

Spektrum

der Wissenschaft

Die Supraleitung startet durch

Forscher nähern
sich der Raumtemperatur

MIKROBEN Kooperation statt Konkurrenz

ANTIMATERIE Fällt sie nach oben?

REGENERATIVE ENERGIE Wege zum Wasserstoff

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ! Ausgewählte **Spektrum KOMPAKT** gibt es auch im Printformat!

€ 4,99
je digitale
Ausgabe



Bestellmöglichkeit und über 250 weitere Ausgaben:

www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL TECHNOLOGIEN FÜR DIE ZUKUNFT

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

Seit der niederländische Physiker und Nobelpreisträger Heike Kamerlingh Onnes 1911 die Supraleitung entdeckt hat, träumen Ingenieure davon, sie für ihre Zwecke etwa in der Energiewirtschaft einzusetzen. Doch selbst mehr als 100 Jahre später steht die Wissenschaft immer noch vor dem entscheidenden Durchbruch: ein Material zu finden, das sich einfach verarbeiten lässt und nicht aufwändig auf extrem tiefe Temperaturen gekühlt werden muss. Die meisten Metalle oder metallischen Verbindungen werden erst ab minus 234 Grad Celsius und kälter supraleitend; die einzige Ausnahme bildet metallischer Schwefelwasserstoff – der aber immer noch erfrischende minus 70 Grad Celsius benötigt, um die gewünschte Eigenschaft zu zeigen.

Die Hoffnung gilt daher seit etwa drei Jahrzehnten den Hochtemperatursupraleitern, deren Entdeckung und Entwicklung entscheidend von dem deutschen Physiker Georg Bednorz und dem Schweizer Karl Alexander Müller vorangetrieben wurde. Beide wurden dafür ebenfalls mit dem Nobelpreis geehrt. Den Rekord hält bislang das Lanthan-Decahydrid, dessen Sprungtemperatur zur Supraleitung bereits bei minus 10 Grad Celsius liegt.

Massentauglich sind diese Werte aber dennoch nicht, weshalb Physiker und Anwender auf völlig neue Materialien hoffen. Das schon vielfach als Wunderstoff gepriesene Graphen könnte den Erwartungen vielleicht zukünftig gerecht werden, wie mein Kollege Robert Gast schreibt (ab S. 20). Der Weg dahin wird aber – wenig überraschend – kein leichter sein.

Deutlich weiter sind die Ingenieure dagegen bei der Herstellung von Wasserstoff: Diese ist heute schon industrieller Alltag. Doch als umweltfreundliche Energiequelle dient das Gas deshalb noch lange nicht; seine Erzeugung basiert zum überwiegenden Anteil noch auf fossilen Energieträgern. Katja Maria Engel berichtet ab S. 56 darüber, wie dieses Dilemma endlich gelöst werden kann.

Ich kann den beiden Forschungszweigen nur viel Glück wünschen. Vielleicht tragen sie ja doch bald zur Energiewende bei – indem sie einerseits einen sauberen Brennstoff und andererseits eine Möglichkeit zur verlustfreien Energieübertragung liefern.

Eine erhellende Lektüre wünscht



NEU AM KIOSK!

Auch in unserem **Spektrum** SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 4.19 geht es um Materialwissenschaft – von neuen Stoffen für die Halbleiterindustrie bis zu extremen Atomen.

IN DIESER AUSGABE



JEFFREY MARLOW UND ROGIER BRAAKMAN

Ein Mikrobiologe und ein Chemiker stießen im Meer auf Mikroorganismen mit erstaunlicher Teamfähigkeit (S. 38).



HERMAN PONTZER

Bei seinen Feldstudien erkannte der Anthropologe: Schimpansen bewegen sich sehr wenig – und leiden dennoch kaum an Stoffwechsel- oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Dass dies bei uns ganz anders ist, hat vermutlich evolutionäre Gründe (S. 46).



JEAN-FRANÇOIS DARS /
CNRS/PHOTOTHÈQUE

GABRIEL CHARDIN

Eigentlich interessierte er sich für Teilchenphysik, doch seine Erforschung der Antimaterie führte den wissenschaftlichen Leiter am französischen CNRS in die Kosmologie, wie er ab S. 64 erklärt.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

26 FORSCHUNG AKTUELL

Entstand der aufrechte Gang in Europa?

Danuvius guggenmosi ging schon vor zwölf Millionen Jahren auf zwei Beinen.

Ring aus 18 Kohlenstoffatomen

Eine grundsätzlich neue Modifikation des Elements.

Googles Quantenrechner

Wie ein Chip mit 54 Qubits selbst Supercomputer alt aussehen lässt.

Topologie ist überall

Offenbar sind solche Materialien keine Ausnahme.

37 SPRINGERS EINWÜRFE

Sind Bankangestellte ehrlich?

Kritik an einer viel beachteten Studie.

55 FREISTETTERS FORMELWELT

Kreationistische Mathematik

Eine täuschend einfache Zahlenspielerlei.

72 SCHLICHTING!

Prickelnde Physik

In Getränken faszinieren aufsteigende Blasen.

86 ZEITREISE

88 REZENSIONEN

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 SUPRALEITUNG **VORSTOSS ZUR RAUMTEMPERATUR**

Neue Ansätze machen Hoffnung bei der Suche nach einem Werkstoff, der seinen Widerstand bereits unter Alltagsbedingungen verliert.

Von Bob Henderson

20 PHYSIK **DER MAGISCHE WINKEL**

Mit einem Trick lässt sich die Kohlenstoffvariante Graphen in einen Supraleiter verwandeln. Der Schlüssel zu einer Materialrevolution?

Von Robert Gast

38 MEERESKUNDE **TEAMGEIST IN DER TIEFSEE**

Marine Mikroorganismen zeichnen sich durch eine erstaunliche Kooperationsfähigkeit aus. Diese Zusammenarbeit prägte vermutlich schon früh das Leben auf der Erde – und ermöglichte vielleicht erst unsere Existenz.

Von Jeffrey Marlow und Rogier Braakman

46 EVOLUTION **ZUM LAUFEN GEBOREN**

Der Mensch muss sich viel bewegen, um gesund zu bleiben – im Gegensatz zu seinen nächsten Verwandten im Tierreich. Der Grund dafür liegt in unserer evolutionären Vergangenheit.

Von Herman Pontzer

56 ENERGIEWIRTSCHAFT **WEGE ZUM WASSERSTOFF**

Das Gas gilt als ein Energieträger der Zukunft, doch entsteht bei seiner Herstellung viel CO₂. Forscher liefern sich ein Rennen um die klimafreundlichste Produktionsmethode.

Von Katja Maria Engel

64 KOSMOLOGIE **DER KLEINE UNTERSCHIED**

Weicht Antimaterie wirklich nur in ihrer Ladung von herkömmlichen Teilchen ab? Oder fällt vielleicht auch ihre Masse anders aus? Künftige Experimente sollen diese gewagte Hypothese überprüfen.

Von Gabriel Chardin

74 MODELLIERUNG **GEFANGEN IM KASINO**

Physiker haben ein ökonomisches Modell entwickelt, das unsere Volkswirtschaften extrem gut beschreibt. Es erklärt außerdem, warum Ungleichheit in der Welt unausweichlich ist.

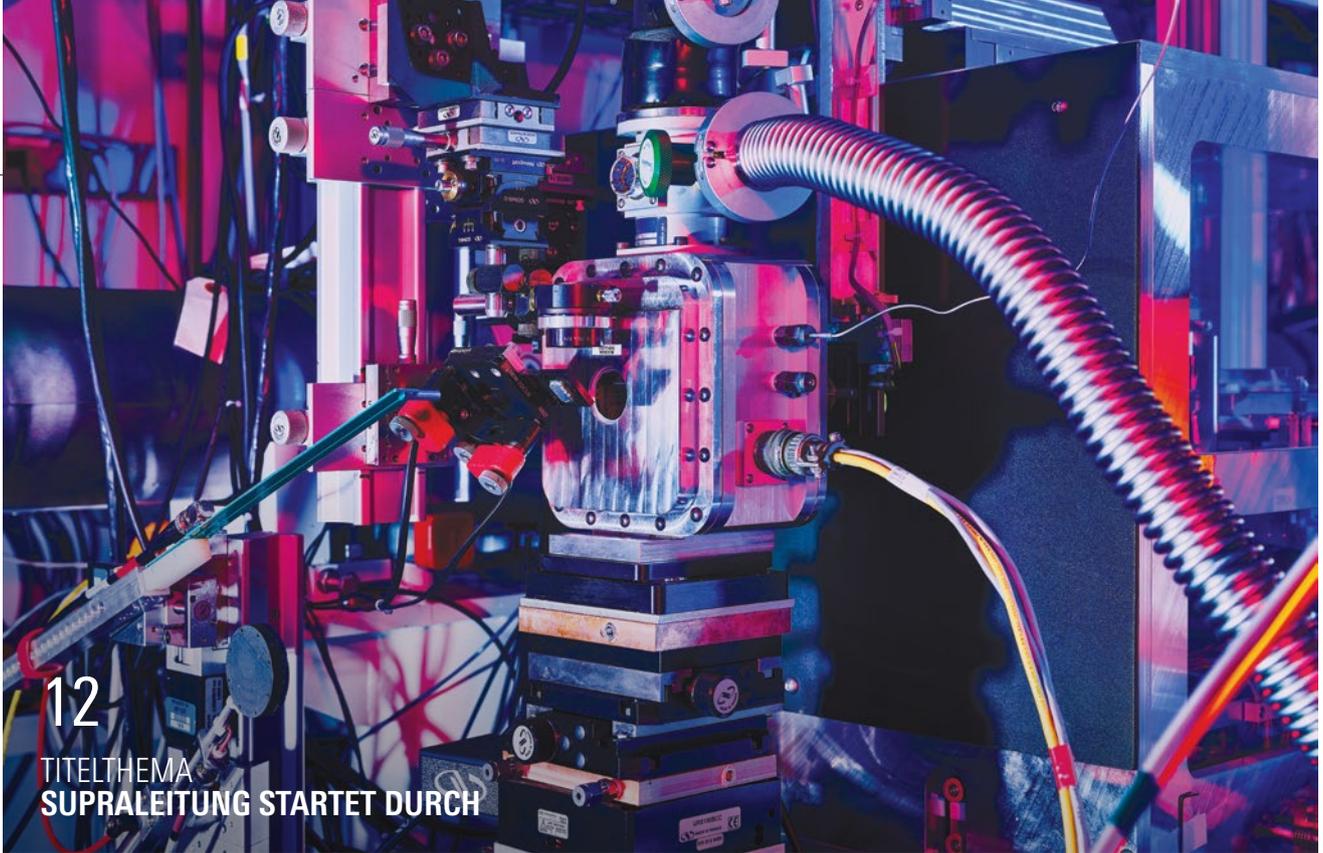
Von Bruce M. Boghosian

82 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
DER TOD KOMMT STETS ZU FRÜH

Vertraut man den Statistiken, können wir selbst im hohen Alter noch mit zumindest einigen Monaten Lebenserwartung rechnen – sogar in der Sekunde des Sterbens. Über einige Tücken des Konzepts vom Durchschnitt.

Von Christoph Pöppe

TITELBILD:
TEEKID / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA
SUPRALEITUNG STARTET DURCH

SPENCER LOWELL

38

MEERESKUNDE
KOOPERIERENDE
MIKROBEN



WILLIAM B. HAND / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2018



46

EVOLUTION
ZUM LAUFEN
GEBOREN

BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019



64

KOSMOLOGIE
MASSE DER ANTIMATERIE

MAXIMILIEN BRICE / DEPA



DABUDY / GETTY IMAGES / ISTOCK

74

MODELLIERUNG
SOZIALE
UNGLEICHHEIT



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

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

SPEKTROGRAMM



MASA EARTH OBSERVATORY, LAUREL DAUPHIN | EARTH OBSERVATORY.MASA.GOV/IMAGES/IASI/9THE MAIN CHANNELS OF THE AMAZON

SCHLANGENFLUSS

► Der Juruá zählt zu den kurvenreichsten Flüssen Südamerikas. Zwischen seiner Quelle im Hochland Perus und seiner Mündung in den Amazonas liegen in Luftlinie rund 1000 Kilometer. Wegen seiner vielen Windungen ist der Juruá jedoch mehr als dreimal so lang. Hier ist ein Abschnitt im Osten der brasilianischen Stadt Eirunepé zu sehen, die Aufnahme stammt vom NASA-Satelliten Landsat 8.

Die geschlängelte Form wird zum einen durch das flache Land begünstigt. Zum anderen spielt wohl auch die Menge an Sedimenten, die der Fluss transportiert, eine Rolle. Ein Teil dieses Materials häuft sich auf der Innenseite der Mäander an und kann dort das Anwachsen des Gleithangs beschleunigen. Das bringt das Wasser dazu, einen noch größeren Bogen zu machen.

Mitteilung des NASA Earth Observatory, November 2019

SPEKTROGRAMM

ASTRONOMIE DER RAND DES SONNENSYSTEMS

► Das Umfeld der Sonne hebt sich deutlich vom umliegenden Weltall ab. In der Heliosphäre dominieren der aus geladenen Partikeln bestehende Sonnenwind und auf die Sonne zurückgehende Magnetfelder. Außerhalb dieser Sphäre beginnt der kühlere und dichtere interstellare Weltraum. In ihm schwirren vor allem die Teilchen der kosmischen Strahlung umher, die teils sehr viel Energie haben und beispielsweise aus fernen Supernova-Explosionen stammen.

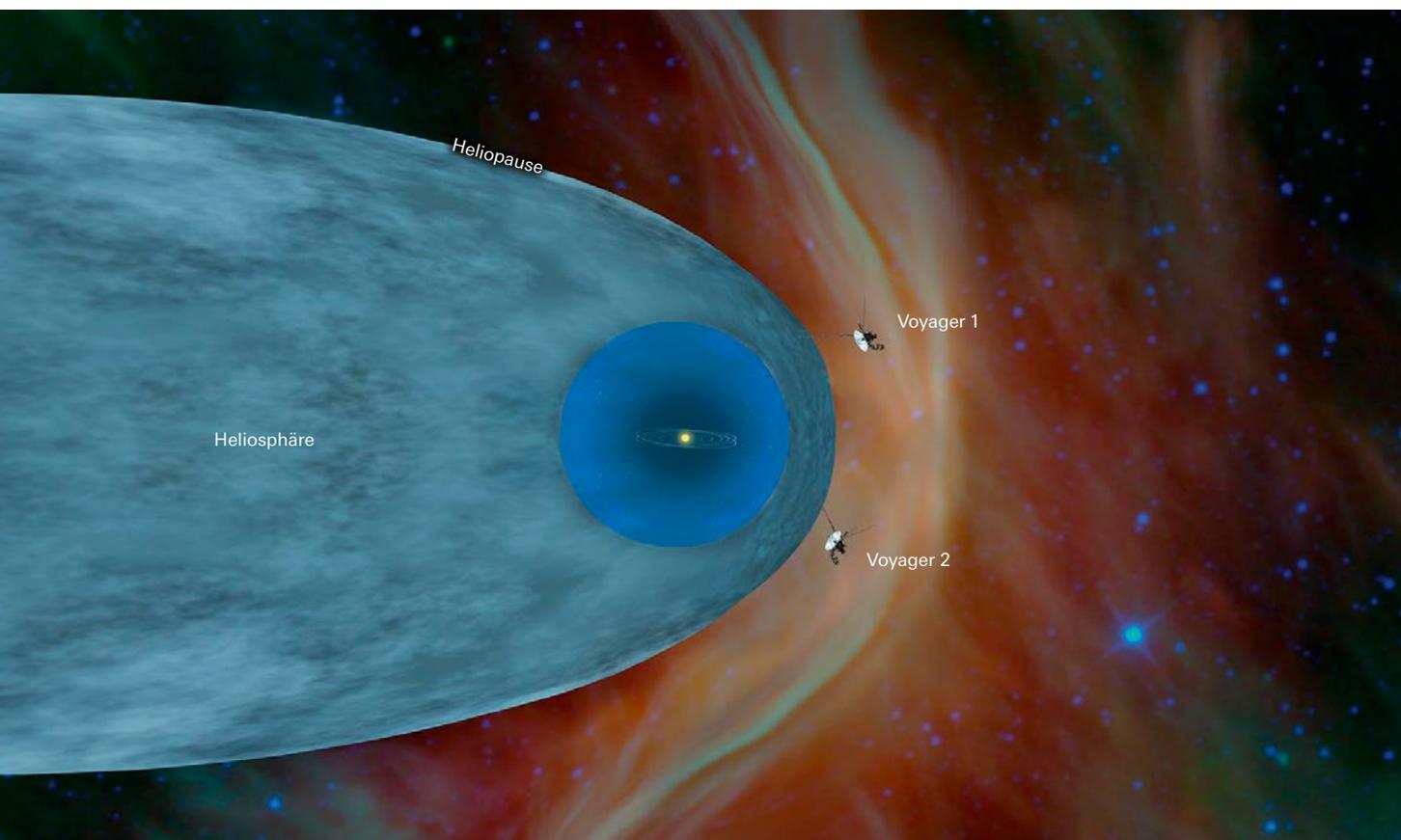
Lange konnten Wissenschaftler nur darüber spekulieren, wie die Grenze zwischen solarem und interstellarem Weltall aussieht. 2012 lieferten dann die Messdaten der 1977 gestarteten Raumsonde Voyager 1 erste Einblicke.

Nun hat auch ihre Schwestersonde Voyager 2 den interstellaren Raum erreicht, wie die NASA-Wissenschaftler um Edward C. Stone vom California Institute of Technology in Pasadena berichten.

Demnach maßen die an Bord installierten Instrumente am 5. November 2018 einen starken Anstieg energiereicher Teilchen bei gleichzeitigem Abebben des Sonnenwinds. Aus Sicht der Forscher ein untrügliches Signal, dass Voyager 2 die Heliosphäre verlassen hat. Insgesamt durchflog die Sonde eine deutlich geordnetere und dünnere Übergangsregion als ihre Schwester vor sieben Jahren. Voyager 1 war vor der Grenze auf sonderbare Magnetfeldröhren gestoßen, die

kosmische Strahlung ins Sonnensystem eindringen lassen. Voyager 2 hingegen entdeckte eine Art Magnetfeldbarriere, die unsere Heimat abzuschirmen scheint. Möglicherweise haben diese Unterschiede mit der Aktivität der Sonne zu tun, die in einem elfjährigen Zyklus schwankt. Für diese Theorie spricht auch, dass die Sonden den Rand der Heliosphäre in unterschiedlichem Abstand von der Sonne erreichten. Voyager 2 war zu diesem Zeitpunkt rund 18 Milliarden Kilometer entfernt, 119-mal so weit wie die Erde. Voyager 1 hingegen hatte die Grenze erst bei der 122-fachen Distanz überquert.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-019-0942-5, 2019



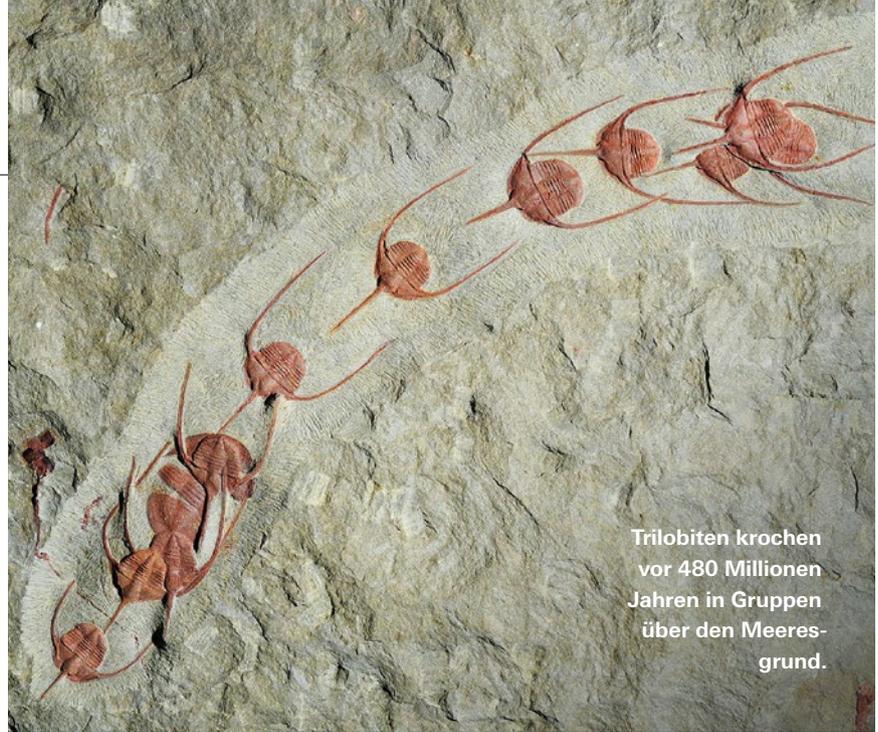
Auf seinem Weg um das Zentrum unserer Galaxie bewegt sich unser Sonnensystem mit hoher Geschwindigkeit durchs All. Der Einflussbereich unserer Sonne, die Heliosphäre, ist daher nicht rund, ihre Form ähnelt vermutlich eher einem Kometenschweif. Sowohl Voyager 1 als auch Voyager 2 haben den Bereich mittlerweile verlassen.

PALÄONTOLOGIE TRILOBITEN IM GÄNSEMARSCH

Die Gruppenbildung von Tieren ist ein Thema, das Biologen bereits ausgiebig erforscht haben. Doch noch immer ist unbekannt, wann Lebewesen damit begannen, sich koordiniert zu bewegen, um sich etwa zur Paarung zusammenzufinden oder besser vor Fressfeinden zu schützen. Forscher um Jean Vannier von der Université de Lyon haben nun Indizien für eine besonders frühe Ausprägung dieses Verhaltens gefunden.

