowie den Nickel- und den Eisengehalt. Denn ^{60}Fe wird durch die kosmische Strahlung aus Nickel erzeugt und ^{53}Mn aus Eisen.

Zudem wird das lose Material auf der Mondoberfläche durch Mikrometeorite laufend umgewälzt. Die Auswirkungen dieser Vorgänge reichen in einem Zeitbereich von einigen Millionen Jahren jedoch nicht weiter als 20 Zentimeter in die Tiefe. Sporadische Einschläge von größeren Meteoriten vermischen das Material zusätzlich. In vielen Mondproben gibt es bereits Messungen von anderen, durch die kosmische Strahlung erzeugten Radionukliden. Wir hatten Proben mit einem gleichmäßigen Konzentrationsabfall in der Tiefe ausgesucht. Dies gab uns Zuversicht, dass in den Proben vermutlich wenig Vermischung geschehen war.

Zuletzt ist nicht auszuschließen, dass das Mondmaterial während der Probenentnahme zusätzlich vermischt wurde. Deshalb lässt sich aus dem Tiefenprofil der Mondproben

keine zeitliche Auflösung herauslesen. Den Gesamteintrag von ^{60}Fe hingegen kann man genauer ermitteln.

Zusammen mit Kollegen von der Rutgers University in New Jersey (USA) beantragten wir beim Curation and Analysis Planning Team for Extraterrestrial Materials (CAPTEM) und dem Astromaterials Laboratory des Johnson Space Centers der NASA für unsere Studien Materialproben von den Apollo-Missionen 12, 15 und 16. Sie sollten bis in 20 Zentimeter unter die Oberfläche reichen, um das Problem des »Gardening« zu umgehen.

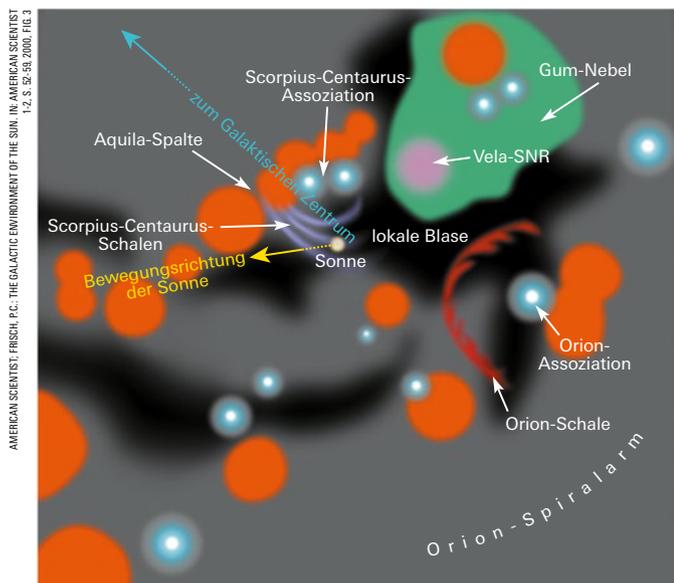
Anhand von insgesamt elf Proben des Mondmaterials ermittelten wir einen Gesamteintrag an ^{60}Fe , zurückgerechnet auf die Zeit vor 2,2 Millionen Jahren, von $0,8 \cdot 10^8$ bis $4 \cdot 10^8$ Atomen pro Quadratzentimeter. Das passte gut zu unseren irdischen Messungen. Wir konnten auch zeigen, dass in den oberflächennahen Mondproben das $^{60}\text{Fe}/^{53}\text{Mn}$ -Verhältnis deutlich höher war als in Meteoriten.

Auf der Suche nach den kosmischen Lieferanten der Eisenisotope

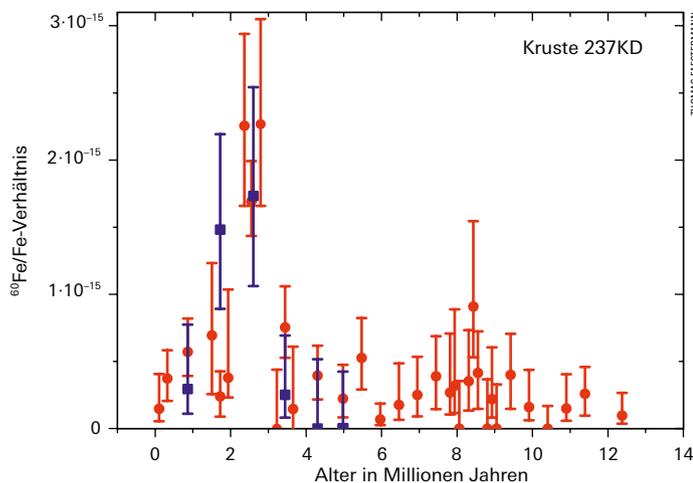
Wo in unserer kosmischen Nachbarschaft sich vor wenigen Millionen Jahren mehrere Supernovae ereignet haben, welche die lokale Blase und den von uns beobachteten Eintrag an ^{60}Fe verursachten, fanden Dieter Breitschwerdt und seine Kollegen heraus. Die Astrophysiker von der Technischen Universität Berlin und der Universität Heidelberg nahmen dazu eine Gruppe von Sternen in der Himmelsregion der Sternbilder Scorpius-Centaurus (Sco-Cen) ins Visier. Diese befindet sich heute in einer Entfernung von 400 Lichtjahren und bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 Kilometern pro Sekunde von uns weg.

Sie enthält viele recht junge, sehr heiße und massereiche so genannte OB-Sterne. Da Sterne in Gruppen entstehen, sind die Mitglieder einer Assoziation ungefähr gleich alt. Außerdem bilden sich stets mehr masseärmere als massereichere Sterne. Diese Massenverteilung folgt einem universalen Potenzgesetz. Da die Lebensdauer der Sterne in Abhängigkeit von ihrer Masse bekannt ist, lässt sich anhand fehlender Sterne am oberen Ende der Massenskala das Alter der Sterngruppierung abschätzen und zurückverfolgen, wann wie viele Sterne bereits als Supernova explodiert sein müssen.

In der neuesten Veröffentlichung vom April 2016 haben Breitschwerdt und seine Kollegen simuliert, wie ^{60}Fe aus Supernova-Explosionen in der Sco-Cen-Assoziation bis auf die Erde gelangt sein könnte. Anhand der möglichen Vorgängersterne schätzen sie die Menge an ausgestoßenem ^{60}Fe zu 20 bis 60 Millionstel einer Sonnenmasse (7 bis 20 Erdmassen) ab. In ihren Berechnungen zur Expansion der Supernova-Überreste berücksichtigten sie die aus Beobachtungen bekannte Dichtestruktur der lokalen Blase. Wie sich zeigte, konnte das ^{60}Fe nur als Staubeilchen, die kurz nach einer Supernova entstehen, gegen den Sonnenwind ankommen und bis zur Erdbahn vordringen. Noch etwas willkürlich gehen die Forscher davon aus, dass von dem bei den Supernovae ausgestoßenen ^{60}Fe 0,6 Prozent in den Ferromangankrusten enden. Nach ihrem Modell ereigneten sich in den letzten 13 Millionen Jahren 16 Supernovae, die die lokale Blase formten. Die jüngsten fanden vor



Die so genannte lokale Blase (»local bubble«) wurde von mehreren Supernovae geformt. Das bei den Sternexplosionen in den Raum geschleuderte Material verdichtete unterwegs die interstellare Materie entlang der Stoßfront. Die Dichte im Randbereich der lokalen Blase liegt bei etwa 10 Atomen pro Kubikzentimeter, in den inneren Regionen hingegen bei 0,05 bis 0,07 Atomen pro Kubikzentimeter. Computersimulationen ihrer Entstehung stimmen gut mit den Funden von Eisen-60 auf Erde und Mond überein.



In dem untersuchten Meeressediment und in Ferromangan-krusten ist das Vorkommen des radioaktiven Eisen-60-Isotops zwischen zwei und drei Millionen Jahren über einen längeren Bereich deutlich erhöht, ein weiteres Mal auch vor acht Millionen Jahren. Die Ursache sind wohl mehrere Supernovae in unserer näheren kosmischen Umgebung.

1,5 sowie 2,3 und 2,6 Milliarden Jahren in Entfernungen von 313, 297 und 346 Lichtjahren statt und schleuderten jeweils acht Erdmassen an ^{60}Fe ins All. Das passt genau zu unseren Messungen in der Mangankruste 237KD.

Ein neuer Forschungssatellit lieferte den Nachweis des Zerfalls in der Milchstraße

Den Beweis, dass Supernovae tatsächlich ^{60}Fe produzieren, veröffentlichten im Jahr 2007 Physiker des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching zusammen mit Kollegen aus Frankreich und den USA. Schon mit früheren satellitengestützten Detektoren für Gammastrahlung konnten sie den Zerfall des Radioisotops ^{26}Al (Halbwertszeit 0,7 Millionen Jahre) in der Milchstraße belegen. Aber ein zweifelsfreier Nachweis des Zerfalls von ^{60}Fe , das zum kurzlebigen ^{60}Co und dann unter Emission zweier hochenergetischer Gammaquanten zum stabilen ^{60}Ni zerfällt, war bis dahin nicht gelungen. Im Oktober 2002 schoss die ESA jedoch den Forschungssatelliten INTEGRAL in eine Erdumlaufbahn. Mit den Daten von 2,5 Jahren Beobachtungszeit durch das Spektrometer SPI ließ sich dann eindeutig die Gamma-Emission vom Zerfall des ^{60}Fe in der Milchstraße nachweisen. Es ergab sich auch, dass in der Milchstraße die Masse an ^{26}Al etwa dreimal so groß ist wie die von ^{60}Fe . Dieses Verhältnis deckt sich ganz gut mit den aktuellen theoretischen Vorhersagen von Astrophysikern, wenngleich sich diese in der Vergangenheit stark unterschieden.

Dass ^{60}Fe in der Nähe des Sonnensystems entstand und Bestandteil der kosmischen Strahlung ist, konnten US-amerikanische Physiker in diesem Jahr zeigen. Sie analysieren die Daten des Cosmic Ray Isotope Spectrometer (CRIS), das an Bord des NASA-Satelliten ACE (Advanced Composition Explorer) seit 1997 die Erde umrundet. CRIS kann hochenergetische schwere Ionen mit Geschwindig-

keiten zwischen 56 und 76 Prozent der Lichtgeschwindigkeit in der kosmischen Strahlung nachweisen und bis zum Element Nickel eindeutig nach Element und Isotop identifizieren. In den Daten von zwölf Jahren fanden sie 15 Atomkerne ^{60}Fe unter insgesamt 355000 detektierten Eisenkernen. Da die Produktion der schweren Kerne und ihre derartige Beschleunigung zwei zeitlich getrennte Supernova-Explosionen erfordert, folgern die Autoren, dass das ^{60}Fe aus einer OB-Sterngruppe stammen muss und betrachten ebenfalls die Sco-Cen-Assoziation als sehr wahrscheinlichen Ursprung. Aus dem gemessenen $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ -Verhältnis, Vorhersagen für die Produktion schwerer Kerne in Supernovae und Modellen für die Diffusion der kosmischen Strahlung schließen sie auf ein Alter der Sternformation zwischen 11 und 17 Millionen Jahren, was gut zur Sco-Cen-Assoziation passt.

Es gibt also eine Vielzahl von Hinweisen, dass während einer Zeitspanne von vor 3 bis 1,5 Millionen Jahren einige Sterne in einem Abstand von etwa 300 Lichtjahren von der Sonne explodiert sind. Wahrscheinlich geschah dies in der Sco-Cen-Gruppe von jungen Sternen, die sich seither vom Sonnensystem wegbewegt hat. Der Abstand der Supernovae ist wohl zu groß, als dass die emittierte elektromagnetische Strahlung (UV- bis zu Gammastrahlen) auf der Erde katastrophale Folgen wie ein Artensterben hatte. Trotzdem darf man spekulieren: Supernovae erzeugen und beschleunigen hochenergetische kosmische Strahlung. Diese ist auch heute noch in Sonnennähe intensiver als sonst in der Milchstraße, vermutlich auf Grund der Supernova-Aktivität.

Die kosmische Strahlung ionisiert Atome in der Erdatmosphäre. Diese Ionen bilden Kondensationskeime für Wassertropfchen, die ihrerseits zu einer verstärkten Wolkenbildung führen können. Eine größere Wolkendecke reflektiert die Sonneneinstrahlung stärker. Es mag reiner Zufall sein, dass Geologen vor etwa 2,6 Millionen Jahren eine neue Epoche beginnen lassen, das Pleistozän, in dem die nördliche Erdhalbkugel durch eine etwa fünf Grad Celsius tiefere Durchschnittstemperatur vergletschert war. Sicher gibt es auch geologische Gründe dafür, wie das Schließen des Isthmus von Panama. Vermutlich war das kältere, trockenere Klima in Afrika ursächlich für die Entwicklung der Gattung *Homo*. Der *Homo habilis* trat wohl erstmals vor 2,5 bis 2,8 Millionen Jahren auf. Ein direkter Zusammenhang wird kaum nachzuweisen sein. Aber die Vorstellung, dass die Entwicklung unserer Art durch Sternexplosionen angestoßen worden sein könnte, hat einen besonderen Reiz. ◀

LITERATURTIPPS

Diehl, R.: Radioaktiver Fingerabdruck. In: Physik Journal 6, S. 18, 2016

Mehr über die aktuellen Nachweise von Isotopen aus nahen Supernovae durch verschiedene Forschergruppen

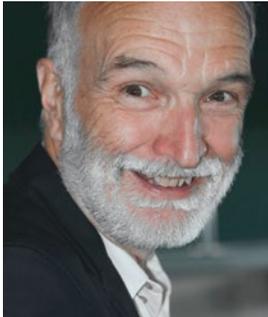
Feige, J.: Astronomie unter dem Meer. In: Physik in unserer Zeit 5, S. 220–227, 2016

Interessantes über die Erforschung der Meeressedimente

WEBLINK

Jenny Feige von der TU Berlin erklärt die Forschungsergebnisse: www.youtube.com/watch?v=vLK4DzYWMVw

SCHLICHTING! ANHÄNGLICHER SCHNEE



Eiskristalle haften gut aneinander – dafür sorgt flüssiges Wasser. Einerseits wirkt es bei Tauwetter durch Kapillarkräfte im Flockengeäst. Andererseits benetzt selbst bei starken Minusgraden eine feuchte Schicht die Oberflächen und klebt diese direkt zusammen.

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.

► spektrum.de/artikel/1432736

► Bei optimalen Bedingungen für den Bau eines Schneemanns löst die gerollte Kugel das Weiß gleich streifenweise von der Wiese. Zurück bleiben fast komplett frei geräumte grüne Schneisen. Dafür sollte es nicht zu kalt sein: Besonders gut haftet das Material, wenn die Temperatur etwas über dem Gefrierpunkt liegt.

Diese Aggregation spielt sich ähnlich ab wie bei feinem, feuchtem Sand, mit dem man ziemlich stabile Kunstwerke konstruieren kann («Das Geheimnis der Sandburgen», *Spektrum* September 2014, S. 44). Sandkörner binden Wasser stark an sich. Wenn es zwischen mehrere von ihnen dringt, haften sie durch Kapillarkräfte fest aneinander. Vergleichbares geschieht bei den Eiskristallen. Sie sind im Schnee relativ locker miteinander verbunden. Wasser kann die Luft aus den kleinen Hohlräumen verdrängen und so den Zusammenhalt verstärken.

Die gleiche Wirkung wird erzielt, wenn man feuchten Schnee zusammendrückt. Mit der Volumenverringerung verschwindet ein Teil der Luft zwischen den Kristallen, und das vorhandene flüssige Wasser bekommt Kontakt zu sehr viel mehr Eisfläche. Das erhöht die Zahl der Bindungen zwischen den Wassermolekülen und damit die Festigkeit. Wer Erfahrungen mit Schneeballschlachten hat, dürfte schon einmal am eigenen Leib erfahren haben, wie hart so ein Wurfgeschoss sein kann.

Bei sehr tiefen Temperaturen gelingt das aber kaum noch. Man spricht von Pulverschnee, weil sich die einzelnen kleinen Schneeflocken nur schwer zu einem größeren Gefüge vernetzen lassen. Es fehlt einfach an Klebstoff, also einem genügend dicken Wasserfilm.

Im Unterschied zum feuchten Sand, der nur wegen der Kapillarkräfte so gut aneinanderhaftet, kommt beim Schnee ein weiterer Faktor hinzu. Die Kristalle vernetzen sich bereits beim Herabfallen zu einer luftigen Struktur, indem sie an ihren Berührungspunkten zu größeren Flocken zusammenfrieren. Auch diese Verbindungen ver-

danken sich letztlich einer äußerst dünnen Wasserschicht. Eis ist nämlich unter normalen Umständen stets benetzt. Anders als bei Sand grenzt die Luft nicht direkt daran, sondern dazwischen liegt selbst bei extremer Kälte ein flüssiger Überzug von wenigen dutzend Nanometern Dicke. Anschaulich gesprochen sind die Moleküle am Rand nicht so stark ins Kristallgitter eingebunden. Darum ist weniger Energie nötig, um sie herauszulösen und in eine schwächer geordnete Phase zu überführen. Treffen hingegen zwei Eiskristalle aufeinander, wird diese Schicht fest, und sie frieren sofort zusammen. Dabei wird Energie frei und als Wärme an die umgebende Kristallstruktur übertragen.



ISTOCK / FRANK DE MEYER

Schneemänner gelingen am besten bei leichten Plusgraden. Dann klebt Wasser die Flocken so fest aneinander, dass man beim Aufrollen eine fast schneefreie Spur hinterlässt.



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

Schnee haftet sogar an Baumstämmen (links) oder auf Dachschrägen (oben). Erwärmt sich der Untergrund, hält die Schicht weiterhin zusammen und rutscht in großen Stücken herab.

Das erhöht die Temperatur, und die Bedingungen für ein weiteres Zusammenkleben werden günstiger.

Die wässrige Grenzschicht wird weit unterhalb des Gefrierpunkts zwar dünner, verschwindet aber erst ab etwa minus 33 Grad Celsius ganz. Dieses besondere Benetzungsverhalten ist eine der wesentlichen Ursachen für die Eisglätte, die wir vom Schlittschuhlaufen oder aus dem Straßenverkehr kennen (»Glatt daneben«, **Spektrum** Februar 2014, S. 60).

Wasser zwischen Eiskristallen sorgt aber nicht nur für Zusammenhalt untereinander. Ebenso ist uns die starke Verbindung zu anderen Materialien vertraut, etwa vom mühsamen Freikratzen zugefrorener Autoscheiben. Sie erscheint im Vergleich zum Verhalten anderer Stoffe außergewöhnlich, denn es gibt wohl keine Substanz, an der Eis oder Schnee nicht haften bleibt. Selbst normalerweise hydrophobe, also Wasser abstoßende Oberflächen wie die Blätter vieler Pflanzen bleiben nicht verschont. Der Zusammenhalt kommt hier nicht bloß von einem Kapillareffekt wie bei Sand, sondern vor allem friert die unterkühlte Wasserschicht auf einer Oberfläche bei Minusgraden schlicht sofort fest.

Wer schon einmal bei Temperaturen deutlich unter dem Nullpunkt einen metallischen Gegenstand berührt hat, kennt die schmerzhaft Erfahrung, kurz daran hängen zu bleiben. Weil auch unsere Haut – freilich aus völlig anderen Gründen als beim Eis – in aller Regel feucht ist, entsteht eine frostige Verbindung zum Metall. Als guter Leiter nimmt dieses im unangenehmsten Fall Wärme aus unserem Körper schneller in sein kaltes Inneres auf, als die tieferen Gewebeschichten nachliefern und die Haut vorm Festschmelzen bewahren können.

Die Anhänglichkeit von Eis kennen wir von zahlreichen weiteren Alltagsphänomenen. So bildet sich bei

Schnee, der sich leicht ballen läßt, schmilzt bald

Jean Paul (1763–1825)

Schneefall beispielsweise auf schrägen Hausdächern eine Decke, deren Dicke beträchtlich werden kann und die bei statischen Berechnungen stets berücksichtigt werden muss. Nach einem Schneesturm kann man häufig beobachten, wie das Weiß selbst an steilen Flächen hängen bleibt und Baumstämme einen male- rischen Überzug erhalten (siehe Fotos oben). Unter der Last an den Ästen können Bäume sogar umknicken. Ein ähnliches Schicksal trifft gelegentlich Überlandleitungen und ihre Masten, was der Infrastruktur und damit der Bevölkerung betroffener Regionen beträchtlich schaden kann. Zahlreiche Forschungsprojekte sollen nun zu einem tieferen Verständnis der Frostvorgänge führen. Von den Ergebnissen verspricht man sich, gefährdete Systeme und Bauwerke besser schützen zu können.

Wenn Objekte die Schneelasten überstehen, droht bei Tauwetter neues Ungemach. Da nämlich Schnee am besten an sich selbst haftet, wird die Schicht auf Schrägen nicht einfach kontinuierlich dünner, sondern sie trennt sich lange vorher vom Untergrund und rutscht in großflächigen Stücken hinab. Diese Lawinen sind gefährlich, besonders wenn sie durch mehrmaliges Antauen und Gefrieren bereits stark vereist sind.

In der Nähe des Gefrierpunkts wechselt Wasser offenbar je nach Situation bereitwillig zwischen seinen Aggregatzuständen. Darum können kleinste Änderungen der äußeren Bedingungen unvermittelt vom einen Extrem des starken Haftens ins andere des fast widerstandslosen Gleitens führen. Die beiden Gesichter der kalten Jahreszeit lassen sich wohl nicht trennen: Dieselben Effekte, denen wir einerseits die vielfältigen Möglichkeiten für Sport und Spiel im Freien verdanken, machen andererseits das Verhalten von Eis und Schneemassen so schwer berechenbar und gefährlich.

ENERGIETECHNIK

KERNFUSION

EINMAL ANDERS

Risikofreudige Physiker – und ein paar Milliarden dahinter – erproben schnellere und billigere Wege, um eine potenziell unerschöpfliche, saubere Energiequelle nutzbar zu machen.



W. Wayt Gibbs ist Wissenschaftsjournalist in Seattle.

» spektrum.de/artikel/1432730

► Auf den ersten Blick sieht die Ansammlung von Bildschirmen und Schaltknöpfen aus wie die überdimensionale Version eines Computerspiels, in dem es irgendwelche Verbrecher abzuknallen gilt. Aber hier treffen die Bezeichnungen wie »plasma guns« und »shot control« zu. Ich sitze im Kontrollraum für den Fusionsreaktor der Firma Tri Alpha Energy in Foothill Ranch (Kalifornien). Diese experimentelle Anlage ist der Prototyp eines Kraftwerks, in dem dasselbe Höllenfeuer entfesselt werden soll wie im Inneren eines Sterns oder einer Wasserstoffbombe. Als wir den nächsten Schuss vorbereiten und ich auf dem Bildschirm beobachten kann, wie die Arbeiter

aus Sicherheitsgründen den Reaktorraum verlassen, wird mir doch etwas mulmig zu Mute.

Um die blechglänzende, zylindrische Vakuumkammer im Zentrum des Reaktors (Bild rechts), die ungefähr so groß ist wie zwei Busse hintereinander, winden sich zwei Dutzend ringförmige Elektromagnete, jeder von ihnen größer als ich und dicker als mein Oberschenkel. Gleich werde ich die Temperatur im Inneren der Kammer auf zehn Millionen Grad ansteigen lassen – allerdings nur für einen winzigen Augenblick.

In einem Nachbargebäude des unscheinbaren Lagerhauses haben sich heute morgen vier Schwungräder, jedes sieben Tonnen schwer, mit Strom aus dem öffentlichen Netz auf Touren gebracht. Auf meinen Knopfdruck hin verwandeln sie ihre ganze angesammelte Bewegungsenergie in einen 20-Megawatt-Stromstoß. Die elektrische Ladung fließt in die Magnetspulen und füllt eine Reihe fetter Kondensatoren. Binnen zwei Minuten springen alle Anzeigen auf meinem Kontrollschirm von »aufladen« auf »fertig«. Der Operator sagt »Achtung, Schuss« über Lautsprecher; Warnlampen blinken auf. Ich drücke den Auslöser.

In einer Mikrosekunde geben die Kondensatoren ihre angestaute Energie frei. Zwei große Düsen an den Enden des Zylinders schießen Wasserstoffionen mit einer Geschwindigkeit von fast einer Million Stundenkilometern in Richtung Zylindermittte; dort stoßen sie aufeinander und verwirbeln sich zu einem heißen, rotierenden Plasma in Form einer hohlen Zigarre. Ungeheure Energien werden auf kleinstem Raum konzentriert – aber es gibt keinen Lichtblitz und keinen Knall, nur ein gedämpftes »Pling«, als hätte nebenan jemand einen Schraubenschlüssel auf den Betonboden fallen gelassen.

AUF EINEN BLICK KLEINFUSION

- 1 Milliarden schwere Großprojekte wie ITER und NIF sind nach wie vor weit davon entfernt, mehr Energie aus Fusionsreaktionen zu gewinnen, als sie zu deren Auslösung aufwenden.
- 2 Einige private Firmen erproben jetzt andere Zugänge in kleineren und einfacheren Anlagen. Erste Ergebnisse stimmen hoffnungsvoll.
- 3 Gleichwohl sind noch gewaltige Hindernisse zu überwinden, bis man die Turbulenz im heißen Plasma sowie den Übergang vom Experimental- zum Produktionsbetrieb beherrscht.