Demnach krochen Trilobiten bereits vor 480 Millionen Jahren in Gruppen über den Meeresboden. Die 16 bis 22 Zentimeter langen Gliederfüßer sind für Paläontologen alte Bekannte: Ihre Überbleibsel gewähren seit Langem einen Einblick in die Evolution zwischen Kambrium- und Perm-Zeitalter.

Vanniers Team stieß in Marokko auf Fossilien, in denen gleich mehrere Trilobiten der Art *Ampyx priscus* verewigt sind. Die Tiere sind eng hintereinander Kopf an Hinterteil aufgereiht und halten über den Frontstachel am Kopfende sowie die seitlichen Wan-



Trilobiten krochen vor 480 Millionen Jahren in Gruppen über den Meeresgrund.

JEAN VANNIER, LABORATOIRE DE GÉOLOGIE DE LYON; TERRE PLANÈTES, ENVIRONNEMENT ICNIS / ENS DE LYON / UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

genstacheln Kontakt. Bis zu 20 Individuen schlossen sich auf diese Weise zu einer Gruppe zusammen. Vermutlich sind sie dabei schlagartig von Sedimenten überdeckt worden, etwa während eines Sturms, und daraufhin für die Ewigkeit erstarrt.

Das Gruppenverhalten der Trilobiten könnte dem heutiger Gliederfüßer geähnelt haben, spekulieren die Paläontologen. In Frage kommen hier etwa Langusten. Sie leben ebenfalls im Ozean und wandern in einer Reihe über den Meeresboden, um sich andernorts fortzupflanzen oder un-

günstigen Umweltbedingungen auszuweichen. Auch Prozessionsspinnerraupen bewegen sich in Gruppen aus bis zu 30 Individuen, wobei sie die Formation mittels einer Pheromonspur halten.

Vannier und seine Kollegen vermuten, dass sich Trilobiten ganz ähnlich über Tast- und Geruchssinn koordiniert haben könnten. Eine visuelle Abstimmung kommt jedenfalls nicht in Frage: Die Tiere waren blind.

Scientific Reports 10.1038/s41598-019-51012-3, 2019

MIKROBIOLOGIE HEILSAMER SCHLEIM

Schleim schützt vor bakteriellen Infektionen. Aber wie bewerkstelligt das Körpersekret das? Ein Team um Katharina Ribbeck vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) meint nun eine Antwort gefunden zu haben: Offenbar verändern langkettige Zuckermoleküle, so genannte Glykane, die Genexpression von Bakterien und senken damit deren Infektiosität.

Die Wissenschaftler setzten zunächst aus Schweinemägen gewonnenen Schleim gegen Ansammlungen des Bakteriums *Pseudomonas aeruginosa* ein. Solche Biofilme, wie sie etwa als Plaque auf unseren Zähnen vorkommen, erweisen sich normalerweise

als besonders hartnäckig und lassen sich nur schwer mit Antibiotika bekämpfen. Doch der Schleim schafft es, etwa 70 Prozent der Bakterien aus dem Biofilm zu mobilisieren und damit angreifbar zu machen.

Weitere Untersuchungen ergaben, dass dabei auch einzelne Bakterienzellen beeinflusst wurden: In Anwesenheit von Schweinemagenschleim oder menschlichem Speichel waren bestimmte *Pseudomonas*-Gene abgeschaltet. Diese dienen unter anderem der Herstellung bakterieller Gifte oder der Kommunikation der Mikroorganismen untereinander.

Schleim besteht aus einer komplexen Mischung so genannter Muzine –

Glykoproteine, die sich zu büstenartigen Gebilden zusammenschließen und große Mengen Wasser binden. Von diesen Molekülen trennten die Forscher den Zuckeranteil ab. Wie sich herausstellte, reagierte *Pseudomonas aeruginosa* auf ihn ähnlich sensibel wie auf kompletten Schleim. Die Mehrfachzucker könnten nach Ansicht der Forschergruppe also der Schlüssel für den antimikrobiellen Effekt sein. Das Fehlen wichtiger Zuckerketten wäre dann wiederum der Grund, weshalb die Schleimabwehr bei manchen Menschen nicht funktioniert.

Nature Microbiology 10.1038/s41564-019-0581-8, 2019

BIOLOGIE DER VIETNAM- MAUSHIRSCH LEBT

► Im schwer zugänglichen Regenwald zwischen Vietnam und Laos haben Forscher immer wieder neue Säugtierarten entdeckt. Doch viele von ihnen sind durch Menschen gefährdet, die Wald abholzen und zu Jagdzwecken Drahtschlingen auslegen.

Als bedroht gilt unter anderem der Vietnam-Maushirsch (*Tragulus versicolor*), auf den Biologen erstmals 1910 aufmerksam wurden. Die gerade mal 40 Zentimeter großen Tiere wirken auf den ersten Blick wie Nagetiere, sie zählen jedoch zur Familie der Paarhufer. Die Männchen tragen zu Hauern verlängerte Eckzähne im Oberkiefer, die sie während der Paarungszeit als Waffe einsetzen. Auffällig ist auch das silbergraue Fell auf ihrer Rückseite, das die Tiere von dem weit häufigeren Kleinkantschil-Hirschferkel abhebt (*Tragulus kanchil*).

Da Forscher seit 1990 kein Exemplar mehr gesichtet hatten, galt der Maushirsch als verschollen – bis jetzt. Ein Team um An Nguyen vom Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung hat ortsansässige Vietnamesen befragt, ob sie die Tiere in den letzten Jahren gesehen hatten, was tatsächlich vereinzelt der Fall war. Die Wissen-



ANDREW TILKER, GLOBAL WILDLIFE CONSERVATION

Der lange verschollene Maushirsch ist wieder aufgetaucht: In Vietnam tappten mehrere der Tiere in eine Fotofalle.

schaftler stellten daraufhin an aussichtsreichen Stellen Kamerafallen auf. Und siehe da: Zwischen April und Juli 2018 lichteten sie mehr als 200-mal Vietnam-Maushirsche ab.

Dennoch seien Maßnahmen nötig, um das Überleben der Art zu garantie-

ren, argumentiert das Team. So müsse vor allem die Wilderei bekämpft werden. Auch sollte man gezielt nach weiteren Populationen der seltenen Tiere suchen.

Nature Ecology & Evolution, 10.1038/s41559-019-1027-7, 2019

GEOLOGIE WARUM DER NIL NACH NORDEN FLIESST

► Der Nil gilt vielen Hydrologen als der längste Fluss der Erde, von seiner Quelle im Hochland Ostafrikas bis zur Mündung ins Mittelmeer sind es rund 6800 Kilometer. Seit wann der Nil in der heutigen Form existiert, ist dagegen unklar.

Ein Team um Claudio Faccenna von der Universität Rom hat nun neue Argumente für die These vorgebracht, dass der heutige Flusslauf seit rund 30 Millionen Jahren besteht. Das würde den Nil zu einem der ältesten Flüsse der Erde machen. Andere Forscher gehen davon aus, dass der

nordafrikanische Strom in seiner heutigen Form erst seit sechs bis acht Millionen Jahren besteht.

Das passe allerdings nicht zu geologischen Befunden und Computermodellen, argumentiert das Team um Faccenna. Es beruft sich unter anderem auf Zirkonminerale aus Sedimenten am Nildelta, die vor 30 Millionen Jahren entstanden sind und aus Äthiopien stammen.

Zu dieser Zeit stieg das äthiopische Hochland empor, da sich im Erdmantel darunter eine heiße Blase aus Gesteinsschmelze gebildet hatte. Laut

den Computersimulationen von Faccennas Gruppe ist dieser »Plume« Teil eines Förderbands im Erdmantel, das seit 40 Millionen Jahren immer mehr Material unter die ostafrikanische Region schaufelt und sie so beständig in die Höhe steigen ließ. Umgekehrt zieht der absteigende Ast der Mantelkonvektion die nördlich davon liegenden Bereiche kontinuierlich nach unten. Das resultierende Gefälle habe den Fluss stets nach Norden fließen lassen, so die Forschergruppe.

Nature Geoscience 10.1038/s41561-019-0472-x, 2019

PHYSIK MIKROSKOP MACHT SPIN SICHTBAR

Wissenschaftler haben ein Rastertunnelmikroskop derart weiterentwickelt, dass man damit direkt den Spin einzelner Atome erfassen kann. Bisher ist dies nur auf Umwegen und mit Einschränkungen möglich gewesen. Der Spin (eine Art quantenphysikalische Eigenrotation) legt die magnetischen Eigenschaften eines Atoms fest.

Rastertunnelmikroskope dienen seit Langem dazu, die Anordnung der Atome in einem Material zu erfassen. Die Geräte setzen dazu auf eine extrem schmale, elektrisch geladene Spitze, die sich im Abstand weniger

Nanometer über die Oberfläche bewegt. Schwankungen im Strom, der zwischen Spitze und Oberfläche fließt, erlauben dann Rückschlüsse auf die Position der Atome.

Um auch deren Spin zu messen, hat das Team um Markus Ternes vom Forschungszentrum Jülich ein magnetisches Molekül an die Spitze eines Rastertunnelmikroskops gepackt. Das Molekül enthält ein Nickelatom, dessen Eigenschaften die Forscher genau kennen. Gelangt es in die unmittelbare Nähe eines klar ausgerichteten Atomspins, beeinflusst das die Energieniveaus, die Elektronen im

Nickelatom offenstehen. Das wiederum verändert den Stromfluss durch das Molekül auf charakteristische Art.

Das Verfahren ermöglichte es, die atomare Struktur einer Oberfläche gemeinsam mit dem Magnetsinn der einzelnen Atome zu erfassen, schreiben die Forscher. Da sich die Technik prinzipiell leicht nachrüsten lässt, könne sie in Zukunft in vielen Laboren zum Einsatz kommen und dort etwa bei der Untersuchung komplexer magnetischer Zustände an den Oberflächen von Festkörpern helfen.

Science 10.1126/science.aax8222, 2019

ARCHÄOLOGIE SÜDDEUTSCHER BRONZEZEITKRIEGER

Archäologen haben aus dem Fluss Tollense die Habseligkeiten eines Bronzezeitkriegers geborgen, der dort vor mehr als 3250 Jahren in einer blutigen Schlacht starb. Wie die Gruppe um Tobias Uhlig von der Universität Göttingen berichtet, kennen Forscher einige der entdeckten Bronzeobjekte bisher nur aus Süddeutschland und Nordfrankreich. Offenbar war der Besitzer von dort bis ins heutige Mecklenburg-Vorpommern gereist.

Das spricht dafür, dass die Kämpfe an der Tollense weit mehr waren als ein lokales Scharmützel. Die Fundstätte gilt als eines der ältesten erhaltenen Schlachtfelder der Welt. Seit 2009 haben Archäologen hier 12000 menschliche Knochenreste ausgegraben, die von ungefähr 140 – ausschließlich männlichen – Opfern stammen.

Nun haben Taucher am Boden der Tollense 31 Bronzeobjekte entdeckt, die aus der Zeit stammen, in der auch die Schlacht stattfand. Die Funde umfassen einen daumenlangen Meißel, eine Messerklinge, einen Pfriem mit Holzgriff und vor allem

FOTO: VOLKER MINIKUS, UHLIG, T. ET AL.: LÖST IN COMBAT A SCRAP METAL FIND FROM THE BRONZE AGE BATTLEFIELD SITE AT TOLLENSE. ANTIQUITY 93, 2019, FIG. 6



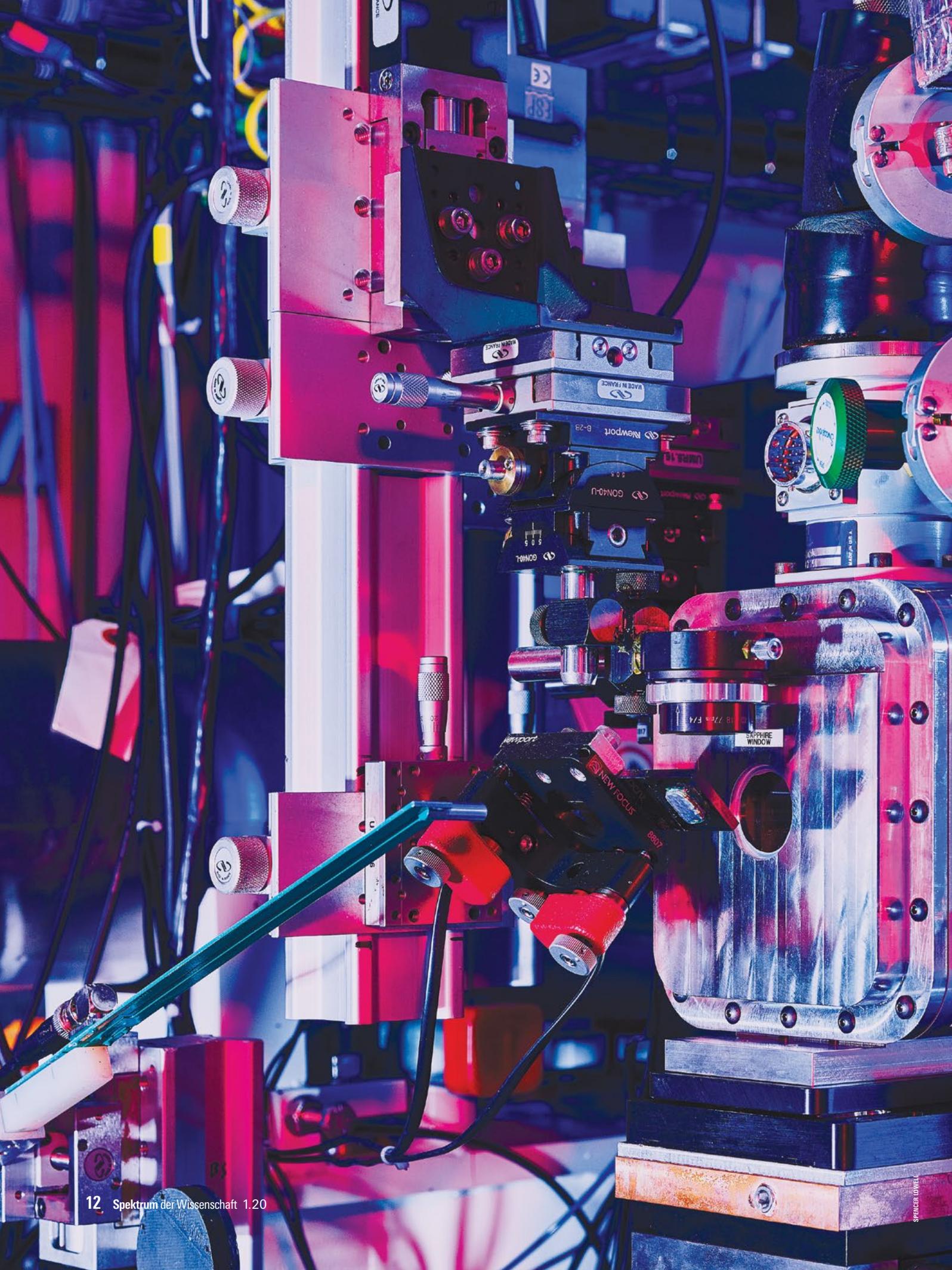
Am Grund der Tollense fanden Archäologen 31 Bronzeobjekte, die vermutlich einst im gleichen Behälter verstaut waren.

Altmetall: Fehlgüsse, Gussreste, Waffenfragmente und Barrenstücke.

In der Spätbronzezeit nutzte man solche Hackbronze als eine Art Tauschwährung, wobei man das Metall mit einem Meißel nach Bedarf zerstückelte. Das Ensemble war quasi das Münzgeld eines Kriegers. Das Portmonee dazu haben die Forscher auch entdeckt: Zwischen den Objekten lagen wenige Zentimeter große Blechrollchen, die noch von Nägeln

zusammengehalten werden. Solche Zylinder sind bisher nur aus spätbronzezeitlichen Gräbern in Süddeutschland und Nordfrankreich bekannt. Sie gehörten stets Männern, die meist auch mit ihrem Schwert bestattet wurden. Die Zylinder dienten vermutlich als Beschläge einer Holzschachtel – die offenbar mit ihrem Besitzer zur Schlacht an der Tollense reiste.

Antiquity 10.15184/aqy.2019.137Published, 2019



SUPRALEITUNG VORSTOSS ZUR RAUMTEMPERATUR

Schon lange suchen Physiker nach einem Werkstoff, der seinen elektrischen Widerstand bereits bei normalen Umgebungsbedingungen verliert. Neue theoretische Ansätze und bessere Computermodelle machen Hoffnung.

Bob Henderson hat in theoretischer Hochenergiephysik promoviert. Er lebt und arbeitet als Wissenschaftsjournalist im US-Bundesstaat New York.



» [spektrum.de/artikel/1686858](https://www.spektrum.de/artikel/1686858)

Im Inneren einer Diamantstempelzelle (hinter dem runden Fenster links der Bildmitte) am Argonne National Laboratory entstehen supraleitende Verbindungen.

Der Experimentalphysiker Maddury Somayazulu – von seinen Kollegen kurz Zulu genannt – konnte nur darauf hoffen, dass »nah dran« gut genug ist. Im Juni 2017 beugten sich er und sein Postdoc Zack Geballe am Argonne National Laboratory im US-Bundestaat Illinois in einem mit Gerätschaften vollgestopftem Raum über ein zylindrisches Gerät: eine Diamantstempelzelle. Darin befand sich ein staubkorngroßes Stück des zu den seltenen Erden gehörenden Metalls Lanthan sowie ein wenig Wasserstoff. Theoretiker hatten vorhergesagt, dass daraus unter enormem Druck eine neuartige Substanz entstehen könnte. Der dafür nötige Wert entspricht dem von 2,1 Millionen Atmosphären oder der Hälfte des Drucks im Zentrum der Erde und lag – und das war das Entscheidende an jenem Tag – nahe am Kapazitätslimit der Diamantstempelzelle. In dieser pressen zwei kleine Diamanten als eines der härtesten Materialien überhaupt den Inhalt zusammen. Sobald die beiden Wissenschaftler die Einstellschrauben der Zelle auf 1,7 Millionen Atmosphären drehten, spürten sie, wie diese sich festzogen. Die Diamanten waren durch den hohen Druck bereits verformt und könnten jederzeit brechen. »Wir dürfen nicht höher gehen«, entschied Somayazulu. »Lass uns hier synthetisieren und sehen, was passiert.«

Für ihr weiteres Vorgehen hatten die Wissenschaftler die Diamantstempelzelle mit Hightech-Geschützen umgeben: Zwei lange Röhren durchleuchteten die Probe mit Röntgenstrahlen, und eine Ansammlung von Linsen und Spiegeln beschoss sie mit Laserlicht. Dieses sollte eine theoretisch vorhergesagte Reaktion von Lanthan und Wasserstoff in Gang setzen. Abgeschirmt außerhalb des Raums beobachteten die Physiker auf einem Computermonitor eine grafische Darstellung der mikroskopischen Struktur, erzeugt mit Hilfe der Röntgenstrahlen. Die Kurve nahm rasch die erhoffte Form an: Die Forscher hatten erfolgreich das Lanthanhydrid LaH_{10} synthetisiert! »Wir waren geradezu perplex«, erinnert sich Somayazulu, »wir mussten nicht einmal besonders viel Wärmeenergie zuführen, damit sich die Substanz bildete.« Und diese hat es in sich.

Theoretische Berechnungen und Computermodelle hatten zuvor vermuten lassen, LaH_{10} könnte ein Supraleiter sein. Solch ein Material transportiert im Gegensatz zu konventionellen Leitern elektrischen Strom völlig widerstandsfrei. Hinzu kam die Vorhersage, LaH_{10} könnte diese Eigenschaft bereits bei einer Temperatur von 280 Kelvin (etwa 7 Grad Celsius) erreichen. Das wäre ein erheblich höherer Wert als bei allen bekannten Supraleitern und nahe an normaler Raumtemperatur. Sie zu erreichen, ist das seit Langem angestrebte Ziel der Forschung an diesen Materialien. Denn für die existierenden Supraleiter sind extrem tiefe Temperaturen erforderlich. Das beschränkt ihre Anwendung auf Nischenbereiche wie Kernspintomografie und Teilchenbeschleuniger. Hier werden die Kosten der Kühlung mittels flüssigen Heliums durch die Vorteile der enorm starken Magnetfelder aufgewogen, die sich in supraleitenden Spulen produzieren lassen. Ein bei Raumtemperatur funktionierender Supraleiter wäre für viele weitere Zwecke nützlich, beispielsweise den effizienten Transport von Strom über weite Strecken, leistungsfähigere Energiespeicher sowie zahlreiche Anwendungen in der Computer- und Medizintechnik.

Zunächst entstand das Material virtuell, erst danach im Labor

Wie die Röntgenanalyse von Somayazulu und Geballe zeigte, besaß das von ihnen erzeugte LaH_{10} genau die von der Theorie vorhergesagte Struktur. »Das erschlug uns fast«, erzählt Somayazulu. Seit Mai 2019 ist er am Argonne National Laboratory angestellt. Als er und seine Kollegen hier 2017 das LaH_{10} synthetisierten, war er noch für das Geophysical Laboratory der Carnegie Institution for Science in Washington tätig. Russell Hemley, sein dortiger Chef, bezeichnet LaH_{10} als »wunderschönes Beispiel für Designermaterialien«. Hemley leitete sowohl das Team, das die Substanz erschuf, als auch die Theoriegruppe, die ihre Existenz und ihre Eigenschaften vorgeschrieben hatte. Er erläutert: »Wir haben das Material zunächst im Computer zusammengesetzt. Berechnungen zeigten uns dann, wo wir danach suchen sollten«, also bei welchem Druck die Forscher welche Elemente mischen mussten.

Das war das wirklich Neue an LaH_{10} . Seit einem Jahrhundert suchen Wissenschaftler nach Hochtemperatur-Supraleitern. Aber in dieser Zeit war fast jeder Durchbruch einer Mischung von Spekulation und Glück im Laboratorium zu verdanken, wo Forscher verschiedenste Ingredienzen und Prozesse ausprobierten.

Die Entdeckung neuartiger supraleitender Substanzen kam bislang stets vor der Theorie, die das Phänomen bei ihnen erklärte. Das ist seit 1911 so, als der Effekt zum ersten Mal überhaupt beobachtet wurde. Damals stellte der niederländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes fest, dass der elektrische Widerstand von Quecksilber verschwand, als er es in flüssiges Helium mit einer Temperatur von vier Kelvin tauchte. Obwohl das Verhalten überraschend häufig auftritt und viele Materialien es unterhalb

AUF EINEN BLICK DER TRAUM VOM PERFEKTEN LEITER

- 1** Diverse Materialien transportieren elektrischen Strom ohne Widerstand. Allerdings benötigen sie dafür extrem niedrige Temperaturen und zusätzlich häufig sehr hohen Druck.
- 2** Supraleiter bei Normalbedingungen würden revolutionäre Anwendungen ermöglichen. Auf dem Weg dorthin mussten sich Forscher bisher vor allem auf ihre Erfahrung und Intuition verlassen.
- 3** Erstmals scheinen nun theoretische Methoden, experimentelles Geschick und moderne Computerverfahren planvoll zusammenzuwirken. Das hat jüngst zu Durchbrüchen geführt.

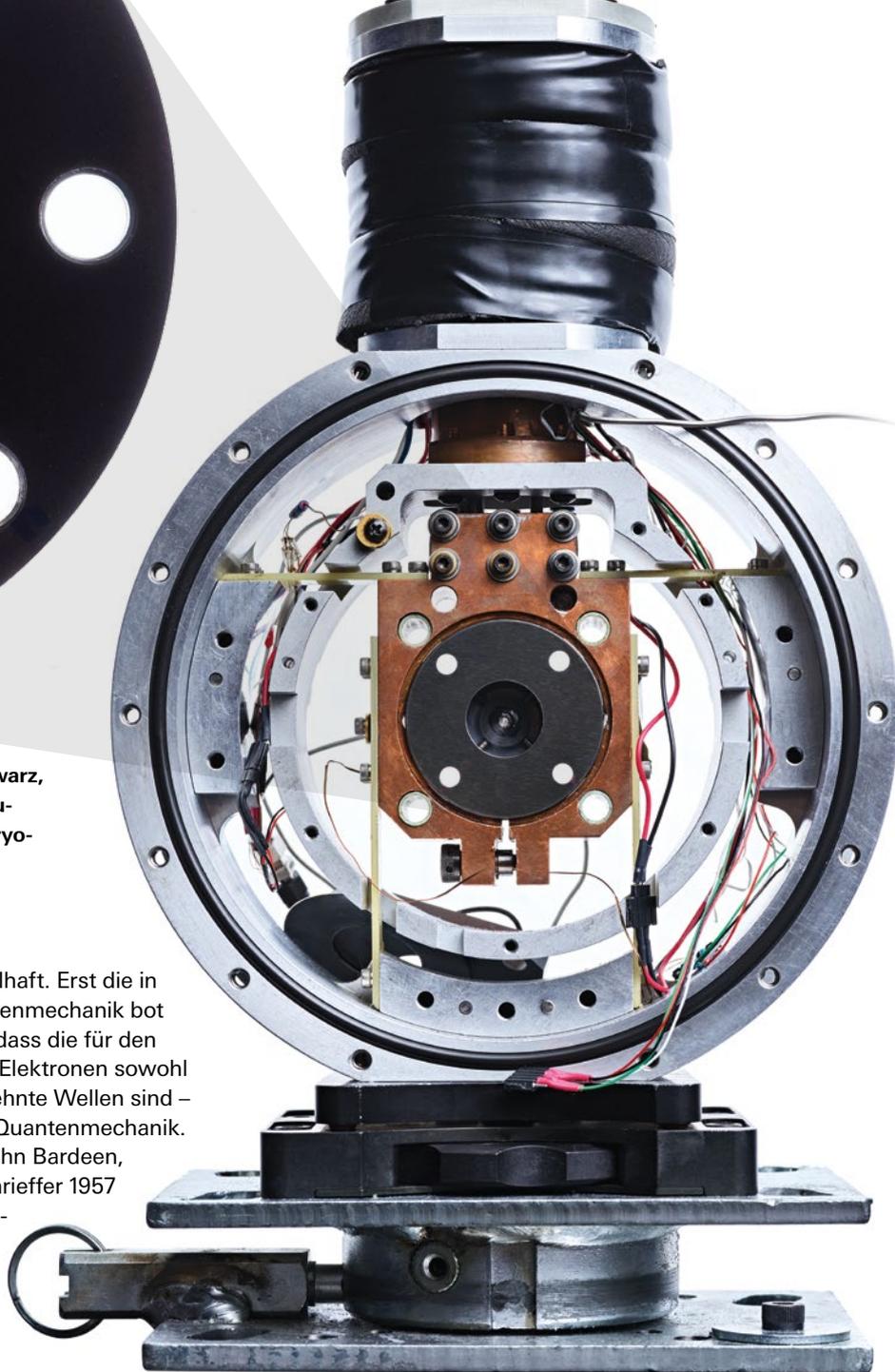
Diamanten in einer Stempelzelle (schwarz, oben) pressen Materie extrem stark zusammen. In der Umgebung hält ein Kryostat (rechts) mit seinem metallischen Innenleben die Temperaturen niedrig.

von zehn Kelvin zeigen, blieb es rätselhaft. Erst die in den 1920er Jahren entwickelte Quantenmechanik bot eine Erklärung. Diese basiert darauf, dass die für den elektrischen Strom verantwortlichen Elektronen sowohl lokalisierte Teilchen als auch ausgedehnte Wellen sind – wie alle subatomaren Objekte in der Quantenmechanik. Darauf aufbauend veröffentlichten John Bardeen, Leon N. Cooper und John Robert Schrieffer 1957 die nach ihren Initialen benannte BCS-Theorie, mit der sie die Physik der Supraleitung beschrieben.

Alles geht von der prinzipiellen Vorstellung der Forscher vom elektrischen Strom aus: Im Inneren eines Metalls formen positiv geladene Ionen (die Atomkerne plus einige gebundene Elektronen) ein Kristallgitter, also eine regelmäßige Struktur. Innerhalb dieses befindet sich ein See aus freien Elektronen. Bei Anlegen einer Spannung bewegen sie sich durch das Gitter und bilden den elektrischen Strom. Fehlerhaft eingebaute Atome und thermische Schwingungen behindern den Elektronenfluss und erzeugen elektrischen Widerstand. Die BCS-Theorie erklärt nun, wie die Elektronen den Widerstand mit einem Quantentrick umgehen (siehe »Kurz erklärt: Supraleitung«, S. 16). Zunächst verbiegt sich das positiv geladene Gitter durch die elektrische Anziehung eines sich bewegenden Elektrons in dessen Richtung. Die Verzerrung verdichtet hier die positiven Ladungen des Gitters und zieht ein zweites Elektron in die Spur des ersten. Die beiden Elektronen verbinden sich zu einem »Cooper-Paar«. Hier kommt dann die Quantenmechanik ins

Spiel: Die Cooper-Paare verhalten sich nicht wie Teilchen, sondern eher wie Wellen – sie überlappen einander, synchronisieren sich und werden zu einer einzigen Welle. Diese ist so groß, dass das Gitter sie nicht mehr beeinflussen kann. Sie bewegt sich daher ohne jeden Widerstand durch den Leiter.

Die BCS-Theorie hat viele erfolgreiche Vorhersagen gemacht, darunter die »kritische« Temperatur, oberhalb der Supraleiter ihre besonderen Eigenschaften verlieren. Doch bei der Suche nach neuen Supraleitern mit höheren kritischen Temperaturen erwies sich das Modell als wenig hilfreich. Im Gegenteil: Der erfolgreichste Supraleiter-Jäger der Geschichte, der US-Experimentalphysiker Bernd Matthias, hielt die BCS-Theorie sogar für irrelevant bei seiner Arbeit. Matthias entdeckte in den 1950er, 1960er und 1970er Jahren Hunderte von Supraleitern, darunter viele



Metalllegierungen, indem er in seinem Labor unzählige Materialien testete. Dabei ließ er sich von empirischen Regeln über deren Eigenschaften leiten – beispielsweise Symmetrieüberlegungen – sowie von einem übergeordneten Prinzip: »Hüte dich vor Theoretikern!«

Trotz Matthias' Erfolge stieg die höchste beobachtete kritische Temperatur zwischen 1955 und 1973 nur geringfügig von 17 auf 23 Kelvin an. Und da blieb sie bis 1986, als George Bednorz und Alex Müller aus den IBM-Laboren in Zürich Supraleitung einer neuen Art entdeckten. Sie forschten an geschichteten keramischen Materialien. Diese so genannten Cuprate erreichten 1993 den bisherigen Rekord für hohe kritische Temperaturen bei Umgebungsdruck: 135 Kelvin. Im Gegensatz zu Matthias hatten Bednorz und Müller »sehr solide theoretische Ansichten über das, was sie suchten«, kommentiert der Physiker Peter Littlewood von der University of Chicago. »Allerdings stellen sich diese Vorstellungen nun eventuell als falsch heraus.«

Möglicherweise basieren die Modelle zur Supraleitung in Cupraten zu Unrecht darauf, wie die BCS-Theorie Cooper-Paare als Resultat atomarer Gitterschwingungen (»Phononen«) voraussagt. Zwar scheinen solche Paare tatsächlich verantwortlich zu sein. Doch viele Experten vermuten heute, dass die Cooper-Bindungen in Cupraten von irgendeiner Form direkter elektromagnetischer Wechselwirkung zwischen den Elektronen abhängen und nicht – oder zumindest nicht allein – von Phononen. Leider lassen sich die Wechselwirkungen nur sehr schwer mathematisch modellieren. Deshalb haben selbst mehrere Jahrzehnte intensiver Forschung keine alternative Hypothese für die Cuprate

hervorgebracht, die der BCS-Theorie ebenbürtig wäre. Es herrscht unter den Forschern bislang nicht einmal Einigkeit über den genauen Mechanismus, der zur Paarbildung bei den Elektronen führt.

Die Wissenschaftler ordnen Cuprate inzwischen in eine größere Kategorie von Supraleitern ein. Zu dieser gehören viele weitere Materialien, bei denen der Effekt offenbar auf einer Art direkter Wechselwirkung zwischen den Elektronen beruht. Sie heißen unkonventionelle Supraleiter, um sie von jenen zu unterscheiden, bei denen die speziellen Eigenschaften von den Phononen aus der BCS-Theorie erzeugt werden. Bednorz und Müller waren also erfolgreich, obwohl die Stoffe anders funktionierten als gedacht.

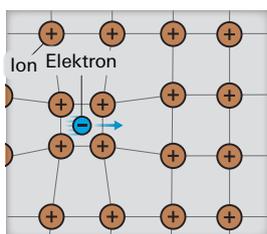
Innovationstreiber Zufall

2006 stolperten japanische Wissenschaftler – während sie an der Verbesserung von Flachbildschirmen arbeiteten – über eisenbasierte Supraleiter. Sie sind ebenfalls unkonventionell, und es gibt keine passende Theorie, um die Supraleitung bei ihnen zu erklären oder gar vorherzusagen. »Immer wieder wird zufällig ein seltsames Material entdeckt«, so Littlewood, »und daraus lernen wir etwas über einen Mechanismus für die Bildung von Elektronenpaaren, an den wir vorher nicht gedacht haben.«

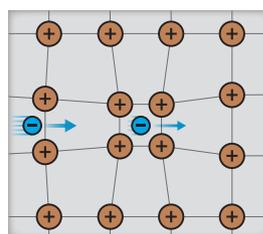
Michael Norman, Materialwissenschaftler am Argonne National Laboratory, betont immerhin, der Wert der Kälte sei unbestritten. Wärme störe einfach das wellenartige Quantenverhalten auf makroskopischen Skalen. Die Energie bricht die Bindungen der Cooper-Paare auf und vernichtet den koordinierten Quantenzustand.

Kurz erklärt: Supraleitung

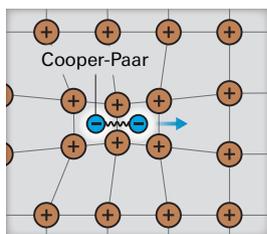
In einem Supraleiter fließt elektrischer Strom ohne Widerstand. Eine grundlegende Vorstellung von den quantenmechanischen Ursachen liefert die BCS-Theorie (benannt nach den Initialen ihrer drei Erfinder). Allerdings vermuten Physiker, dass der Prozess bei vielen supraleitenden Materialien komplizierter ist als in diesem Modell.



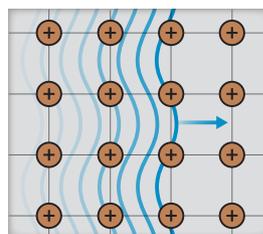
1 Bewegt sich ein negativ geladenes Elektron in einem Festkörper durch ein Gitter aus positiv geladenen Ionen, werden die Ionen zum Elektron gezogen. Das verzerrt das Gitter.



2 Dadurch verdichten sich die positiven Ladungen. Das wiederum zieht ein weiteres Elektron hinter dem ersten her.



3 Die beiden Elektronen verknüpfen sich miteinander und bilden eine Einheit, ein »Cooper-Paar«.



4 Viele Cooper-Paare gehen in einen gemeinsamen quantenmechanischen Zustand über. Er breitet sich wie eine große Welle aus. Diese spürt keinen Widerstand mehr durch das Gitter.

Die Anzahl der Paare und die Stärke ihres Zusammenhalts dienen gemeinsam als Barriere gegen die thermische Zerstörung der Supraleitung. Die kritische Temperatur steht für die Höhe dieser Schutzmauer. Oberhalb dieser kann das Material der Wärme nicht länger standhalten. Für Cuprate ist die Barriere vermutlich so hoch, weil die direkte Elektron-Elektron-Wechselwirkung stärkere Paarbindungen erzeugt als der indirekte Mechanismus der Phononen.

»Heute bezweifelt wohl niemand mehr, dass Supraleiter bei Raumtemperatur und normalem Druck möglich sind«, meint Norman. Schließlich tauchen ständig neue Verbindungen und mögliche Mechanismen der Paarbildung auf. Selbst für konventionelle Supraleiter existiere laut Igor Mazin vom Naval Research Laboratory in Washington keine fundamentale Grenze für die kritische Temperatur. Es gebe lediglich »eine Art statistischer Schranke«, weil das Phänomen mit zunehmender Temperatur immer unwahrscheinlicher werde.

Doch die schiere Menge denkbarer Materialien macht Hoffnung: Es gibt fast 100 stabile Elemente im Periodensystem, mit tausenden prinzipiellen Kombinationen aus zwei Elementen, hunderttausenden aus drei, und so weiter. Berücksichtigt man weiterhin die Stöchiometrie – die verschiedenen Mengenverhältnisse der Elemente in einer Verbindung – und obendrein die zahlreichen vorstellbaren räumlichen Strukturen, so sind die Möglichkeiten praktisch unendlich. Aber wie sollen Wissenschaftler die Supraleitungsstecknadel in dem gewaltigen chemischen Heuhaufen finden?

Außerdem braucht es selbst nach einer erfolgreichen theoretischen Suche noch die Bestätigung im Experiment. So zermarterte sich Somayazulu im September 2017 sein Hirn, denn seine weiteren Versuche mit LaH_{10} , in denen er die Supraleitfähigkeit nachweisen wollte, verliefen nicht gut. Dafür benötigte er unverändert hohen Druck, denn die Verbindung existiert nur unter diesen Bedingungen. Doch um einen Kurzschluss während der Messung des elektrischen Widerstands zu vermeiden, musste eine Dichtung aus Metall in der Diamantstempelzelle durch einen Isolator ersetzt werden. Seit Monaten entkam gasförmiger Wasserstoff durch Lecks in der Apparatur, egal welches Design die Forscher ausprobierten. »Jeden Tag kamen wir zusammen, diskutierten und versuchten es vergeblich aufs Neue«, erinnert sich Somayazulu. »Es war höchst frustrierend.«

Eines Tages, unterwegs auf der Ringautobahn um Washington auf dem Weg zur Arbeit, kam ihm eine Idee: »Warum verwenden wir nicht einen Festkörper als Quelle für den Wasserstoff?« Die chemische Verbindung Amminboran, die der Forscher von früheren Arbeiten her kannte, könnte Wasserstoff genau auf die richtige Weise freisetzen. Nach vielen Monaten der Verbesserungen am Versuchsaufbau funktionierte es endlich: Bei einer Temperatur von 265 Kelvin fiel der Widerstand von LaH_{10} auf null. Somayazulu gelang gerade noch ein Foto mit seinem Smartphone, bevor die Diamantstempelzelle auseinanderbrach. Das Bild war alles, was den Forschern von ihrem Erfolg blieb. Erst nach sechs Monaten schaffte das Team eine Wiederholung.

Somayazulu hat mehr als zwei Jahrzehnte mit dem Versuch zugebracht, Wasserstoff unter hohem Druck in

einen Supraleiter zu verwandeln. Auch Hemley war diesem Traum viele Jahrzehnte nachgejagt, ausgehend von Vorhersagen des Physikers Neil Ashcroft von der Cornell University aus dem Jahr 1968. 1983 hatte Ashcroft dann eingeräumt, es sei zwar wohl ein Druck von zehn Millionen Atmosphären nötig, er vermutete zugleich allerdings, ein hinzugefügtes zweites Element könne den Wert reduzieren. Es würde wie ein Keil die Wasserstoffbindungen spalten. Derart befreit wären für die Atome Schwingungen möglich, die eine Supraleitfähigkeit bei höheren Temperaturen begünstigen könnten. Ihre geringe Masse ließe Phononen mit ungewöhnlich hohen Frequenzen und damit hoher Energie zu. Das wiederum würde eine große Zahl von Elektronen in den supraleitenden Zustand befördern.

Somayazulu war 1994 aus Indien an die Carnegie Institution gekommen, um als Postdoc bei Hemley zu arbeiten, und seither hat er zahllose Wasserstoffmischungen auf unterschiedlichsten Wegen aufgeheizt und zusammengequetscht. Er stieß auf viele interessante physikalische Effekte – aber nicht auf Supraleitung. »Ich versetzte also Wasserstoff systematisch mit allen möglichen Substanzen«, sagt er. »Ich benutzte immer höhere Drücke – und nichts geschah. Ich fing an zu überlegen: Hatte Ashcroft sich geirrt?«

Mit Rechenstärke und Thermodynamik zur optimalen Struktur

Ashcroft lag richtig. Aber um das zu beweisen, war erst ein neuer Typ von Computerprogramm für eine systematische Suche nach geeigneten, stabilen Kristallstrukturen nötig. Der Algorithmus fahndet nach brauchbaren Stoffen, indem er virtuell Atome hin und her schiebt. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik sorgt dafür, dass dabei solche Strukturen entstehen, die nur noch ein Minimum an Energie als Wärme abgeben können. Einige Programme verwenden evolutionäre Suchprozesse, die mit einer Gruppe von Kristallstrukturen beginnen, diese verändern und gewissermaßen jeweils die fittesten der Nachkommen auswählen. Mit diesen wiederholen sie den Vorgang, bis sie schließlich eine optimale Struktur finden. Die Wissenschaftler wenden auf das modellierte Material dann die BCS-Theorie an, um das Potenzial der Struktur für die Supraleitung zu ermitteln und die kritische Temperatur abzuschätzen.

In China benutzte eine Forschergruppe um Yanming Ma 2012 ein solches Programm und sagte – in Einklang mit Ashcrofts Ideen – voraus: Das Kalziumhydrid CaH_6 sollte sich in einer Diamantstempelzelle erzeugen lassen und bei relativ hohen Temperaturen supraleitend sein. Rasch begannen Hemleys Team sowie weitere Arbeitsgruppen damit, Kalzium unter hohem Druck in Wasserstoff zu pressen. Außerdem sollte Ma zufolge Schwefelwasserstoff (H_2S) unter ausreichendem Druck unterhalb von 80 Kelvin supraleitend werden. In Deutschland überprüften das Mikhail Eremets vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz und seine Kollegen bei einem Druck entsprechend 1,5 Millionen Atmosphären und stellten bei dem von ihnen produzierten Material überrascht fest, dass es bereits bei 203 Kelvin supraleitend ist. Die Forscher waren zufällig auf einen weiteren Supraleiter gestoßen, auf H_3S . Bis zur Erzeugung von LaH_{10}

hielt H_3S den Temperaturrekord. Aus Hemleys Suche war ein Wettrennen geworden. Mit der Hilfe von Hanyu Liu, einem Postdoc in Mas Gruppe, verwendete er einen Algorithmus zur Struktursuche und sagte 2017 die Existenz von LaH_{10} voraus. Damit konnte er seiner Gruppe die Marschrichtung vorgeben, die schließlich zur Synthese des Materials führte. Eremets schaffte es kurz darauf ebenfalls, LaH_{10} herzustellen. Er bestätigte den charakteristischen Verlust des Widerstands und führte später eine ganze Reihe von Tests durch, um die Supraleitfähigkeit von LaH_{10} in Einklang mit der BCS-Theorie zu bringen – erfolgreich.