Einen Augenblick später hat sich die Plasmawolke verflüchtigt. Die Warnlampen verlöschen, die Arbeiter machen da weiter, wo sie soeben aufgehört haben, und die Computer arbeiten sich durch die Gigabytes an Daten, die Dutzende von Sensoren im Inneren des Reaktors von dem Ereignis geliefert haben. Bei den hundert Schuss pro Tag, die Tri Alpha abfeuert, ist einer mehr kein Grund für besondere Aufregung.

Als ich im Februar 2016 die Anlage besuchte, hatte die Versuchsmaschine C-2U zwei Jahre Betrieb und 50 000 kleine Plings hinter sich – und damit ihre Schuldigkeit getan. Die Ingenieure von Tri Alpha hatten alle Daten beisammen, um weiterzumachen. Michl Binderbauer, der drahtige, leicht hyperaktive Technikchef der Firma, ließ die Anlage im April 2016 abschalten und ausschlachten. Teile von ihr sollen in dem Nachfolgemodell namens C-2W Verwendung finden, dessen Fertigstellung für Mitte 2017 vorgesehen ist.

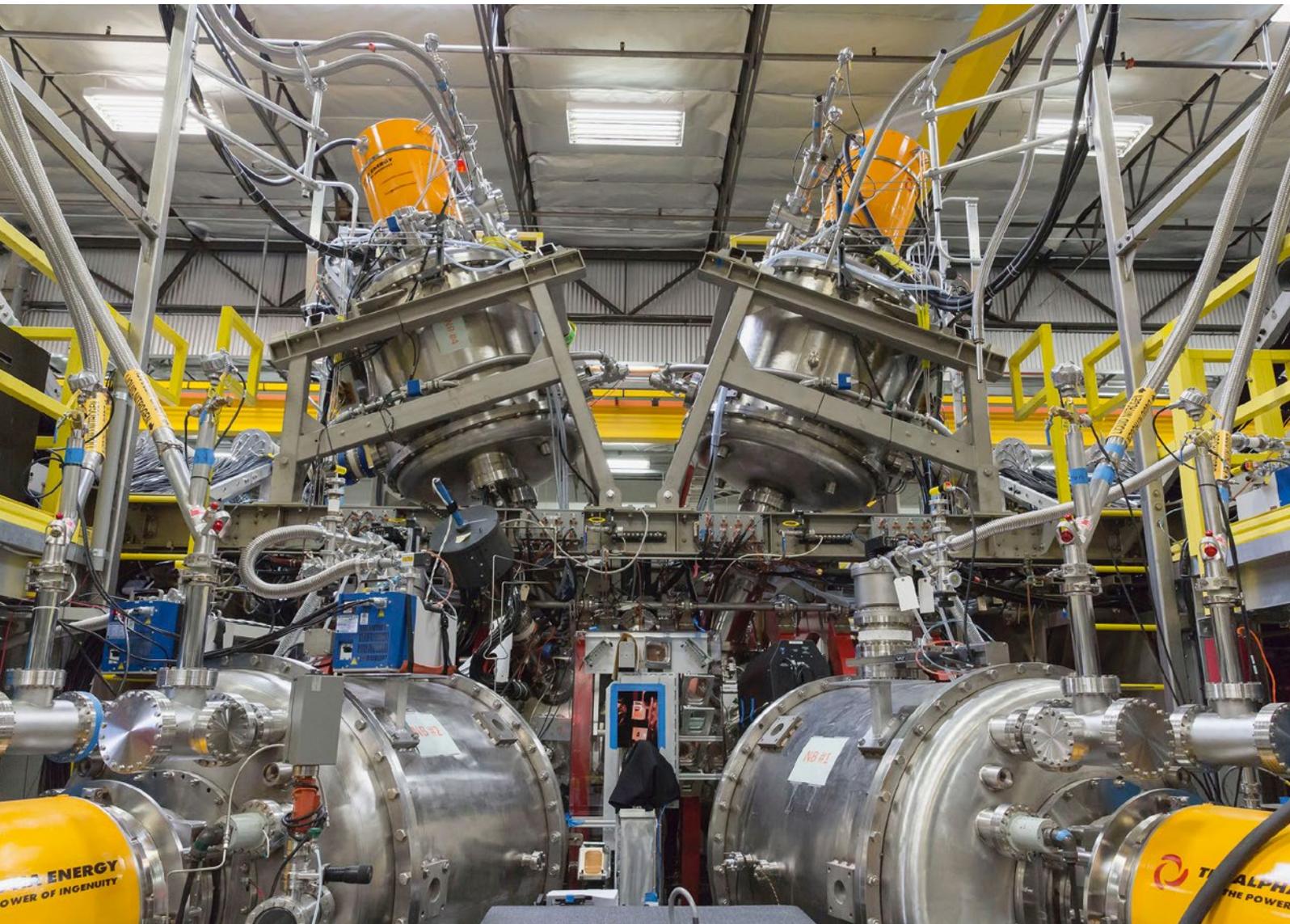
Mit diesem »Klein-und-schnell«-Konzept – einen Prototyp bauen, das Nötigste daran austesten und ihn alsbald durch einen besseren ersetzen – steht Tri Alpha in krassem Gegensatz zu den Bräuchen der Zunft. Seit Jahrzehnten

versuchen akademisch geprägte Wissenschaftler mit gigantischen Maschinen, dem hochoverhitzten, gewaltigen Kräften ausgesetzten Plasma seine Geheimnisse zu entreißen. In dessen Innerem soll eine Kernfusion stattfinden – aber das passiert eben häufig nicht. Binderbauer, Sohn eines vielseitigen Wiener Unternehmers, gehört zu einer neuen Sorte Fusionsforscher: getrieben von den Ertrags-erwartungen risikobereiter Investoren, der pragmatischen Geisteshaltung eines Ingenieurs und dem unablässig verfolgten Ziel, nicht einen Tempel der Hochenergiephysik zu errichten, sondern ein konkret realisierbares Kraftwerk. Auch etliche andere Start-ups, zum Beispiel General Fusion aus der Nähe von Vancouver (Kanada), setzen darauf, dass sie mit einem Fusionsreaktor Geld verdienen können, ohne zuvor die komplexe Physik in allen Einzelheiten bewältigt zu haben.

Eigentlich sind Fusionskraftwerke ideale Energiegewinnungsanlagen: Ihr Brennstoff steht – im Ozean oder in Allerweltsgesteinen – in praktisch unerschöpflicher Menge zur Verfügung und enthält keinen Kohlenstoff, also tragen die Anlagen auch nicht nennenswert zum Treibhauseffekt bei. Sie produzieren nur geringe Mengen strahlender

Bei Tri Alpha schießen Injektoren (gelbe und metallisch blanke Zylinder) Atomstrahlen auf rotierendes Plasma, um dessen Bewegung aufrechtzuerhalten und zu stabilisieren.

MIT FRDL. GEN. DER TRI ALPHA ENERGY INC.





CHRIS MUELLER

In diesem Prototyp der Firma General Fusion erzeugen riesengroße Kolben durch Aufschlagen auf Ambosse eine Stoßwelle. Diese komprimiert das Plasma im Zentrum des Reaktors so stark, dass Kernfusionen stattfinden.

Abfälle, deren Radioaktivität zudem nach relativ kurzer Zeit abklingt, und kein waffenfähiges Uran. Ein einziges Kraftwerk würde unabhängig von Wind und Sonnenschein den Energiebedarf einer ganzen Stadt decken. Es bleibt nur noch ein Hindernis: Man müsste einige der schwierigsten physikalischen und technischen Probleme lösen, die Menschen je angegangen sind.

LIFE ist beendet, und ITER wird niemals Strom ins Netz liefern

Zurzeit genießen die Pragmatiker größere Aufmerksamkeit, weil die staatlich geförderten Kollegen in einer Sackgasse gelandet sind. Mit ihren Riesenreaktoren haben sie zwar einige Grundlagenfragen geklärt, aber keine Vorstellung, wie sie bis Mitte des Jahrhunderts Strom ins öffentliche Netz einspeisen könnten.

Paradebeispiel ist die National Ignition Facility (NIF) am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in Livermore (Kalifornien). Die vier Milliarden Dollar teure Anlage feuert Laserpulse mit einer Billion Watt auf winzige Brennstoffbehälter. »Die NIF schießt ein paar hundert Mal pro Jahr«, sagt Binderbauer in seinem österreichisch gefärbten Singsang; für einen Kraftwerksbetrieb müssten es jedoch einige 10 000 Schuss pro Tag sein.

Für ihren Hauptzweck, die Waffenforschung, hat die NIF brauchbare Ergebnisse geliefert. Aber das Nachfolgeprojekt LIFE (Laser Inertial Fusion Energy) müsste den Energieausstoß um den Faktor 30 000 steigern, nur um die Laser aus eigener Kraft betreiben zu können – und noch wesentlich darüber hinaus, damit sich ein Kraftwerk

rechnet. Im April 2014 hat das LLNL dem Projekt LIFE ein Ende gesetzt und damit seine Pläne für den Prototypen eines Kraftwerks beerdigt.

Das zweite traurige Beispiel ist der ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), eine zehn Stockwerke hohe Maschine, die ein internationales Konsortium zurzeit in Cadarache in Südfrankreich baut. Riesengroße supraleitende Magnete sollen ein Plasma zusammenhalten, das zumindest für etliche Minuten eine Temperatur von 150 Millionen Grad Celsius erreicht. Selbst wenn ITER erfolgreich ist, wird er niemals Strom ins Netz abgeben.

Bei der Vertragsunterzeichnung im November 2006 rechneten die Politiker mit Baukosten von 5,5 Milliarden Euro, Betriebskosten in ungefähr gleicher Höhe und einer Fertigstellung 2016. Im Mai 2016 war die Kostenschätzung allerdings auf 20 Milliarden angeschwollen, und mit dem Regelbetrieb rechnet man inzwischen für 2035 – frühestens. In den USA, die mit ungefähr fünf Milliarden Dollar an den Kosten beteiligt sind, stimmte ein frustrierter Senat mit 90 zu 8 Stimmen für einen Ausstieg aus dem Projekt. Nachdem das Energieministerium jedoch in einem ausführlichen Bericht den Verbleib nachdrücklich empfohlen hatte, gab der Kongress grünes Licht für zweieinhalb Jahre, gerechnet ab Mai 2016.

Allem Anschein nach hat sich Donald Trump noch nicht zum ITER geäußert; da es sich aber um ein internationales Projekt handelt und Trump sich die Anliegen der Arbeiter im Kohlebergbau zu eigen gemacht hat, ist nicht mit großen Sympathien von seiner Seite zu rechnen.

Der quälend langsame Fortschritt der Dinosaurierprojekte NIF und ITER hat Binderbauer und den anderen »neuen Wilden« klagemacht, dass sie ihr Heil in kleineren Maschinen und neuen Zugängen suchen müssen. Es geht darum, eine sehr geringe Menge Brennstoff heiß genug zu machen, dicht genug zusammenzupressen und lang genug in diesem Zustand zu halten, damit einige der

Atome miteinander verschmelzen und dabei einen Teil ihrer Masse in Energie verwandeln. Dabei kann zum Beispiel eine höhere Temperatur eine niedrigere Dichte wettmachen; es kommt darauf an, dass das Produkt von Temperatur, Dichte und Einschlusszeit einen hinreichend großen Wert erreicht (siehe unten).

Das eröffnet eine breite Palette von Möglichkeiten. An deren Extrempunkten – geringe Dichte, hohe Temperatur oder umgekehrt – finden sich die Großprojekte NIF und ITER; die Neulinge dagegen ziehen es vor, in der bislang wenig erforschten Mitte (vergleichsweise mäßige Dichten und Temperaturen) nach Beute zu suchen.

Außerdem sind diese Unternehmungen so konzipiert, dass sich der Erfolg oder das Scheitern relativ bald zeigt. Ihre Reaktoren sind »im Prinzip für ein Hundertstel des Preises von ITER zu haben, einfacher und in kürzerer Zeit zu bauen und treiben die Forschung schneller voran«, sagt Scott Hsu, ein Fusionsphysiker am Los Alamos National Laboratory, der mit einem weiteren Start-up namens HyperV Technologies zusammenarbeitet. Dort schießt man aus Hunderten von Rohren Plasmen aus Wasserstoff und Argon in den Mittelpunkt eines kugelförmigen Reaktors, wo sie sich zu einer verdichteten Brennstoffwolke vereinigen. Irgendwelche fatalen Fehler in einer dieser Ideen werden höchstwahrscheinlich zu Tage treten, bevor Jahrzehnte vergangen und Milliarden verbraten sind.

So etwas gefällt den Investoren. General Fusion hat seine 100 Millionen Dollar unter anderem bei Jeff Bezos, dem Gründer des Onlinehändlers Amazon, der kanadischen Regierung und dem Staatsfonds von Malaysia eingesammelt. Tri Alpha rühmt sich, mehrere hundert Millionen von prominenten Geldgebern wie der Großbank Goldman Sachs und Paul Allen, einem der Gründer von Microsoft, erhalten zu haben. Und ein etabliertes Institut wie die Sandia National Laboratories bezieht einen Teil seiner Finanzierung von der Advanced Research Projects Agency – Energy (ARPA-E) des Energieministeriums, die sich in dieser Beziehung wie ein Risikokapitalgeber verhält.

Es handelt sich um Wetten mit hohem Hauptgewinn – und hohem Risiko. »Die Geschichte der Fusionsforschung ist voll von Fällen, in denen die Natur gesagt hat: »Nette Idee, aber so läuft's nicht«, lästert Stephen A. Slutz, Cheftheoretiker des Sandia-Projekts.

Kernfusion ist wie Speed Dating – nur millionenfach heißer und schneller

Dass es so schwer ist, ein heißes, wildes Plasma im Zaum zu halten, liegt in der Natur der Kernfusion. Zwei Atomkerne, ihrer Elektronenhülle beraubt, würden von der starken Kernkraft durchaus zueinander hingezogen – aber nur aus unmittelbarer Nähe. Aus etwas größerer Entfernung finden sie sich wegen der elektrostatischen Kräfte überaus abstoßend. Es geht also darum, die widerstrebenden Atomkerne so intensiv zusammenzubringen, dass sich ihre anziehenden Kräfte auswirken können. Wenn das geschieht, vereinigen sich die beiden Partner zu dem Atomkern eines schwereren Elements, der etwas weniger Masse hat als die Summe seiner Teile. Dieser »Massendefekt« wird als Energie frei, die in Form von Photonen und

schnellen Elementarteilchen davonfliegt und sich am Ende als Wärme nutzen lässt. Konventionelle Kernreaktoren beziehen dagegen ihre Energie nicht aus der Vereinigung, sondern aus der Spaltung von Atomkernen, in der Regel Uran.

Damit sich bei dieser etwas gewaltsamen Form von Speed Dating viele Paare bilden, müssen die Partner mit hoher Geschwindigkeit zusammengebracht werden, so dass die elektromagnetische Kraft sie nicht vorzeitig auseinandertreibt, aber nicht zu schnell, so dass die starke Kernkraft ihre Wirkung entfalten kann. Das läuft typischerweise auf eine Plasmatemperatur jenseits von 100 Millionen Grad hinaus. Der Reaktor muss die superheißen, sprich schnell bewegten Vereinigungskandidaten auf sehr engem Raum innerhalb einer Vakuumkammer zusammendrücken und dort halten, bis eine ausreichende Zahl heftiger Begegnungen stattgefunden hat. Nach einer gängigen Faustregel muss das Produkt von Dichte und Einschlusszeit größer sein als ungefähr 10^{14} Sekunden pro Kubikzentimeter. Die Faktoren dieses Produkts dürfen dabei um etliche Größenordnungen variieren.

ITER begnügt sich mit einem ziemlich dünnen Plasma: ungefähr ein halbes Gramm der neutronenreichen Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, verteilt auf eine torusförmige Vakuumkammer (»Tokamak«) vom Volumen eines kleinen Hauses. Dafür soll der heiße Stoff für mehrere Sekunden beisammen bleiben.

Am anderen Ende der Skala schießt die NIF Laserpulse mit einer Gesamtleistung von bis zu 500 Billionen Watt auf einen kleinen Krümel aus tiefgefrorenem Deuterium und Tritium. Die Anlage zur Bereitstellung dieser gewaltigen Energiemengen füllt ein 30 Meter hohes Gebäude, das die Fläche von drei Fußballfeldern bedeckt. Um das Plasma zu »zünden«, das heißt in einen Zustand zu versetzen, in dem es ohne weitere Hilfe von außen mit der selbst erzeugten Energie die Fusionsreaktion aufrechterhält, benötigt die

Michel Laberge, Gründer und Chefwissenschaftler von General Fusion, zeigt ein Gerät, das bisher unerreichte physikalische Zustände messen soll. Mit Überraschungen – guten wie bösen – sei zu rechnen.



NIF eine unglaublich hohe Plasmadichte, denn nichts hält die Atome zusammen außer ihrer Massenträgheit. Damit haben sie nur den Bruchteil einer Nanosekunde, um zusammenzufinden.

Die Mitte zwischen diesen beiden Extremen, also mäßige Dichten und mäßige Einschusszeiten, bietet vielleicht die besten Aussichten, sagt Patrick McGrath, der Programmdirektor von ARPA-E. Aber bislang kann keine Maschine die Kollapse der Turbulenz und der Instabilität zähmen, die unweigerlich in solchen Plasmen ihr Unwesen treiben. Ein heißes Fusionsplasma zu bändigen ist wie eine Kerzenflamme zusammenzudrücken, ohne sie zu berühren. Es ist sogar noch viel schwerer, weil die Ionen im Plasma selbst komplexe und starke elektromagnetische Felder erzeugen. »Sogar wenn es uns gelingt, die Kerze anzuzünden, bläst sie sich selbst aus«, drückt es Dylan Brennan aus, ein Fusionsforscher am Princeton Plasma Physics Laboratory.

Jede Menge Fachleute sind sich sicher, dass das Verfahren von General Fusion nie funktionieren wird

In dieser Disziplin hat zurzeit Tri Alpha den größten Fortschritt zu verzeichnen. »Alles hier ist jünger als ein Jahr«, sagt Binderbauer stolz, während wir die Maschine C-2U der Länge nach abschreiten – immerhin 23 Meter, aber winzig im Vergleich zu NIF oder ITER. Schon drei Monate nach Inbetriebnahme produzierte sie bis zu 100 rotierende Wasserstoff-Plasmawölkchen pro Tag. Sie lebten immerhin fünf Millisekunden und brachten es auf die Hälfte der geplanten Dichte von 10^{14} Ionen pro Kubikzentimeter.

Bis zu der Zielvorstellung der Firma – ein Plasma, das in aller Ruhe Tage oder Wochen am selben Platz vor sich hinrotiert – ist es noch weit hin. Aber die Vision scheitert nicht an prinzipiellen Hindernissen, sondern an den Grenzen der Energiezufuhr von außen, sagt Binderbauer. Ein Produktionsreaktor, der sowohl das Stromnetz als auch sich selbst mit Energie beliefert, könne beliebig lang am Stück laufen. In dem Nachfolgemodell C-2W soll eine elektronische Steuerung den Neigungen des Wölkchens, zu schwingen oder davonzulaufen, entgegenwirken.

Scott Hsu bescheinigt der Firma Tri Alpha, mit der er in keiner Weise verbunden ist, sie habe das Stabilitätsproblem im Wesentlichen gelöst. Jetzt kommt es darauf an, längere Einschusszeiten zu erreichen, und das bei höheren Temperaturen, während die ganze Zeit Brennstoff nachgefüttert wird; denn erst im Dauerbetrieb erzeugt der Reaktor einen Energieüberschuss.

Im Gegensatz dazu arbeitet der Reaktor von General Fusion im Pulsbetrieb (Bild S. 62). Die kugelförmige, einen Meter breite Reaktionskammer trägt eine gigantische Igelfrisur aus zahlreichen Kolben, jeder reichlich 30 Zentimeter dick und so lang wie Michel Laberge, der großgewachsene, rotbärtige Gründer und Chefwissenschaftler der Firma (Bild S. 63). Mit dem unverkennbaren Akzent eines Frankokanadiers beschreibt er sein etwas punkig geratenes Baby: »Jeder Kolben wird mit Pressluft auf 200 Stundenkilometer beschleunigt, dann trifft er auf den Amboss, und wumm!«, ruft er und klatscht in die Hände. »Die müssen alle innerhalb von fünf Millisekunden zu-

schlagen, dann gibt es eine Stoßwelle.« Die trifft im Zentrum der Kugel auf etwas Plasma, das zwei große Injektoren »just in time« in Form eines Rauchrings dorthin geschossen haben, komprimiert es gewaltig und löst damit eine kurze, aber energiereiche Kaskade von Fusionsreaktionen aus. Das Ganze soll sich ungefähr einmal pro Sekunde abspielen, wie ein Herzschlag. Auf diese Weise lasse sich die Turbulenz leichter beherrschen, so Laberge, weil der kleine Plasmatorus nur eine Millisekunde lang seine Form wahren muss.

Die richtige Plasmadichte erreicht das Injektorsystem schon, sagt Laberge, ebenso die Temperatur und die magnetische Feldstärke. Bloß mit der Einschusszeit hapert es noch. Nur 20 statt 1000 Mikrosekunden hält das Plasma durch, bevor es der Instabilität zum Opfer fällt. Mit einer neuen, trompetenähnlich geformten Düse will Laberge dem vom Plasma selbst erzeugten Magnetfeld den richtigen Dreh geben, so dass dieses die Atome lange genug zusammenhält.

»Und trotzdem gibt es jede Menge Fachleute, die sich sicher sind, dass das Verfahren von General Fusion nie funktionieren wird«, sagt Brennan, der die Firma berät. Es ist auch wenig plausibel, dass ein kleines Häuflein Entschlossener aus einem Start-up etwas hinkriegen sollte, an dem akademische Forscher in jahrelanger Arbeit gescheitert sind. »Aber gibt es ein wissenschaftliches Argument, das uns erklärt, dass das unmöglich ist? Nein!«

In einer Anlage namens MagLIF (Magnetized Liner Inertial Fusion) ist den Sandia Laboratories in Albuquerque (New Mexico) etwas gelungen, was die Start-ups noch vor sich haben: Fusionsreaktionen in nennenswerter Menge auszulösen. Wie NIF strebt MagLIF hohe Teilchendichten an – um die 10^{24} Ionen pro Kubikzentimeter – und begnügt sich mit Einschusszeiten im Nanosekundenbereich. Aber es ist mit 34 Metern Breite viel kleiner und entsprechend billiger als NIF. Die Fusion findet in einem offenen Metallzylinder statt, der nicht größer ist als der Radiergummi am hinteren Ende eines Bleistifts. Das Kunststück, trotz der bescheidenen Größe eine Fusion auszulösen, gelingt durch einen gezielten Doppelschlag.

Erstens schießt die so genannte Z Machine (Bild rechts) einen elektrischen Stromstoß von 19 Millionen Ampere durch den Apparat. Das dadurch erzeugte Magnetfeld drückt den Zylinder zusammen wie ein Bodybuilder eine Getränkedose und bringt die Fusionspartner dadurch näher zusammen. In diesem Moment ionisiert zweitens ein kurzer Laserstrahl von einer Billion Watt den komprimierten Brennstoff. Ein weiteres Magnetfeld hindert das dadurch entstehende Plasma, durch die Enden des Zylinders zu entweichen. Allerdings krumpelt sich die kleine Metallröhre noch nicht so geregelt zusammen, dass das Plasma nicht durch irgendwelche Risse in der Seitenwand verschwinden könnte.

Seit den ersten Tests gegen Ende 2013 hat sich die Ausbeute pro Schuss verhundertfacht. Projektleiter Daniel Sinars rechnet für nahe Zukunft mit weiteren Verbesserungen.

Wenn alles gut geht, wollen die Sandia-Leute den Stromstoß auf 25 Millionen Ampere hochdrehen. Die dann

stattfindenden 10^{16} Fusionsreaktionen würden mehr Energie liefern, als zuvor in den Brennstoff hineingesteckt wurde. Damit wäre der Erfolg der NIF von 2014 zu einem Bruchteil der Kosten erreicht.

Der Nachfolger der Z Machine ist schon auf dem Reißbrett. Die neue Z800 würde mit 65 Millionen Ampere zuschlagen und statt des bisherigen Deuteriums ein wesentlich zündfreudigeres Gemisch aus Deuterium und Tritium verwenden. Das gäbe die bis zu 100 000-fache Ausbeute pro Schuss. In ihren kühnsten Träumen erreichen die Forscher von Sandia damit die sich selbst erhaltende Fusion zehn oder mehr Jahre, bevor ITER so weit ist.

Da Sandia vom Staat finanziert wird, müsste der Kongress jede größere Neuinvestition genehmigen, und der war in letzter Zeit nicht in Geberlaune. Aber hier könnte Konkurrenz das Geschäft beleben. Stephen A. Slutz versäumt nicht, darauf hinzuweisen, dass chinesische Wissenschaftler eine kleinere Version der Z Machine gebaut und das – veröffentlichte – Experiment erfolgreich repliziert haben; Russland plant eine ähnliche Anlage mit 50 Millionen Ampere.