Diese Entdeckungen verbinden das gezielte Design von Stoffen mit glücklichen Zufällen. LaH_{10} beispielsweise resultierte aus Hemleys Idee, Liu möge nach Verbindungen mit einem möglichst hohen Wasserstoffanteil suchen. Das sollte Ashcrofts ursprünglichem Ansatz nahekommen. Vermutlich erreicht LaH_{10} seine Hochtemperatur-Supraleitung durch Vibrationsmoden in der speziellen Struktur seiner atomaren Käfige, in denen Wasserstoffatome ein Lanthanatom umschließen (siehe »Neues Wundermittel?«, rechts).

Theoretiker »wären niemals auf eine solche Konfiguration gekommen«, kommentiert Eva Zurek, eine Chemikerin an der University of Buffalo, die ebenfalls Struktursuchen durchführt. Ungeachtet, welcher Anteil der Erfolge nun geplant oder zufällig war: Die neuen Computerprogramme haben Theoretiker wie Ma und Zurek plötzlich zu potenziell entscheidenden Mitspielern gemacht. »Ich glaube, die Experimentalphysiker nehmen uns jetzt erheblich ernster als früher«, resümiert Zurek.

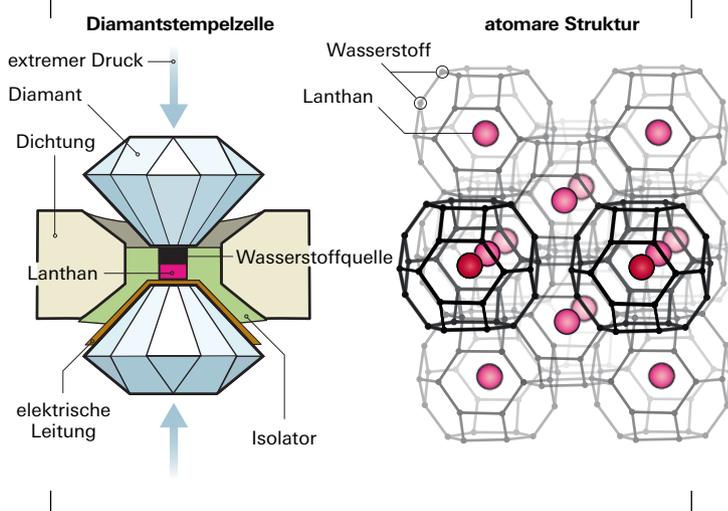
Die eine Sache ist, dass Theoretiker die Entdeckung von H_3S und LaH_{10} beschleunigt haben, also von konventionellen Supraleitern, die durch die BCS-Theorie beschrieben werden. Überraschenderweise könnte ihnen das jedoch auch für unkonventionelle Supraleiter gelingen, für die Physiker keine funktionierenden Modelle haben.

Etwa zur gleichen Zeit wie LaH_{10} sorgte ein anderes supraleitendes Material für Schlagzeilen: zweilagiges Graphen (siehe Artikel ab S. 20). Graphen ist eine nur atomdünne Schicht aus Kohlenstoff, der ein hexagonales Gitter bildet. Legt man zwei solche Lagen leicht gegeneinander verdreht übereinander, entsteht eine supraleitende Struktur mit einer zwar niedrigen kritischen Temperatur von 1,7 Kelvin, aber ungewöhnlich starken Cooper-Bindungen. Die Entdeckung verbindet Zufall und computergestützte Vorhersage – »halb dies, halb jenes«, meint Pablo Jarillo-Herrero, der am Massachusetts Institute of Technology die Gruppe leitet, die das Material entdeckt hat. Das Verhalten zeigt sich nur bei einem »magischen« Winkel von 1,1 Grad zwischen den beiden Wabenschichten, ein Wert, der zuerst in den Ergebnissen der Computeranalyse auftauchte. Allerdings sagte das Modell lediglich ein Maximum der Elektron-Elektron-Wechselwirkung voraus, nicht aber den supraleitenden Charakter. Der offenbarte sich erst im Laborexperiment.

Gleichwohl hebt die Entdeckung die Bedeutung dessen hervor, was Michael Norman Designprinzipien nennt: berechenbare Größen, die dabei helfen, Supraleitung vorher-

Neues Wundermittel?

Lanthan-Decahydrid (LaH_{10}) ist sogar noch bei einer Temperatur von rund minus 10 Grad Celsius supraleitend, allerdings nur unter extremem hohem Druck. Damit ist das Material dasjenige mit der höchsten bekannten kritischen Temperatur. Wissenschaftler haben es 2017 mit Hilfe einer Diamantstempelzelle erzeugt, in der sie Lanthan und Wasserstoff komprimierten. So entstand ein Gitter aus Wasserstoffatomen, die jeweils einzelne Atome Lanthan (pink) käfigartig umschließen.



zusagen, obwohl es noch keine umfassende Theorie gibt. Die Regeln von Bernd Matthias waren solche Prinzipien, doch zu jeder davon fanden sich Ausnahmen bei der Erforschung unkonventioneller Supraleiter. Aber wie Norman 2016 zeigte, ähneln sich selbst unkonventionelle Supraleiter unterschiedlicher Klassen. Etwa gibt es gemeinsame Merkmale im Phasendiagramm, also der Darstellung ihrer Eigenschaften in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Außerdem scheinen geschichtete, quasizweidimensionale Strukturen wie Cuprate hohen kritischen Temperaturen zuträglich zu sein, und bestimmte Kristallstrukturen sind offenbar grundsätzlich von Vorteil.

Mit der Entdeckung neuer Klassen von Supraleitern sollten weitere Designprinzipien offensichtlich werden, argumentierte Norman. Bereits heute scheint angesichts mehr als 12000 katalogisierter und charakterisierter supraleitender Materialien die Frage begründet, ob in den vorhandenen Daten nicht weitere Regeln verborgen sein könnten.

Hier könnte maschinelles Lernen helfen. So heißen Computerprogramme, die sich selbstständig auf Basis wachsender Datenmengen verbessern. 2018 bewies das ein solcher Algorithmus nach einem Training anhand tausender Materialien. Er identifizierte in einem getrennten Datensatz sowohl konventionelle als auch unkonventionelle Supraleiter mit einer Genauigkeit von 92 Prozent und

schätzte ihre kritische Temperatur erfolgreich ab. Das Programm verwendete dazu lediglich einfache Eigenschaften der Elemente wie das Atomgewicht und den Schmelzpunkt. »Es ist nicht so sehr die Tatsache erstaunlich, dass das mit maschinellem Lernen möglich ist«, sagt der an der Analyse beteiligte Forscher Valentin Stanev von der University of Maryland, »sondern wie die Maschine es macht, welche Größen sie für ihre Vorhersagen heranzieht.«

Das wichtigste Designprinzip, das der Algorithmus für die kritischen Temperaturen von Cupraten gefunden hat, ist ein Parameter, der von der Anzahl der Elektronen in den äußersten Schalen der Atome abhängt. Wie Stanev hervorhebt, hatte niemand ihn vorher beachtet. Die Forscher hoffen nun auf weitere für die Vorhersage nützliche Größen.

Einen aussichtsreichen Stoff zu finden, ist das eine – aber dann fehlt noch seine Bauanleitung

Statt sich im Labor auf das Glück zu verlassen, so Stanevs Kollege Stefano Curtaolo von der Duke University, »könnte maschinelles Lernen uns eine Untermenge von Verbindungen vorschlagen«. Er führt aus: »Die Experimentatoren müssten dann nicht ein Jahr lang zehn Verbindungen untersuchen, sondern würden 10000 im Computer testen und für diese Vorselektion nur wenige Wochen benötigen.«

Doch selbst wenn Theoretiker neue und interessante Verbindungen finden, gibt es noch längst keine Anleitung dafür, wie sie sich im Labor produzieren lassen. »Man macht etwas, das funktioniert«, beschreibt Somayazulu den Prozess der Materialsynthese, »und dann wiederholt man exakt dasselbe, damit es weiter klappt. Aber man weiß überhaupt nicht, warum.«

Er brauchte beispielsweise sechs Monate, um den Nachweis der Supraleitung bei LaH_{10} zu wiederholen, weil die Forscher zuerst mögliche Fehler in ihrem Vorgehen identifizieren und vermeiden mussten. Aber immerhin gelang die Herstellung von LaH_{10} überhaupt – im Gegensatz zu CaH_6 , einem ebenfalls von Ma 2012 vorhergesagten Material, das sich bislang bei keinem Versuch herstellen ließ. Yttriumhydrid YH_{10} sollte wiederum sogar bei noch höheren Temperaturen supraleitend werden als LaH_{10} . Aber besser man fragt Somayazulu gar nicht danach. Der Stoff verhielt sich in seinen Experimenten »scheußlich«. Der Trick mit dem Amminboran funktionierte beispielsweise nicht. Und mit Selen ging es zwar bei niedrigen Drücken, aber nicht bei hohen. Wie erwähnt produzierte Eremets H_3S , als er eigentlich auf der Jagd nach H_2S war. Die Synthese dieser Materialien ist immer noch eine Art schwarzer Kunst.

Unterdessen verursacht die Computeranalyse ihre eigenen Probleme. Im Mittel benötigt ein Superrechner eine Woche, um eine Struktur bei einer vorgegebenen Stöchiometrie und einem bestimmten Druck zu finden. Und für ein gegebenes Paar von Elementen können viele unterschiedliche Kombinationen von Interesse sein. Der enorme Rechenaufwand und die knifflige Analyse beschränken die Suche auf Materialien aus zwei Elementen und nicht allzu vielen Atomen pro Einheitszelle, dem fundamentalen Baustein des Kristallgitters. »Wir sind immer noch nicht in der Lage, Systeme mit drei Elementen und 50 Atomen pro Einheitszelle vorherzusagen«, resümiert Zurek.

Maschinelles Lernen ist weitaus weniger rechenintensiv. Stanev führte seine Analysen auf einem Laptop durch. Die große Einschränkung: Das Verfahren kann nur von Fakten ausgehen, die sich aus bereits bekannten Supraleitern ableiten lassen. Deshalb gibt es wenig Hoffnung, damit völlig neue Klassen solcher Stoffe zu entdecken.

Die Meinungen gehen darüber auseinander, was letztlich das Vermächtnis von LaH_{10} und den anderen Hydriden sein wird. Hemley, der inzwischen an die University of Illinois in Chicago gewechselt ist, hofft auf Hinweise auf Materialien, die ihre supraleitenden Eigenschaften auch beim Übergang zu normalen Drücken behalten. Littlewood hält das zumindest nicht für unmöglich. Doch andere Forscher sind skeptisch, weil der Druck für die Supraleitfähigkeit der Hydride bislang eine so entscheidende Rolle spielt. Igor Mazin betont: »Die starke Elektron-Phonon-Kopplung zerstört den Kristall nur deshalb nicht, weil er durch den Druck von außen zusammengehalten wird.«

Wenn aber ein solches Material möglich ist, dann besteht es vermutlich aus mindestens drei verschiedenen Elementen, meint Zurek. Und Mazin geht von einer komplexen Kristallstruktur aus. Denn ganz allgemein tendieren neue Hochtemperatur-Supraleiter zu immer komplizierteren Verbindungen. Zuerst wurden die Supraleiter aus einem einzigen Element mit kritischen Temperaturen im einstelligen Kelvinbereich von den von Matthias entwickelten Metalllegierungen übertroffen. Danach kamen Materialien mit mehr Elementen und komplizierteren Kristallstrukturen. Viele Experten vermuten Raumtemperatur-Supraleiter in einer noch unbekanntem Klasse von Supraleitern, die das Spielfeld des Periodensystems wohl noch stärker ausnutzen werden.

Unterdessen ist Somayazulu zufrieden damit, die gegen Theoretiker gerichtete Regel von Matthias gebrochen zu haben. Am Argonne Laboratory äußert er sich trotz der bislang ausgebliebenen Erfolge leidenschaftlich über die Versuche, CaH_6 zu synthetisieren und die damit verbundenen Debatten mit Theoretikern. Manchmal konnten diese den Experimentatoren etwas beibringen, in anderen Situationen war es umgekehrt. Für Somayazulu ist die nun fruchtbar gewordene Rückkopplung zwischen Laborversuch und Modell die bislang wichtigste Lektion der Hydride. »Jedes Mal, wenn die Theoretiker eine Vorhersage machen, funktioniert das zwar nur in der Hälfte der Fälle«, sagt der Forscher. »Aber immerhin haben wir jetzt diese 50-Prozent-Chance.« ◀

QUELLEN

Drozdov, A. P. et al.: Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system. *Nature* 525, 2015

Drozdov, A. P. et al.: Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures. *Nature* 569, 2019

Somayazulu, M. et al.: Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures. *Physical Review Letters* 122, 2019

Stanev, V. et al.: Machine learning modeling of superconducting critical temperature. *npj Computational Materials* 4, 2018

PHYSIK DER MAGISCHE WINKEL

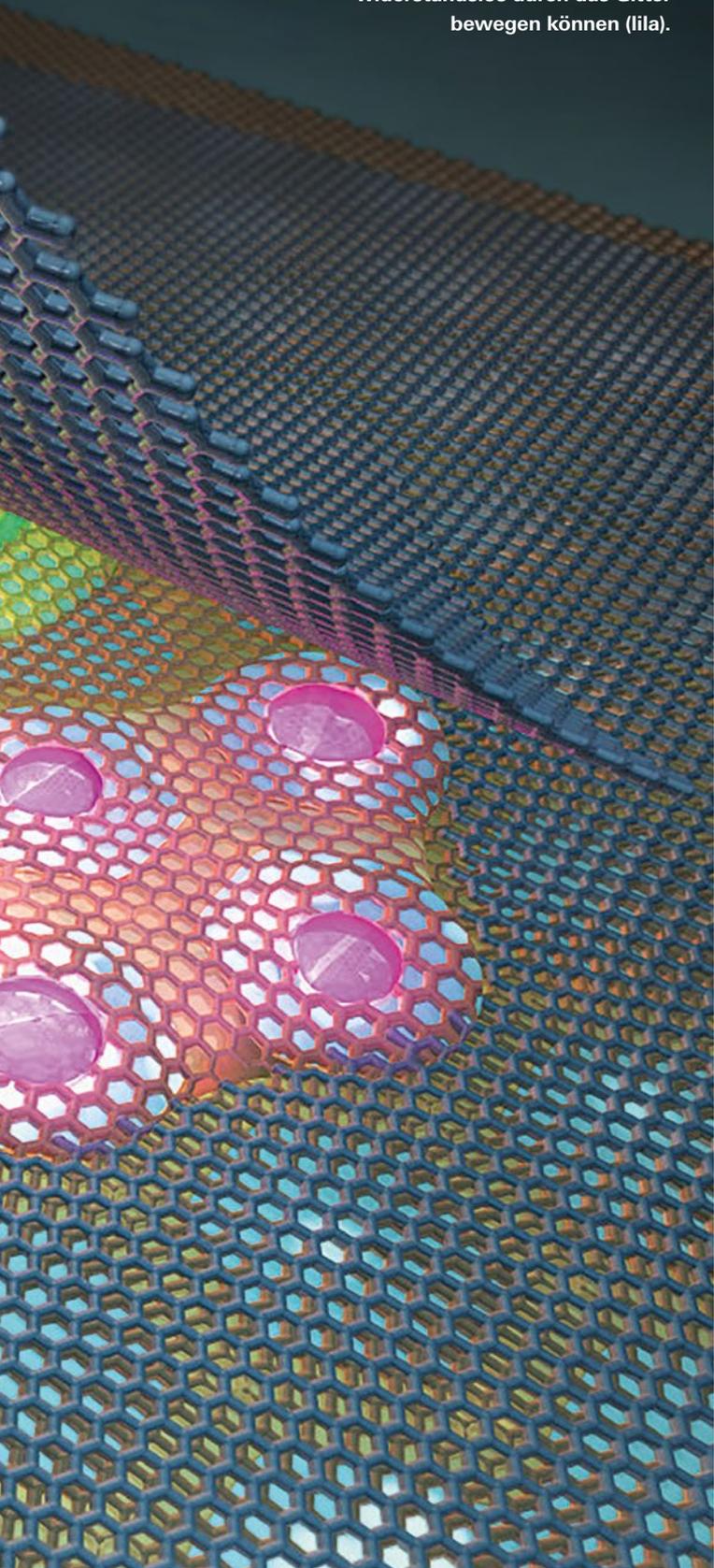
Wenn man zwei Schichten der Kohlenstoff-variante Graphen gegeneinander verdreht, fließt Strom verlustfrei hindurch. Der Schlüssel zum Verständnis der Hochtemperatur-Supraleitung?



Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei Spektrum.

» spektrum.de/artikel/1686860

In zweilagigem Graphen, dessen Schichten unter dem »magischen Winkel« verdreht wurden, nehmen Elektronen besondere Zustände ein: Mal bleiben sie fest an ihre Atomkerne gebunden (rosa), mal zeigen sie eine spezielle Form von Magnetismus (grün) und mal finden sie zu Cooper-Paaren zusammen, die sich widerstandslos durch das Gitter bewegen können (lila).



Die Elektronen flitzen einfach so hindurch, vorbei an allen Atomrümpfen. Normalerweise geht den geladenen Teilchen irgendwann die Puste aus, doch hier reicht ihre Energie auf ewig. Billionenfach strömen sie durch das, was Physiker einen Supraleiter nennen. Er überträgt Strom widerstandslos, ohne die sonst üblichen Verluste – und könnte damit unsere Welt verändern. Aber bisher funktioniert der Zauber nur bei extremen Minusgraden, meist im untersten Geschoss der Temperaturskala bei minus 273 Grad Celsius.

Schon lange träumen Physiker von einem Material, das auch bei 15, 20 oder 25 Grad keinen elektrischen Widerstand aufweist. Aber aus welchen chemischen Elementen müsste solch ein »Raumtemperatur«-Supraleiter bestehen, und in welche Anordnung müsste man die Atome bringen? Seit 30 Jahren ist das eine der großen Fragen der Physik.

Derzeit sehen sich die Experten einer Antwort so nah wie schon lange nicht mehr. Zum einen diskutieren sie begeistert über Experimente mit Diamantpressen, die spezielle chemische Verbindungen extrem stark zusammendrücken. Mit ihnen haben Physiker zuletzt beeindruckende Rekorde für die Supraleitung aufgestellt (siehe »Vorstoß zur Raumtemperatur«, S. 12).

Zum anderen stürzen sich Forscher auf einen schon länger bekannten Stoff: Graphen ist ein 2-D-Material; es besteht nur aus einer hauchdünnen Schicht, in der Kohlenstoffatome ein Bienenwabemuster bilden. 2018 stapelten Wissenschaftler des Massachusetts Institute of Technology (MIT) zwei Ebenen des Materials und verdrehten sie leicht gegeneinander. Verblüfft stellten sie fest, dass die beiden Graphenschichten bei einem Winkel von exakt 1,1 Grad zum Supraleiter werden.

Gerechnet hatte damit fast niemand. Über Nacht wurde der »magische Winkel« zur großen Hoffnung der Supraleiterjäger. Zweilagiges Graphen selbst bietet sich zwar nicht für einen Einsatz außerhalb des Labors an, da es die begehrte Eigenschaft nur knapp oberhalb des absoluten Temperaturnullpunkts hat. Doch es könnte sich wie kein zweites Material dazu eignen, die physikalischen Prozesse hinter der Supraleitung besser zu verstehen.

Leiter, Nichtleiter, Supraleiter

Wer diese Mechanismen entschlüsseln will, muss sich mit der Physik fester Körper auseinandersetzen. Darin sind Teilchen keine Einzelgänger, sondern eng zusammengepackt. Solide Materialien bestehen aus unzähligen Atomen, die in vielen Fällen in einem dreidimensionalen Gitter angeordnet sind. Dadurch überlappen die Einflussbereiche der Atome; ihre Elektronen müssen sich den Raum mit anderen teilen. Statt diskreten Energieniveaus stehen den Ladungsträgern »Energiebänder« offen, die je nach Art des Atomgitters verschieden aussehen und unterschiedlich stark mit Elektronen befüllt sind.

In Kupfer gibt es pro Atom beispielsweise überdurchschnittlich viele Elektronen mit reichlich Bewegungsenergie. Sie sind an keinen Atomrumpf gebunden und können sich daher leicht von Atom zu Atom bewegen. Das macht das Metall zu einem guten Stromleiter, wenn auch zu keinem perfekten: Da die positiv geladenen Atomkerne

stets an den Elektronen zerran, verlieren diese bei ihrem Weg durchs Gitter Energie. Ganz anders sieht es in Isolatoren aus: Hier haben die Elektronen von vornherein eher wenig Bewegungsenergie. Deshalb können sie die elektrostatische Anziehung der einzelnen Atomkerne überhaupt nicht überwinden. Entsprechend fließt kein Strom durch das Material.

In Supraleitern tritt ein besonderes Phänomen auf: Die Elektronen helfen einander beim Weg durch den Festkörper, indem sie sich zu so genannten Cooper-Paaren zusammenschließen. Das haben die Physiker John Bardeen, Leon Cooper und John Schrieffer 1957 herausgefunden, 46 Jahre nachdem die Supraleitung erstmals in einem ultrakalten Quecksilberdraht beobachtet wurde.

Gemäß dieser »BCS-Theorie« kann man sich die Zusammenarbeit der Elektronen wie folgt vorstellen: Eines von ihnen zieht auf seinem Weg durch das Gitter die Atome ein wenig zu sich. Dadurch bewegen sich auch die Nachbarn ein kleines Stück, nur um nach der Passage des Elektrons wieder in ihre Ausgangslage zu schwingen. Bis dahin hat jedoch bereits ein anderes Elektron das zeitweise verformte Atomgitter genutzt: Es surft gewissermaßen in der Kielwelle seines Schwesterteilchens.