Bislang scheint das Plasma umso besser beherrschbar zu sein, je heißer es ist

Selbst wenn eines dieser Projekte die Parameter Dichte und Einschlusszeit in ungeahnte Höhen treiben sollte, bleibt noch der dritte: eine ebenfalls unglaublich hohe Plasmatemperatur. Und die ist schwer zu erreichen, weil das Plasma seine innere Bewegungsenergie auf vielen Wegen verlieren kann, vor allem über Abstrahlung von

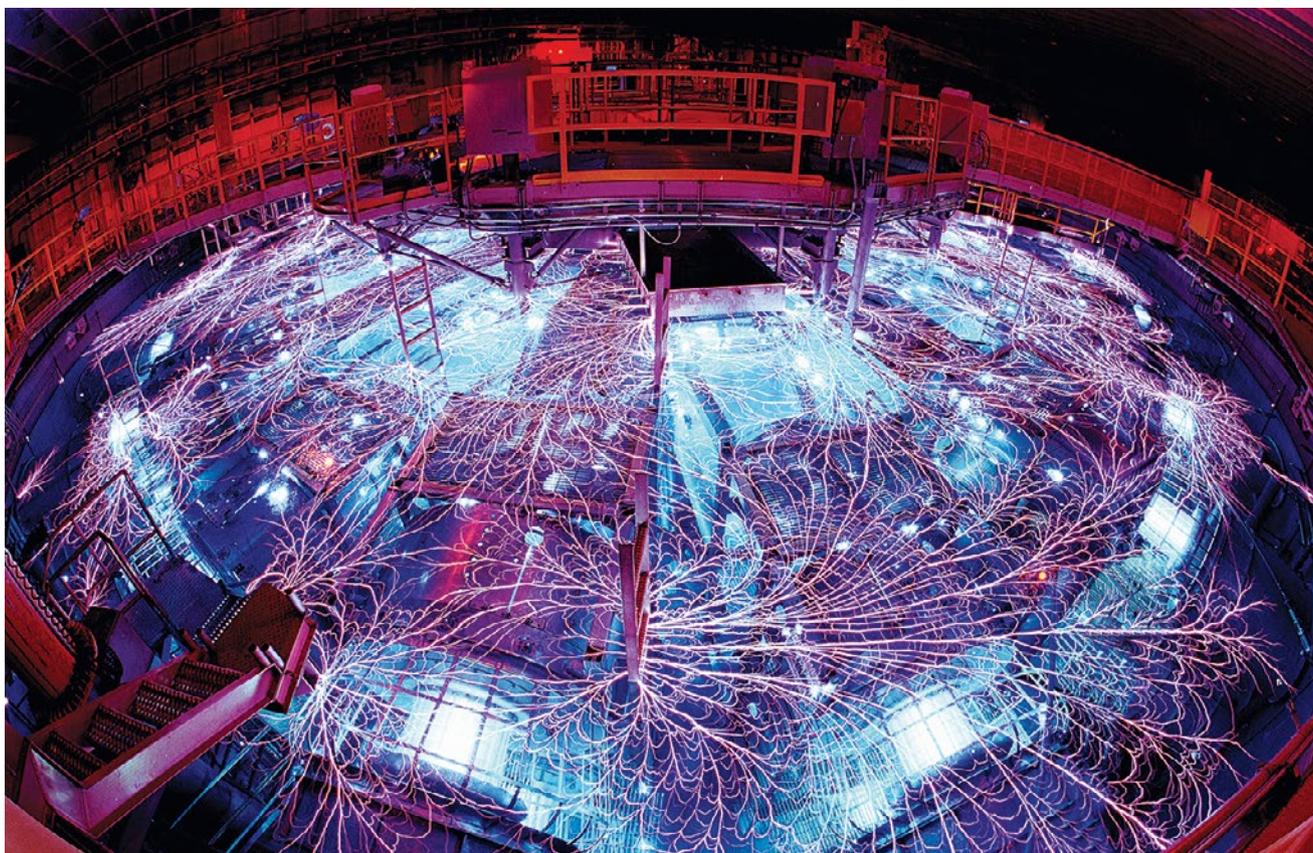
Licht und Wechselwirkungen zwischen Elektronen. Dann würde die Auskühlung die Fusionsreaktionen ersticken, kaum dass sie begonnen haben.

Daher versuchen Sinars und Slutz bei Sandia herauszufinden, wieso der Laser nicht die theoretisch vorhergesagte Heizleistung erbringt. Vielleicht gibt es Streuverluste durch die dünnen Fenster, welche die Enden des Fusionszylinders verschließen. Oder ein Laser ist für diesen Zweck prinzipiell ungeeignet. Sinars räumt ein, »dass man in einer kommerziellen Anlage den Brennstoff wahrscheinlich auf andere Weise erhitzen möchte«. Noch versuchen die Ingenieure allerdings, die Heizung durch Laser zu optimieren. Wenn das misslingt, werden sie das immerhin relativ bald merken.

Tri Alpha hat noch einen weiteren Weg vor sich, weil die Firma mit einem Gemisch aus gewöhnlichem Wasserstoff und Bor-11 (dem häufigsten Bor-Isotop) arbeitet. Diese beiden Partner kommen sich erst bei 3,5 Milliarden Grad hinreichend nahe, dem 20-Fachen der Temperatur, die das Deuterium-Tritium-Gemisch benötigt.

Im Prinzip ist ein Plasma umso schwieriger zu bändigen, je heißer es ist. Aber Binderbauer wettet darauf, dass die Einschluss technik von Tri Alpha mit steigender Temperatur sogar besser funktioniert. So war es jedenfalls bisher in Experimenten, aber das sagt leider nicht viel. Selbst die

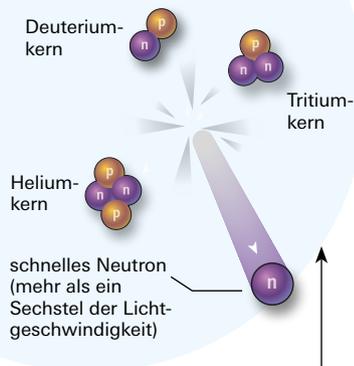
Die Z Machine von den Sandia National Laboratories erzeugt mit kurzen, sehr intensiven Stromstößen Magnetfelder, die das Plasma komprimieren.



BRANDY MONTVOYA / SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Neue Fusionsreaktoren

Mehrere Forschergruppen arbeiten an Prototypen für Anlagen, die geringe Anteile der Masse von Atomkernen in Energie verwandeln sollen (Grafik links). Die Sandia National Laboratories und das Start-up-Unternehmen General Fusion wollen ein Plasma erzeugen, das seine Energie in Form schneller Neutronen abgibt, während es bei Tri Alpha in erster Linie Röntgenstrahlen sind. In jedem Fall müssen diese Energien noch in nutzbare Formen umgewandelt werden. Die Abbildungen zeigen nicht die aktuellen Prototypen, sondern deren geplante, kommerziell nutzbare Nachfolger.

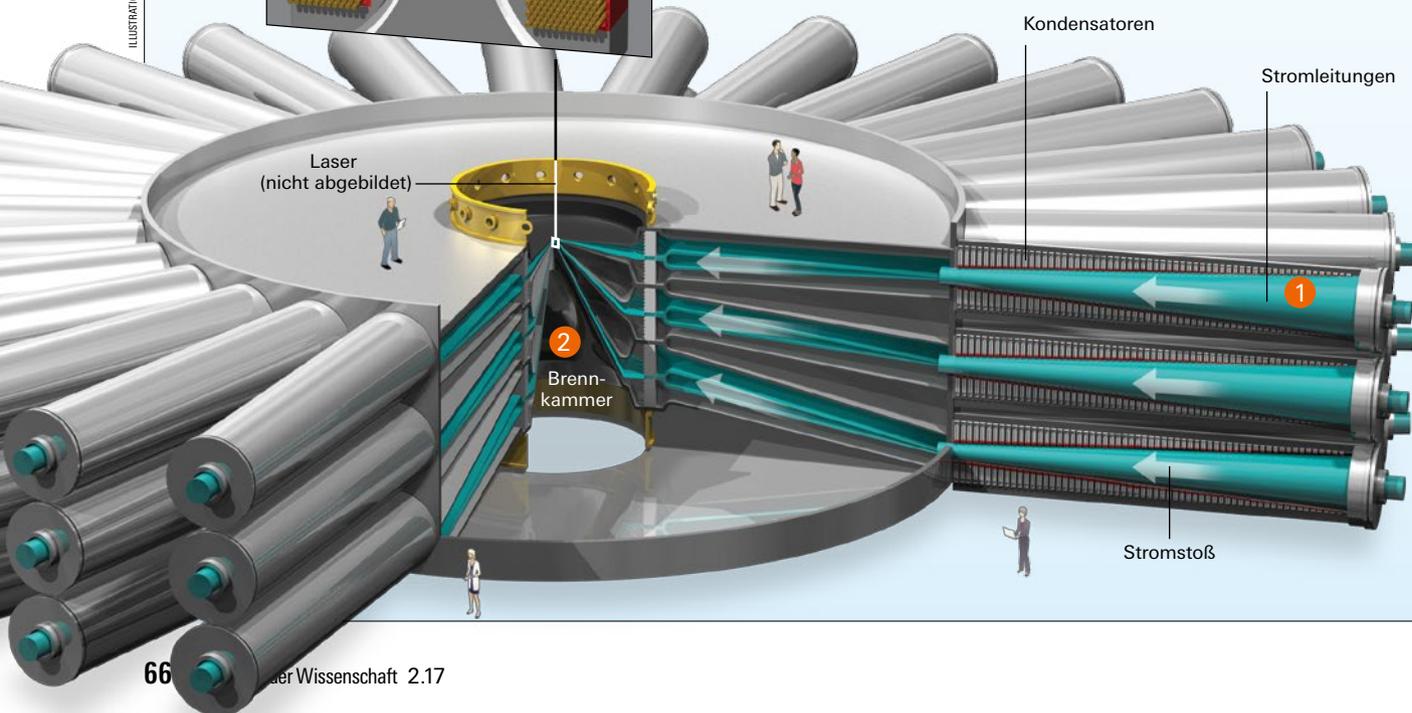
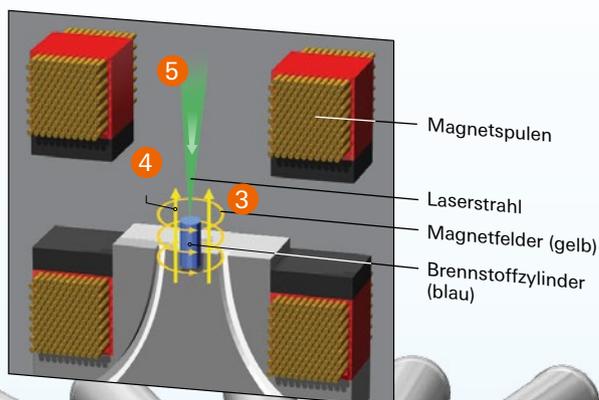


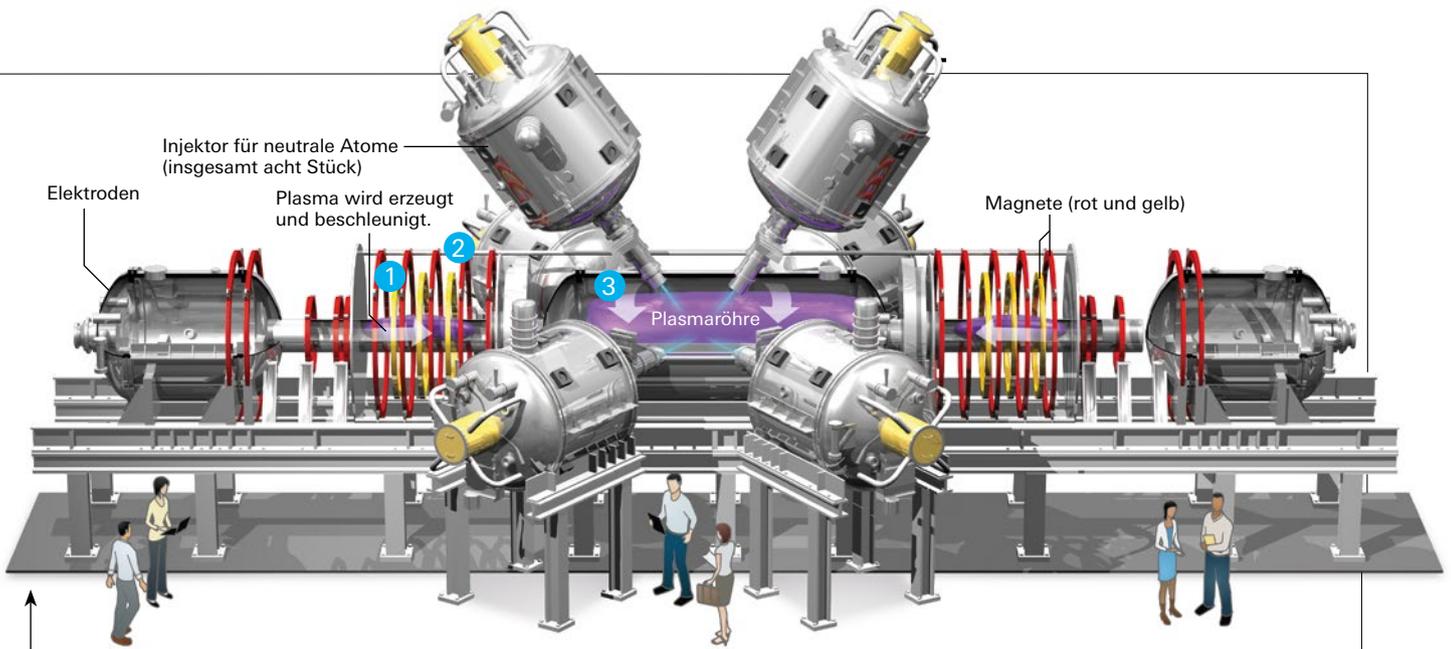
Materie zu Energie

Wenn zwei Atomkerne wie die von Deuterium und Tritium (schwerer und überschwerer Wasserstoff) mit der richtigen – hohen – Geschwindigkeit zusammenprallen, verschmelzen sie zu einem schwereren Atomkern, im Beispiel Helium, wobei noch ein Neutron übrig bleibt. Die Gesamtmasse der Reaktionsprodukte ist geringer als die Massen der beiden ursprünglichen Kerne zusammen. Die Fusionsreaktion verwandelt diese überschüssige Masse in Energie, die in Form von (Röntgen-)Photonen oder Bewegungsenergie der Reaktionsprodukte frei wird.

Sandia: die Magnetfaust

90 Gruppen von Kondensatoren entladen sich zeitgleich und schicken über dicke Verbindungsleitungen (1) einen Stromstoß von 65 Millionen Ampere in die Brennkammer (2). Das erzeugt ein starkes Magnetfeld rund um die vertikale Achse eines nur wenige Millimeter großen Metallzylinders (blau), der mit kaltem Deuterium und Tritium gefüllt ist. Unter der Wirkung des Magnetfelds implodiert er samt Inhalt binnen 100 Nanosekunden (3). Ein weiteres Magnetfeld hindert den Brennstoff daran, nach oben und unten aus dem Zylinder zu entweichen (4). Zu Beginn der Implosion heizt ein grüner Laser mit einer Leistung von einer Billion Watt durch einen Blitz von zehn Nanosekunden Dauer (5) den Brennstoff so stark auf, dass er zusammen mit der Wirkung der Implosion die erforderliche Temperatur erreicht. Daraufhin setzt die Fusion ein und produziert einen Schauer energiereicher Neutronen. In einem kommerziellen Fusionskraftwerk müsste der ganze Prozess mehrmals pro Minute stattfinden.





Tri Alpha: das Ionenkarussell

Ein kurzer, intensiver Stromstoß erzeugt ein Magnetfeld in den Spulen (1, gelb) beiderseits des Reaktorkerns. Dieses wiederum verwandelt ein Wölkchen gasförmigen Brennstoffs in ein Plasma aus Bor-Ionen und Protonen. Andere Elektromagnete (rot) halten das Plasma am Ort fest, während ein sehr starkes, entgegengerichtetes Magnetfeld eine Mikrosekunde lang einwirkt und dadurch einen elektrischen Strom innerhalb des Plasmas induziert (2). Dieser Kreisstrom erzeugt seinerseits ein torusförmiges Magnetfeld, das wie ein Käfig das Plasma am Auseinanderfliegen hindert. Daraufhin beschleunigt ein weiterer Stromstoß durch das erste Magnetsystem die beiden

Plasmaringe in Richtung Zentrum, wo sie mit ungefähr einer Million Stundenkilometer aufeinanderprallen und eine größere, heißere röhrenförmige Struktur bilden (3). Um die Fusion zu zünden, muss das Plasma eine Temperatur von 3,5 Milliarden Grad Celsius erreichen. Acht Injektoren spritzen neutrale Atome tangential an die Plasmaröhre, was einerseits Brennstoff nachliefert und andererseits eine stabile Rotation der Plasmaröhre aufrechterhält. Die Fusion soll über Stunden oder Tage hinweg andauern. Die Energie wird über extrem schnelle Heliumkerne und Röntgenstrahlen abgeführt.

General Fusion: der Plasmahammer

Ein Injektor, betrieben durch einen Stromstoß aus zahlreichen Kondensatoren, schießt eine ringförmige Plasmawolke aus Deuterium und Tritium durch einen Trichter (1) in die Brennkammer, wobei der Brennstoff stark komprimiert wird (2). Dort schlagen annähernd 200 große, pressluftgetriebene Kolben synchron mit 200 Stundenkilometern auf ebenso viele Ambosse (3) und lösen eine Stoßwelle aus. Diese wandert durch eine Mischung aus flüssigem Blei und Lithium (4), die im Inneren der Brennkammer rotiert (und wegen dieser Rotation in Fortsetzung des Trichters einen Hohlraum lässt). Im Zentrum der Brennkammer läuft die Stoßwelle auf einen Punkt zusammen und komprimiert dadurch das Plasma auf einen Druck von mehr als 5 Millionen Atmosphären bei einer Temperatur von 150 Millionen Grad Celsius. Das schafft für den Bruchteil einer Sekunde die Bedingungen für eine Fusion. Das flüssige Metall absorbiert sowohl die Neutronen als auch die Wärmeenergie, die durch die Fusion frei werden. Im Produktionsbetrieb müsste der Hammer einmal pro Sekunde zuschlagen.

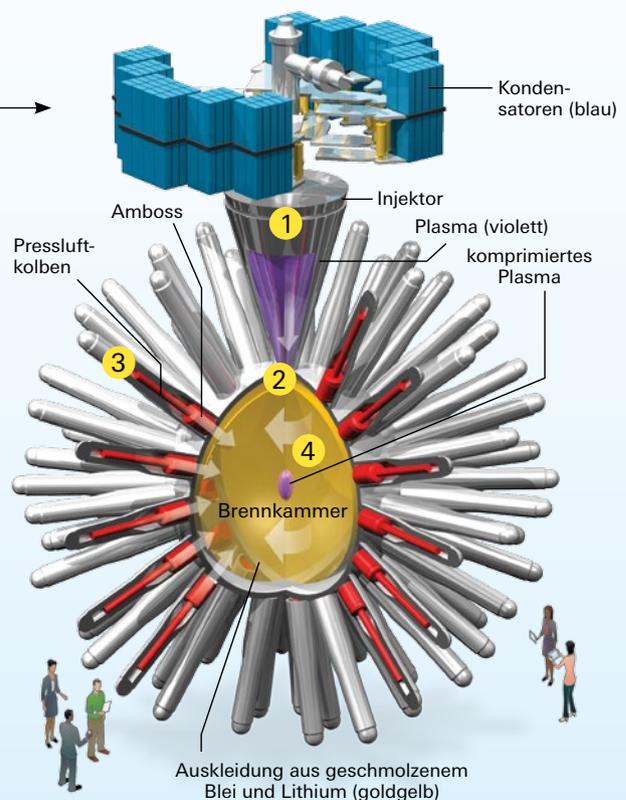


ILLUSTRATION: DON FOLEY; SCIENTIFIC-AMERICAN NOVEMBER 2016; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

neue C-2W wird auf kaum ein Prozent der benötigten Temperatur kommen und das Plasma gerade mal für 30 Millisekunden zusammenhalten. Die Wette könnte Binderbauer verlieren, wie er offen zugibt, aber: »Wir haben keine Daten für diesen Bereich. Da müssen wir's wohl ausprobieren.«

Auch General Fusion wagt sich in ein Gebiet vor, über das die Physik noch keine Auskunft geben kann – in diesem Fall darüber, wie schnell das Plasma Wärmeenergie nach außen verliert. »Da hilft es nicht, über die Bewegung einzelner Atome nachzudenken oder allgemeine Wahrheiten wie den Energieerhaltungssatz heranzuziehen. Also können jede Menge Überraschungen auf uns warten – gute oder böse«, sagt Laberge. »Wenn die Wärmeverluste schlimmer sind als erwartet, können wir das ganze Ding größer machen. Das verbessert nämlich das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche. Aber wenn wir bei der Größe vom ITER landen, haben wir ein Problem.«

»Die Physik hat jede Menge Gelegenheit, uns in den Arsch zu beißen«

Sowie irgendein Fusionsreaktor eine Zündung erreicht, werden die Sektkorken knallen – und dann fängt die Arbeit erst richtig an. Am Ende muss ein solches Gerät nicht nur irgendwie Strom produzieren, sondern zu Preisen, die mit denen der erneuerbaren Quellen konkurrieren können. Das werde den riesigen Tokamaks wie ITER wahrscheinlich nie gelingen, sagt Dennis Whyte, Chef des Plasma Science and Fusion Center am Massachusetts Institute of Technology. Denn diese Maschinen fressen zu viel von der erzeugten Energie gleich wieder für den Eigenbedarf auf. Die kleinen Start-ups haben zwar von Anfang an mehr an die praktische Realisierung gedacht als die Großen, aber auch auf sie warten noch eine Menge ungelöster Probleme.

So leidet zum Beispiel MagLIF darunter, dass bis auf Weiteres jeder Schuss einen Teil des Materials zerstört. Die Fusion von Deuterium und Tritium setzt den größten Teil ihrer Energie in Form schneller Neutronen frei, die in den Stahl eindringen und die getroffenen Atome in radioaktiv verwandeln. Jede Anlage, die mit diesem Brennstoff arbeitet, muss die schnellen Neutronen dazu bringen, an Stelle ihres Zerstörungswerks nützliche Arbeit zu leisten. Aber für die Wissenschaftler dort ist Schadensbegrenzung bislang kein Vorrangthema – und ihre Vorstellung, wie sie die Schussfolge von mehrmals pro Woche auf mehrmals pro Minute hochsetzen wollen, bestenfalls vage. HyperV und Magneto-Inertial Fusion Technologies, eine kleine Firma in Tustin südlich von Los Angeles, erkunden mit Fördermitteln von ARPA-E andere Wege zur Lösung des Neutronenproblems, sind damit aber noch nicht weit gekommen.

Die Firma Tri Alpha geht dem Ärger aus dem Weg, indem sie Protonen mit Boratomen fusioniert. Dabei entstehen drei Heliumkerne, auch Alphateilchen genannt – daher der Name der Firma –, sowie Röntgenstrahlen, aber kaum Neutronen. Nur stecken jetzt 80 Prozent der Energie in den Röntgenstrahlen.

Im Prinzip könnte man mit speziellen photovoltaischen Zellen an der Innenwand des Reaktors die Röntgenpho-

tonen in elektrischen Strom verwandeln, sagt Binderbauer. Aber solche Zellen gibt es noch nicht. Also greifen die Tri-Alpha-Leute notgedrungen auf das Prinzip der Dampfmaschine zurück: Die Röntgenstrahlen heizen eine Kühlflüssigkeit, welche die Energie als Wärme abführt.

General Fusion bleibt beim Deuterium-Tritium-Gemisch, obgleich Tritium geringfügig radioaktiv, extrem selten und entsprechend teuer ist. Laberge will die Energie der schnellen Neutronen mit einem Gemisch aus geschmolzenem Blei und Lithium abfangen, das die Innenwände des Reaktors entlangzirkuliert. Dabei reagieren einige Neutronen mit Lithium zu Helium und Tritium. Letzteres wäre dann als Brennstoff zu verwenden.

Auf dem Reißbrett ist das eine elegante Lösung; nur hat bisher noch niemand ein solches System gebaut. Noch weiß keiner, wie viel Tritium eine solche Anlage erbrüten würde, sagt Hsu. Und Laberge fürchtet, dass von dem flüssigen Metall durch die Stoßwelle der 200 Kolben Spritzer ins Plasma fliegen. »Das ist wie Wasser ins Feuer«, gibt er zu; die Temperatur der Schmelze ist so niedrig, dass die Fusionsreaktion erlöschen würde.

Nachdem ITER und NIF aus ihrem Schleichtempo nicht herauskommen, »ist es Zeit, dass wir all unsere Physik zusammennehmen und nach Alternativen suchen«, sagt Whyte. Darunter sind Variationen des Tokamak-Designs, die diesen Riesen-Donut kleiner machen oder ihn zu einer sonderbaren Form namens Stellarator verdröseln. »Am liebsten würde ich einen sehr kompakten Tokamak, das Konzept von General Fusion, einen kleinen Stellarator und eine Maschine von Typ Tri Alpha gegeneinander ins Rennen schicken – und dann sehen, wer gewinnt.«

Wenn das Rennen in den USA stattfindet, dann jedenfalls nicht mit Staatsgeld. Der Kongress ist in diesem Punkt von Jahr zu Jahr zugeknöpfter, auch wenn Hsu nicht müde wird, für den Erfolgsfall das goldene Zeitalter heraufzubeschwören. »Wenn auch nur eines dieser innovativen Konzepte den Durchbruch schafft, dann haben wir in 20 Jahren für ein paar Milliarden Dollar die Fusionsenergie nutzbar gemacht.«

Kann sein, kann auch nicht sein. Binderbauer drückt es etwas drastischer aus: »Die Physik, die wir noch nicht kennen, ist nicht wenig. Und deswegen hat sie jede Menge Gelegenheit, uns in den Arsch zu beißen.«

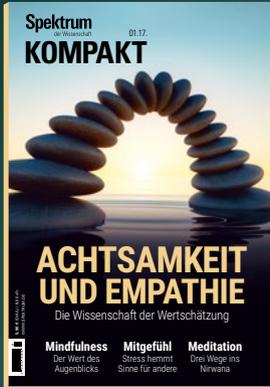
Aber die Aussichten sind einfach verlockend. Eine neue Energiequelle, die sich nicht von einer Windflaute oder bewölktem Himmel beeindrucken lässt, keinen Ausbau des Stromnetzes erfordert, keinen Missbrauch für militärische Zwecke befürchten lässt, auch bei einem Totalversagen das Nachbardorf nicht radioaktiv verstrahlt oder gar pulverisiert und am Ende günstiger zu haben ist als eine Windfarm – wäre das nicht noch ein paar Probeschüsse wert? ◀

QUELLEN

Slutz, S. A. et al.: Scaling Magnetized Liner Inertial Fusion on Z and Future Pulsed-Power Accelerators. In: Physics of Plasmas 23, 022702, Februar 2016

Waldrop, M. M.: Plasma Physics: The Fusion Upstarts. In: Nature 511, S. 398–400, 24. Juli 2014

Unsere Neuerscheinungen!



Mindfulness: Der Wert des Augenblicks • Mitgefühl: Stress hemmt Sinne für andere • Meditation: Drei Wege ins Nirwana • Literatur: Einfühlsame Bücherwürmer • Empathie: Wenn das Bauchgefühl trügt • € 5,90



Umweltpsychologie: Die Welt und wir • Sportpsychologie: Schneller, höher, weiter! • Rechtspsychologie: Verbrechen unter der Lupe • Kulturpsychologie: Macht der Gemeinschaft • € 8,90



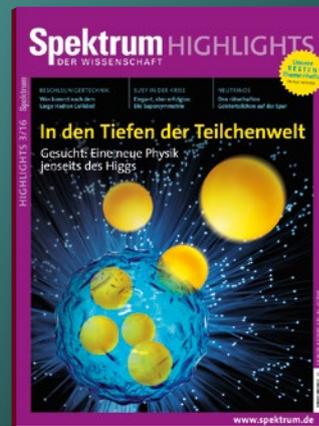
Neuro-Gadgets: Hightech für Selbstoptimierer • Tagträumen: Flieg, Gedanke, flieg! • Macht Kreatin nicht nur stark, sondern auch schlau? • Physiologie: Schlaf drüber! • Mentales Training: Mehr Mitgefühl • € 8,90



Troja: Erinnern »Ilias« und »Odyssee« an den Kulturkollaps? • Hatuscha: Eine Hauptstadt verschwindet • Griechenland: Licht am Ende der »dunklen Jahrhunderte« • Levante: Welthandel in der Krise • € 8,90;



Frühe Erde: Als die Meere vom Himmel fielen • Saturnmond: Heißes Wasser in der Tiefe des Enceladus • Bausteine der Planeten: Urtümliche Meteoriten • Exoplaneten: Besser als die Erde • Exzentrische Bahnen: Gibt es Planet X? • € 8,90



Genregulation: Das interaktive Buch des Lebens • Kognition: Gibt es ein Gen für Intelligenz? • Wovon unsere Lebenszufriedenheit abhängt • Neuropsychologie: Der Schalter für Sucht • Gene und Persönlichkeit • € 8,90

Hier bestellen:
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/neuerscheinungen

**Ausgewählte
 Sonderhefte
 auch im
 PDF-Format**

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

DAS BEUNRUHIGENDE PARADOX VON SIMPSON

Manche statistischen Daten führen zu widersprüchlichen Schlüssen – je nachdem, wie man sie in Gruppen einteilt. Und leider ist es unmöglich zu sagen, welches Vorgehen das richtige ist.



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

► spektrum.de/artikel/1432733

Stellen wir uns folgende Situation vor. In einer Doppelblindstudie zur Behandlung einer schweren Krankheit erhalten von 160 Patienten 80 ein neues Medikament und die restlichen 80 ein Placebo. Nach Abschluss der Behandlung sind aus der Gruppe der Behandelten 40 Patienten (50 Prozent) wieder gesund, aus der Kontrollgruppe dagegen nur 32 (40 Prozent).

zusammen	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	A 40	B 40	50 %
Placebo	C 32	D 48	40 %

Das Ergebnis ist vielleicht nicht gerade begeisternd, scheint aber klar dafür zu sprechen, dass das Medikament wirksam ist.

Nun schaut sich ein eifriger Doktorand die Daten nach Geschlechtern aufgegliedert an – und kommt zu genau dem entgegengesetzten Ergebnis! Sowohl den Männern als auch den Frauen geht es mit dem Placebo deutlich besser als mit dem Medikament.

Männer	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	a 36	b 24	60 %
Placebo	c 14	d 6	70 %

Frauen	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	a' 4	b' 16	20 %
Placebo	c' 18	d' 42	30 %

Offensichtlich hat sich niemand verzählt, wie man leicht nachprüfen kann: Die Fallzahlen für Männer und Frauen zusammen addieren sich zum Gesamtergebnis. Aber wie kann das sein? Und vor allem: Ist das Medikament nun wirksam oder nicht?

Einen derartigen Fall beschrieb erstmals 1899 der englische Mathematiker Karl Pearson (1857–1936); wenige Jahre später, 1903, entdeckte der schottische Statistiker George Udny Yule (1871–1951) das Phänomen erneut. Aber erst 1951 hat der Brite Edward Simpson (*1922) diese statistische Ausnahmerecheinung sorgfältig studiert und diskutiert. Heute trägt das Paradox seinen Namen – was nicht ganz gerechtfertigt erscheint.

Dass ein statistischer Befund sich in sein Gegenteil verkehrt, wenn man die Ergebnisse aus Teilgruppen zusammenfasst, ist keineswegs exotisch. Jedes Jahr erregen zahlreiche neue Fälle Erstaunen und ungläubiges Kopfschütteln. Beispiele kommen unter anderem aus der Medizin, der Analyse von Basketballspielen, der Demografie und der Analyse von Unfallrisiken (siehe »Das Simpson-Paradox im echten Leben«, S. 72). Man findet es in der Diskussion um die Evolution des Altruismus (siehe »Das Simpson-Paradox und der Sieg des Guten«, S. 76).

Ein Fall ging 1973 sogar vor Gericht: Die Zulassungsquoten zum Graduiertenstudium an der University of California in Berkeley lagen für die Frauen so weit unter denen für die Männer, dass ein Verfahren wegen Geschlechterdiskriminierung eröffnet wurde. Auf der Ebene der einzelnen Fachbereiche blieb jedoch von der beklagten Benachteiligung praktisch nichts übrig. Vielmehr erklärte sich das Phänomen dadurch, dass sich die Frauen

bevorzugt in den überlaufenen Fächern beworben hatten und schon deshalb von einer höheren Ablehnungsquote betroffen waren.

Schauen wir uns zunächst die Sache in abstrakten Zahlen an. Wir bezeichnen mit A, B, C und D die vier Zahlen in der ersten Tabelle, mit a, b, c und d diejenigen der zweiten und mit a', b', c' und d' jene der dritten. Dann gilt stets

$$A = a + a'; B = b + b'; C = c + c'; D = d + d';$$

das sagt nichts weiter, als dass die erste Tabelle die Zusammenfassung der beiden anderen ist. Ein Simpson-Paradox liegt zum Beispiel dann vor, wenn

$$a/b < c/d; a'/b' < c'/d'; A/B > C/D$$

gilt. Das ist in den obigen Tabellen der Fall; denn $36/24 < 14/6$ ($1,5 < 2,33$) und $4/16 < 18/42$ ($0,25 < 0,42$), aber $40/40 > 32/48$ ($1 > 0,66$).

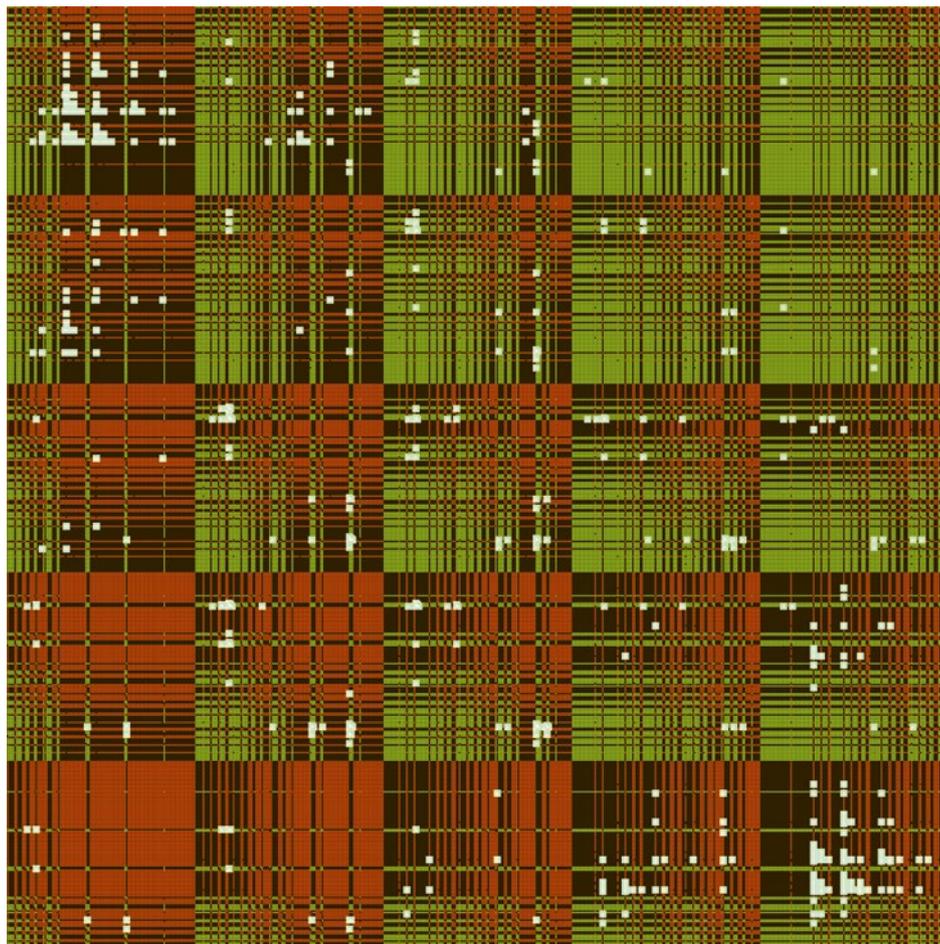
Da stutzt man zunächst, denn irgendwie hat man erwartet, dass man die beiden ersten Ungleichungen einfach addieren könne und dass dann die dritte herauskommen müsste, aber eben mit dem Kleiner- statt mit dem Größerzeichen. Das ist allerdings ein Irrtum! $a/b + a'/b'$ ist eben nicht dasselbe wie $(a+a')/(b+b')$ – ein beliebter Fehler unter Kindern, die gerade Bruchrechnen lernen.

Vom rechnerischen Standpunkt aus ist das allenfalls ein bisschen überraschend, aber kein Paradox. Und wenn man die grafische Darstellung zu Hilfe nimmt (siehe »Das Paradox – geometrisch«, S. 73), findet man ohne große Mühe Beispiele für dieses merkwürdige Verhalten – selbst wenn man sich auf sehr kleine Zahlen beschränkt. Verlangt man von den Parametern ($a, b, c, d, a', b', c', d'$), dass sie natürliche Zahlen zwischen 1 und 4 sein sollen, so findet man die vier Lösungen (1, 2, 3, 4, 4, 2, 3, 1), (1, 3, 2, 4, 4, 3, 2, 1), (4, 2, 3, 1, 1, 2, 3, 4) und (4, 3, 2, 1, 1, 3, 2, 4) (siehe auch »Wie häufig ist das Paradox?«, S. 75).

Lässt man natürliche Zahlen zwischen 1 und 5 zu, so steigt die Anzahl der Lösungen explosionsartig auf 232 an (Bild unten). Mit jeder weiteren Zahl, die man hinzunimmt, werden es noch mehr: 1370, 8126, 28252 und schließlich 86140 für den Bereich von 1 bis 9. Wenn man die Zahl der zugelassenen natürlichen Zahlen gegen unendlich gehen lässt, strebt der Anteil der paradoxen Fälle gegen 0,9606 Prozent.

Ist es ein Mensch, gib das Medikament. Ist es ein Mann oder eine Frau, gib das Placebo. – Wie bitte?

Das ist alles ganz nett, hilft jedoch dem Arzt nicht. Soll er nun im konkreten Fall das Medikament verabreichen (nach den Daten in Tabelle 1) oder nicht (nach denselben Daten,



MIT FRIEDRICH VON JEAN-FRANÇOIS COLOMBA

Wenn das Simpson-Paradox auftritt, bereitet es dem Anwender erhebliches Kopfzerbrechen; aber es kommt glücklicherweise nur selten vor. Diese Grafik verzeichnet alle Kombinationen von acht Zahlen, die man sich als Fallzahlen in einer medizinischen Studie vorstellen darf, wobei jedes dieser Resultate eine natürliche Zahl zwischen 0 und 5 ist. Nur die (durch Rahmen hervorgehobenen) weißen Punkte sind Fälle des Simpson-Paradoxons. Die Farbkodierung ist in »Wie häufig ist das Paradox?« auf S. 75 erläutert.

aufgeteilt in Tabellen 2 und 3)? Wenn Sie sich in seine Situation versetzen, werden verschiedene Haltungen denkbar.

Sichtweise 1: Angenommen, ich weiß nicht, ob es sich um einen Mann oder um eine Frau handelt – wenig plausibel in der Situation am Krankenbett, aber vielleicht werde ich am Telefon um Rat gebeten und kann aus irgendwelchen Gründen nicht nachfragen. Dann kann ich mich nur von Tabelle 1 leiten lassen und verschreibe das Medikament; denn es ist anscheinend wirksamer als das Placebo. Wenn ich aber das Geschlecht des Patienten erfahre, ziehe ich bei einem Mann Tabelle 2 zu Rate und verabreiche das Placebo; bei einer Frau ziehe ich Tabelle 3 zu Rate und verabreiche ebenfalls das Placebo. Das Vorliegen einer neuen Information veranlasst mich also, meine Entscheidung zu revidieren. Dagegen ist im Prinzip nichts einzuwenden, im Gegenteil. Aber in diesem Fall wirkt die Überlegung irgendwie absurd. Das führt auf

Sichtweise 2: Ein Patient ist entweder ein Mann oder eine Frau. Wenn ich sein Geschlecht kenne, ist die Schlussfolgerung stets: Verabreiche das Placebo. Also

muss ich das Geschlecht des Patienten nicht kennen, um zu dieser Entscheidung zu gelangen.

In der Sprache der formalen Logik wäre das folgendermaßen auszudrücken: Aus $(A \Rightarrow B)$ und $(\text{nicht-}A \Rightarrow B)$ folgt B . Wenn aus A (»Der Patient ist ein Mann«) die Aussage B (»Das Placebo ist die richtige Therapie«) folgt und aus nicht- A (»Der Patient ist eine Frau«) dieselbe Aussage, dann ist Aussage B stets wahr.

Die neue Information, die mich veranlasst, meine ursprüngliche Entscheidung – gib das Medikament wegen Tabelle 1 – zu revidieren, besteht nicht in der Kenntnis des Geschlechts des Patienten, sondern in der Kenntnis der detaillierteren Statistik, wie sie in Tabellen 2 und 3 zu finden ist. Wie in der ersten Sichtweise führt die neue Information zu einer Änderung einer Entscheidung, und wieder ist das nichts Besonderes. Ungewöhnlich ist allenfalls, dass ich wegen dieser Zusatzinformation die Tabelle 1 komplett verwerfe, obwohl sie korrekte und aus den beiden anderen Tabellen zusammengefasste Daten enthält.

An dieser Stelle könnte man einwenden, dass bei derart kleinen Fallzahlen stets mit seltsamen Ergebnissen

Das Simpson-Paradox im echten Leben

Alle werden besser, aber der Durchschnitt nicht. In den Jahren 1981 und 2002 lag der Mittelwert der Punktzahlen, die US-amerikanische Schulabgänger im Verbalteil des Studierfähigkeitstests SAT erzielten, bei genau 504 Punkten. Andererseits verbesserte sich der entsprechende Mittelwert für jede ethnische Gruppe (Weiße, Schwarze, Asiaten, ...) im selben Zeitraum um 8 bis 27 Punkte.

Gerald Bracey (1940–2009) von der George Mason University in Fairfax (Virginia) hat in einer Arbeit von 2004 dieses seltsame Phänomen als einen Fall des Simpson-Paradoxons identifiziert und auch gleich die Erklärung dazu geliefert: In dem betrachteten Zeitraum nahm der Anteil der weißen Testteilnehmer von 85 auf 65 Prozent ab, während die Angehörigen von Minderheiten entsprechend zulegen. Damit fiel deren generell schlechterer Durchschnitt mehr ins Gewicht, was in der Gesamtwertung die Fortschritte jeder einzelnen Gruppe bis zur Unkenntlichkeit verwischte.

In Schweden leben die Frauen gefährlicher als in Costa Rica. Joel Cohen von der Rockefeller University in New York verglich 1986 die Sterblichkeitsraten für Frauen aus beiden Ländern. Da Schweden über eine hervorragende medizinische Versorgung verfügt und seine Einwohner im Allgemeinen eine gesunde Lebensweise praktizieren, verwundert es wenig, dass im Jahr 1960 ein geringerer Anteil jeder Altersgruppe starb als in Costa Rica, wo schlechte soziale und medizinische Verhältnisse das Leben der Bewohner verkürzen. Gleichwohl war die Sterberate aller Frauen in Schweden höher als in Costa Rica!

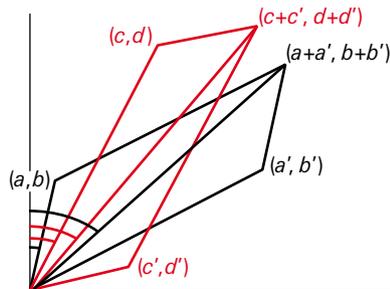
Die Erklärung liegt in den unterschiedlichen Altersstrukturen der beiden Länder. Die Bevölkerung von Costa Rica ist im Schnitt viel jünger als die in Schweden. Folglich tragen die jungen Altersgruppen, die eine geringe Sterblichkeit aufweisen, in Costa Rica mehr zum Gesamtdurchschnitt bei als in Schweden, obwohl die Rate in jeder einzelnen Altersgruppe schlechter ist.

Schneller fahren verursacht weniger Unfälle. Gary Davis von der University of Minnesota untersuchte 2004 die Statistik der Verkehrsunfälle in einer Stadt. Dabei suchte er eine Beziehung zwischen der Anzahl der Unfälle, an denen ein Fahrzeug und ein Fußgänger beteiligt waren, und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Um nachzurechnen, wie viele Unfälle durch eine strengere Geschwindigkeitsbegrenzung zu vermeiden wären, stellte er ein mathematisches Modell auf – und erhielt das Ergebnis, dass die Anzahl der Unfälle zunimmt, wenn man die Geschwindigkeitsbeschränkung von 30 auf 25 Meilen pro Stunde herabsetzt.

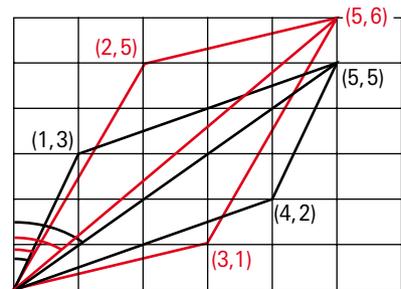
Natürlich werden aber an jeder Stelle einer Stadt die Unfälle weniger (und weniger schwer), wenn man die zulässige Höchstgeschwindigkeit vermindert. In diesem Fall führte die Zusammenfassung der Daten zu einem absurden Ergebnis, weil man nicht berücksichtigt, dass Unfälle in reinen Wohngebieten viel seltener sind als auf Durchgangsstraßen.

Das Paradox – geometrisch

Das Simpson-Paradox tritt auf, wenn $a/b < c/d$ und $a'/b' < c'/d'$, aber $(a+a')/(b+b') > (c+c')/(d+d')$ ist. In diesen Diagrammen sind die Punkte (a, b) , (c, d) und so weiter auf die übliche Weise eingetragen. Die Gerade durch einen Punkt (x, y) und den Nullpunkt enthält alle Punkte, für die das Verhältnis der ersten zur zweiten Koordinate dasselbe ist wie von x zu y . Ein Ungleichung wie $a/b < c/d$ kommt in dieser Darstellung dadurch zum Ausdruck, dass die Gerade durch (a, b) »links« von derjenigen durch (c, d) liegt, das heißt mit der y -Achse einen kleineren Winkel bildet.



Im Diagramm oben liegt (a, b) links von (c, d) und (a', b') links von (c', d') . Das muss aber keineswegs für die Summen dieser (als Vektoren zu verstehenden) Punkte gelten. Insbesondere liegt



$(a+a', b+b')$ nicht links, sondern rechts von $(c+c', d+d')$.

Eine solche Situation ist alles andere als exotisch. Sie lässt sich bereits mit kleinen Zahlen herbeiführen (rechtes Diagramm).

zu rechnen ist und dem Problem dadurch abzuwehren wäre, dass man mehr Patienten in die Studie einbezieht. Aber der Einwand geht ins Leere: Man kann sich problemlos eine erweiterte Studie vorstellen, in der alle Zahlen in unseren Tabellen mit einem Faktor 100 oder gar 10 000 multipliziert sind. Die Schlüsse, die wir daraus ziehen, bleiben dieselben – nur diesmal statistisch besser abgesichert.

Sichtweise 2 ist die klassische Antwort auf das Paradox, das damit erledigt zu sein scheint. Die Lehren, die man daraus ziehen kann, sind »Halte dich im Konfliktfall an die detailliertere Statistik« und »Es ist nicht immer eine gute Idee, Einzeldaten in einen Topf zu werfen«. Ich selbst hielt diese Haltung für überzeugend, bis ich auf ein Argument stieß, das sie ad absurdum führt.

Kritik der Sichtweise 2: Stellen wir uns vor, in der eingangs genannten Studie sei außer dem Geschlecht des Patienten auch seine Augenfarbe – hell oder dunkel – notiert worden. Wir können also den Erfolg der Behandlung getrennt für hell- und dunkeläugige Patienten bestimmen. Nehmen wir weiter an, dass die Ergebnisse (Tabellen 4 und 5) für das Medikament und gegen das Placebo sprechen.

4

helläugig	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	20	20	50%
Placebo	16	24	40%

5

dunkeläugig	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	20	20	50%
Placebo	16	24	40%

Eine derartige Situation ist möglich; das belegen die nachfolgenden Tabellen 6, 7, 8 und 9, die für jede der vier Kategorien die Erfolgsrate mit Medikament und mit Placebo angeben.

6

helläugige Männer	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	19	13	59,375 %
Placebo	6	2	75 %

7

dunkeläugige Männer	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	17	11	60,71 %
Placebo	8	4	66,66 %

8

helläugige Frauen	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	1	7	12,5 %
Placebo	10	22	31,25 %

9

dunkeläugige Frauen	geheilt	nicht geheilt	Erfolgsquote
Medikament	3	9	25 %
Placebo	8	20	28,57 %

Man kann leicht nachrechnen, dass die Tabellen 6 und 7 für die Männer zusammen wieder Tabelle 2 liefern und auch die Anzahlen der Frauen, der Helläugigen und der Dunkeläugigen die richtigen Werte ergeben.

Angesichts dieses Beispiels lässt sich Sichtweise 2 nicht mehr aufrechterhalten. Denn wenn ich ihr folgend

die Patienten in Männer und Frauen einteile, komme ich zu dem Ergebnis, das Placebo zu geben; teile ich sie in Hell- und Dunkeläugige auf, komme ich zum gegenteiligen Ergebnis. Also: Sichtweise 1 ist absurd – und Sichtweise 2 auch, weil sie bei denselben Daten einmal die eine Handlung und ein anderes Mal das Gegenteil empfiehlt.

Ein Praktiker könnte an dieser Stelle argumentieren, dass die Augenfarbe des Patienten unter keinen Umständen ein Indikator für einen Unterschied sein kann, der für den Krankheitsverlauf bedeutsam wäre; also bringe eine Unterteilung nach Augenfarbe ungefähr so viel Informa-

tion wie das Lesen im Kaffeesatz. Um diesen Ausweg aus dem Paradox zu verbauen, kann man Augenfarbe durch Hautfarbe ersetzen oder durch irgendein anderes Merkmal, dessen Aussagekraft nicht von vornherein auszuschließen ist.