Betrachtet man die Energiebilanz des Cooper-Paars, so bewegt es sich ohne Verluste durch den Festkörper – die Grundlage der Supraleitung. Aber wie finden die Elektronen zueinander? Und weshalb trennen sie sich nicht nach kürzester Zeit wieder?

Laut BCS-Theorie tauschen die Teilchen Gitterschwingungen aus, die das Atomgitter verändern. Die resultierende Anziehung zwischen den Elektronen ist dabei gerade so stark, dass sie die elektrostatische Abstoßung der gleich gepolten Teilchen überkompensiert. Der Mechanismus funktioniert allerdings nur nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt. Lediglich dort halten die Atomrümpfe so still, dass die von den Cooper-Paaren ausgesandten Gitterschwingungen ihre Wirkung entfalten können. Zappeln die Atome bei höheren Temperaturen hin und her, geht die Verbindung zwischen den Partnern unwiederbringlich verloren.

Ein Supraleiter, der bei Raumtemperatur funktioniert, ist daher mit der BCS-Theorie nicht vereinbar. Lange war das ein Problem ohne echte Relevanz: Bis in die 1980er Jahre waren nur Materialien bekannt, die ihren elektrischen Widerstand bei weniger als minus 250 Grad Celsius verlieren. Doch dann taten Physiker im IBM-Forschungslabor im schweizerischen Rüslikon eine neue Klasse von Supraleitern auf, die Cuprate. Die kupferhaltigen Keramiken sind eigentlich Isolatoren. Wenn man allerdings zusätzliche Atome in ihr Gitter einfügt, leiten manche von ihnen auch noch viele Dutzend Grad oberhalb des absoluten Nullpunkts Strom, und zwar ohne Widerstand.

Die Euphorie über diese »Hochtemperatur«-Supraleiter war so groß, dass zwei Forscher ein Jahr später den Physik-Nobelpreis erhielten. Bald darauf machte sich jedoch Ernüchterung breit: Supraleitende Cuprate bestehen aus vier oder mehr Atomsorten. Wie genau ein daraus konstruiertes Gitter Elektronen beeinflusst, ist bis heute

nicht ganz klar. Ähnlich ist es bei den eisenhaltigen Pniktiden, die 2008 die Bühne betraten (siehe **Spektrum** Dezember 2009, S. 36).

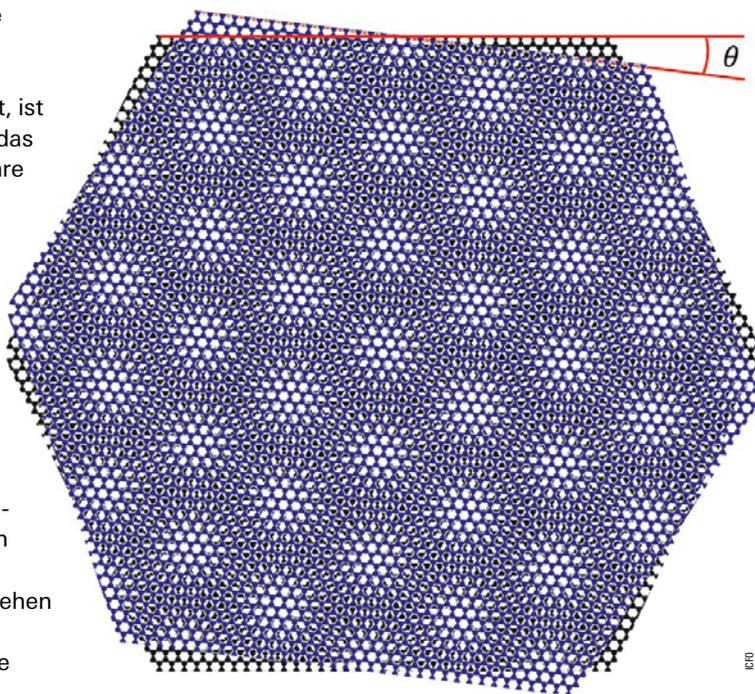
»Wegen der vielen verschiedenen Bestandteile sind die theoretischen Modelle für solche Festkörper extrem kompliziert«, sagt Dante Kennes, Professor an der RWTH Aachen. Selbst mit Supercomputern komme man hier nicht weiter. So gibt es zwar unzählige Ideen für den Ursprung der Cuprate-Supraleitung. Aber keine davon könne alle vorhandenen Messdaten schlüssig erklären.

Dabei liegt darin die große Hoffnung des Forschungszweigs: Wenn man die »unkonventionelle« Supraleitung bei vergleichsweise hohen Temperaturen versteht, kann man vielleicht ein Atomgitter designen, das die Supraleitung quasi erzwingt; und zwar auch dann noch, wenn die Atome bei 20 Grad Celsius eifrig hin und her schwingen. »Die bekannten chemischen Elemente lassen so viele verschiedene Kombinationen zu, dass man auf solch ein Material hoffen kann«, sagt Kennes.

Die Forscher hielten das Ergebnis zunächst für einen Messfehler

Noch vor ein paar Jahren glaubten nur wenige Forscher, dass Graphen hierbei eine Rolle spielen würde. Der hauchdünne Kohlenstoff machte sich nach seiner Entdeckung im Jahr 2004 vor allem deshalb einen Namen, weil er ein sehr guter gewöhnlicher Stromleiter ist. Experten handelten Graphen daher eine Weile als möglichen Nachfolger des weit verbreiteten Halbleitermaterials Silizium, allerdings

Verdreht man zwei Graphenschichten um exakt 1,1 Grad gegeneinander, bildet sich ein so genanntes Moiré-Muster. Die spezielle Anordnung der Atome zwingt Elektronen dazu, stark miteinander zu interagieren – was unter anderem die Supraleitung herbeiführen kann.



zeigten sich dabei bald große praktische Probleme (siehe **Spektrum** März 2019, S. 50). In Sachen Supraleitung fristete Graphen dagegen ein Nischendasein: Zwar überlegten Forscher, den besonderen Zustand zu ermöglichen, indem man andere Atomsorten in Kontakt mit dem einlagigen Gitter bringt. Da das mit vielen Materialien klappt und dafür großer Aufwand nötig ist, hielt sich das Interesse der Fachwelt jedoch in Grenzen.

Immer wieder beschäftigten sich Wissenschaftler auch mit gestapelten Graphenschichten. Die Theoretiker Allan MacDonald und Rafi Bistritzer spekulierten bereits 2011, dass etwas Besonderes passieren müsste, wenn man zwei der Ebenen um 1,1 Grad gegeneinander verdreht. Denn bei diesem »magischen« Winkel bilden die gestapelten Atome ein so genanntes Moiré-Muster, was laut MacDonald und Bistritzer zu interessanten Phänomenen führen müsste.

Nicht viele Forscher schenkten der Vorhersage Glauben, aber für Pablo Jarillo-Herrero fühlte sich die Sache richtig an. Mit seiner Gruppe am Massachusetts Institute of Technology experimentierte er um das Jahr 2011 herum eifrig mit Graphen. Er dachte auch schon länger darüber nach, wie man es in einen Supraleiter verwandeln könnte.

Nach mehreren Jahren gelang es seinem Team schließlich, Kohlenstoffebenen unter dem magischen Winkel zu verdrehen. Als Jarillo-Herrero und sein Doktorand Yuan Cao eine der Proben auf minus 271 Grad Celsius abkühlten und den elektrischen Widerstand maßen, glaubten sie zunächst an einen Fehler. Es wollte partout kein Strom fließen; die Elektronen schienen sich einfach keinen Weg entlang der beiden Schichten bahnen zu können.

Noch überraschter waren die MIT-Forscher, als sie die elektrische Spannung etwas veränderten, die an beiden Enden des doppelten Gitters anlag. Dadurch gelangten mehr Ladungsträger in das Material, statt 1,6 Billionen tummelten sich plötzlich 1,8 Billionen in jedem Quadratzentimeter. Das gab den Ausschlag: Plötzlich flitzten die Elektronen ohne elektrischen Widerstand durch das zweilagige Graphen.

Eine Sache elektrisierte die Forscher dabei besonders: Die Supraleitung wies verblüffende Ähnlichkeiten zu den Vorgängen in Hochtemperatur-Cupraten auf. Auch dort hängen die Leitungseigenschaften empfindlich von der Elektronendichte ab; auch dort ist es nur ein kurzer Weg von Isolator zu Supraleiter. »Das hat die riesige Begeisterung ausgelöst«, sagt Dante Kennes.

Elektronen scheinen in magischem Graphen auf eine besondere Art und Weise miteinander zu interagieren, Physiker sprechen von »starken Korrelationen« zwischen den Ladungsträgern. Für das ungewöhnliche Phänomen interessieren sich Experten schon lange. Denn es spielt vermutlich auch bei diversen exotischen Materiezuständen eine wichtige Rolle, beispielsweise in dem Quark-Gluon-Plasma, welches das Weltall kurz nach dem Urknall füllte, oder im dicht gepackten Inneren von Neutronensternen.

Dass der besondere Zustand in geschichtetem Graphen auftritt, geht wahrscheinlich auf das Moiré-Muster zurück, in dem sich die Atome bei einem Verdrehungswinkel von 1,1 Grad anordnen. In manchen Bereichen der periodischen

AUF EINEN BLICK SUPRALEITENDER KOHLENSTOFF

- 1** Seit 30 Jahren versuchen Forscher, die Mechanismen der Hochtemperatur-Supraleitung in so genannten Cupraten zu verstehen. Sie können Strom verlustfrei übertragen.
- 2** Die zweidimensionale Kohlenstoffvariante Graphen stellt Fortschritte in Aussicht: Verdreht man zwei der Schichten um 1,1 Grad gegeneinander, wird das Material plötzlich supraleitend.
- 3** Da Graphen deutlich einfacher zu untersuchen ist, könnten sich die damit gewonnenen Erkenntnisse auf Cuprate und andere Hochtemperatur-Supraleiter übertragen lassen.

Struktur können Elektronen leicht von einer Schicht in die andere »tunneln«. Dadurch verlieren sie jedoch nahezu ihre gesamte Bewegungsenergie. »Die Elektronen bleiben fast stehen«, erläutert Dmitri Efetov, der am Institut für Photonische Wissenschaften sowie am Barcelona Institute of Science and Technology forscht.

Statt einem Kontinuum an Bändern mit vielen verschiedenen Energieniveaus steht den Ladungsträgern nur noch ein einziges, stark abgeflachtes Band offen. Bei der dort verfügbaren Energie handelt es sich fast ausschließlich um potenzielle Energie. Die Teilchen stranden also gewissermaßen an einem Gitterplatz. Dort spüren sie zwar die elektrostatische Abstoßung ihrer Artgenossen, können aber nicht entkommen. In Fluchrichtung wartet bereits das nächste Atom mit gefangenem Elektron. Die »Wellenfunktionen« der Teilchen, mit denen sich ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit berechnen lässt, überlappen daher in starkem Maße. Dadurch treten quantenphysikalische Phänomene auf den Plan: Die Elektronen kondensieren zu einer Art Quantenflüssigkeit, was ganz neue Dynamiken ins Spiel bringt.

Rücken sich Elektronen auf die Pelle, wird es für Physiker spannend

Aber welche? Die theoretische Festkörperphysik stößt hier seit Langem an ihre Grenzen: Zwar gibt es Modelle für starke Korrelationen zwischen Elektronen, aber sie arbeiten mit groben Vereinfachungen. Die reale Situation, wie sie in echten Atomgittern auftritt, lässt sich wegen der gigantischen Zahl an Variablen allenfalls näherungsweise berechnen. »Wie so oft in der Physik sind es die interessantesten Probleme, die theoretisch sehr herausfordernd sind«, sagt Mathias S. Scheurer von der Harvard University.

So ist es bislang ein Rätsel, wieso die stark wechselwirkenden Elektronen magisches Graphen in einen Isolator verwandeln, bei einer etwas anderen Ladungsträgerkonzentration aber auch Supraleitung zulassen. Ideen gibt es viele, die sich grob in zwei Lager einordnen lassen: Ein Teil der

Forscher argumentiert, dass – ähnlich wie in konventionellen Tieftemperatur-Supraleitern – Gitterschwingungen die Elektronen aus ihrem Gefängnis befreien.

Die Schwingungen koppeln die Elektronen demnach zu Cooper-Paaren und bahnen ihnen so einen Weg durch den Festkörper. In diesem Fall hätte die Supraleitung in magischem Graphen nichts mit den Wechselwirkungen zwischen den eingesperrten Elektronen zu tun. Die starken Korrelationen wären vielmehr eine Eigenschaft des isolierenden Zustands, die verloren geht, sobald es zur Supraleitung kommt.

Aus Sicht vieler Experten wäre ein anderes Szenario spannender. Sie vermuten, dass die Interaktionen zwischen Elektronen sowohl für den isolierenden als auch den supraleitenden Zustand verantwortlich sind. Die beiden Phänomene wären demnach keine Konkurrenten, sondern zwei Seiten derselben Medaille. Damit müssten Gitterschwingungen nicht länger die Rolle als Mediator zwischen den Cooper-Paaren spielen – stattdessen wäre ein anderer, noch unbekannter Mechanismus verantwortlich.

In Frage kommt hier unter anderem eine Theorie, die Experten auch als Ursache der Supraleitung in Cupraten diskutieren. Ihr zufolge führen periodische Schwankungen in den Spins der Elektronen die Cooper-Paare zusammen. Die Ausrichtung des Spins (eine Art quantenphysikalische Eigenrotation) legt den Magnetsinn der Teilchen fest, der andere Partikel beeinflussen kann. Entsprechend würden

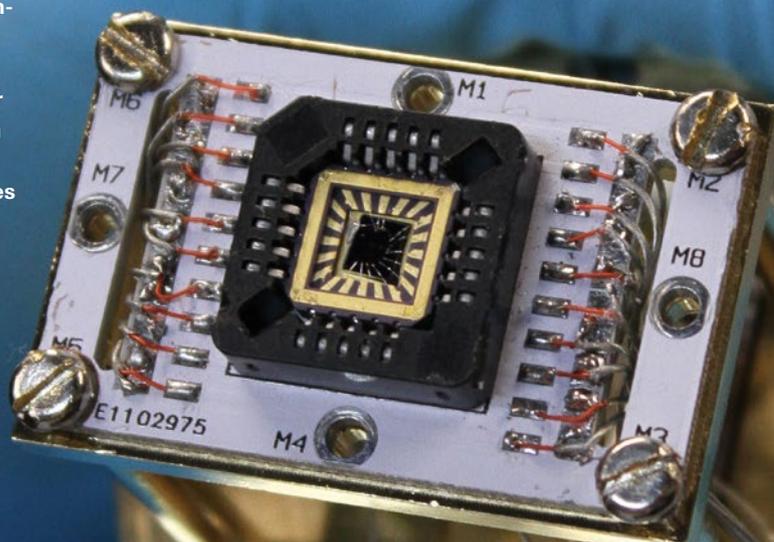
die Supraleitungs-Elektronen nicht Gitterschwingungen austauschen, sondern Magnetschwingungen.

Aber sind diese »Spinwellen« wirklich das Geheimnis hinter der Hochtemperatur-Supraleitung? Und wenn ja, wie genau geht der Prozess vonstatten? Trotz 30 Jahre intensiver Forschung mit Cupraten ist die Frage noch unbeantwortet. Zwar haben Wissenschaftler immer wieder experimentelle Fortschritte gemacht. So konnten sie beispielsweise zeigen, dass die Cooper-Paare in den Hochtemperatur-Supraleitern bestimmte Richtungen zu bevorzugen scheinen; Experten sprechen von einer d-Wellen-Symmetrie. Sie würde man erwarten, wenn die Cooper-Paare auf Spinfluktuationen zurückgehen.

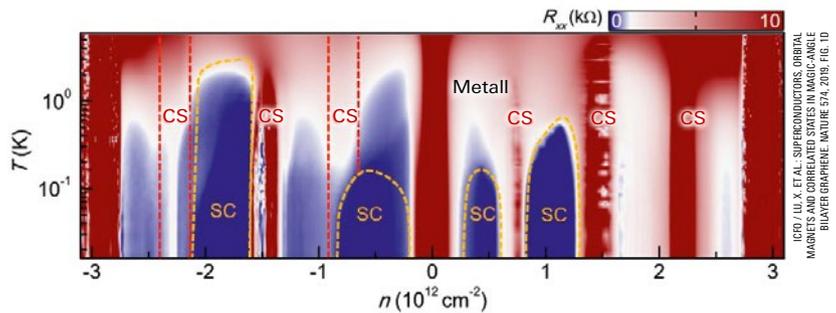
Ein eindeutiger Beweis ist das aber noch nicht. Und die Untersuchung von Cupraten ist mühsam, nicht nur weil man ihre komplizierten, dreidimensionalen Atomgitter kaum simulieren kann. Man muss auch mit aufwändigen »Dotierungen« arbeiten, um die Zahl der Elektronen im Experiment zu verändern. Gemeint sind Fremdkörperatome, die Forscher unter großem Aufwand in das Kristallgitter einfügen.

Bei zweilagigem, unter dem magischen Winkel verdrehten Graphen kann man sich diesen Aufwand sparen. Hier reicht es, die an eine Probe angelegte Spannung zu variieren, um die Elektronendichte zu verändern. Und anders als die Cuprate mit ihrer abschreckenden Chemie besteht Graphen nur aus einem einzelnen Element – den Atomen des Kohlenstoffs. »Es ist so simpel aufgebaut, dass wir die

Um die elektronischen Eigenschaften der gegeneinander verdrehten Graphenschichten zu testen, fertigen Forscher winzige Proben aus dem Material an (schwarzes Plättchen in der Mitte des Chips).



Dmitri Efetov und seine Kollegen haben genau untersucht, wie sich die Leitfähigkeit R_{xx} von magischem Graphen in Abhängigkeit von der Ladungsträgerdichte n (x-Achse) und der Temperatur T (y-Achse) verändert. In dem Diagramm kann man erkennen, dass es bei tiefen Temperaturen um den Temperaturnullpunkt (0 Kelvin) mehrere Regionen gibt, in denen das Material supraleitend (SC) wird. Bei anderen Ladungsträgerkonzentrationen ist die Probe hingegen stark isolierend (CS).



physikalischen Abläufe darin wahrscheinlich wirklich verstehen können«, sagt Kennes.

»Wenn in Graphen tatsächlich Elektron-Elektron-Interaktionen hinter der Supraleitung stecken, könnte man in der Tat einiges über die Hochtemperatur-Supraleitung lernen«, findet auch Mathias Scheurer. Zwar könne man von den verdrehten Kohlenstoffschichten nicht automatisch auf die Vorgänge in Cupraten schließen. »Aber mit Graphen könnte man dann die Modelle verfeinern und ausbauen«, sagt der Harvard-Theoretiker.

Hunderte Theorien, aber nur wenige Experimente

Bisher gibt es nur wenige experimentelle Untersuchungen, die der Supraleitung in verdrehten Graphenschichten nachspüren. Von den etwa 15 Gruppen, die schon länger über die nötigen Techniken verfügen, hätte erst eine Hand voll Ergebnisse publiziert, erzählt Dmitri Efetov. Dem gegenüber stehen viele hundert Fachaufsätze mit theoretischen Überlegungen.

Efetovs Team am Barcelona Institute of Science and Technology gelang es vor kurzem, magisches Graphen eingehender zu untersuchen als andere Gruppen. Die Ende Oktober in »Nature« publizierten Daten erhärten einen von vielen Theoretikern gehegten Verdacht: Es scheint nicht nur eine Elektronenkonzentration zu geben, bei der magisches Doppelschichtgraphen supraleitend wird, sondern mehrere.

Ausschlaggebend ist demnach, wie viele überschüssige Elektronen sich durchschnittlich in einem etwa 13 Nanometer großen Bereich des flachen Gitters befinden, einer so genannten Moiré-Zelle. Hat man es mit einer ganzen Zahl (1, 2, 3 ...) zu tun, erweist sich das Material als Isolator. Weicht die Konzentration geringfügig davon ab, kommt es zur Supraleitung. »Bisher verstehen wir leider noch nicht, wieso das so ist«, sagt Efetov.

Nach wie vor ist es eine Sisyphusarbeit, zwei Graphenschichten unter dem magischen Winkel zusammenzukleben. Die Forscher müssen dazu einen sehr sauberen Graphenschnipsel mit einer Art Roboterarm drehen und vorsichtig auf die zweite Schicht pressen, die Steuerung erfolgt mit einem Joystick. Per Mikroskop überprüfen sie, ob sie die richtige Orientierung treffen. »Nur zwei von 30 Proben eignen sich am Ende für weiterführende Tests«, erläutert Efetov.

Bislang haben die Wissenschaftler vor allem den elektrischen Widerstand solcher Proben gemessen und die

Reaktion auf äußere Magnetfelder. Daneben gibt es erste Ergebnisse von Untersuchungen mit Rastertunnelmikroskopen, die die Oberfläche mit einer extrem sensitiven Spitze abfahren. »Bisher ist hier allerdings schwer zu unterscheiden, welche der beobachteten Eigenschaften auf echte Physik zurückgehen, und welche auf Unsauberkeiten in den Materialproben«, sagt Scheurer.