Wenn das Paradox vorliegt, gibt es keine Abhilfe – aber das kommt glücklicherweise selten vor

Was tun? So wie es aussieht, bleibt einem nichts anderes übrig als einzugestehen, dass ohne detailliertere Daten jegliche Therapieentscheidung unsicher ist. Diese vorsichtige Sichtweise 3, die unten näher erklärt wird, ist für den

Der doppelte Simpson

Am 20. März 2013 entdeckte Jean-François Colonna im Zuge intensiver Rechnungen einen – fiktiven – Datensatz mit den folgenden paradoxen Eigenschaften:

Aus einem Kollektiv von 183 Patienten werden 89 mit dem Medikament behandelt und 94 mit dem Placebo (Tabelle 1). Die Erfolgsquote ist höher bei der Gruppe, die das Medikament nimmt; also scheint es so, als sollte man dieses den Kranken verschreiben.

Betrachtet man Männer und Frauen getrennt (Tabellen 2 und 3),

so schneidet in jeder dieser Gruppen das Placebo besser ab als das Medikament. Das ist das einfache Simpson-Paradox.

Betrachtet man Hell- und Dunkeläugige getrennt (Tabellen 4 und 5), so sieht wieder das Medikament besser aus.

Schlimmer noch: Selbst wer alle bisherigen Informationen (also Tabellen 1 bis 5) einbezieht, weiß nicht genug, um eine richtige Entscheidung zu treffen. Die fünf Tabellen können nämlich aus zwei wesentlich verschiedenen Quellen entstanden sein. Genauer gesagt: Es gibt zwei konkurrierende Statistiken für die am feinsten eingeteilten Untergruppen, nämlich hell-

äugige Männer, dunkeläugige Männer und so weiter (Tabellen A6 bis A9 einerseits, B6 bis B9 andererseits), die beide zusammengefasst die Tabellen 1 bis 5 ergeben. Aber für jede dieser Untergruppen läuft die A-Statistik auf die eine Therapieempfehlung hinaus und die B-Statistik auf die entgegengesetzte!

Wer also diese Detaildaten nicht hat, kann sie aus den Tabellen 1 bis 5 nicht rekonstruieren und kommt deswegen auch nicht zu einer begründeten Therapieempfehlung.

Daten, die das Paradox in einer derart extremen Form zeigen, sind nicht leicht zu finden; aber es gibt sie, wie Colonna gezeigt hat.

1

zusammen	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	47	42	52,80 %
Placebo	38	56	40,42 %

2

♂	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	40	26	60,60 %
Placebo	16	9	64 %

3

♀	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	7	16	30,43 %
Placebo	22	47	31,88 %

4

👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	24	19	55,81 %
Placebo	21	28	42,85 %

5

👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	23	23	50 %
Placebo	17	28	37,77 %

A6

♂ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	21	13	61,76 %
Placebo	8	5	61,53 %

A7

♂ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	19	13	59,37 %
Placebo	8	4	66,66 %

A8

♀ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	3	6	33,33 %
Placebo	13	23	36,11 %

A9

♀ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	4	10	28,57 %
Placebo	9	24	27,27 %

B6

♂ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	21	14	60 %
Placebo	9	4	69,23 %

B7

♂ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	19	12	61,29 %
Placebo	7	5	58,33 %

B8

♀ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	3	5	37,50 %
Placebo	12	24	33,33 %

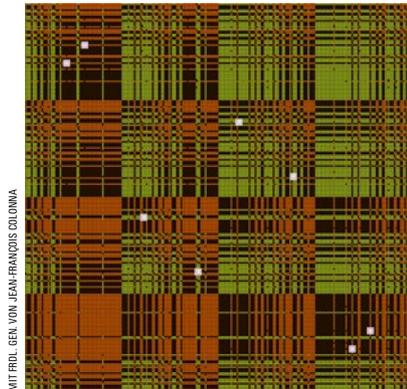
B9

♀ 👁️	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	4	11	26,66 %
Placebo	10	23	30,30 %

Wie häufig ist das Paradox?

Die Grafik unten fasst alle möglichen Ergebnistabellen (nach Art der Tabellen 2 und 3 im Text) zusammen, bei denen die acht Einträge natürliche Zahlen zwischen 1 und 4 sind. Das liefert $4^8 = 65\,536$ unterschiedliche Fälle.

Diese werden durch ein quadratisches Schema aus $256 \cdot 256$ Pixeln dargestellt; jedem Pixel



$27=0 \cdot 64+1 \cdot 16+2 \cdot 4+3 \cdot 1=0123$ zur Basis 4

Männer 27	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	1	3	25 %
Placebo	2	4	33 %

entspricht ein Fall. Man zieht von jedem Tabelleneintrag 1 ab, so dass sich Zahlen zwischen 0 und 3 ergeben, schreibt diese spaltenweise – also in anderer Reihenfolge als im Text – hintereinander und fasst sie als Ziffern im Zahlensystem zur Basis 4 auf. Für die Männer ergibt sich eine Zahl zwischen 0 und 255; das ist die x -Koordinate des Pixels. Die y -Koordinate errechnet sich in der gleichen Weise aus den Werten für die Frauen.

Die Farbe des Pixels ist – grün, falls das Placebo sowohl bei den Männern und bei den Frauen als auch bei der Gesamtheit gewinnt, das heißt, die höhere Erfolgsquote aufweist; – braun, falls das Medikament jedesmal gewinnt; – schwarz in den uninteressanten Fällen: Das Medikament gewinnt

bei den Männern, das Placebo bei den Frauen oder umgekehrt, oder einer der Vergleiche geht unentschieden aus;

– weiß, wenn das Simpson-Paradox vorliegt. Damit die acht weißen Pixel überhaupt auffallen, sind sie mit einem hellen Rahmen umgeben.

Es gibt nur acht dieser Fälle: die vier im Text erwähnten plus dieselben Fälle mit umgekehrten Ungleichheitszeichen. Sie entsprechen den Pixeln (27, 216), (39, 228), (78, 114), (141, 177), (177, 141), (216, 27) und (228, 39). Der erste Fall ist in den Tabellen am Anfang des Artikels dargestellt.

Diese von Jean-François Colonna erfundene und realisierte Darstellung zeigt, dass das Paradoxon von Simpson zum Glück nur selten vorkommt.

$216=3 \cdot 64+1 \cdot 16+2 \cdot 4+0 \cdot 1=3120$ zur Basis 4

Frauen 216	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	4	3	57 %
Placebo	2	1	66 %

zusammen 243	geheilt	nicht g.	Erfolgsquote
Medikament	5	6	45,45 %
Placebo	4	5	44,44 %

Mediziner äußerst unbefriedigend; schließlich will er wissen, was er tun soll. Gleichwohl ist diese Zurückhaltung unvermeidlich, vor allem wenn man den Extremfall des Simpson-Paradoxons betrachtet (siehe »Der doppelte Simpson«, links).

Sichtweise 3: Wer nur über die Tabellen 1, 2 und 3 verfügt, kann keine begründete Empfehlung abgeben. Denn bei jedem Votum ist damit zu rechnen, dass Informationen nach Art der Tabellen 4 und 5 es widerlegen. Wer aber Daten über die feinsten Kategorien hat – aufgeteilt sowohl nach Männern und Frauen als auch nach hellen und dunklen Augen –, kann auf Basis der Detailinformationen eine Entscheidung treffen, wenn er weiß, welches Geschlecht und welche Augenfarbe sein Patient hat. Diese Zurückhaltung wird durch zwei Argumente gestützt.

Argument 1: Es seien irgendwelche Daten entsprechend der Tabelle 1 gegeben, die das Verabreichen des Medikaments nahelegen, und die Fallzahlen seien nicht zu klein (größer als 3 in jedem der vier Tabellenfelder). Dann ist es stets möglich, die Patienten in zwei Gruppen einzuteilen derart, dass die Statistik jeder Gruppe (entsprechend den Tabellen 2 und 3) auf den gegenteiligen Schluss führt (»das Placebo ist besser«).

In Gruppe 1 kommen Patienten, die das Placebo erhielten und gesund geworden sind, aber nicht alle; mindestens einen Patienten dieser Art stellen wir in die andere Gruppe. Außerdem wird kein Placeboempfänger, der nicht geheilt wurde, der Gruppe 1 zugeteilt, wohl aber alle, die mit Medikament gesund geworden sind, sowie einige, die das Medikament bekamen, aber nicht geheilt wurden. Infolge dieser Auswahlprozedur beträgt die Erfolgsquote des Placebos in Gruppe 1 volle 100 Prozent, und die des Medikaments liegt darunter. In Gruppe 2 gibt es niemanden, der mit Medikament gesund geworden ist (denn die sind alle in Gruppe 1), weshalb die Erfolgsquote des Medikaments gleich null ist. Dagegen sieht das Placebo besser aus, denn man hat mindestens einen Patienten mit Placebo, der gesund geworden ist, für Gruppe 2 aufgehoben. Also hat in beiden Gruppen das Placebo nicht nur die gleiche, sondern sogar eine höhere Erfolgsquote als das Medikament.

Der Trick funktioniert gelegentlich sogar für Fallzahlen, die noch unter den geforderten 3 pro Kategorie liegen. Wenn Tabelle 1 die Einträge (2, 2, 2, 3) enthält, liefert die beschriebene Methode (2, 1, 1, 0) für Tabelle 2 und (0, 1, 1, 3) für Tabelle 3.

Das Simpson-Paradox und der Sieg des Guten

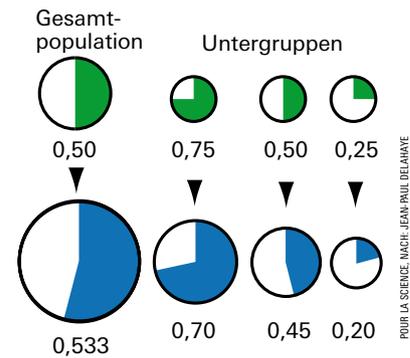
Handeln für das Gemeinwohl ist im Allgemeinen mit Nachteilen («Kosten») für den Wohltäter verbunden, was auch die Anzahl seiner Nachkommen beeinträchtigt. Altruistisches Verhalten als erbliches Merkmal müsste also infolge der natürlichen Selektion aussterben. Wieso ist es dann in der belebten Natur so verbreitet? Diese Frage hat intensive Forschung an Menschen ebenso wie an unseren nächsten biologischen Verwandten ausgelöst; verschiedene Autoren haben Empathie oder einen Sinn für Fairness als – erbliche – Ursachen ausgemacht (*Spektrum* März 2002, S. 52, und Mai 2015, S. 60).

John Chuang, Olivier Rivoire und Stanislas Leibler von der Rockefeller University in New York haben das Phänomen an Lebewesen studiert, denen derartige Charakterzüge eher fremd sind: Bakterien. Ein Stamm von *Escherichia coli* produziert unter erheblichem Aufwand, der seine Vermehrung

beeinträchtigt, ein Antibiotikum, der andere nicht. Für beide Bakterienvarianten ist die Gegenwart des Antibiotikums von Vorteil.

Chuang und Kollegen gaben nun Bakterien beider Sorten in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen in jeweils ein Reagenzglas und ließen sie sich vermehren. In jedem einzelnen Behälter nahm der Anteil der »Guten« (der produzierenden Bakterien) ab – wenig überraschend, denn bei ihnen verzehrte die Produktion des Antibiotikums Ressourcen, die zum Wachstum nicht mehr zur Verfügung standen. Überraschenderweise nahm jedoch ihr Anteil über alle Kulturen zusammengenommen zu – ein typischer Fall von Simpson-Paradox!

Damit kann ein rein mathematischer Sachverhalt – zumindest zum Teil – erklären, dass ein Merkmal zugleich nachteilig für das Individuum und vorteilhaft für die Gruppe sein kann.



Am Anfang eines (fiktiven) Experiments werden gleiche Mengen produzierender (farbig) und nichtproduzierender Bakterien (farblos) in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen auf drei Reagenzgläser verteilt (grüne Felder). Am Ende des Experiments (blaue Felder) hat in jedem Glas der Anteil der Produzenten abgenommen, in der Gesamtsumme jedoch zugenommen; denn die Population im linken Glas hat um den Faktor 4,5 zugelegt, die im mittleren auf das Dreifache und die im rechten nur auf das Anderthalbfache.

POUR LA SCIENCE. ILLUSTRATION: JEAN-PAUL DELAHAYE

Eine solche Einteilung strotzt natürlich vor Willkür. Ein Bösewicht, der auf diesem Weg ein eigentlich positives Ergebnis schlechtreden möchte, hätte sicherlich die größten Schwierigkeiten, für diese Gruppeneinteilung eine plausible Begründung zu finden. Gleichwohl zeigt die schiere Existenz eines solchen Verfahrens, dass das Simpson-Paradox an jeder Ecke lauert. Es lässt sich in jeder Tabelle herbeiführen, deren Dateneinträge nicht zu klein sind.

Argument 2: Es gibt Extremfälle des Paradoxons, die als doppelter Simpson bezeichnet werden (siehe »Der doppelte Simpson«, S. 74). Die Gesamtstatistik sagt ja zum Medikament, die Einteilung in Männer und Frauen sagt nein, die Einteilung nach hellen und dunklen Augen sagt ja, und was sagt die Einteilung nach Geschlecht und Augenfarbe zugleich? Das kann man sich aussuchen! Für diese feinste Einteilung gibt es zwei Datensätze, die beide zu den Zahlen für die minder feinen Einteilungen passen und einander für jede der fein eingeteilten Untergruppen widersprechen.

Bevor Jean-François Colonna vom Zentrum für angewandte Mathematik an der École Polytechnique diese Fälle durch numerische Experimente entdeckte, war der doppelte Simpson unbekannt. Dessen Existenz zeigt definitiv, dass jemand, der absolute Sicherheit haben

möchte, in gewissen Situationen wegen des Paradoxons handlungsunfähig wird.

Aber es gibt einen Trost: Wer ein gewisses Irrtumsrisiko in Kauf zu nehmen bereit ist, wird fast immer zu richtigen Entscheidungen kommen. Jean-François Colonna hat eine gewissermaßen repräsentative Teilmenge aller möglichen Studienergebnisse ausgezählt (siehe »Wie häufig ist das Paradox?«, S. 75, und Bild S. 71) und ist zu dem Ergebnis gekommen, dass das Simpson-Paradox allenfalls in 1,92 Prozent aller Fälle auftritt und der doppelte Simpson noch seltener.

Fazit: Wenn das Simpson-Paradox auftritt, dann ist es nicht wegzudiskutieren. Aber das kommt so selten vor, dass man guten Gewissens riskieren kann, nicht daran zu denken! ◀

QUELLEN

Bracey, G. W.: Simpson's Paradox and other Statistical Mysteries. In: American School Board Journal 2, S. 32–34, 2004

Chuang, J. et al.: Simpson's Paradox in a Synthetic Microbial System. In: Science 323, S. 272–275, 2009

Pearl, J.: Simpson's Paradox: An Anatomy. University of California, Los Angeles, 2011. <http://escholarship.org/uc/item/3s62r0d6>

SciViews

Die besten Wissenschaftsvideos im Netz.



unsplash / Anna Demianenko / CC0

SciViews ist das neue Videoportal von **Spektrum der Wissenschaft**. Hier finden Sie die besten Webvideos rund um Wissenschaftsthemen, ausgewählt von unseren Redakteuren und vorgestellt von Fachjournalisten und Wissenschaftsbloggern.

www.SciViews.de

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Mit den besten Videos unserer nationalen und internationalen Medienpartner:





KULTURKOLLAPPS ENDE MIT SCHRECKEN

Die mächtigen Paläste des mykenischen Griechenlands gingen in Flammen auf, Dörfer wurden verwüstet, ganze Landstriche verödeten. Obwohl die Palastbeamten noch bis zum Schluss ihre Arbeit protokollierten, sind die Gründe des abrupten Untergangs ein Rätsel.



Der promovierte Althistoriker **Josef Fischer** unterrichtet griechische Frühgeschichte an der Universität Passau. Er lebt in Krakau.

► spektrum.de/artikel/1431427



Das Löwentor von Hattuscha, der Hauptstadt des hethitischen Reichs, diente auch der Repräsentation von Macht. Errichtet im 13. Jahrhundert v. Chr., verlor es um 1200 v. Chr. seine Bedeutung, als die Stadt aufgegeben wurde.

Der östliche Mittelmeerraum war in Aufruhr. Die Wirtschaft steckte in einer tiefen Krise, Staaten versanken im Chaos, Regierungen wurden gestürzt, blühende Städte in Schutt und Asche gelegt. Tausende Menschen waren auf der Flucht und suchten ein neues Zuhause. All das klingt vertraut – doch handelt es sich hier nicht um eine Beschreibung der Verhältnisse im heutigen Nahen Osten. Vielmehr ist von einer fundamentalen Krise vor 3200 Jahren die Rede, die als ein Wendepunkt der Weltgeschichte betrachtet werden kann. Neue Forschungen werfen nun mehr Licht auf die Hintergründe dieser epochalen Umwälzungen.

Während der späten Bronzezeit blühte in Griechenland und auf den Inseln der Ägäis die mykenische Hochkultur,

die während der so genannten Palastzeit von 1400 bis 1200 v. Chr. ihre höchste Entfaltung fand. Mächtige Burgen und monumentale Grabmäler kündeten vom Reichtum und Einfluss der frühgriechischen Herrscher. Ein System von Straßen durchzog das Land und bezeugte das Knowhow mykenischer Baumeister, die Trassen und Brücken anlegten, breit genug für Streitwagen und mit Stützmauern sowie Wasserdurchlässen abgesichert. So stammen die drei »Brücken von Arkadiko« aus jener Zeit: Sie verbanden verschiedene Zentren auf dem Peloponnes mit dem Hafen Palea Epidavros. Ihr Können bewiesen die frühen »Ingenieure« auch durch Kanäle und Dämme, mit denen sie ausgedehnte Sümpfe trockenlegten. Dem Koppaisbecken beispielsweise rangen sie damit Anbauflächen

ab, die später wieder unter Wasserlagen, bis französische Ingenieure sie im 19. Jahrhundert trockenlegten und dabei auf die mykenischen Anlagen stießen.

In den Palästen durften Besucher farbenprächtige Wandmalereien und beeindruckende Reliefs wie das Löwentor von Mykene bestaunen, aber auch Elfenbeinschnitzereien und kleinformartige Plastiken aus Ton und Metall. Auf Grundlage zweier zuvor in der minoischen Kultur Kretas entwickelten Schriften – Linear A und eines Hieroglyphensystems – entstand die Silbenschrift Linear B für Verwaltungsvorgänge, zum Beispiel um den Warenbestand in Magazinen zu notieren oder um Personal mit den jeweiligen Aufgaben und Entlohnungen aufzulisten.

Regel Briefwechsel der Diplomaten

In dieser Zeit strahlte die mykenische Kultur über das ganze Mittelmeer aus. Nicht nur Kreta und die Kykladeninseln standen unter ihrem Einfluss; auch auf Rhodos, Kos und in Kleinasien wurden Stützpunkte errichtet. Mit den Völkern des westlichen Mittelmeerraums und Zentraleuropas standen die mykenischen Eliten genauso in engem Kontakt wie mit den Hochkulturen des Nahen Ostens. Schriftquellen und archäologische Befunde belegen beispielsweise Beziehungen zwischen den griechischen Fürsten und dem hethitischen Großkönig, den Regenten an der Levanteküste sowie dem ägyptischen Pharao.

All diese Reiche waren überraschend eng miteinander vernetzt und betrieben einen regen Tauschhandel. Besonders spektakuläre Zeugnisse für dessen Art und Umfang bergen Unterwasserarchäologen aus den Überresten gesunkener Schiffe. So transportierte ein vor mehr als 3300 Jahren vor der heutigen türkischen Südküste, nahe dem Kap Uluburun gesunkener Frachter eine beachtliche Ladung, die offenbar Richtung Norden unterwegs war:

zehn Tonnen Kupferbarren aus Zypern, eine Tonne Zinnbarren wohl aus dem Fernen Osten, 350 Kilogramm blaues Glas aus dem syrisch-palästinensischen Raum, das für Parfüms und Medizin geschätzte Harz des Terebinthenbaums, Gefäße, Waffen und Werkzeuge (siehe Karte S. 82/83). Zudem bargen die Taucher Luxusprodukte wie afrikanisches Ebenholz und Elfenbein, Bernstein vom Baltikum und einen ägyptischen Skarabäus.

Doch jäh endete diese goldene Zeit in einer Katastrophe. In Griechenland gingen Paläste und Siedlungen in Flammen auf, manche Regionen wie die antike Landschaft Messenien wurden regelrecht entvölkert: Im 12. Jahrhundert v. Chr. lebten nur in einem Zehntel seiner Siedlungen noch Menschen. Die Qualität von Produkten wie die von Gebäuden sank. Die Linear-B-Schrift, die ganz auf die Belange der Paläste zugeschnitten gewesen war, geriet in Vergessenheit, und es sollte gut 400 Jahre dauern, bis sie einen Nachfolger fand. Prähistoriker sprechen oft vom »dunklen Zeitalter« Griechenlands, wobei Grabungen der letzten Jahre dieses Bild korrigiert haben.

Die Katastrophe war nicht auf das griechische Festland beschränkt: Zeitgleich zerbrach das Großreich der Hethiter in Anatolien, zahlreiche Kleinreiche der Levante wie das kanaanäische Ugarit fanden ein gewaltsames Ende, und Ägypten konnte nur mit Mühe die Invasion fremder Völker abwehren. Jüngeren Forschungen nach wurde auch Troja an der kleinasiatischen Küste von Gewalt und Zerstörung heimgesucht; ob dies dem Mythos vom Trojanischen Krieg zu Grunde lag, lässt sich allerdings nicht eindeutig sagen.

Viele Erklärungen haben Experten insbesondere für das Ende der mykenischen Paläste vorgeschlagen. Spätestens Anfang des 20. Jahrhunderts hat man es mit Bevölkerungsbewegungen in Verbindung gebracht, die antike Quellen für die Zeit nach dem Trojanischen Krieg überlie-



Militärische Stärke war überlebenswichtig in der späten Bronzezeit. Das spiegelt sich auch im Dekor mykenischer Artefakte. Dieser Krater – ein Gefäß zum Mischen von Wein und Wasser – zeigt eine Gruppe Schwerbewaffneter, die offenbar in den Krieg ziehen, während ihnen eine Frau nachwinkt. Die Keramik stammt aus der Zeit nach dem Untergang der mykenischen Paläste.

fern. Insbesondere dachte man an die Einwanderung des griechischen Stamms der Dorer in den Peloponnes. Einem Mythos zufolge sollte der Halbgott Herakles dort herrschen, doch Zeus' Frau Hera sorgte dafür, dass ein mykenischer König den Thron erhielt und Herakles' Söhne fliehen mussten. In mehreren Kriegszügen setzten sie ihr Anrecht schließlich durch. Zwar legt die Verteilung griechischer Dialekte, wie sie sich aus Texten der Archaik (etwa 750–500 v. Chr.) erschließen lässt, tatsächlich eine Migration dorischer Gruppen nahe, Veränderungen in den Bestattungssitten und im Siedlungsmuster sprechen aber dafür, dass sie erst im 11. Jahrhundert v. Chr. erfolgte. Ohnehin darf man sie sich nicht als waffenstarrenden Ansturm vorstellen, der gut befestigte Burgen überrollen konnte, sondern als Ankommen kleiner Gruppen über Jahrzehnte hinweg.

Alternative Untergangsszenarien: Aufstände und Kleinkriege

Auch Aufstände der Bevölkerung waren als Ursachen des Niedergangs in der Diskussion. Wie Linear-B-Texte vertragen, führten die mykenischen Paläste ein strenges Regiment, verlangten Arbeitsleistungen und Abgaben von »Untertanen« der Fürsten. Unzufriedenheit konnte sich aufgestaut und gewaltsam entladen haben. Allerdings waren die mykenischen Paläste nach der Ansicht der meisten Experten unabhängige politische Einheiten, nahezu gleichzeitige Revolten erscheinen aber wenig plausibel. Doch auch wenn soziale Spannungen nicht die unmittelbaren Auslöser der Zerstörungen gewesen waren, haben sie das alte System vielleicht geschwächt.

Auch zwischen den einzelnen mykenischen Staaten gab es möglicherweise Spannungen, verschiedene Mythen lassen darauf schließen. Dazu gehören insbesondere die Sagen »Sieben gegen Theben« und der »Zug der Epigonen«: Eteokles und Polyneikes, die Söhne des thebanischen Königs Ödipus, sollen einst vereinbart haben, sich in der Herrschaft jährlich abzuwechseln. Aber Eteokles trat nicht ab, sondern vertrieb seinen Bruder. Dieser floh nach Argos und heiratete dort die Tochter des Königs Adrastos. Mit Hilfe seines Schwiegervaters und fünf anderer Fürsten versuchte er, die Macht in seiner Heimatstadt an sich zu reißen. Doch in der Schlacht kamen fast alle um; Eteokles und Polyneikes töteten sich gegenseitig. Zehn Jahre später hatten die Söhne der Sieben, die so genannten Epigonen, mehr Erfolg. Freilich können auch solche innermykenischen Kriege den Untergang aller Kleinstaaten binnen kürzester Zeit nicht zufrieden stellend erklären.

Die Palastverwaltungen funktionierten wohl bis zum Schluss. Jedenfalls notierten ihre Beamten noch im Jahr der Zerstörung Warenein- und -ausgänge. Allerdings fehlen sonst übliche Aufzeichnungen etwa zur Schafschur – das Verwaltungsjahr war wohl noch nicht weit fortgeschritten. Der britische Mykenologe John Chadwick (1920–1998) vermutete für Pylos eine Zerstörung im Frühjahr. Sicher ist nur, dass die griechische Palastkultur ein abruptes Ende fand.

Allerdings hatte es Vorzeichen gegeben, wie Archäologen bei Grabungen entdeckten: So brannten einige Jahr-

AUF EINEN BLICK DER RÄTSELHAFTE UNTERGANG

- 1** Um 1200 v. Chr. brannten die mykenischen Paläste, das hethitische Großreich zerbrach, diverse Kleinstaaten in Kleinasien und an der Levanteküste wurden vernichtet.
- 2** Seit dem 19. Jahrhundert machen Forscher kriegerische »Seevölker« für das gewaltsame Ende der Bronzezeit verantwortlich. Bis jetzt gelang es aber niemandem, diese eindeutig zu identifizieren.
- 3** Mögliche weitere Ursachen der Krise könnten Erdbeben und eine Dürreperiode gewesen sein. Vermutlich lässt sich der Kulturkollaps im östlichen Mittelmeerraum nicht an einer einzelnen Ursache festmachen.

zehnte zuvor, um die Mitte des 13. Jahrhunderts v. Chr., etliche außerhalb der Zitadelle von Mykene liegende, aber dennoch zum Palast gehörige Gebäude. Auch in der Unterburg von Tiryns sowie im Palast von Theben wurden Beschädigungen nachgewiesen.

Was immer geschehen war, die Herrschenden reagierten rasch. Die Akropolis von Athen erhielt eine massive Befestigungsmauer. Mykenes Fürst ließ seine Anlagen erweitern und integrierte dabei zuvor ungeschützte Bereiche in die Burg. Auch der nach seinen Reliefs als Löwentor bekannte monumentale Zugang entstand nun – er war besser zu verteidigen. Der als Unterburg bezeichnete Bereich von Tiryns verschwand ebenfalls hinter gewaltigen Verteidigungsmauern, was das gesicherte Areal beträchtlich erweiterte und obendrein Platz für Lager, Werkstätten und Verwaltungsgebäude schuf. Allenthalben schlug man Gänge und Schächte in den Fels, um Quellen zu erschließen und so die Wasserversorgung der Paläste sicherzustellen.

All diese Baumaßnahmen dienten dem Schutz und der Verteidigung der Herrschersitze, deren Belagerung offenbar befürchtet wurde. Dieses erhöhte Sicherheitsbedürfnis spiegelt möglicherweise auch eine »zyklopische Mauer« – die verbauten Steinblöcke waren so gewaltig, dass spätere Generationen sie als Werk von einäugigen Riesen betrachteten – am Isthmos von Korinth wider, dem einzigen Landzugang vom griechischen Festland auf den Peloponnes. Der amerikanische Archäologe Oscar Broneer hat einige Abschnitte der Anlage vor mehreren Jahrzehnten entdeckt. Keramikreste sprechen für eine Entstehung in mykenischer Zeit. In den noch erhaltenen Abschnitten war die Mauer zwischen 4 und 5,7 Metern dick, an einer Stelle erreicht die Ruine eine Höhe von 2,5 Metern. Dass dieses Bauwerk der Verteidigung diente, ist der plausibelste Schluss.

Unsicherheit und Angst herrschten wohl auch auf Kreta. Ende des 13. Jahrhunderts v. Chr. waren die Küsten großenteils menschenleer, die Einwohner hatten sich in oft stark befestigte Siedlungen im Gebirge zurückgezogen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE BRÄUK

Die Großmächte der Epoche

- Mykener
- Hethiter
- Assyrer
- Babylonier
- Ägypter

mögliche Herkunft einiger Stämme der »Seevölker«

- 1 Lukka
- 2 Schekelesch
- 3 Schardana
- 4 Tjeker
- 5 Weschesch
- 6 Teresch
- 7 Denyen / Ekwesch
- 8 Peleset

Handelsrouten

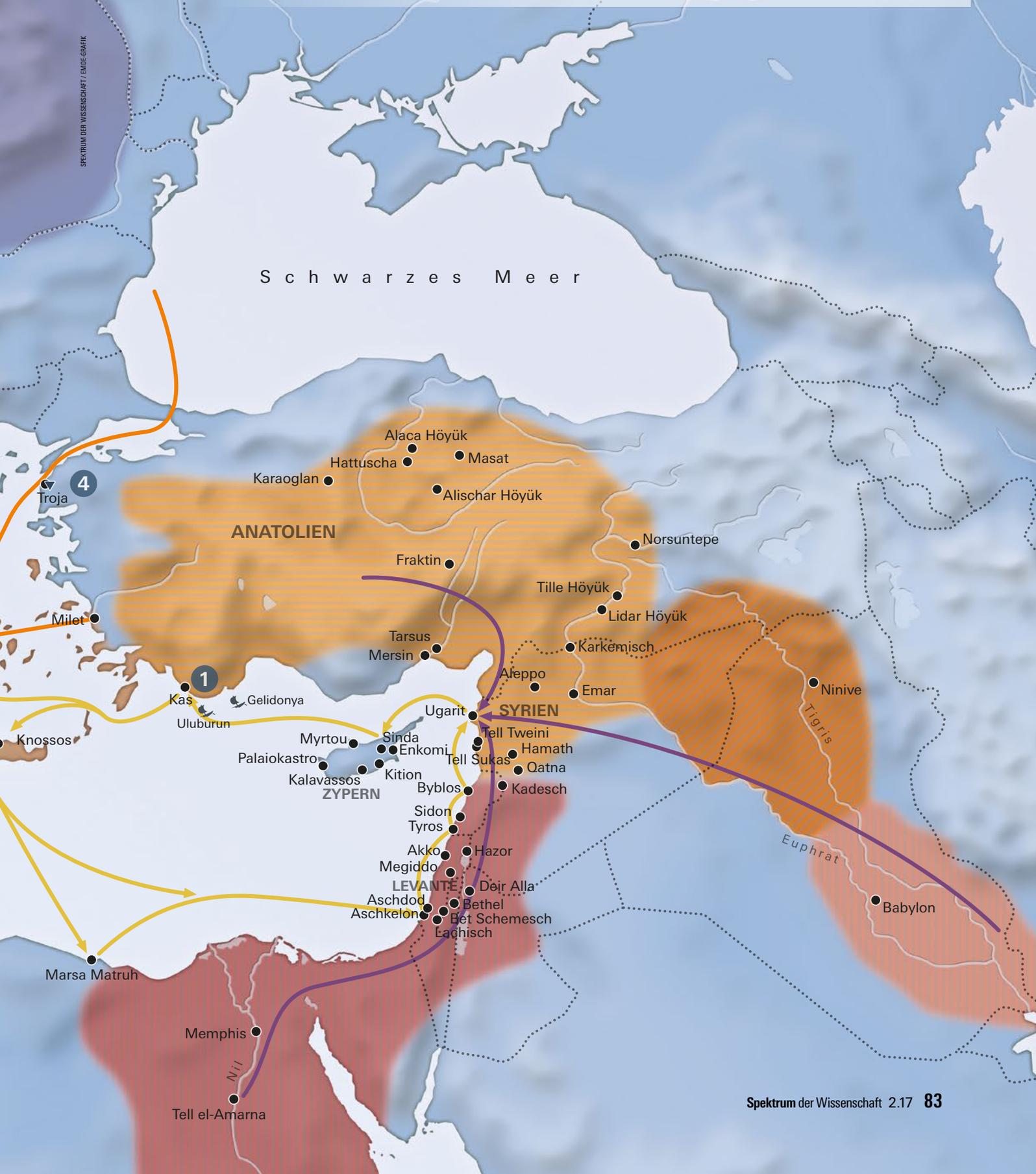
- Seeroute
- Landroute
- mögliche Routen der Handelsschiffe von Ugarit

Urnenfelderkultur

- Verbreitungsgebiet
- Fundort Urnenfeld
- Schiffswrack
- wichtige Fundorte
- heutige Landesgrenze

Der Mittelmeerraum um 1200 v. Chr.

In der späten Bronzezeit florierte der Fernhandel, und die Großmächte der Epoche waren wirtschaftlich und politisch eng miteinander verbunden. Das jähe Ende dieser Zeit des Wohlstands gibt nach wie vor Rätsel auf.



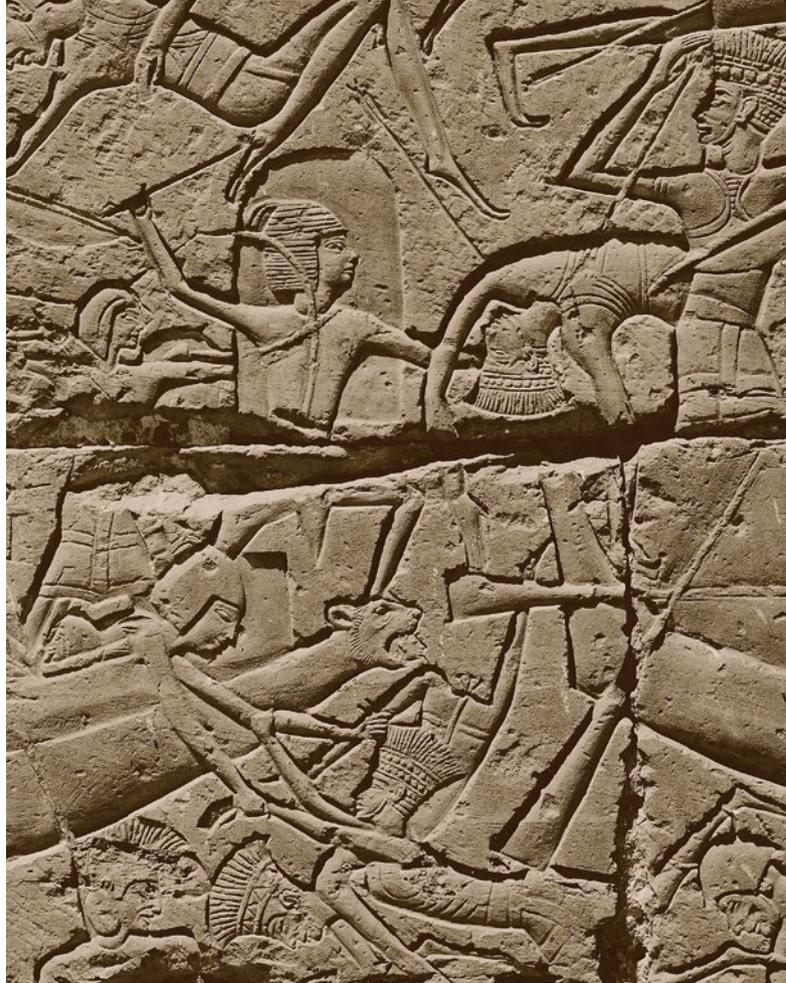
Steile Felsen und entlegene Berggipfel boten Schutz vor einem Feind, den man vom Meer her erwartete. Hinweise auf eine solche Bedrohung finden sich auch in Linear-B-Texten aus Pylos, die über die Aufstellung einer Truppe berichten, deren Aufgabe es war, die Küsten zu bewachen. Ob dies routinemäßig oder als Notmaßnahme in einer Bedrohungslage angeordnet wurde, vermag niemand zu sagen. In ihrer Summe aber deuten all diese archäologischen und epigrafischen Indizien darauf hin, dass die Paläste der Ägäis mit einer Invasion von See her rechneten.

Etwa zur gleichen Zeit zerbrach auch das Großreich der Hethiter. Auf der Liste möglicher Ursachen stehen Machtkämpfe um den Thron sowie nach Unabhängigkeit strebende Teilreiche, wirtschaftliche Schwierigkeiten und Angriffe beispielsweise durch die nomadisch lebenden Kaschkäer. Die archäologischen Befunde sprechen aber dafür, dass Tempel und Verwaltungsgebäude der Hauptstadt Hattuscha bewusst aufgegeben wurden. König Suppiluliuma II. (regierte 1215–1190 v. Chr.) ließ seine Residenz aus heute ungeklärten Gründen an einen unbekanntem Ort verlegen. Die Gebäude verfielen, zuvor heilige Stätten dienten als Werkstätten und Wohnbereiche. Erst Anfang des 12. Jahrhunderts v. Chr. wurde Hattuscha gewaltsam zerstört und blieb bis in das 11. Jahrhundert v. Chr. unbewohnt.

Der diplomatischen Korrespondenz zwischen Suppiluliuma II. und seinem »Amtskollegen« Pharao Merenptah zufolge litt das hethitische Reich unter einer schrecklichen Hungersnot. Der Ägypter versprach Getreidelieferungen. Einem Briefwechsel mit dem Vasallenstaat Ugarit lässt sich zudem entnehmen, dass die hethitische Armee vor der Insel Zypern in Kämpfe verwickelt war; Ugarit fiel kurz nach 1190 v. Chr.

»Leute von Inseln inmitten des Meeres«

Die Angreifer nannte der Ägyptologe Gaston Maspero (1846–1916) Seevölker, in Anlehnung an einen Text Ramses' III. (regierte 1186–1155 v. Chr.) über »Leute von Inseln inmitten des Meeres«. Der Pharao will diesen Einhalt geboten haben; er listete die Namen der besiegten Völker auf einem Relief seines Totentempels Medinet Habu auf: Peleset, Tjeker, Schekelesch, Denyen und Weschesch. Im selben Text machte er sie für den Untergang des Hethiterreichs sowie der Kleinkönigreiche Karkemish, Arzawa und Zypern verantwortlich. Über Angriffe der Schekelesch berichtete bereits Pharao Merenptah (regierte 1213–1203 v. Chr.), ebenso über Überfälle der Schardana, Ekwesch, Teresch und Lukka.



ANG IMAGES / FERICH LESSING

Schon im 19. Jahrhundert wurden diese Ethnonyme mit aus anderen Quellen bekannten antiken Völkernamen gleichgesetzt. Während es keinen Zweifel an der Identifikation der Peleset mit den biblischen Philistern gibt, sind alle anderen Zuweisungen ebenso wie die ihnen zugeschriebenen Attacken mehr oder weniger umstritten. Die Schardana und die Schekelesch verorteten Historiker auf Sardinien beziehungsweise Sizilien, die Lukka in die kleinasiatische Landschaft Lykien; diese drei Identifikationen gelten als recht sicher. Die Tjeker wurden als die ursprünglich in der Troas beheimateten Teukrer angesehen, die Teresch als Tyrrhener beziehungsweise Etrusker; die Weschesch könnten ebenfalls aus Italien stammende Osker gewesen sein. Und als Denyen beziehungsweise Danuna erkannte Philologen die Danaer, hinter den Ekwesch beziehungsweise Aqaiwascha dann die Achaier – beides schon von Homer verwendete Bezeichnungen für Festlandgriechen des mykenischen Raums.

Falls diese Vermutungen zutreffen, müsste der Ursprung der Seevölker in Italien zu finden sein; in Griechenland hätten sich ihnen dann Einheimische angeschlossen. Tatsächlich belegen archäologische Funde intensive Kontakte zwischen dem italischen und dem hellenischen Raum. So kam frühmykenische Keramik auf den Liparischen Inseln in Siedlungen des 16. und 15. Jahrhunderts v. Chr. zum Vorschein. In der Palastzeit wurde dieser Export nach Westen intensiviert, obendrein begann man in Italien im mykenischen Stil zu produzieren. Ab der Mitte des 13. Jahrhunderts v. Chr. gelangten auch umgekehrt italische Keramik, Geräte und Waffen nach Griechenland, Produkte im italischen und mitteleuropäischen Stil wurden



FRAUKE FÖCKE

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema alte Hochkulturen finden Sie unter [spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit](https://www.spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit)



AGE IMAGES / FERDICH LESSING

Ganze Heerscharen von Kriegeren seien gegen Ägypten gezogen, nachdem sie bereits große und kleine Königreiche vernichtet hatten. Doch den Streitmächten des Nilstaats mussten sie sich geschlagen geben. So berichtete es jedenfalls Ramses III. Reliefs an seinem Totentempel in Medinet Habu zeigen den Herrscher in der Schlacht, unerbittlich Feind auf Feind niederstreckend. Sind diese Bilder reine Propaganda oder stellen sie wahre Ereignisse dar?

dort hergestellt. Experten gehen aber davon aus, dass diese Artefakte und Techniken nicht im Zuge eines Fernhandels importiert, sondern mitgebracht wurden. Allerdings geschah dies bereits vor dem Fall der mykenischen Paläste, es kann also keinesfalls als ein Beleg dafür gelten, dass Heere aus dem italischen Raum stammender Invasoren die frühgriechische Welt überfallen und in Flammen gesetzt hätten.

War der Kulturkollaps Folge einer Wirtschaftskrise?

In letzter Zeit melden sich ohnehin kritische Stimmen gegen die These »Die Seevölker haben allein jahrhundertlang stabile Reiche zerstört«. So verwies Eric Cline, Archäologe an der George Washington University in New York und Experte für die Bronzezeit im Ostmittelmeerraum, in einer Publikation 2014 auf eine offenbar kritische wirtschaftliche Lage. Anscheinend waren Handelswege und insbesondere die Versorgung mit Metallen gefährdet. Die Linear-B-Texte verzeichneten für die letzten Wochen und Monate vor dem Untergang nur wenige Kilogramm Bronze, also relativ geringe Mengen, die an die mit dem Palast verbundenen Schmiede verteilt wurden. Eine Tontafel aus Pylos registriert, dass infolge dieser Rohstoffknappheit sogar Bronze aus Tempeln – vermutlich Weihegaben wie Gefäße – zu Waffen verarbeitet wurde.

Nach Ansicht etwa des griechischen Archäologen Spyros Iakovidis (1923–2013), der die Grabungen in Mykene über 50 Jahre hinweg leitete, und des deutschen Prähistorikers Joseph Maran von der Universität Heidelberg, Grabungsleiter in Tiryns, haben gewaltige Erdbeben die Kata-

strophe um 1200 v. Chr. herbeigeführt. Der gesamte Ostmittelmeerraum ist stark gefährdet, wie schwere Beben zuletzt im Mai 2014 in Griechenland und der Türkei zeigten, denn dort stoßen gleich drei tektonische Platten aneinander – die Eurasische, die Afrikanische und die Arabische. Einige griechische Fundstellen zeigen eindeutig Beschädigungen durch Erdstöße, so etwa Mykene, Tiryns und Midea. Im heute syrischen Lachisch wurden sogar Skelette mehrerer Personen geborgen, die von herabfallenden Steinen erschlagen worden waren. Die gesamte Region könnte zwischen 1230 und 1170 v. Chr. von einem regelrechten Erdbebensturm heimgesucht worden sein.

Allerdings zeigt die Geschichte zumindest der ägäischen Kulturen, dass sich dergleichen schon früher ereignet hatte, etwa am Übergang von der minoischen Altpalastzeit zur Neupalastzeit. Doch stets wurden die Paläste wiederaufgebaut. Weshalb also kollabierte diesmal das gesamte politische System, noch dazu in Griechenland, Kleinasien und im Vorderen Orient?

Paläoklimatologische Forschungen zeigen, dass auch Klimaveränderungen ihren Teil beigetragen haben könnten. Wie David Kaniewski von der Universität Toulouse und sein belgisch-französisches Forscherteam anhand von Bohrkernen aus Seesedimenten Zyperns und Syriens nachweisen konnten, kam es seinerzeit im Ostmittelmeerraum infolge einer globalen Abkühlung zu signifikant geringeren Niederschlägen über einen längeren Zeitraum.

Die Bedingungen für den Regenfeldbau verschlechterten sich also zusehends, Ernteausfälle waren die Folge. So lassen Pflanzenresten aus dem Palast von Tiryns eine Agrarkrise im 13. Jahrhundert v. Chr. vermuten: Die Getreidekörner wurden kleiner, und Unkräuter gediehen auf den Feldern, was laut dem Kieler Archäobotaniker Helmut Kroll Missernten nahelegt. In der Folge ließ man den Ackerböden keine Zeit sich zu erholen – ein Teufelskreis.

Die Trockenheit reduzierte auch die Erträge aus der Viehzucht. Die Archäozoologin Cornelia Becker von der Freien Universität Berlin wies anhand von Tierknochen aus dem makedonischen Kastanas nach, dass Rinder, Schafe und Ziegen in der Spätbronzezeit kleiner waren als zuvor, was sich wohl auf schlechtere Nahrungs- und Futterbedingungen zurückführen lässt.

Haben also klimatische Veränderungen und die damit verbundenen Probleme in der Landwirtschaft den Niedergang der bronzezeitlichen Kulturen ausgelöst? Waren die aggressiven Seevölker in Wahrheit Migranten, die vor dem Hungertod in die Fremde flohen? Eindeutig zu entscheiden ist diese Frage nicht, doch gilt es inzwischen als unwahrscheinlich, dass eine einzelne Ursache das Ende einer Ära auslöste. Vielmehr lassen die neuen Forschungen ein ganzes Bündel von Faktoren erkennen, deren Zusammenspiel das komplexe System der eng miteinander verknüpften Reiche im Ostmittelmeerraum kollabieren ließ. ◀

QUELLE

Hattler, C. et al. (Hg.): Zeit der Helden. Die »dunklen Jahrhunderte« Griechenlands 1200–700 v. Chr. Katalog zur Ausstellung im Badischen Landesmuseum Karlsruhe 25. 10. 2008–15. 2. 2009. Primus, Darmstadt 2008

REZENSIONEN



NATIONAL HISTORY MUSEUM LONDON. AUS JUDITH MAGEE: MEISTERWERKE DER NATURGESCHICHTE. MIT FRIEDRICH GENÉ: DES HAUPT-VERLAGS. BERN



Der polnische Jesuit Michael Piotr Boym (1612–1659) hielt sich 1644 in Mosambik auf und hat dort höchstwahrscheinlich Flusspferde gesehen. Warum er sie in der »Flora Sinensis« abbildete, also in China verortete, ist unklar.

WISSENSCHAFTS- GESCHICHTE KUNSTVOLL UND LEBENSECHT

Das Natural History Museum in London stellt 31 bedeutende naturgeschichtliche Werke und ihre Urheber vor.



Judith Magee
**MEISTERWERKE
DER NATURGESCHICHTE**

Aus dem Englischen
von Coralie Wink
und Monika Niehaus
Haupt, Bern 2016
224 S., € 59,-

Um 77 n. Chr. verfasste Plinius der Ältere die Enzyklopädie »Naturalis historia«. Sie war dermaßen bedeutsam, dass sie fast anderthalbtausend Jahre später als erstes naturkundliches Buch mit der neuen Technik des Buchdrucks verlegt wurde. Das Natural History Museum in London besitzt eines der ersten Druckexemplare aus dem Jahr 1469 und stellt es – neben 30 weiteren wissenschaftsgeschichtlich relevanten Arbeiten aus seinem Bibliotheksfundus – in diesem Bildband vor.

Das Buch befasst sich vor allem mit den fachlich beachtenswerten oder auch

künstlerisch wertvollen Illustrationen dieser historischen Werke. Die Originale wurden oft von Hand koloriert und teils mit Blattgold verziert. Manche Zeichnungen sind so naturgetreu, dass sie heute noch wissenschaftliche Gültigkeit besitzen. Andere präsentieren sich eher stilisiert, beispielsweise die anthropomorphe Darstellung eines Flusspferds.

Herausgeberin ist Judith Magee, Leiterin der Spezialsammlungen in den Museumsbibliotheken und -archiven. 13 weitere Autoren, hauptsächlich Museumsmitarbeiter, haben an den begleitenden Texten gearbeitet. Verständlich und zugleich unterhaltsam umreißen sie, unter welchen Umständen das jeweilige Werk entstanden ist und was man über seinen Urheber weiß. Dabei ist interessant zu sehen, wie sehr sich die Vorstellungen davon, was wissenschaftliches Arbeiten sei, vom 15. bis zum 19. Jahrhundert verändert haben. In diesem Zeitraum sind die behandelten Werke erschienen.

Man erblickt unter anderem exotische Tiere und Pflanzen, erste Mikroskopiezeichnungen, aber auch Darstellungen von Vulkanausbrüchen und anderen Geophänomenen. 36 Sonderdrucke, die dem Buch beiliegen, zeigen die schönsten Illustrationen noch einmal in großem Format (26 mal 33 Zentimeter) und besonders hoher Qualität. Bildband und Prints kommen in einer Schmuckbox, die sich zum Verschenken eignet.

Miriam Plappert ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Tübingen.

NATIONAL HISTORY MUSEUM LONDON. AUS JUDITH MAGEE: MEISTERWERKE DER NATURGESCHICHTE. MIT FRIEDL. GEN. DES HAUPTVERLAGS, BERN

LINGUISTIK MIT HEISSER NADEL GESTRICKT

Publizist Daniel Scholten schreibt über Indogermanisch und vieles andere, kann aber nicht voll überzeugen.

Der Dichter Hans Magnus Enzensberger soll gesagt haben, Linguisten seien Leute, die das Weltgeschehen aus dem Satz »Hänschen fährt Fahrrad« herleiten können. Falls der Ausspruch authentisch ist, nimmt er etwas aufs Korn, das bei Sprachenthusiasten tatsächlich nicht selten vorkommt: das Bestreben nämlich, einen Rundumschlag à la »Alles, was ich zum Thema Sprache längst einmal loswerden wollte« zu publizieren.