Mittelfristig hoffen Fachleute daher noch auf eine dritte, sehr anspruchsvolle Analyseverfahren: Bei der so genannten Photoemissionsspektroskopie feuert man Strahlung auf die Probe und katapultiert so Elektronen ins Freie. Dadurch lässt sich nachvollziehen, welche Energieniveaus den Ladungsträgern offenstehen. Auf diese Weise können Experimentatoren vielleicht früher oder später die Frage beantworten, ob Cooper-Paare auch in Graphen bestimmte Richtungen bevorzugen. »Damit könnte man dann viele Modelle falsifizieren«, sagt Kennes. So würde eine d-Wellen-Symmetrie beispielsweise auf einen anderen Kopplungsmechanismus hindeuten als die aus der klassischen BCS-Theorie bekannten Gitterschwingungen.

Einige Theoretiker träumen gar von noch exotischeren Vorgängen. Manche Modelle sagen voraus, dass Spin und Bewegungsrichtung der supraleitenden Elektronen einander stark beeinflussen. Damit würde magisches Graphen zur Klasse der »topologischen« Materialien zählen, an deren Oberflächen besonders robuste Ströme fließen (siehe »Topologie ist überall«, S. 30). Das könnte bei der Entwicklung störungsresistenter Quantencomputer helfen.

Erste Indizien, dass topologische Effekte zumindest im isolierenden Zustand eine Rolle spielen, fand Dmitri Efetov in seiner Untersuchung aus dem Oktober 2019. Er bemüht sich jedoch, die Erwartungen zu zügeln: »Das Feld ist noch sehr jung.« Auch mit Blick auf die Raumtemperatur-Supraleitung hätten er und seine Kollegen viel Arbeit vor sich. »Es kann sein, dass wir noch 10 oder 20 Jahre brauchen.« Aber das müsse ja nicht unbedingt etwas Schlechtes sein: »Wenn man jetzt zu schnell eine Erklärung findet, ist sie vielleicht nicht so interessant wie gedacht.« ◀

QUELLEN

Bistritzer, R., MacDonald, A.: Moiré bands in twisted double-layer graphene. PNAS 108 (30), 2011

Cao, Y. et al.: Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. Nature 556, 2018

Efetov, D. et al.: Superconductors, orbital magnets and correlated states in magic-angle bilayer graphene. Nature 574, 2019

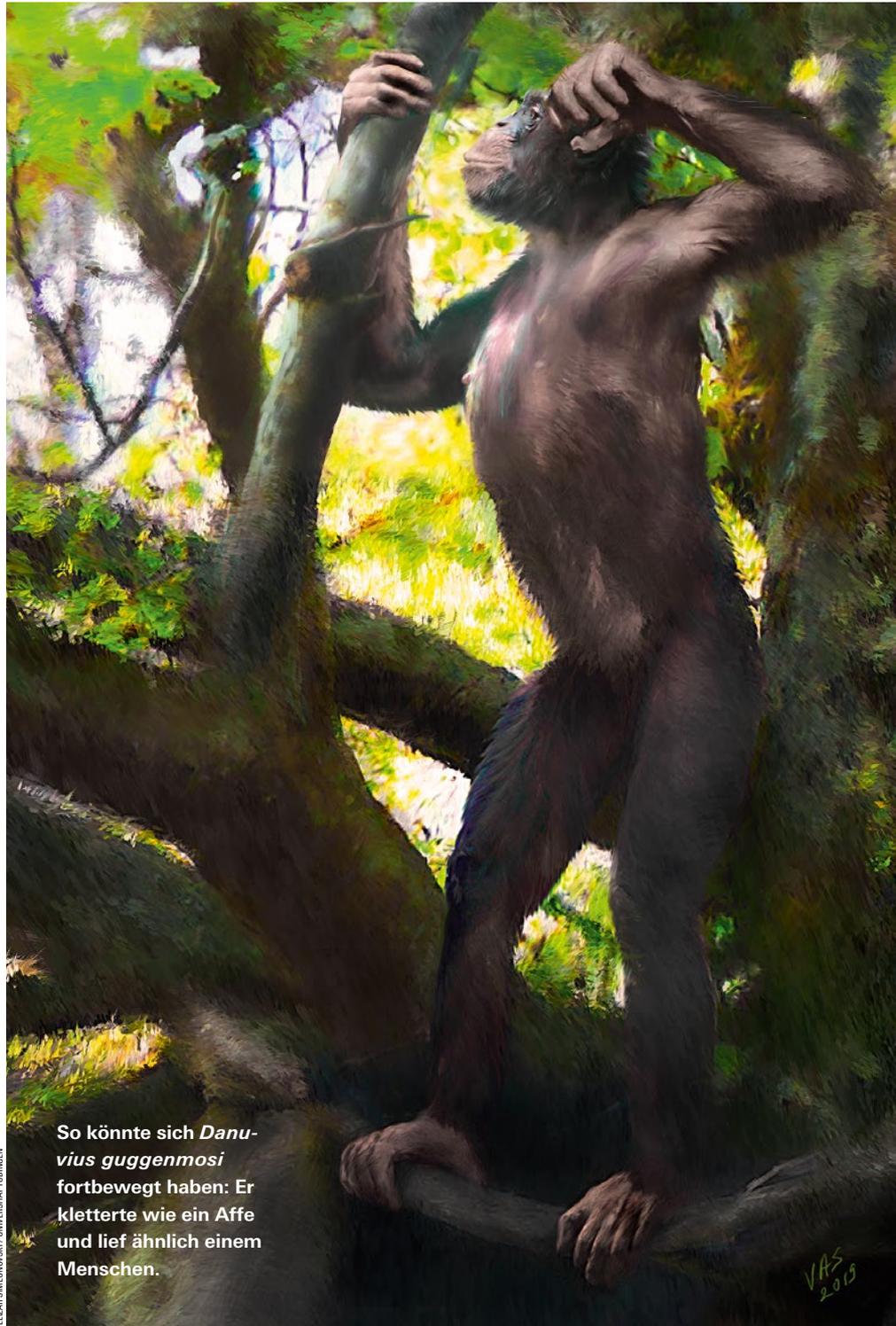
EVOLUTION ENTSTAND DER AUFRECHTE GANG IN EUROPA?

Paläoanthropologen haben in Süddeutschland eine neue Primatenart entdeckt, die offenbar schon vor zwölf Millionen Jahren aufrecht auf zwei Beinen ging.

► Bereits lange vor der Entstehung des anatomisch modernen Menschen *Homo sapiens* bewegten sich seine Vorfahren auf zwei Beinen fort. Wann und wo genau sich die ersten Zweibeiner herausgebildet hatten und aus welcher Art der Fortbewegung der aufrechte Gang entstand, ist aber noch nicht geklärt. Zwei Thesen bestimmen die Diskussion, die vor allem auf Analogien mit heute noch lebenden Menschenaffen basieren. Die eine lautet: Der Ursprung dieses zentralen Merkmals von uns Menschen liegt bei Vierfüßlern, die sich hangelnd von Baum zu Baum schwingen, ähnlich den Orang-Utans der Gattung *Pongo*. Die andere Vermutung geht davon aus, dass der aufrechte Gang aus dem vierbeinigen Knöchelgang entstand, der heute für Gorillas, Bonobos und Schimpansen typisch ist. Die afrikanischen Menschenaffen kraxeln auf Bäume zum Schlafen und Essen, laufen aber sonst auf allen vieren am Boden.

Was die Fossilien bezeugen

So überzeugend die beiden Thesen klingen, so wenig lassen sie sich aber mit den bekannten Fossilien in Einklang bringen, meint die Paläoanthropologin Tracy Kivell von der University of Kent in Canterbury. Da wäre zum Beispiel *Ardipithecus ramidus*, dessen fossile Knochen in Äthiopien ans Licht kamen. Das Alter liegt bei ungefähr 4,4 Millionen Jahren. Die anatomischen Merkmale von *Ardipithecus* haben jedoch wenig mit modernen Menschenaffen gemeinsam. »Ardi« ist der bislang früheste vermutete Hominine, also der älteste Aufrechtgeher und erste Vertreter einer Entwicklung, die in unsere Gattung *Homo* mündete. Sein Skelett lässt aber nicht erkennen, dass er aus einem auf den Knöchelgang spezialisierten Primaten hervorgegangen war. Gorillas, Schimpansen



So könnte sich *Danuvius guggenmosi* fortbewegt haben: Er kletterte wie ein Affe und lief ähnlich einem Menschen.

VELZAR SWEEDNOSKI / UNIVERSITÄT TÜBINGEN

und Bonobos hatten offenbar einen anderen Entwicklungsweg zurückgelegt. Tracy Kivell gibt daher zu bedenken: »Jede noch lebende Art der Menschenaffen ist das Ergebnis ihrer eigenen langen Evolutionsgeschichte – und im Fall der afrikanischen Menschenaffen vergessen wir das oft, weil es so wenige fossile Zeugnisse von ihnen gibt.«

Noch weniger Halt finden die bisherigen Thesen vom aufrechten Gang, wenn man ältere Fossilien sichtet – solche aus dem mittleren und oberen Miozän, der Zeit von vor 13 bis vor 5,3 Millionen Jahren. In dieser Epoche der Erdgeschichte, genauer gesagt vor ungefähr sechs oder sieben Millionen Jahren, verorteten Forscher auch den letzten gemeinsamen Vorfahren von Menschenaffen und Menschen in Afrika. Die hominiden Fossilien des Miozäns geben jedoch anatomisch gesehen Rätsel auf, findet Kivell. Die rund 30 bekannten Gattungen ausgestorbener Menschenaffen, die einst in Afrika, Asien und Europa existierten, so die Forscherin, seien mit heutigen Primaten kaum vergleichbar.

Seit November 2019 haben die bisherigen Thesen zum aufrechten Gang weiter an Standfestigkeit eingebüßt. Paläoanthropologen der Universität Tübingen und des dortigen Senckenberg Centre for Human Evolution and Palaeoenvironment haben in Süddeutschland Fossilien eines 11,62 Millionen Jahre alten Primaten entdeckt, der eine ganz andere Entwicklungsgeschichte nahelegt. Wie die Ausgräber um die Paläontologin Madelaine Böhme erklären, gehören die Knochen zu einer bislang unbekannten Primatenart, die sie *Danuvius guggenmosi* getauft haben. Die gut erhaltenen Fossilien aus dem mittleren Miozän würden genügend Informationen liefern, so die Forscher, um die Bewegungsweise dieser Hominiden zu rekonstruieren. *Danuvius* habe sich sowohl zweibeinig auf Ästen fortbewegt als auch mit den Armen von Ast zu Ast gehandelt. Damit wäre der aufrechte Gang nicht nur anders entstanden als angenommen, sondern auch deutlich früher, als bisherige Funde nahelegen. Außerdem soll sich

CHRISTOPH JACKLE, UNIVERSITÄT TÜBINGEN



Vom Skelett des Männchens sind die meisten Knochen erhalten, insgesamt 21 Stück.

diese wichtige Entwicklungsstufe der Humanevolution nun nicht in Afrika, sondern auf Bäumen des europäischen Kontinents abgepielt haben. Für die Tübinger Forscher könnte *Danuvius guggenmosi* vielleicht sogar eine Primatenart gewesen sein, auf die Menschenaffen und Menschen letztlich zurückgehen.

»Udo« lebte im Haremsverband

Die fossilen Knochen von *Danuvius guggenmosi* haben Madelaine Böhme und ihre Kollegen zwischen 2015 und 2018 in der Tongrube Hammer Schmiede bei Pforzen im Ostallgäu entdeckt. Sie ordnen die 37 Fossilien vier verschiedenen Individuen zu, einem Männchen, zwei Weibchen und einem Jungtier. Die Hominiden waren nicht größer als einen Meter, das Männchen wog schätzungsweise 31 Kilogramm, die beiden Weibchen jeweils 17 bis 19 Kilogramm. Der deutliche Gewichtsunterschied zwischen Männchen und Weibchen lege eine polygyne Lebensweise nahe. »Das heißt, das Männchen lebte im Haremsverband«, wie Böhme auf einer Pressekonferenz in Tübingen erklärt. Der anatomische Aufbau dieser Homi-

niden, davon ist Böhme überzeugt, würde überdies mehr einem Menschen als einem Menschenaffen ähneln.

Danuvius guggenmosi besaß eine bislang unbekannte Anatomie unter den Vorfahren der Menschen und der afrikanischen Menschenaffen. Das sei vor allem an den 21 Knochenstücken des Männchens Udo zu erkennen, den Böhme nach dem Sänger Udo Lindenberg benannt hat. Der feierte just an dem Tag seinen 70. Geburtstag, als die Paläontologin 2016 ein Schlüsselstück von *Danuvius* aus der Tongrube gefördert hatte. Was macht den Primaten aus der Hammergrube nun so menschenähnlich? Das zeigt sich an mehreren anatomischen Details der Wirbelsäule und der Beinknochen. Es sind zwei Wirbel von Udo erhalten, deren Fortsätze stark geneigt sind, anders als etwa bei einem Schimpanse. Daraus resultiert, dass die Wirbelsäule s-förmig angelegt gewesen sein muss. Dank der Biegung im Kreuz konnte *Danuvius* also seinen Rumpf aufrichten. Sein Brustkorb war flach und breit wie beim Menschen – zum Vergleich: Bei Schimpanse ist er tief und schmal.

Aus den fossilen Resten von Udo schließt Böhme, dass sein Lendenbereich länger war als der von modernen Menschenaffen. Er besaß vermutlich sechs oder sieben Lendenwirbel, ein oder zwei mehr als der Mensch, aber drei oder vier mehr als ein Schimpanse. Der braucht den kurzen Lendenbereich, um stabil kraxeln zu können. Der Primat aus dem Miozän hingegen war deutlich beweglicher im Kreuz. Damit konnte er seinen Körperschwerpunkt über den Knien verlagern – und aufrecht stehen. Das würden insbesondere auch die Beckenknochen naheliegen. Bei *Danuvius guggenmosi* lag der Oberschenkelknochen auf einem flachen, oberen Ende des Schienbeins auf. »Unter Last, also unter normalen Bedingungen ist *Danuvius* bevorzugt mit gestreckten Knien gestanden«, fasst Böhme zusammen. Seine Beine müssen zudem eher der menschlichen X-Stellung gleichgekommen sein. Die Füße waren ebenfalls menschenähnlich flach geformt, hatten allerdings einen abgespreizten großen Zeh zum Greifen – und für einen sicheren Gang im Baumgeäst.

Die Arme von *Danuvius* glichen dagegen mehr den Extremitäten eines Menschenaffen, genauer eines Bonobos. Während sie beim Menschen kürzer sind als die Beine, verhält es sich bei Affen genau umgekehrt – so auch bei der neuen Menschenaffenart aus dem Allgäu. Daraus schließen die Forscher, dass die vorderen Gliedmaßen von *Danuvius* vor allem aufs

Klettern, die hinteren Extremitäten auf einen zweibeinigen Gang spezialisiert waren. Diese Fortbewegungsweise bezeichnen die Tübinger Paläoanthropologen als »extended limb clambering«, was auf Deutsch so viel bedeutet wie »Klettern mit gestreckten Gliedmaßen«.

Der letzte gemeinsame Vorfahre

Allerdings zeichnet die Gattung *Homo* die Fähigkeit aus, nicht nur aufrecht zu schreiten, sondern auch auf zwei Beinen rascher zu laufen. Diese Eigenschaft habe sich erst vor zwei Millionen Jahren in Afrika herausgebildet, betont Madelaine Böhme. Dass es dort aber schon so früh wie in Europa aufrecht gehende Wesen gab, bezweifelt die Forscherin. Gerade aus der Zeit vor 13 bis 14 Millionen Jahren gäbe es aus Kenia einen guten Vergleich: Die Primatengattung *Nacholapithecus* sei mit einem kompletten Skelett belegt. »Ihre Körperform entsprach in etwa dem, was wir von einem Pavian kennen, ein quadrupele (vierfüßiger), baumbewohnender Primat – er war aber nicht biped.«

Für die Tübinger Forscher war *Danuvius guggenmosi* vielleicht der letzte gemeinsame Vorfahre der Menschenaffen und Menschen – oder sogar von Menschen und Schimpansen. Oder war er selbst eine Art früher Mensch? Auch das kann sich Böhme vorstellen, »denn der aufrechte Gang, die Bipedie, ist das wahrscheinlich einzige charakterisierende Merkmal

der menschlichen Evolutionslinie.« Offenbar ist der Aufrechtgeher *Danuvius guggenmosi* kein Ausreißer der Evolution. Erst im September 2019 veröffentlichten die Paläoanthropologen Carol Ward von der University of Missouri in Columbia und David Begun von der University of Toronto im »Journal of Human Evolution« ein Fossil mit ähnlicher Tragweite wie Udo. Es handelt sich um einen zehn Millionen Jahre alten Beckenknochen der Gattung *Rudapithecus* aus Ungarn. Von diesem Primaten hat Begun schon Kiefer, Zähne und Knochen der Gliedmaßen entdeckt, doch das Becken legt nun nahe, dass *Rudapithecus* ebenfalls einen recht flexiblen Lendenbereich besaß und auf zwei Beinen gehen konnte, also auch er wenig mit den heutigen Menschenaffen gemeinsam hatte.

Nach Ansicht von Ward regen solche Fossilien zu einem grundsätzlichen Richtungswechsel in der Paläoanthropologie an: »Wir sollten uns weniger fragen, warum die Vorfahren des Menschen von allen vieren aufgestanden sind, sondern eher, warum unsere Ahnen vielleicht nie auf alle viere runtergegangen sind.« Für Ward belegen solche Fossilien, dass der Ursprung der Zweibeinigkeit nicht in der Anatomie der modernen Menschenaffen zu finden ist, weil die Vorfahren des Menschen wohl schlicht anders aufgebaut gewesen waren.

Die direkten Nachweise für den aufrechten Gang – fossilisierte Fußabdrücke von zweibeinig laufenden Wesen – reichen nicht ganz so weit in die Vergangenheit wie *Rudapithecus* und *Danuvius* zurück. Die ältesten fanden sich 2017 in Trochilos an der kretischen Westküste. Dort dokumentierten Experten des Polnischen Forschungsinstituts in Warschau und der Universität Uppsala 5,7 Millionen Jahre alte Fußspuren. Am berühmten Fundort von Laetoli in Tansania waren vor 3,65 Millionen Jahren Vormenschen aufrecht über noch weiche Vulkanasche marschiert. Die Fußabdrücke härteten aus und überdauerten so die Jahrmillionen. Von *Homo erectus* stammen 1,5 Millionen Jahre alte Fußabdrücke aus Ileret in Kenia.

Wie *Danuvius guggenmosi* zu seinem Namen kam

Böhme hat die neue Primatengattung nach dem keltisch-römischen Flussgott Danuvius (lateinisch für Donau) benannt, da die Fundregion im Einzugsgebiet dieses Flusses liegt. Der Artname *guggenmosi* leitet sich von dem verstorbenen Citizen Scientist Sigulf Guggenmos ab. Er hatte 1972 die ersten Fossilien in der Tongrube Hammerschmiede zu Tage gefördert, wo vor Millionen von Jahren ein wenige Meter breiter, geschwungener Bach verlief und Knochenmaterial angeschwemmt wurde. Böhme und ihre Kollegen haben dort seit 2011 rund 15 000 Fossilien frei gelegt, die sie 115 Wirbeltierarten zuordnen konnten – darunter Fische, Riesensalamander, Schildkröten, Elefanten, Mäuse und ein Panda.

Zwar könnte sich die Bipedie Millionen Jahre später ein zweites Mal in Afrika entwickelt haben. Aber für Madelaine Böhme ist schon durch die Fossilien aus dem Allgäu klar: Der aufrechte Gang entstand vor zwölf Millionen Jahren bei Menschenaffen, die in Europa auf Bäumen lebten. ◀

Karin Schlott ist promovierte Archäologin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Böhme, M. et al.: A new Miocene ape and locomotion in the ancestor of great apes and humans. *Nature* 575, 2019

Gierliński, G. D. et al.: Possible hominin footprints from the late Miocene (c. 5.7 Ma) of Crete? *Proceedings of the Geologists' Association* 128, 2017

Kivell, T. L.: Fossil ape hints how bipedal walking evolved. *Nature* 575, 2019

Ward, C. V. et al.: A late Miocene hominid partial pelvis from Hungary. *Journal of Human Evolution* 136, 2019

CHEMIE DER HERR DES KOHLENSTOFFRINGS

Ringe aus 18 Kohlenstoffatomen, die abwechselnd von Dreifach- und Einfachbindungen zusammengehalten werden, stellen eine grundsätzlich neue Form des Elements dar. Um sie zu erzeugen, mussten Forscher einzelne Atome manuell zur Reaktion zwingen.

▶ Kohlenstoff kommt in der Erdkruste in zwei Modifikationen vor: als Graphit und als Diamant. Im Welt- raum lassen sich zudem fußballför- mige Gebilde nachweisen, die so ge- nannten Fullerene, die dank der Arbei- ten von Harry Kroto, Richard Smalley und Robert Curl seit 1985 im Labor hergestellt werden können. Als künst- liche Versionen des Elements kennen wir inzwischen auch Graphen – eine einzelne Schicht der Graphitstruktur –

sowie diverse Arten von Kohlen- stoff-Nanoröhren, die man sich als aufgerollte Versionen einer Graphit- schicht vorstellen kann.

Doch damit sind die Möglichkeiten noch nicht erschöpft. Das Acetylen (Ethin, HCCH) kann lange Ketten bilden (Polyine), die nur an ihren Enden je ein Wasserstoffatom benötigen. Könnten diese Ketten unendlich lang werden, dann wären auch sie eine Modifikation des reinen Elements.



Die Spektrum- Schreibwerkstatt

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

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

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

Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/schreibwerkstatt

Spektrum LIVE

Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft

Ein anderer Weg, den Wasserstoff an den Enden zu eliminieren, besteht darin, diese zusammenzubringen und zu einem Ring zu verknüpfen. Zwar schreiben die quantenmechanischen Modelle der Molekülorbitale prinzipiell vor, dass Polyine schnurgerade ausgestreckt sein sollten. Laut Berechnungen jedoch gibt es einen geringen Spielraum zur Abweichung von der Linearität, der ab einer Kettenlänge von 18 Kohlenstoffatomen einen Ringschluss ermöglichen könnte. Und an Versuchen, eine solche C_{18} -Spezies herzustellen, hat es bislang nicht gefehlt.

Der organische Chemiker Harry Anderson, der jetzt an der University of Oxford forscht, hatte sich diese Aufgabe gestellt, als er 1993 als Postdoc in das Labor von François Diederich an der ETH Zürich ging. Dessen Arbeitsgruppe hatte bereits 1989 Hinweise darauf gefunden, dass sich

C_{18} als kurzlebiges Zwischenprodukt in der Gasphase bildet. Nach seiner Ankunft in Zürich kam Anderson aber zu dem Schluss, dass es mit damaligen Methoden nicht zu schaffen war, die Substanz herzustellen und zu charakterisieren. Stattdessen nahm er ein Projekt zur Fullerenchemie in Angriff – doch der Traum vom C_{18} -Ring ließ ihn nicht los.

Im Jahr 2005 erzeugte die Arbeitsgruppe von John Maier an der Universität Basel C_{18} -Ringe durch Verdampfen von Graphit. Spektroskopische Daten legten aber nahe, dass es sich in diesem Fall nicht um ein Polyin mit alternierenden Einfach- und Dreifachbindungen handelte, sondern um ein so genanntes Cumulen, in dem alle Kohlenstoffatome mit Doppelbindungen verknüpft sind. Die Verbindung existierte aber nur extrem kurze Zeit in gasförmigem Zustand und zersetzte sich gleich wieder, so dass die For-

scher sie nicht eingehender untersuchen konnten.

Ein Jahrzehnt später gab es eine neue Methode für knifflige Synthesen instabiler Verbindungen: Das Rasterkraftmikroskop, so stellte sich heraus, kann nicht nur einzelne Moleküle auf einer Oberfläche abtasten, sondern diese auch durch Injektion einer elektrischen Ladung zu chemischen Reaktionen veranlassen.

Die Arbeitsgruppe von Leo Gross am Forschungslabor der IBM in Zürich, wo Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1981 das Rastertunnelmikroskop entwickelt hatten, führte zusammen mit der Gruppe von Diego Peña in Santiago de Compostela die erste organische Synthese durch Manipulation von Molekülen mit einem Kraftmikroskop durch. Hierfür nahmen die Wissenschaftler die Bergmann-Reaktion ins Visier. Bei dieser wandelt sich ein Anthracen-Derivat (eine Verbindung, in der drei Benzolringe wie Bienenwaben aufgereiht sind) in ein System um, in dem zwei der Bienenwaben zu einem größeren Ring mit zwei Dreifachbindungen verschmolzen sind: zu einem »zyklischen Diin«.

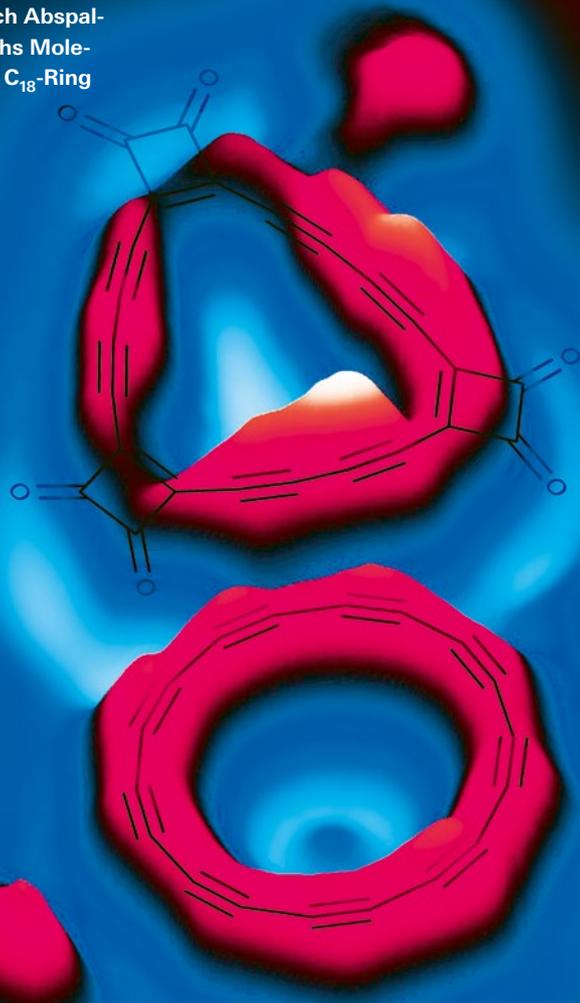
Atome abtrennen im Mikroskop

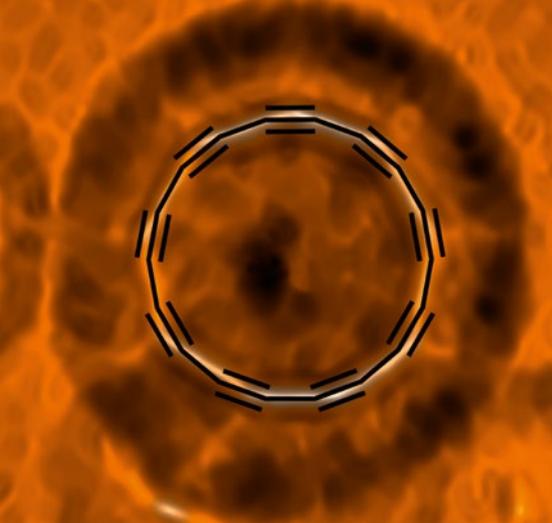
Konkret gingen sie von einer Version des Bienenwabenmoleküls aus, das mit zwei Bromatomen bestückt ist. Mit Hilfe des Kraftmikroskops erzeugten sie daraus durch Abspalten der Bromatome ein Diradikal, also einen Stoff, der an zwei Stellen je ein ungepaartes Elektron trägt. Das Diradikal verwandelten sie dann durch weitere Manipulationen in das zyklische Diin.

Przemyslaw Gawel, der in Oxford mit Harry Anderson zusammenarbeitet, hörte auf einer Konferenz, wie Leo Gross über die durch atomare Manipulation ausgelöste Bergmann-Reaktion sprach und überlegte sich, dass man auf ähnliche Weise auch offene Ketten mit mehreren Dreifachbindungen unter kontrollierten Bedingungen und mit gleichzeitiger Überwachung durch die Kraftmikroskopie erzeugen könnte. Anderson war von der Idee ebenfalls angetan, da er immer noch die Idee im Hinterkopf hatte, ein solches Polyin zu einem C_{18} -Ring zu biegen.

IBM RESEARCH

Aus $C_{24}O_6$ (oben) entsteht durch Abspaltung von sechs Molekülen CO ein C_{18} -Ring (unten).





IBM RESEARCH

Rasterkraftmikroskopaufnahme eines Cyclo[18]carbon-Moleküls mit darübergelegter Molekülstruktur.

Gemeinsam wandten Gross, Gawel und Anderson die Methode auf die Fritsch-Buttenberg-Wiechell-Umlagerung an. Diese Reaktion, bei der wiederum ein Diradikal zur Bildung einer neuen Dreifachbindung führt, war zwar bereits seit 1894 bekannt, doch ihr Mechanismus blieb umstritten. Manche Studien postulierten ein Carben (ein Molekül, in dem ein Kohlenstoffatom nur zwei Bindungen sowie ein ungepaartes Elektronenpaar hat) als Zwischenstufe, andere behaupteten, dass die Umlagerung direkt zu der neuen Dreifachbindung führe.

Die Forscher erzeugten unter bestimmten Gegebenheiten zwar das

vermutete Carben, doch bildete sich unter diesen Bedingungen nicht die erhoffte Dreifachbindung. Auf einer Kochsalzoberfläche hingegen gelang es ihnen – ohne nachweisbare Carben-Zwischenstufe – Dreifachbindungen von Hand herzustellen. Sie waren sogar in der Lage, mehrere dieser Bindungen hintereinanderschalten und auf diese Weise ein Polyin zu erzeugen, das in der Nanotechnologie als molekularer Draht dienen kann.

Nachdem sich die Kraftmikroskopie in diesen Synthesen von Alkinen und Polyinen bewährt hatte, kam Anderson auf seinen alten Traum zurück. Könnte man einen C_{18} -Ring mit weiteren Elementen und weniger als neun Dreifachbindungen in einen reinen Kohlenstoffring mit den gewünschten neun Dreifachbindungen umwandeln, indem man die anderen Atome manuell abtrennt?

Gross, Gawel und Anderson setzten ihre erfolgreiche Zusammenarbeit fort und erzeugten aus einem Ring mit der Zusammensetzung $C_{24}O_6$ durch erzwungene Abspaltung von sechs Molekülen Kohlenmonoxid (CO) einen reinen C_{18} -Ring. Die Kraftmikroskopie des gebildeten Reaktionsprodukts zeigte deutlich, dass die 18 Bindungen nicht alle gleich waren. Es lagen

jeweils im Wechsel kurze, elektronenreiche Bindungen (Dreifachbindungen) und längere, elektronenärmere Einfachbindungen vor.

Damit kann nun eine neue Strukturformel für reinen Kohlenstoff offiziell in die Lehrbücher aufgenommen werden. Sie hört auf den Namen Cyclo[18]carbon. Aber wer es gerne kompliziert hat, kann auch 1,3,5,7,9,11,13,15,17-Cyclooctadecanonain sagen. Die Eigenschaften des neuen Stoffs bleiben noch zu erforschen. ◀

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

QUELLEN

Boguslavskiy, A. E. et al.: Gas-phase electronic spectra of C18 and C22 rings. *The Journal of Chemical Physics* 123, 2005

Kaiser, K. et al.: An sp-hybridized molecular carbon allotrope, cyclo[18]carbon. *Science* 365, 2019

Pavliček, N. et al.: Polyyne formation via skeletal rearrangement induced by atomic manipulation. *Nature Chemistry* 10, 2018

Schuler, B. et al.: Reversible Bergman cyclization by atomic manipulation. *Nature Chemistry* 8, 2016

PHYSIK GOOGLES QUANTENCOMPUTER

Ein Forschungsteam des Internetgiganten hat einen besonderen Chip entwickelt, der bei einer Spezialaufgabe selbst Supercomputer schlägt.

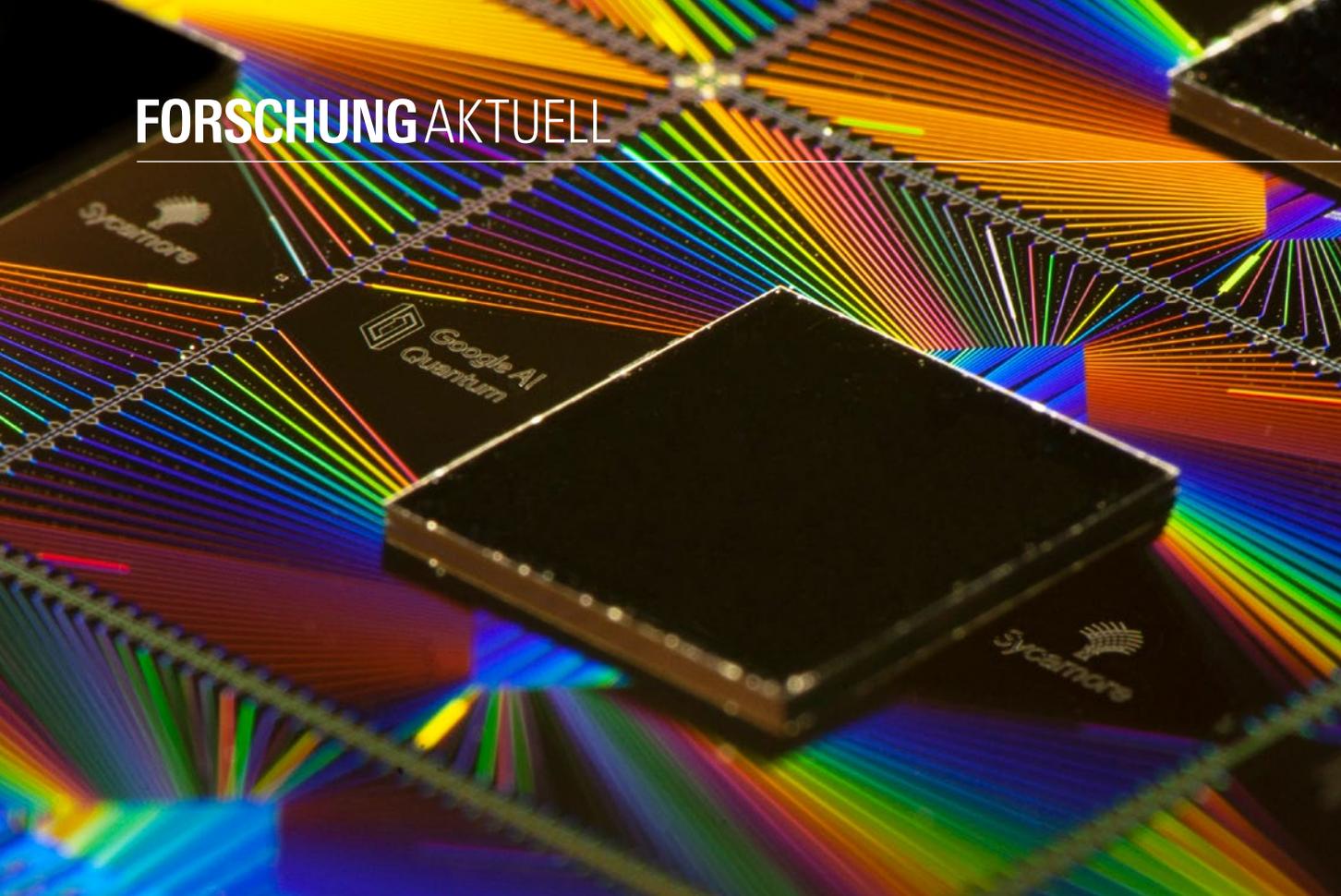
Um das Jahr 2014 traf man bei Google eine weit reichende Entscheidung: Der Quantencomputer – lange eine Fantasie optimistischer Physiker – soll endlich Wirklichkeit werden. Also engagierte man John Martinis von der University of California in Santa Barbara, seit Langem eine Größe auf diesem Gebiet (siehe **Spektrum** Februar 2018, S. 62). Sein Auftrag: Die Welt soll den Quantenrechner als erreichbare Zukunftstechnologie wahrnehmen; als eine Maschine, die klassische Supercomputer bei einer

ausgewählten Aufgabe hinter sich lassen kann. Nun will Google diese »Quantenüberlegenheit« tatsächlich bewiesen haben – bei einer Spezialanwendung, die Quantencomputern wie auf den Leib geschneidert ist. Wie Martinis und seine Kollegen berichten, hat ein von ihnen entwickelter Quantenchip namens Sycamore binnen weniger Minuten eine Rechnung durchgeführt, für die gewöhnliche Computer Jahre bräuchten.

Um diese Leistung einordnen zu können, muss man sich die Arbeits-

weise klassischer Rechner vergegenwärtigen. Diese arbeiten mit Binärziffern oder Bits, die entweder den Wert 0 oder 1 annehmen. Mit mehreren Bits lassen sich Informationen speichern; beispielsweise steht die Folge 01100001 für den Buchstaben a und 01111010 für z.

Mit so genannten Logikgattern können Bits dazu gebracht werden, einfache Rechnungen durchzuführen. Das UND-Gatter liefert beispielsweise immer dann eine 1 als Ausgabe, wenn es mit zwei auf 1 geschalteten Bits



GOOGLE

Googles Quantenprozessor ist gerade mal einen Zentimeter groß. Damit er funktioniert, muss man ihn allerdings in ein riesiges Thermostat packen und enorm stark abkühlen.

verknüpft ist. Den physischen Counterpart von Bits übernehmen Transistoren. Die Halbleiterbauelemente lassen sich mit Hilfe einer kleinen elektrischen Spannung auf leitend schalten, was den Wert des Bits auf 1 setzt.

Transistoren in heutigen Computern sind winzig, sie messen gerade einmal einige millionstel Millimeter. In einem handelsüblichen Prozessor sind Milliarden von ihnen untergebracht. Dennoch verhalten sie sich im Großen und Ganzen wie mechanische Rechenmaschinen aus dem 19. Jahrhundert: Sie speichern Zahlen und arbeiten Befehle nacheinander ab.

Bei Quantencomputern tritt an die Stelle des Bits eine andere Recheneinheit, das Qubit. In Googles Quantenrechner nehmen diesen Part winzige Kreuze aus einem supraleitenden Material ein. Je nach Flussrichtung der Elektronen repräsentieren sie mal den

Wert 0 und mal 1. Der Quantenzauber beginnt, wenn man ein Qubit von der Umgebung abschirmt: Wird es nicht mehr durch thermische Fluktuationen oder Zusammenstöße mit Luftmolekülen gestört, gehorcht es den Regeln der Quantenphysik.

Objekte können dann in einer »Überlagerung« mehrerer Zustände existieren, bei einem Qubit sind dies die Werte 0 und 1. Erst wenn es ausgelesen wird, muss sich die Natur – auf Basis von Wahrscheinlichkeiten – für eine dieser Möglichkeiten entscheiden. Gleichzeitig lassen sich mehrere Qubits auf geisterhafte Art und Weise miteinander »verschränken«. Eine Messung an einem Qubit beeinflusst dann auch den Wert eines damit verbundenen, zweiten Qubits.

Die falschen Lösungen verschwinden einfach

Essenziell für Quantencomputer ist noch eine dritte Eigenart des Mikrokosmos: Laut ihren Gesetzen verhalten sich Objekte wie ausgedehnte Wellen. Wenn diese überlappen, entsteht eine komplizierte »Wellenfunktion«. Sie ist der Grund, warum Quantencomputer bei manchen Rechnungen klar überle-

gen sind. In der Wellenfunktion sind alle möglichen Zustände der einzelnen Qubits enthalten. Ein Quantenrechner kann das gezielt ausnutzen – und erzielt dadurch einen enormen Geschwindigkeitsvorteil. Wo ein gewöhnlicher Computer mit N Bits pro Rechenschritt N Nullen oder Einsen verarbeiten kann, berücksichtigt eine Quantenmaschine pro Schritt bis zu 2^N Binärwerte.

Die Rechenkraft wächst also exponentiell mit der Zahl der Qubits an, bereits 100 von ihnen können eine gigantische Zahl an Zuständen verarbeiten. In der Realität funktioniert dies aber nur bei ausgewählten Aufgaben mit einer bestimmten mathematischen Struktur. Bei ihnen können Physiker die Wellen der Einzel-Qubits dazu bringen, gerade so zu überlappen, dass falsche Lösungen durch Interferenz ausgelöscht werden. Übrig bleibt dann nur die korrekte Antwort.

Google hat diese Vision auf einer Fläche von gerade mal einem Zentimeter umgesetzt. Der Sycamore-Chip besteht aus insgesamt 54 supraleitenden Qubit-Kreuzen, die in Form eines Gitters angeordnet sind. Zwischen zwei Kreuzen befindet sich jeweils ein Koppler, über den sich die Nachbarn

verschränken lassen. Steuern lassen sich Qubits und Koppler mit Mikrowellenpulsen und Magnetfeldern.

Damit der Quantenprozessor funktioniert, muss man ihn in ein mächtiges Thermostat packen und auf knapp über den absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273,15 Grad abkühlen. In den Tests von Google ließen sich lediglich 53 der 54 Qubits ansprechen – das genügte aber, um die anvisierte Spezialaufgabe zu bewältigen.

Bisher sind nur wenige Rechnungen bekannt, in denen Quantencomputer ihre Vorteile ausspielen könnten. Das wohl bekannteste Beispiel ist ein Algorithmus, den sich der US-Physiker Peter Shor 1994 ausgedacht hat. Bei ihm geht es um die Suche nach den Primzahlen, die miteinander multipliziert eine vorgegebene Zahl ergeben. Diese Faktorisierung ist die Basis des weit verbreiteten RSA-Verschlüsselungsverfahrens. Ein ausgereifter Quantencomputer, der Shors Algorithmus ausführt, käme hier sehr viel schneller zu einem Ergebnis als gewöhnliche Rechner. Ein anderer Algorithmus zielt auf das schnelle Durchsuchen von Datenbanken. Er gilt – genauso wie Shors Algorithmus – jedoch als viel zu anspruchsvoll, als dass ihn heutige Quantencomputer-Prototypen bereits Gewinn bringend ausführen könnten.

»Das ist ein technologisches Meisterstück«

Frank Wilhelm-Mauch,
Universität des Saarlandes

Google hat seine Bemühungen daher auf eine andere, sehr viel speziellere Aufgabe konzentriert: Bei ihr geht es darum, den Quantencomputer Zahlenfolgen ausspucken zu lassen und anschließend zu überprüfen, ob deren Häufigkeit wirklich einer von der Quantenphysik vorgegebenen Verteilung folgt.

Martinis Team wendete dafür zunächst eine klar definierte Abfolge von Logikgattern auf die 53 Qubits des

Sycamore-Chips an. Die Gatter brachten erst die einzelnen Qubits in einen Überlagerungszustand aus 0 und 1 und verschränkten sie anschließend paarweise zu einem immer komplizierter werdenden Kollektivzustand. In 20 Durchläufen kamen so insgesamt 1500 Gatter zum Einsatz.