Das ist durchaus nicht ehrenrührig – insbesondere, wenn man fachkundig ist. Daniel Scholten, Publizist und Krimiautor, kann denn



auch mit einem Studium der Historischen Sprachwissenschaft, Deutschen Linguistik und Ägyptologie aufwarten. Zudem betreibt er einen Podcast über die Grammatik und Stilistik des Deutschen. In seinem neuen Buch »Denksport Deutsch« beschäftigt er sich mit unterschiedlichsten

Themen. Er behandelt die Entstehung der grammatischen Geschlechter und taucht dabei tief in die indogermanische Vergangenheit ein. Er befasst sich mit gutem deutschen Stil und spricht dabei den Dativ von der Anschuldigung des Genetivmords frei. Er verarztet den deutschen Konjunktiv und nimmt die journalistische Zitierpraxis aufs Korn – und er bläst den angeblich kurz bevorstehenden Untergang des Deutschen ab. Das liest sich alles recht nett und munter, informativ ist es obendrein, und man kann es ganz nach Gusto in kleinen Häppchen genießen. Genau darin liegt aber auch das Problem.

Zunächst lässt das Werk einen roten Faden vermissen. Soll es nun um sprachliche Fossilien im Deutschen gehen oder um die korrekte Verwendung des Konjunktivs? Sprachgeschichte oder zeitgenössische Sprachnorm? Man kann natürlich fragen,

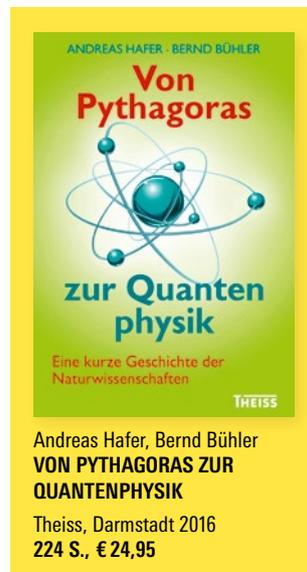
wieso nicht beides zwischen die Buchdeckel passen sollte. Leider aber klärt der Autor das Verhältnis zwischen beiden Sichten nicht, was zu unaufgelösten Widersprüchen führt. Einerseits kanzelt er die Bastian Sicks dieser Welt ab, weil sie sich anmaßen, die Muttersprachenkompetenz ihrer Mitmenschen anzuzweifeln. Andererseits konstatiert er wenig später: »Wer etwas erinnert (statt jemanden oder sich an etwas), spricht (...) einfach nur falsch.« Ja, was denn nun?

An solchen Stellen zeigt sich, dass der Band aus dem Geist eines Blogs heraus entstanden ist. Er wirkt über weite Strecken wie eine Sammlung von Einträgen, die eher lose um ein Thema herum gruppiert wurden – und deren Umfang wie Argumentationstiefe davon abhängen, was den Autor spontan interessiert oder geärgert hat. Dabei kam es prompt zu einigen Schludrigkeiten.

GESCHICHTE WISSENSCHAFTSHISTORIE IM ABRISS

Ein Überblick über 2500 Jahre Naturforschung.

Die Autoren erzählen die Geschichte der Naturwissenschaften und der Naturphilosophie in den zurückliegenden 2500 Jahren. Große Rätsel wie die Bewegungen der Planeten, über gewaltige Entfernungen wirkende Kräfte und die Effekte elektrischer Ladungen haben die Menschen schon immer nach Erklärungen suchen lassen. Diese Suche schildert das Buch kompakt, kurzweilig und entlang eines roten Fadens. Die



Autoren, beide Lehrer für naturwissenschaftliche Fächer, stellen berühmte Forscher in den Mittelpunkt ihrer Schilderungen, beispielsweise Aristoteles, Isaac Newton und Charles Darwin. Sie beleuchten deren Lebensgeschichten und erläutern dabei, wie bestehendes Wissen und neue Ideen gemeinsam in Erkenntnisfortschritt mündeten. Häufig waren die Wissenschaftler ihrer Zeit weit voraus und wurden zunächst verkannt. Immer wieder mussten sie mit bisher Gedachtem brechen, um Erklärungsstaus aufzulösen – und immer wieder gab es dabei, aus heutiger Sicht, kuriose Fehlinterpretationen. All dies gehört zur spannenden Geschichte der Naturwissenschaft und -philosophie, wie das Buch verständlich darlegt. Jürgen Scharberth

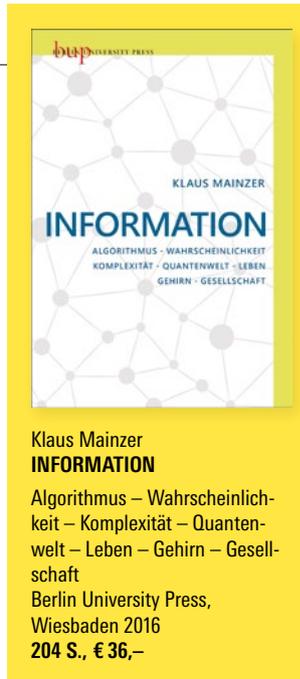
»Die Sache« heißt auf italienisch »la cosa« und nicht »il cosa«. Kausative werden im *Urindogermanischen* mit o- und nicht mit a-Vokalismus gebildet. Das »a« ist die *urgermanische* Vertretung des »o« (der Autor formuliert das zumindest missverständlich).

Manchmal geraten Scholtens Aussagen zu vollmundig. Unbestreitbar: Die Entschlüsselung des Hethitischen war von immenser Bedeutung für die indogermanische Sprachwissenschaft. Aber dass sie »alle großen Gewissheiten über das Urindogermanische gefällt« habe, ist deutlich übertrieben – das wäre ja auch ein Armutszeugnis für eine oft glänzend bewährte Methodik. Und Scholtens Behauptung, keine einzige indogermanische Sprache konstruiere eine Präposition mit dem Genetiv, ist nicht bloß übertrieben, sondern bereits falsch. Altgriechisch hat mehr als ein Dutzend Präpositionen, die auch oder sogar nur mit dem Genetiv konstruiert werden.

»Indoeuropäisch« zu sagen statt »indogermanisch«, ist hingegen nicht falsch, wie Scholtens behauptet. Es ist schlicht eine Anpassung an internationale Gepflogenheiten. Eine solche Umbenennung ist vielleicht nicht verkehrt angesichts der unrühmlichen Rolle, die die Indogermanistik im Dritten Reich gespielt hat. Darum liest man Ausführungen, in denen Scholtens den Erfolg des Indogermanischen auf ein »survival of the fittest« zurückführt, mit Befremden und Unbehagen. Zumal er damit auf eine Frage antwortet, die sich gar nicht stellt. Von den indogermanischen Sprachen genießen heute vor allem das Englische und das Spanische weltweite Verbreitung, und zwar infolge historischer Gegebenheiten. Dass beide Sprachen indogermanisch sind, ist in diesem Zusammenhang ganz unerheblich. Man wünscht sich, ein Lektor hätte eingegriffen und darauf aufmerksam gemacht, dass manche Leser solche Darstellungen in den gänzlich falschen Hals bekommen können.

Insgesamt kann man Lesern, die ein solches Werk zu erwerben bereit sind, mehr Differenzierung zumuten. Natürlich möchten sie unterhalten werden und kann das Buch daher keine wissenschaftliche Abhandlung sein. Selbstverständlich ist das Zusammentragen von Literaturangaben und Überprüfen von Zitaten eine nervtötende Angelegenheit. Trotzdem erscheint es als nicht so ganz die feine Art, auf weiterführende Literaturangaben komplett zu verzichten mit dem Hinweis, die »Literatur der historischen Sprachwissenschaft ist ohne Fachstudium nicht zugänglich«. Für so unbedarft sollte man seine Leser nicht halten – und die Fachkollegen nicht durchweg für so unfähig, sich verständlich auszudrücken. Es bleibt der Eindruck, dass der Autor hier mit allzu heißer Nadel gestrickt und das Potenzial für ein vernünftiges und instruktives Buch verschenkt hat. Schade.

Vera Binder hat Sprachwissenschaft und Philologie in Tübingen studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.



Klaus Mainzer
INFORMATION

Algorithmus – Wahrscheinlichkeit – Komplexität – Quantenwelt – Leben – Gehirn – Gesellschaft
Berlin University Press,
Wiesbaden 2016
204 S., € 36,-

KOMPLEXITÄTS- FORSCHUNG EIN BUCH ÜBER ALLES

Dieses Werk beleuchtet den Informationsbegriff von vielen Seiten und lässt dabei kaum einen modernen Wissensbereich unerwähnt.

► Klaus Mainzer ist Philosoph und Wissenschaftstheoretiker mit dem Schwerpunkt Komplexitätsforschung. Zwischen unterschiedlichen Forschungsbereichen stellt er Zusammenhänge her, die sich offenbaren, sobald man ihren inneren Aufbau, Struktur oder Organisationsform analysiert und miteinander vergleicht. In mehreren Büchern hat Mainzer so gleichsam Aufrisse des Wissenschaftsgebäudes skizziert – von den Grundlagen der Quantenphysik über biologische Systeme bis zu gesellschaftlichen Strukturen.

So geschehen beispielsweise in Mainzers Werk »Der kreative Zufall« (2007). Aus ihm geht hervor, dass die Quantenmechanik eine Theorie ist, die nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Aussagen über das Ergebnis eines Experiments trifft; dass winzige Zufallsschwankungen in der Nichtgleichgewichtsthermodynamik auf unvorhersehbare Weise spontane Ordnung erzeugen; dass der Zufall im Gehirn wie in der Wirtschaft eine wesentliche Rolle spielt.

Im vorliegenden Buch versucht Mainzer das Gleiche anhand des Informationsbegriffs. Er stellt mathematische, wahrheits- und komplexitätstheoretische Definitionen der Information vor. Daran verdeutlicht er, dass es wenig sinnvoll ist, den Begriff salopp zu gebrauchen, als wüsste man von vornherein, was mit dem abgenutzten Modewort gemeint ist. Dann geht die Reise auf der Komplexitätsskala aufwärts zu immer komplizierteren Systemen – von Quantenexperimenten über die DNA-Sequenz und die neuronale Informationsverarbeitung bis hin zu Internet und Big Data.

Erstaunlich, was der Autor da alles auf relativ engen Raum packt. Das meiste ist informativ und erhellend; Infokästen organisieren den oft nicht leichten Stoff. Kurzum: Man liest mit Gewinn. Das Buch ist ein Zwischending zwischen populärer Darstellung des Wissensstands und anspruchsvollem Fachbuch. So lässt es sich gut als Wegweiser zur Orientierung nutzen, mit

REZENSIONEN

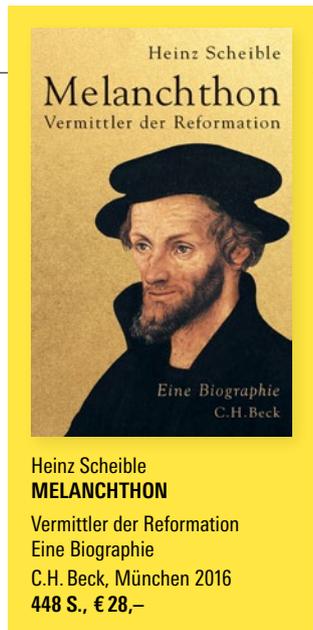
dem man, falls gewünscht, anhand des Literaturverzeichnis hier und da in die Tiefe gehen kann.

Sehr unbefriedigend ist allerdings die spartanische Bebilderung, die meist aus Mainzers früheren Büchern übernommen wurde. Abbildung 7 illustriert die

Bénard-Zellen mit dreieckigen Pfeilspitzen, die überallhin weisen könnten. Abbildung 16 kopiert eine Tabelle aus Mainzers Buch über den Zufall unvollständig, so dass das NICHT-Gatter keinen Sinn ergibt. Wirklich ärgerlich ist Abbildung 10. Sie soll eine

komplexitätstheoretische Entdeckung verdeutlichen, die Mainzer mit Koautor Leon Chua 2013 publiziert hat: Zur spontanen Strukturbildung sind stets so genannte lokal aktive Zentren unerlässlich, während Koryphäen wie der Physikochemiker Ilja Prigogine (1917–2003) und der Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) noch glaubten, ein System müsse sich bloß nichtlinear verhalten, um Strukturen hervorbringen zu können. Doch just jene, im Original vermutlich farbige, Abbildung, welche die originellste Aussage des ganzen Buchs erklären soll, ist dermaßen brutal verkleinert und grau abgedruckt, dass der neugierige Leser partout nichts erkennen kann. Schade!

Michael Springer ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von **Spektrum** der Wissenschaft.



Heinz Scheible
MELANCHTHON
Vermittler der Reformation
Eine Biographie
C.H. Beck, München 2016
448 S., € 28,-

Gründer und langjähriger Leiter der Melanchthon-Forschungsstelle der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, hat nun eine überarbeitete und erweiterte Neuauflage seiner Melanchthon-Biografie von 1997 vorgelegt.

Gestützt auf solide Quellenkenntnis gibt Scheible einen faktenreichen Abriss der (Religions-)Geschichte des 16. Jahrhunderts und beleuchtet die Rolle, die sein Protagonist damals spielte. Gut nachvollziehbar arbeitet er die wichtigsten Stationen im Leben Melanchthons heraus: dessen Wirken als Gelehrter, Reformator und »Diplomat des Glaubens«. Dabei entsteht eine lesenswerte Darstellung, die Melanchthon einerseits als Mann seiner Zeit präsentiert, andererseits aber auch seine zukunftsweisenden Leistungen hervorhebt.

Scheible zufolge war Melanchthon beileibe nicht der profillose Kompromissler, als der er oft dargestellt wird, sondern durchaus ein harter Verhandlungspartner, der eigene Impulse setzte. Bei wichtigen Religionsgesprächen agierte er aller-

VETERINÄRMEDIZIN TIERISCHE PATIENTEN

Was Tierärzte in Zoos so erleben.



Christian Wenker,
Stefan Hoby und Tanja Dietrich
DAS OKAPI HAT HUSTEN
Geschichten aus dem Alltag
eines Zootierarztes
Fotos von Torben Weber
Christoph Merian, Basel 2016
231 S., € 28,-

Die Basler Zootierärzte Christian Wenker und Stefan Hoby erzählen 58 Anekdoten aus ihrem Arbeitsalltag. Ihre Kurzgeschichten, die sich in neun Themengebiete untergliedern, handeln unter anderem von den Leiden eines Graumullkönigs, der Wurmkur von Zwergotterbabys oder einem Stein im Elefantenrüssel. Schnell wird klar, wie abwechslungsreich der Beruf des Zootierarztes ist. Die Autoren befassen sich nicht nur mit Krankheiten und Unfällen zahlrei-

cher Tiere, sondern auch damit, wie diese sich transportieren, erforschen und artgerecht pflegen lassen. Besonders kuriose Storys finden sich im Teil »Schlameier und Schurken«. Jede Minigeschichte ist mit gelungenen Fotos des Tierpflegers Torben Weber bebildert, allerdings stört deren Platzierung an den Kapitelenden. Zudem geraten die Anekdoten etwas zu knapp: Gern würde man mehr über die tierischen Protagonisten erfahren. Was haben diese bereits erlebt? Welche Charakterzüge prägen ihr Verhalten? Wie gehen sie mit ihren Gesundheitsproblemen um? Diese Fragen bleiben leider oft unbeantwortet. Dennoch lässt sich das Buch zoo- und tierbegeisterten jungen Lesern empfehlen. Michaela Maya-Mrschtik

REFORMATION IN LUTHERS SCHATTEN

Dass Philipp Melanchthon ein überaus wichtiger Reformator war, wird leider oft übersehen.

Das Reformationsjubiläum 2017 naht, und allzu oft gerät dabei außer Acht, dass die Reformation außer Luther noch andere geistige Väter hatte. Einer von ihnen, der lange Zeit im Schatten des Wittenberger Augustinermonchs stand, war der Philologe, Philosoph, Humanist und Theologe Philipp Melanchthon (1497–1560). Heinz Scheible,

dings mit Feingefühl und suchte den Bruch mit der katholischen Kirche zu verhindern, als die Reformation in eine gewaltsame Revolution umzuschlagen drohte.

Melanchthon war schon als junger Mann mehr den Freuden des Geistes zugehan als denen des Leibes. Er schrieb zahlreiche Lehrbücher zur griechischen und lateinischen Grammatik, zu Rhetorik, Ethik, Physik, Geschichte und Geografie, was ihm den Ehrentitel Praeceptor Germaniae, »Lehrmeister Deutschlands«, einbrachte. Diese wissenschaftlichen Verdienste würdigt Scheible ebenso wie Melanchthons bildungspolitisches Engagement, das vornehmlich die Neuordnung der Universitäten und das Gründen von Elementarschulen betraf.

Zu seiner geschichtlichen Bedeutung kam Melanchthon, indem er in die Reformation hinein- und von Luther angezogen wurde, mit dem ihn mehr als 28 Jahre lang eine freundschaftliche Kollegialität verband. Beide – so Scheible – bildeten trotz gegensätzlichen Charakters ein kongeniales Duo, eine Doppelspitze der religiösen Erneuerung. Hier Luther, der Rabiater, der keinem theologischen Streit aus dem Weg ging. Dort Melanchthon, der Hochgebildete und Feinsinnige, der stets um Ausgleich bemüht war und einen Religionskrieg zu vermeiden suchte – was am Ende nicht gelang.

Überzeugend arbeitet der Autor heraus, welche Bedeutung Melanchthon für Luther hatte: Er war ihm ein »allseits hochgeschätz-

ter Ratgeber in theologischen Fragen«. Melanchthon stand Luther bei dessen Bibelübersetzung präzisierend und korrigierend zur Seite und motivierte ihn überhaupt dazu, die Heilige Schrift in volkverständliches Deutsch zu übersetzen. Er verlieh Luthers neuer Theologie eine Systematik, indem er mit seinen 1521 verfassten »Loci communes rerum theologicarum« die erste gültige Zusammenfassung der reformatorischen Lehre schrieb.

Auch Melanchthons Rolle als »Diplomat der Reformation«, lange in der Forschung wenig beachtet, würdigt der Autor gebührend. Als der geächtete Luther das schützende Kursachsen nicht verlassen konnte, avancierte Melanchthon zum wichtigsten theologischen Berater der evangelischen Stände auf Reichstagen und bei Religionsgesprächen. Auf dem Reichstag zu Augsburg (1530) führte er die Verhandlungen mit der römisch-katholischen Kirche und verfasste im Auftrag des sächsischen Kurfürsten das reformatorische Bekenntnis, »Confessio Augustana«, auf das evangelische Pfarrer noch heute ordiniert werden.

Scheible holt mit seiner Biografie vieles ans Licht, das in den auf Luther fixierten Reformationsfeiern unterzugehen droht. Somit verhilft er einem ganz Großen seiner Zeit zu einem angemessenen Platz im Geschichtsbild.

Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.

Aus unserem Lesershop



Spektrum-Sammelkassette

Die Sammelkassette aus schwarzem Kunststoff bietet Platz für 12 bis 15 Hefte. Sie können darin alle Ihre **Spektrum**-Hefte und -Sonderhefte aufbewahren. Die Sammelkassette kostet € 9,50 (zzgl. Versand).

Hier bestellen:

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/sammeln

FUNDA- MENTALISMUS MIT GOTTES SEGEN IN DIE HÖLLE

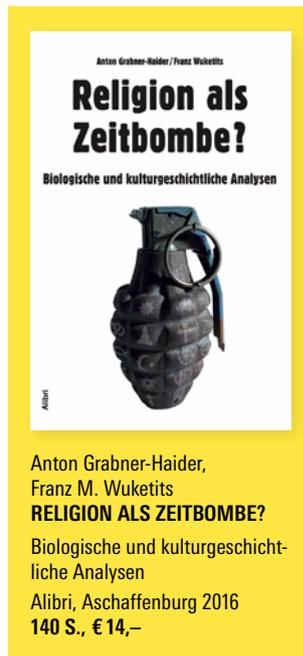
Religionen bieten ihren Vertretern starke Überlebensvorteile – und bergen eben darum ein großes Zerstörungspotenzial.

► Fördern Religionen die Gewalt? Das diskutieren Franz Manfred Wuketits und Anton Grabner-Haider in diesem schmalen Band. Wuketits, Biologe, Wissenschaftstheoretiker und renommierter Buchautor, hat den vorderen Teil verfasst. Er erörtert, welche biologischen Wurzeln die Religionen haben und wie sie evolutionär entstanden sein könnten. Auf der stilistischen Ebene überzeugt er dabei zwar nicht – er formuliert seltsam altbacken –,

inhaltlich aber gibt er interessante Anregungen.

Elemente der Religiosität, spekuliert Wuketits, könnten bereits entstanden sein, als selbstreflexives Bewusstsein noch gar nicht existierte. Er verweist auf unsere frühen Primatenvorfahren, die in Baumkronen lebten. Dorthin konnten ihnen Raubtiere, die in der schattigen Bodenzone jagten, schlecht folgen. Wurden sie von Beutegreifern attackiert, führte der sicherste Fluchtweg nach oben, wo es hell war und die Artgenossen (im Gegenlicht betrachtet) Strahlenkränze trugen. Licht und helle Auren wiesen also den Weg fort von der Gefahr. Diese Präferenz könnte noch heute in uns angelegt sein: Kulturübergreifend sind »hell« und »oben« überwiegend positiv besetzt, »dunkel« und »unten« eher negativ.

Sehr bedeutsam, so Wuketits, sei die Entstehung des selbstreflexiven Bewusstseins gewesen.



Anton Grabner-Haider,
Franz M. Wuketits
RELIGION ALS ZEITBOMBE?

Biologische und kulturgeschichtliche Analysen

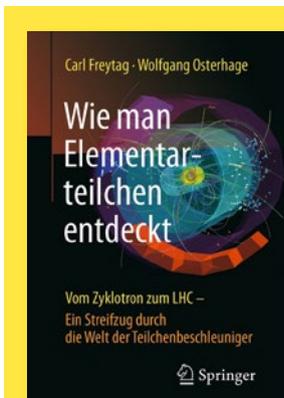
Alibri, Aschaffenburg 2016
140 S., € 14,-

Menschen konnten immer besser zwischen sich und der Umwelt differenzieren, erkannten ihre Stellung darin und ihre gestalterischen Möglichkeiten. Sie begannen Werkzeuge und Behausungen herzustellen und geplant vorzugehen – also sinn- und zweckorientiert zu denken. Das habe

zu der Frage nach dem Sinn des *Ganzen* geführt, und zur Vermutung, allem liege ein Plan zu Grunde.

Mächtige Antriebe religiösen Denkens seien weiterhin die Erkenntnis, sterben zu müssen – womöglich eine Besonderheit des Menschen – und die Fähigkeit der Religionen, Gruppen zusammenschweißen. Hier liege aber auch eine Gefahr, schreibt Wuketits. Denn indem Religionen starke Gemeinschaften schmiedeten, grenzten sie diese nach außen hin ab. Dieses »Wir gegen die anderen« habe immer wieder kollektive Hysterien und Gewaltkonflikte geschürt.

Religionsphilosoph Anton Grabner-Haider macht das konkret, indem er in der zweiten Buchhälfte eine kurze Kulturgeschichte der Religionen vorlegt. Auf rund 80 Seiten unternimmt er eine Tour de Force von Schamanismus über chinesischen Daoismus, indischen Buddhismus und



Carl Freytag, Wolfgang Osterhage
**WIE MAN ELEMENTAR-
TEILCHEN ENTDECKT**

Springer,
Berlin und Heidelberg 2016,
268 S., € 24,99

TEILCHENPHYSIK DIE WELT DES ALLERKLEINSTEN

Zwei Physiker beschreiben die fundamentalen Bausteine der Welt und wie man sie erforscht.

► Wie ist das heutige Standardmodell der Teilchenphysik entstanden? Wie und warum beschleunigt man Teilchen, und was kann man mit heutigen Experimenten über sie herausfinden? Solche und andere Fragen beantworten die Autoren – beide Physiker – in ihrem kompakten Buch. Sie bieten einen flüssig lesbaren Überblick über die wissenschaftlichen Grundlagen und Techniken der Teilchenphysik und stellen die Geschichte dieses Forschungsgebiets dar. Die letzten Kapitel sind modernen Laboratorien, typischen Experimenten und bahnbrechenden Ergebnissen der Teilchenphysik gewidmet. Schwarz-Weiß-Grafiken und Fotos unterstützen die Erklärungen. Zusammenfassungen, Infokästen und Tabellen machen den prägnanten, klar gegliederten Text noch übersichtlicher. Mathematische Vorkenntnisse auf dem Niveau einiger Studiensemester sind für das Verständnis hilfreich. Ansonsten richtet sich das Buch an alle, die wissen möchten, wie man erforscht, was die Welt im Innersten zusammenhält. Manuela Kuhar

japanische Religionen, keltische und germanische Mythen bis zu den klassischen Buchreligionen. Er untersucht, welche gesellschaftlichen Funktionen sie jeweils erfüll(t)en und inwiefern sie als soziale Zeitbomben wirk(t)en. Dieser Teil wirkt streckenweise leider wie ein wenig inspirierter Zusammenschrieb diverser Religionshandbücher.

Immerhin lässt sich ihm entnehmen, dass weltweit einmal mutterzentrierte (matrifokale) Formen des Zusammenlebens verbreitet waren, mit Mythen und Religionen, bei denen die Ahnenverehrung eine bedeutende Rolle spielte. Als sich weithin das Patriarchat durchsetzte, wurden alte, oft weibliche Schutzgötter von männlichen, häufig kriegerischen verdrängt: Shang ti in China, Indra in Indien, Marduk in Babylon und so weiter. Die klassischen Buchreligionen, legt Grabner-Haider dar, grenzen das Weibliche umfassend aus der göttlichen Sphäre aus – Jahwe/El erscheint in den Geschichtsbüchern der Bibel als rachsüchtiger, extrem aggressiver Kriegergott. Der Religionsphilosoph verweist in diesem Zusammenhang auf fanatische Gruppen der Jahwereligion, die mit ihrem gewalttätigen Fundamentalismus mehrmals die Zerstörung Israels einleiteten.

Das Christentum startete relativ friedlich, transformierte in den folgenden Jahrhunderten aber zu einem kriegerischen Reichschristentum. Dessen Aggressivität richtete sich sowohl nach außen (Kreuzzüge, Kolonisation,

Zwangsmisionierung) als auch nach innen (Ketzerkriege, Hexenwahn, Inquisition). Das Reichschristentum brachte beispiellose Gewaltexzesse wie den Dreißigjährigen Krieg hervor und trug nicht unerheblich zur Katastrophe des 20. Jahrhunderts bei; im Sog beider Weltkriege kollabierte es. Seither, so Grabner-Haider, verbreite sich unter Laienchristen wieder das Verantwortungschristentum der Frühzeit, kehre eine Vielfalt christlicher Bekenntnisse und Bilder zurück.

Der Religionsphilosoph geht auch auf den Islam ein und natürlich auf den gewaltbereiten Islamismus, der täglich Schlagzeilen macht. Es gebe heute ein Ringen zwischen liberalen Strömungen dieser Religion und fundamentalistischen Bewegungen wie den Wahabiten, Salafisten und Muslimbrüdern, die (mittels Dschihad) neue Gottesstaaten durchsetzen wollten.

Das Fazit der Autoren ist durchwachsen. Religionen brächten ihren Vertretern zweifellos und nachweislich starke Überlebensvorteile; ihre Lehren und Bilder seien große Leistungen der kulturellen Sozialisation. Sie hätten aber auch ein enorm destruktives Potenzial. Es sei dringend nötig, ihren Wahrheitsanspruch zu relativieren, Religion und Staat zu trennen und insbesondere Heranwachsenden klarzumachen, dass keine Ideologie und keine Religion Menschenopfer fordern darf. »200 Jahre nach der Aufklärung dürfte das nicht zu viel verlangt sein.«

Frank Schubert ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/ Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke

E-Mail: redaktion@spektrum.de

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke, Hanna Hillert

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

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Lt.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Prof. Klaus Volkert.

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 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWiK).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/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: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH,

Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, 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. 38 vom 1.1. 2017.

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:

© 2017 (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. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson,
Executive Vice President: Michael Florek



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



1917

EUKALYPTUS GEGEN MALARIA

»Während des letzten Abschnitts des 19. Jahrhunderts ist es gebräuchlich geworden, in den von Malaria heimgesuchten Gegenden Eukalyptusbäume anzupflanzen, da die von den Blättern erzeugten Öle imstande sein sollten, aus den Sümpfen aufsteigenden giftigen Ausdünstungen entgegenzuwirken. So ist eine Gegend in Algerien in 12 Monaten nach Anpflanzung von mehreren tausend Bäumen von der Seuche frei geworden. Dies erklärt man sich nun in folgender Weise: Eukalyptusbäume haben von allen Baumarten den größten Bedarf an Wasser. Da die Bäume sehr schnell wachsen, in warmen Gegenden viele Zentimeter täglich, wird das Aussterben der Malariasträger – bekanntlich erfolgt die Übertragung der Parasiten durch den Stich der Anophelesmücken – bedingt. Denn die Vermehrung dieser Stechmücke ist an Wassertümpel und Moräste gebunden.« *Kosmos 2, S. 54*



Nach einem Tag hat ein Eukalyptusschössling viel mehr Wasser aufgenommen als der eines Pflaumenbaums.

DÜNGER AUS ALGEN

»In einem Vortrage sprach James Hendrik in Edinburg über seine Untersuchungen und Versuche mit Meerespflanzen, um die Unterbindung der deutschen Kalizufuhr wettzumachen. Die Stengel von *Laminaria digitata* und *stenophylla* sind sehr reich an Kali und Jod und können die Grundlage für eine chemische Industrie abgeben; die *Fucus*-Arten sind weniger reich, doch kann ihre Asche als Düngemittel verwendet werden. In England scheint demnach der Kalimangel recht bedeutend zu sein. Selbst wenn die vorgeschlagene Erzeugung günstige Ergebnisse erzielen sollte, dürfte der deutschen Kaliindustrie schwerlich ein gefährlicher Wettbewerb dadurch erwachsen.«

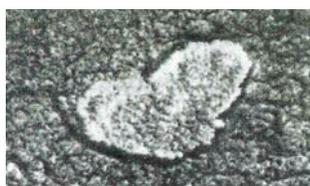
Die Umschau 9, S. 175

UMSÄUMTE SONNE

»Seit Langem ist es durch die Beobachtung festgestellt, daß wir auch bei heiterem Himmel die Sonne fast immer von einem kreisförmigen weißlichen Schein – einer Art Korona – umgeben sehen. Am 16. Juni konnte zum erstenmal eine zarte braune Umsäumung konstatiert werden; dieselbe verschwand am folgenden Tage, während in der Nacht zum 17. Juni in Nordamerika Nordlicht und Erdstromerscheinungen, also zweifellos bedeutende Kathodenstrahlwirkungen von der Sonne her, stattfanden.«

Die Umschau 6, S. 115

1967



3,1 Milliarden Jahre altes Bakterium mit zweischichtigem Aufbau der Zellwand.

SEIT WANN GIBT ES PFLANZEN?

»Mitte vergangenen Jahres galten die von den Forschern E. S. Barghoorn und J. W. Schopf im Elektronenmikroskop sichtbar gemachten Bakterien aus Feuersteinen von Ontario/Kanada mit 2

Milliarden Jahren als die ältesten Lebewesen. Nun berichten dieselben Forscher über fossile Mikroorganismen aus Westaustralien (Alter 2,7 Milliarden Jahre) sowie dem östlichen Transvaal in Südafrika, die 3,1 Milliarden Jahre alt sind. Das Gestein barg aber auch die Kohlenwasserstoffe Pristan und Phytan. Sie entstehen aus Chlorophyll. Sollte sich der biologische Ursprung bestätigen, muß man annehmen, daß es schon vor 3 Milliarden Jahren Chlorophyll-erzeugende Mikroorganismen oder grüne Pflanzen gab.« *Kosmos 2, S. 30/32*

KREBSRISIKO ALLTAG

»Wie die experimentelle Krebsforschung gezeigt hat, gibt es neben ionisierenden Strahlen zahlreiche chemische Substanzen, welche Erbveränderungen hervorrufen können. Viele werden durch Pharmaka, Zusatzstoffe zu Lebensmitteln und Kosmetika aufgenommen. Welche Gefahren drohen, ist kaum erforscht. Die bisherigen Ergebnisse scheinen jedoch so beunruhigend zu sein, daß von namhaften Genetikern und Toxikologen gefordert wird, die mutagene Wirkung von chemischen Substanzen routinemäßig zu prüfen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 2, S. 78*

NIE WIEDER GLATTEIS

»Um die Gefahren, denen der Autofahrer bei Glatteis auf Brücken ausgesetzt ist, zu verringern, hat eine Firma ein Spezialheizgewebe entwickelt, das mit allen Anschlussleitungen und Installationselementen in eine Isoliermasse eingegossen ist. Das Gewebe kann mit jeder beliebigen Heizleistung hergestellt werden, da die einzelnen Heizwiderstände quer zur Gewebefaser als Schuss eingearbeitet werden.« *Neuheiten und Erfindungen 366, S. 16*

(Seit 2016 wird auf einer Teststrecke bei Köln eine Asphaltheizung erprobt, bei der warmes Wasser durch Rohre geleitet wird; d. Red.)

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht.

DAS K PASST NICHT IN DIE REIHE

Der russische Mathematiker Vladimir Voevodsky will Beweisführungen per Computer rechnen lassen (»Werden Computer das Wesen der Mathematik verändern?«, *Spektrum* Dezember 2016, S. 60).

Manfred Weis, Malsch: Auf S. 64 wird anhand von Buchstaben topologische Äquivalenz erklärt. So sind A, R, Q äquivalent zu einem Kreisring; bei den Buchstaben C, X, K, die äquivalent zu einer Kreisscheibe sein sollen, ist der Font aber leider so gewählt, dass der Buchstabe K äquivalent zu zwei sich berührenden Kreisscheiben ist: Der linke Balken und der rechte Winkel berühren sich in einem einzigen Randpunkt, und dieser kann nicht durch stetige Verformung »aufgespalten« werden.

Antwort des Redakteurs Christoph Pöppe:

Die Wahl des K ist in der Tat etwas ungeschickt – schon weil sie damit die Aufmerksamkeit auf einen Umstand lenkt, auf den es dem Autor gar nicht ankommt. Immerhin ist auch bei dem K mit dem extrem dünnen Hals noch jeder geschlossene Rundweg auf einen Punkt zusammenziehbar, im Gegensatz zur Situation bei A, R und Q. Wenn man sich allerdings auf geschlossene Wege beschränkt, die keinen Punkt zweimal treffen, dann hat unser K sozusagen zwei Zusammenhangskomponenten.

BEGRIFFSKLÄRUNG

Die Altertumswissenschaftlerin Luise Loges kritisierte eine kühne These des Geoarchäologen Eberhard Zangger. (»War Troja die Hauptstadt der Seevölker?«, *Spektrum* Dezember 2016, S. 76).

Serdal Mutlu, Basel: Als Koautor der maßgeblichen Arbeit zur Einführung des Begriffs luwische Kultur stelle ich fest, dass sowohl der Artikel in *Spektrum* wie auch die Antwort der Redaktion zum Leserbrief von Walter Weiss in Heft 1.17 nahelegen, dass Sie Zanggers Buch und die entsprechende wissenschaftliche Publikation gar nicht kennen. Sie sagen: »Aus dem Verbreitungsgebiet einer Sprache folgt nicht, dass dort eine diese sprechende Ethnie lebte, also auch kein entsprechendes Staatsgebilde« bestand.« Genau das sagen Zangger und ich aber in einem eigens der Begriffsdefinition gewidmeten Abschnitt:

»Wir verwenden »luwisch« jedoch als geografisch und chronologisch begrenzten Begriff für die Menschen, die im 2. Jahrtausend v. Chr. in Westkleinasien lebten. Die Bezeichnung ist also weder sprachlich noch ethnologisch

LESERBRIEFE

noch durch Keramiktypologien definiert. Sie ist in dieser Hinsicht durchaus mit der Definition der mykenischen, minoischen und hethitischen Kulturkreise vergleichbar.«

Antwort der Redaktion:

Dass Eberhard Zangger den Begriff luwisch nicht als Ethnie versteht, stand durchaus im Kommentar. Kritisiert wurde vielmehr: Es gilt heutzutage als wissenschaftlich unsauber, eine Kultur nicht nach ihrem Verbreitungsgebiet, sondern einer Sprache zu benennen. Denn Letzteres unterstellt beispielsweise, dass die Sprecher der Sprache mit den Trägern der Kultur deckungsgleich seien. Diese Identifikation kann zu falschen Schlussfolgerungen und Assoziationen verleiten.

KOMMT DER GROSSE BLACKOUT?

Wie gleicht man schwankende Energielieferung durch Wind und Sonne aus?, fragte Michael Springer (»Dringend gesucht: Intelligente Energienetze«, Springers Einwürfe, *Spektrum* September 2016, S. 37).

Wolfgang Monninger, Essen: Völlig zu Recht stellt Michael Springer fest: »Das größte Hindernis für den ehrgeizigen Plan stellt das launische Wetter dar.« Und weiter unten: »Längerfristig wird die Energiewende nur dann eine Chance haben, wenn sich das Netz praktisch augenblicklich an das aktuelle Wettergeschehen anzupassen vermag.« Das Problem ist aber seit Langem bekannt. Jetzt soll also ein »Intelligentes Netz«, an dem EWeLiNE arbeitet, die Lösung bringen. Allerdings reicht seine Intelligenz wohl nur für »ein, zwei Tage«. Was geschieht am dritten Tag mit kaltem, windstillem und nebligem Wetter?

Ich kann nicht glauben, dass auch die Intelligenz der Verantwortlichen nicht weiter reicht. Haben wir hier den Punkt erreicht, wo Schwarmdummheit zum schuldhaften Handeln wird, weil die Akteure sich nicht ihrer Verantwortung stellen wollen? Muss es wirklich erst den großen Blackout geben? Meine Antwort: Ja, es muss ihn geben, damit alle verstehen. Ich möchte allerdings, dass die Verantwortlichen dafür bezahlen, nicht der kleine Mann.

SPEKTRUM IN NEUEM GEWAND

Seit der Septemбераusgabe erscheint Spektrum in einem überarbeiteten Layout, was unterschiedlichste Reaktionen hervorgerufen hat.

Christian Monnerjahn, Magdeburg: Die Diskussion um das neue Layout von *Spektrum* ist ja sehr lebendig! Mir gefällt es – die Präsentation wirkt frischer, und Flattersatz finde ich ohnehin besser lesbar als Blocksatz. Die Inhalte sind wie eh und je auf hohem Niveau. Auch Kolumnen wie »Springers Einwürfe« und die jeweils abschließende Kurzgeschichte unterhalten sehr gut. Bitte weiter so!

futur III

Welt der Erwachsenen

Nanosonden markieren das Ende der Jugendzeit.

Eine Kurzgeschichte von Karsten Kruschel

Schon seit dem frühen Morgen war Darius leicht übel vor Aufregung gewesen. Als aber die beiden schweigsamen, breitschultrigen Männer nun die Tätowiermaschine enthüllten, breitete sich ein zunehmend frostiges Gefühl in seinem Magen aus. Während sein Lehrer, der Mann von der Stadtverwaltung und der Arzt ihre kurzen Reden hielten, wie man sie einem jungen Menschen am Vorabend seines 14. Geburtstages zu halten pflegte, starrte Darius in das Innenleben der Maschine.

Dort wimmelte es von Röhren, bunten Drähten, kleinen Motoren – sowie Nadeln und nochmals Nadeln, die von bunten Schläuchen mit schillernden Flüssigkeiten versorgt wurden.

Der Junge blickte kurz auf die Innenseite seines dünnen Unterarms und stellte sich mit Schaudern vor, wie die scharfen Spitzen seine Sehnen durchlöcherten oder gar auf den Knochen trafen.

Sein Magen wurde noch einmal um ein paar Grad kälter.

Die Rede der Offiziellen handelte vom Eintritt in die Welt der Erwachsenen, von der künftigen Rolle einer selbstbestimmten Persönlichkeit im Gemeinwesen und von der Kontrolle über das eigene Leben – alles dank der Farbkodierung der Nanosensoren.

Darius konnte das gar nicht mehr hören; seit Monaten redeten Eltern, Lehrer und staatliche Berater von nichts anderem mehr. Wie segensreich die eintätowierten drei mal drei Quadrate seien, wie nützlich ihre Farben, mit denen schlaue Nanopartikel meldeten, was sie herausgefunden hatten.

Dass sie beizeiten rot leuchtend Fieber ankündigen könnten, oder mit Gelb zu niedrige Hormonspiegel, und dass sie bei absinkendem Blutzucker vor Heißhungerattacken warnen würden. Dabei hatte Darius im Leben noch nie Hunger verspürt. Für ihn war Essen immer Arbeit gewesen.

Vielleicht war er deswegen so schlaksig.

Er warf einen Blick zu seinen Eltern hinüber. Vater war wie immer die Ruhe selbst, seine neun kleinen eintätowierten Quadrate zart lindgrün. Es sah aus, als hätte man ihm einen geordneten Zauberwürfel auf den Arm gestempelt. Bei Mutter hingegen waren Blutdruck und Stresshormone rot erhöht, wie so oft. Aber dafür hätte Darius keine Nanotechnik gebraucht – er wusste, was es hieß, wenn sie so hektisch ihre Finger knetete.

Die Redner schwafelten inzwischen von Krankheitsfrüherkennung, Krebsvorsorge und den Segnungen der modernen Genetik. Fast wünschte sich Darius, er könne auf ewig 13 bleiben und sich all den Fortschritt ersparen. Aber das ging natürlich nicht. Jeder Mensch trug seinen persönlichen Zauberwürfelabdruck mit sich herum, das war vorgeschrieben.

Nun musste der Junge seinen Unterarm in die Maschine stecken. Ihm war, als schwappten Eiswürfel in seinem Bauch umher. Zumal die Anwesenden jetzt ihn, Darius, anstarrten – ein scheußliches Gefühl –, bis auf seine Mutter, die nirgendwohin blickte, und die beiden Stiernacken im

grauen Anzug, die ihre Diplomatenkofferchen betrachteten.

Gepolsterte Klammern fixierten Handgelenk und Ellenbogen mit einer Kraft, die man so einer kleinen Maschine nicht zugetraut hätte. Mit einem mechanischen Klickern und Rasseln setzten sich die Nadeln in Bewegung und stießen in die Haut des Jungen. Es tat bei Weitem nicht so weh, wie Darius befürchtet hatte. Wahrscheinlich lag das an dem Kältespray, das der Arzt großzügig auf der Haut verteilt hatte.

Es war seltsam zu sehen, wie sich die Flüssigkeiten im Innern der Maschine träge in Bewegung setzten und durch die emsig ratternden Nadeln in seiner Haut verschwanden. War das die Welt der Erwachsenen, die da in ihn hineingepumpt wurde? Und wieso zeigten die Quadrate immer nur drei Farben, während in den Schläuchen der ganze Regenbogen vorkam?

Dann war es vorbei, und die Nadeln zogen sich zurück. Die Klammern lockerten ihren unbarmherzigen Druck und öffneten sich.

Darius zog seine Hand vorsichtig aus dem Schlund der Tätowiermaschine und betrachtete seinen eigenen, ganz persönlichen Zauberwürfelabdruck. Die Farben schwankten ein wenig unentschlossen hin und her, waberten zwischen Rot, Gelb und Grün, aber man konnte schon erkennen, dass sie sich mehr oder weniger im grünen Bereich einpendeln würden.

Darius atmete aus und merkte, dass er die Luft angehalten hatte, seitdem

er seine Hand in das nadelgespickte Ding gesteckt hatte. Triumphierend blickte er zu den Eltern hinüber – aber die sahen gar nicht her. Sein Lehrer, der Mann von der Stadtverwaltung und der Arzt auch nicht.

Alle starteten die beiden Männer in den grauen Anzügen an, die ihre Diplomatenkofferchen geöffnet hatten. Mit geübten Bewegungen packten sie Dinge aus, die Darius nicht recht einordnen konnte.

Das eine Gerät wirkte wie eine Waffe, das andere sah aus wie einer dieser Scanner, mit denen Supermarktkassiererinnen auf Barcodes feuern – aber der Laser irrlichterte, mehrfach die Farbe wechselnd, über Darius' nagelneue Drei-mal-drei-Tätowierung und piepste.

Der Junge hätte gern gewusst, was das sollte. Aber als er sah, mit welchem Gesichtsausdruck seine Eltern, sein Lehrer, der Arzt und der Mann von der Stadtverwaltung das Tun der beiden beobachteten, verdichtete sich die Kälte in seinem Magen zu einer soliden Kugel aus Eis.

Der Griff der beiden Männer um sein Handgelenk war jetzt ebenso fest wie die Klammern der Maschine zuvor.

Dann veränderten sich die Farben in Darius' Tätowierung: Die obere und die untere Reihe der kleinen Quadrate färbte sich blau.

Wieso denn blau?, dachte Darius. Es gibt doch nur Rot, Gelb und Grün!

Verwirrt blickte er auf und bemerkte, dass das Zimmer plötzlich von Bewegung nur so wimmelte.

Seine Mutter weinte und wollte zu ihrem Sohn laufen, wurde aber von seinem Vater festgehalten. Sein Lehrer hatte Formulare hervorgezogen, die er in Windeseile, aber methodisch ausfüllte. Der Arzt zog eine Spritze auf und ging auf Darius zu. Der Mann von der Stadtverwaltung sprach eine Reihe von Zahlen in sein Mobiltelefon.

Darius wollte aufspringen; aber die zwei Muskelberge in den grauen Anzügen waren auf derlei Ideen vorbereitet. Der Junge musste, von kräftigen Armen niedergehalten, zusehen, wie ihm der Arzt eine Injektion verabreichte.

Ihm wurde sehr schnell schwummrig zumute.

Einer der beiden Männer, die offenbar die Kontrolle übernommen hatten, entnahm einem kleinen Büchlein einen Aufkleber und heftete ihn direkt neben den Zaubervüfelabdruck des Jungen. Darius versuchte zu verstehen, was das bedeutete,

aber alles verschwamm vor seinen Augen. Das mochte das Biohazard-Symbol sein oder das Hundert-Plus-Zeichen der Schwerbegabten, vielleicht auch die Doppelraute der Universalblutspender oder das Sternzeichen Krebs, weiß der Geier.

Er konnte es nicht erkennen. Womöglich war es die Adresse eines Verbrennungsofens oder die der Kunsthochschule. Er hatte keine Ahnung, und alles verblasste.

Ehe Darius bewusstlos wurde, hörte er noch Satzketten, in denen von Entschädigungszahlungen, Versicherungsprämien, Krankenkassenkosten, der nationalen Sicherheit, Verschwiegenheitserklärungen und Seuchenschutzvorschriften die Rede war.

Dann war da nur noch klirrende Kälte – ein blauer Punkt in seinem Bauch.

DER AUTOR

Karsten Kruschel lebt als Schriftsteller in der Nähe von Leipzig und veröffentlicht Sciencefiction-Romane, Kurzgeschichten, Kritiken und Essays. Er gewann mehrfach den Kurd-Laßwitz-Preis und den Deutschen Sciencefiction Preis.

www.karstenkruschel.de

Alles verschwamm vor seinen Augen. Das mochte das Biohazard-Symbol sein oder das Hundert-Plus-Zeichen der Schwerbegabten, vielleicht auch die Doppelraute der Universalblutspender.

VORSCHAU

NEUES BILD VOM SPRACHERWERB

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts revolutionierte Noam Chomsky unsere Vorstellung davon, wie Kleinkinder ihre Muttersprache lernen. Dem berühmten Linguisten zufolge beruhen alle Sprachen der Welt auf einer einheitlichen Universalgrammatik, die im menschlichen Gehirn von Geburt an fertig vorliegt. Aber jetzt erweisen sich Chomskys Ideen als überholt. Offenbar folgt der kindliche Spracherwerb den Regeln der so genannten gebrauchsbasierten Linguistik.



GETTY IMAGES / AARON TILLEY; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



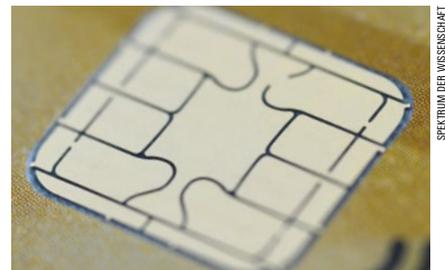
WIE ENTSTAND UNSER SONNENSYSTEM?

Bildeten sich die Planeten ganz allmählich, von kleinen Partikeln hin zu immer größeren Gesteinsbrocken? So dachten Astronomen lange. Doch neue Analysen von Meteoriten aus der Frühzeit des Systems deuten auf eine Phase von heftigen Kollisionen, Zerstörung und Wiederaufbau hin.



CAPBRETON: ELDORADO DER WALE

Die tiefe Meeresschlucht in der Südbiskaya enthält eine besonders reiche Tierwelt. Berühmt für sie sind seit jeher die vielen Walarten, allen voran der Atlantische Nordkaper, der dort früher in großer Zahl vorkam.



DIE SICHERHEIT DER CHIPKARTE

Anfang der 1980er Jahre gerade eingeführt, erwies sich die Bankkarte mit integriertem Computerchip schnell als verwundbar gegenüber Hackerangriffen. Hastig mussten Informatiker das Loch mit kryptografischen Mitteln stopfen.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Buch »Die Physik der Zukunft«:

Wie werden wir leben – in 20, 60, 100 Jahren? Der Physiker Michio Kaku beschreibt in seinem Buch auf spannende Weise den Weg in die Zukunft. Dazu befragte er weltweit 300 namhafte Forscher aus den Bereichen künstliche Intelligenz, Raumfahrt, Medizin und Biologie bis hin zu Technik, um so ein realistisches Szenario vorzustellen.



Wählen
Sie Ihr
Geschenk

Taschenmesser »Spartan« von Victorinox:

Dieses Multitalent mit zwölf Funktionen hat sich als zuverlässiger Helfer so bewährt, dass es zum Bestseller unter den »Swiss Army Knives« aufgestiegen ist. Länge: 91 mm.



Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo



IMMUNONKOLOGIE VON
BRISTOL-MYERS SQUIBB

Mehr Informationen auf:
www.krebs.de

Die Entwicklung von immunonkologischen Therapien kann eine neue Perspektive für das Leben ermöglichen.

Die Behandlung von Krebs ist eine Herausforderung, der sich Bristol-Myers Squibb seit über 50 Jahren stellt. Dabei stehen intelligente Lösungen im Mittelpunkt unserer Forschung, um Krebs einen Schritt voraus zu sein.

Wir konzentrieren uns vor allem auf die **Immunonkologie**, die auf die Fähigkeit des körpereigenen Immunsystems setzt, Krebszellen zu bekämpfen.

Unser Ziel ist es, eines Tages möglichst viele Krebsarten mit diesem Therapieprinzip erfolgreich behandeln zu können.

Mehr Informationen zur Immunonkologie auf www.krebs.de



Bristol-Myers Squibb