Anschließend lasen die Forscher über die Leitungen des Chips den Wert jedes einzelnen Qubits aus: Das zwang die Quantenobjekte, entweder den Wert 0 oder 1 anzunehmen. So erhielten die Forscher eine 53 Stellen lange Folge aus Nullen und Einsen – eine von 2^{53} beziehungsweise 9 Milliarden Möglichkeiten, die in der Wellenfunktion des Systems enthalten sind.

Anders als man denken würde, sind nicht alle Zahlenreihen gleich wahrscheinlich. Bei manchen verstärken sich die Wellenfunktionen der einzelnen Qubits, weshalb der Chip sie häufiger ausspucken sollte, Physiker sprechen von konstruktiver Interferenz. Aber welche Bitfolgen tauchen häufiger auf, wenn man oben beschriebenes Prozedere etliche Male wiederholt?

Der einfachste aller Quantenjobs

Für einen klassischen Computer ist das eine sehr schwierige Frage. Er kann zwar mit Spezialsoftware ein Quantensystem aus vielen verschränkten Qubits simulieren. Der Rechner muss hierbei jedoch alle denkbaren Zustände berücksichtigen. Die Komplexität der Aufgabe nimmt daher exponentiell mit der Zahl der Qubits sowie der darauf angewendeten Gatteroperationen zu. Um die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines 50-Qubit-Systems zu bestimmen, muss ein klassischer Computer ein Gleichungssystem mit 2^{50} Koeffizienten lösen. Das bringt selbst die Supercomputercluster, auf die Google Zugriff hat, an ihre Grenzen.

John Martinis' Quantenprozessor kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung hingegen viel leichter ermitteln: Seine Gruppe ließ den Chip einfach eine Zahlenreihe nach der anderen ausgeben, wobei die Forscher die Qubits vor jeder Ausgabe aufs Neue via Gatteranwendung in den kompli-

zierten, hochgradig verschränkten Kollektivzustand versetzten. Am Ende des Experiments musste das Team nur noch abzählen, wie häufig die Maschine bestimmte Zahlenfolgen produziert hatte.

Für eine Million Bitfolgen benötigte Sycamore knapp dreieinhalb Minuten. Damit habe er die Wahrscheinlichkeitsverteilung um ein Vielfaches schneller ermittelt, als ein Supercomputercluster mit einer Million Prozessoren das hätte tun können, berichten die Wissenschaftler. Dieser müsse rund 10000 Jahre rechnen, um eine ähnlich präzise Wahrscheinlichkeitsverteilung zu erhalten.

Ein neuer Sputnik-Moment?

Eine wichtige Frage des Überlegenheitsexperiments war, ob Sycamore wirklich nach den Gesetzen der Quantenphysik arbeitet – oder ob er einfach nur zufälligen Datenmüll produziert. Martinis und seine Kollegen haben dafür ein Verfahren entwickelt, mit dem sie die Wahrscheinlichkeitsverteilung weniger komplexer Qubit-Gitter auf eines mit 53 Qubits extrapolieren können. Wie häufig diese kleineren Systeme bestimmte Bitfolgen ausgeben, ließ sich mit Hilfe von Supercomputerclustern gerade noch simulieren.

Die von Sycamore ausgegebenen Zahlenwerte passen gut zu dieser Prognose, berichtet das Sycamore-Team. Der Chip scheint also wie gehofft nach den Regeln der Quantenphysik zu arbeiten. Ob er klassischen Computern in Sachen Geschwindigkeit tatsächlich derart stark überlegen ist, wie die Zahlen in der Veröffentlichung von Google nahelegen, ist dagegen fraglich: Herkömmliche Supercomputer müssten nicht zwangsläufig tausende Jahre benötigen, um den Qubitschaltkreis eine Million mal zu durchlaufen, legte Googles Konkurrent IBM kurz nach der Veröffentlichung dar. Mit der richtigen Software könnten klassische Rechner dies möglicherweise auch binnen weniger Tage schaffen.

Unbeteiligte Experten halten Googles Quantenchip dennoch für einen wichtigen Meilenstein. »Das ist ein technologisches Meisterstück«, sagt der Quantencomputerexperte Frank

Wilhelm-Mauch von der Universität des Saarlandes. »Ich sehe das gewissermaßen wie den Sputnik-Moment in der Raumfahrt, der vielen Menschen signalisiert hat, was alles möglich ist.« Ähnlich äußert sich Andreas Wallraff von der ETH Zürich: »Die Leistung von Google ist bemerkenswert.«

Gleichzeitig betonen die Experten, dass es sich bei der vollführten Rechnung in erster Linie um einen symbolischen Erfolg handelt. »Es geht hier um eine extrem akademische Aufgabe«, sagt Wilhelm-Mauch. Sie ist wie maßgeschneidert für einen Quantencomputerprototyp dieser Größe, macht gewöhnlichen Rechnern dagegen bewusst sehr viele Probleme. »Der Algorithmus ist so ausgelegt, dass er für klassische Computer besonders kompliziert ist«, sagt Wallraff.

So erscheint das Supremacy-Experiment einzig auf einer Maschine mit 50 bis 60 Qubits sinnvoll. In diesem Bereich verlieren normale Computer bei der Spezialaufgabe den Anschluss an Quantenrechner, können die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zufallszahlen aber gerade so noch abschätzen – und auf diese Weise die Ergebnisse des Quantencomputers verifizieren.

Damit die futuristischen Maschinen andere Aufgaben übernehmen können, die für Supercomputer zu komplex sind, müssen sie jedoch noch deutlich besser und größer werden. Ein Problem sind vor allem die Fehler, die beim Rechnen mit Qubits auftreten. Google konnte die Wahrscheinlichkeit, dass die Anwendung eines Gatters nicht korrekt funktioniert, zwar auf einige zehntel Prozent senken. Für anspruchsvollere Aufgaben ist die Fehlerrate damit aber noch viel zu hoch.

Nach Ansicht von Experten geht von Quantencomputern fürs Erste auch noch keine Gefahr für die Privatsphäre aus, auch wenn dies immer wieder zu lesen ist. Damit Shors Algorithmus die im Internet übliche RSA-Verschlüsselung knacken kann, müsste er auf einem Quantencomputer mit zehntausenden Qubits laufen, von denen viele allein dafür da wären, die Fehler ihrer Verwandten auszugleichen. Wann und ob es solche Maschi-

nen geben wird, ist noch völlig unklar. Fachleute gehen hier eher von Jahrzehnten als von Jahren aus.

Sorge vor zu großen Erwartungen

Bei anderen Anwendungen könnten Quantencomputer schon früher nützlich sein, etwa bei der Simulation von chemischen Reaktionen. Sie bereitet klassischen Rechnern oft Schwierigkeiten. Physiker gehen davon aus, dass hier fehleranfällige Modelle bereits eine Hilfe sein könnten.

Aber selbst für solche Anwendungen müssen die Geräte noch zahlreiche technische Hürden nehmen. Zwar fließen mittlerweile beträchtliche Gelder in die Quantencomputerforschung, unter anderem aus der Privatwirtschaft. Der Trubel um die Quan-

tenüberlegenheit dürfte diesen Trend noch einmal verstärken. Forscher sehen dabei jedoch die Gefahr, dass die aktuelle Begeisterung in Enttäuschung umschlagen könnte. Wenn Quantencomputer die bei Investoren geweckten Erwartungen nicht erfüllen, trocknen die Geldströme möglicherweise schnell wieder aus. ◀

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Martinis, J. et al.: Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574, 2019

Pednault, E. Et al.: Leveraging Secondary Storage to Simulate Deep 54-qubit Sycamore Circuits. *ArXiv* 1910.09534, 2019

MATERIALWISSENSCHAFTEN TOPOLOGIE IST ÜBERALL

Vor knapp 15 Jahren entdeckten Physiker die ersten topologischen Isolatoren, eine völlig neue Art von Festkörper. Wie sich nun zeigt, scheinen fast alle bekannten Materialien über eine abgeschwächte Form der Topologie zu verfügen – und könnten dadurch wesentlich exotischere Eigenschaften bergen als bisher gedacht.

▶ Vor 20 Jahren ernteten Festkörperphysiker noch skeptische Blicke, wenn sie über Topologie sprachen. Schließlich hat das abstrakte mathematische Gebiet, in dem ein Donut und eine Tasse nicht unterscheidbar sind, auf den ersten Blick nichts mit der Erforschung von Materialien zu tun. Topologen beschäftigen sich mit Abbildungen, die Objekte kontinuierlich verformen, ohne sie zu zerreißen. Dadurch können sie beispielsweise geometrische Körper in verschiedene Klassen einordnen: Weil man eine Tasse ganz einfach zu einem Donut kneten kann, gehören beide zur gleichen Kategorie und sind demnach topologisch gleich.

Der Zusammenhang zur Festkörperphysik ergab sich, als man feststellte, dass in einigen Materialien Elektronen mit »verknöteten« Quantenzuständen

auftauchen. Die Regeln der Topologie diktieren in solchen Fällen das Verhalten der Teilchen. Beispielsweise können sich manche Elektronen gemäß ihrer Knotenform bloß in eine Richtung bewegen. Ein Richtungswechsel würde dazu führen, dass sich der Quantenzustand abrupt ändert, der Knoten würde anschaulich gesehen aufgeschnitten. Doch genau das verhindert die Topologie. Die physikalischen Eigenschaften solcher Materialien sind daher »topologisch geschützt«.

Das älteste und bekannteste Beispiel dafür ist der Quanten-Hall-Effekt, den der deutsche Physiker Klaus von Klitzing 1980 in bestimmten zweidimensionalen Halbleitern entdeckte. Er stellte damals fest, dass diese Materialien bei tiefen Temperaturen plötzlich alle den gleichen elektrischen Widerstand haben – unabhängig davon, ob

er die Temperatur leicht variierte oder seine Probe durch einen anderen Stoff aus der Halbleiterfamilie austauschte. Kleine Schwankungen schienen dem bizarren Zustand nichts anzuhaben. Der Quanten-Hall-Effekt erwies sich als so robust, dass er seit 1990 für die Definition des Ohm genutzt wird, der Maßeinheit des elektrischen Widerstands.

Kurioser Einzelfall?

Anfangs hielten Physiker von Klitzings Beobachtung für einen bizarren Einzelfall; es dauerte über 20 Jahre, bis sie sich intensiver mit topologischen Effekten beschäftigten. Das Gebiet gewann aber endgültig an Beliebtheit, als Forscher um Laurens Molenkamp 2007 erstmals einen so genannten topologischen Isolator im Labor herstellten. Trotz ihres Namens haben die ungewöhnlichen Stoffe einen perfekt leitenden Rand, während ihr Inneres isoliert. Solche stark topologischen

Stark topologische Materialien stellen dagegen einen Spezialfall dar

Materialien sind wie der Quanten-Hall-Effekt äußerst stabil gegenüber äußeren Änderungen. Leichte Temperaturschwankungen oder variierende Teilchenzahlen können ihnen nichts anhaben – sie behalten ihre eigentümlichen Eigenschaften.

Das macht sie für Physiker so interessant: Sie könnten als thermoelektrische Stoffe eingesetzt werden, die Wärme in Strom umwandeln oder zu einer neuen Art von Quantencomputer führen, die wesentlich stabiler wären als aktuelle Modelle.

Doch was macht topologische Materialien so besonders? Offenbar

sind die Quantenzustände der Elektronen dafür verantwortlich: Anstatt sich wie in einem Isolator um einzelne Atome zu scharen, sind sie »delokalisiert«; das heißt, ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit erstreckt sich über das gesamte topologische Material.

Theoretische Physiker stellten kürzlich in Aussicht, dass es Materialien mit derart delokalisierten Elektronen gibt, die jedoch nicht stark topologisch sind. Das heißt, sie sind empfindlicher gegenüber äußeren Störungen und bei Weitem nicht so stabil. Indem man etwa die in jedem natürlichen Kristall auftretenden Gitterfehler leicht verändert (etwa ein Fremdatom verschiebt), kann man die delokalisierten Zustände zerstören, wodurch das Material wieder normal wird, ganz ohne topologische Eigenschaften. In einer 2017 erschienenen Arbeit hat das Team um Ashvin Vishwanath von der Harvard University in Cambridge das Phänomen daher

Spektrum LIVE

Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft

Spektrum-Leserreisen

Islands faszinierende Geologie

Kommen Sie mit auf eine zehntägige Reise zu Islands einzigartiger Geologie. Die Erkundung der Halbinsel Snæfellsnes im Westen Islands mit dem Vulkan Snæfellsjökull wird wissenschaftlich begleitet von Prof. Dr. Sonja Philipp.

<https://mol-reisen.de/island-geologie/>

Mit dem Code »Spektrum« bei Buchung einer der Reisen erhalten »Spektrum«-Leser für sich und maximal eine mitreisende Person einen Rabatt von fünf Prozent auf den Reisepreis (Zusatzleistungen ausgeschlossen).

Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/live

fragile Topologie genannt. Wenn die Wissenschaftler Recht behalten, stellen stark topologische Stoffe bloß einen Spezialfall in einer vielfältigen Welt von Materialien mit delokalisierten Elektronen dar.

Anfangs waren sich Physiker nicht sicher, was sie von der Entdeckung halten sollten. Die fragile Topologie erschien als mathematische Besonderheit ohne weiteren Nutzen. Doch diese Ansicht änderte sich, nachdem Forscher im März 2018 feststellten, dass zwei übereinandergeschichtete Graphenlagen supraleitend werden, wenn man sie unter einem »magischen« Winkel von 1,1 Grad gegeneinander verdreht (siehe »Der magische Winkel«, S. 20). Daraufhin versuchten viele Wissenschaftler herauszufinden, was die Elektronen in diesem System dazu bringt, Strom widerstandsfrei zu übertragen. Vishwanath und sein Team arbeiteten ein theoretisches Modelle aus, dem zufolge einige Elektronen in derart verdrehtem zweilagigen Graphen fragil topologisch sein könnten. »Das war erstaunlich«, erinnert sich Vishwanath. »Bis dahin dachten wir, dass es für fragile Topologie keine Anwendung gäbe. Doch plötzlich eröffneten sich bahnbrechende Möglichkeiten.«

»Es scheint, dass jedes Material etwas Topologisches hat«

Andrei Bernevig, Princeton University

Bisher weiß man allerdings noch nicht, ob es wirklich die fragilen Zustände sind, die verdrehtem doppellagigen Graphen seine supraleitenden Eigenschaften verleiht. Dafür müsste man die fragile Topologie erst einmal im Labor genau untersuchen, was bisher noch nicht gelang.

Ende 2017 und Anfang 2018 versetzten einige weitere Veröffentlichungen die Festkörperphysiker ebenfalls in Erstaunen. Anders als zuvor angenommen sind demnach stark topologische Materialien keine Ausnahme; etwa ein

Viertel aller kristallinen Festkörper könnten dieser exotischen Stoffklasse angehören.

Berechnungen zufolge sollte die fragile Topologie aber viel verbreiteter sein als ihre starke Version. Als der theoretische Physiker Andrei Bernevig von der Princeton University in New Jersey und seine Kollegen im Mai 2019 eine riesige Datenbank mit bekannten Kristallen nach Spuren fragiler Zustände durchforsteten, fanden sie tatsächlich hunderttausende Beispiele für das ungewöhnliche Phänomen. »Es scheint, dass im Grunde genommen jedes Material etwas Topologisches hat«, sagt Bernevig.

Milliarden über Milliarden wechselwirkender Teilchen

Bis dahin stand ein experimenteller Nachweis der neuartigen Materiezustände allerdings noch aus. Doch nun haben Joshua Island von der University of California in Santa Barbara und seine Kollegen erstmals fragil topologische Merkmale in doppellagigem Graphen beobachtet, das nicht verdreht ist. Darauf stießen sie durch Zufall.

Eigentlich wollten die Forscher einen starken topologischen Isolator auf Graphenbasis herstellen, den man nutzen könnte, um Informationen in künftigen topologischen Quantencomputern zu speichern. Dazu schoben sie zwei Lagen Graphen zwischen zwei Wolframdiselelenid-Schichten, und legten ein elektrisches Feld daran an. Als sie die Feldstärke veränderten, registrierten sie Elektronen, die sich bloß entlang des Rands ihres Aufbaus bewegten, wie es bei topologischen Isolatoren der Fall ist. Doch ihren Messungen zufolge konnte es sich dabei nicht um einen gewöhnlichen topologischen Isolator handeln.

Da sich Island das nicht erklären konnte, bat er einen Kollegen um Hilfe. Als der theoretische Physiker von den ungewöhnlichen Ergebnissen hörte, erkannte er, dass das Team um Island höchstwahrscheinlich einen fragilen topologischen Zustand gefunden hatte – was den ersten experimentellen Hinweis auf ein solches Phänomen liefert.

Die neuesten Erkenntnisse könnten einige Arbeiten aus der Materialwissenschaft in Frage stellen. Da Festkörper aus Milliarden über Milliarden von wechselwirkenden Teilchen bestehen, müssen Forscher vereinfachte Annahmen treffen, um sie am Computer zu simulieren – selbst wenn sie dafür Supercomputer verwenden. Doch diese Vereinfachungen könnten unter fragiler Topologie nicht mehr zutreffen, warnt die theoretische Physikerin Jennifer Cano von der Stony Brook University in New York.

Um das herauszufinden, muss man mehr über fragile Zustände erfahren, vor allem durch Versuche im Labor. Einige Wissenschaftler vermuten, dass sich photonische Systeme besser dafür eignen könnten als herkömmliche Festkörper. Seit mehreren Jahren nutzen Forscher Lichtleiter, in denen Photonen sich wie die Elektronenzustände in Kristallen verhalten, um die Eigenschaften von Materialien zu simulieren. Damit ließe sich ebenfalls herausfinden, welchen Nutzen die fragile Topologie in der Photonik haben kann.

Wie die Anwendungen des neuen Materiezustands tatsächlich aussehen werden – wenn es überhaupt welche gibt –, bleibt abzuwarten. Für theoretische Physiker sind die aktuellen Ergebnisse aber schon jetzt eine kleine Revolution: »Die fragile Topologie wirft langjährige Überzeugungen über das Verhalten von Elektronen in Festkörpern über den Haufen«, sagt Barry Bradlyn von der University of Illinois in Urbana-Champaign. ◀

Davide Castelvecchi ist Redakteur bei »Nature« in London.

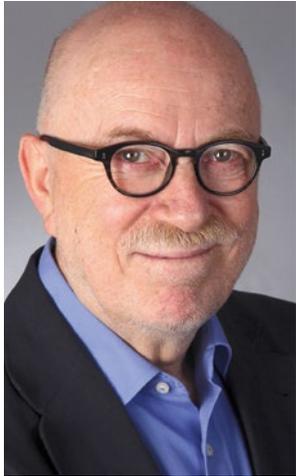
QUELLEN

Island, J. O. et al.: Spin-orbit-driven band inversion in bilayer graphene by the Van der Waals proximity effect. *Nature* 571, 2019

Song, Z. et al.: Fragile phases as affine monoids: Full classification and material examples. *ArXiv* 1905.03262, 2019

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 571, S. 17–18, 2019



SPRINGERS EINWÜRFE SIND BANKANGESTELLTE EHRlich?

Eine sozialpsychologische Studie hat das in Zweifel gezogen – und wird nun ihrerseits in Frage gestellt.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

» spektrum.de/artikel/1686864

Die Finanzkrise von 2008 und eine Reihe von Betrugsskandalen haben das Image des internationalen Bankensektors merklich getrübt. Sind Aktienhändler aber tatsächlich tendenziell unaufrichtiger als Angehörige anderer Berufe? Diese Frage warfen in einer viel beachteten experimentellen Untersuchung 2014 drei Verhaltensökonominnen der Universität Zürich auf, zu denen der prominente Forscher Ernst Fehr gehörte. Sie fanden heraus: Gut 100 Angestellte einer Großbank mogelten bei einem Münzwurfspiel signifikant häufiger, wenn sie vorher durch einen suggestiven Fragenkatalog auf ihre berufliche Identität hingewiesen worden waren (*Nature* 516, S. 86–89, 2014).

Die methodisch aufwändige Untersuchung erregte bei ihrem Erscheinen öffentliches Aufsehen, schien sie das Stereotyp des skrupellosen Finanzjongleurs, der um seines Erfolgs willen gern fünf gerade sein lässt, wissenschaftlich zu untermauern. Doch neuerdings übt ein internationales Team um die Verhaltensforscherin Zoe Rahwan vom Berliner Max-Planck-Institut für Bildungsforschung scharfe Kritik an der Methode der drei Züricher und zieht deren Resultat grundsätzlich in Zweifel (*Nature* 575, S. 345–349, 2019).

Eingangs beklagt das Forschertrio die generelle »Reproduzierbarkeitskrise« in den Sozialwissenschaften und betont, wie extrem schwierig es sei, Resultate zu überprüfen, die anhand schwer zugänglicher Testpopulationen – wozu die Bankerszene gehört – gewonnen wurden. Dennoch gelang es den Berliner Kritikern, mehr als 1000 Personen von drei Kontinenten zu rekrutieren. Die damit gewonnenen Resultate gehen zwar tendenziell in die Richtung der Züricher Studie – Banker sind eine Spur unehrlicher –, fallen allerdings viel diffuser und statistisch kaum signifikant aus. Zudem zeigen sich geografische Unter-

schiede, welche die Kritiker auf die regional variiende Rechtsprechung zurückführen. Zur Erklärung des schwachen Ergebnisses spekulieren die Berliner darüber, dass sich die aktuelle Moral im Bankensektor infolge früherer Skandale wohl deutlich gebessert habe. Diese Botschaft wurde von einigen Medien auch sofort dankbar und erleichtert aufgenommen.

Aber damit ist das letzte Wort noch nicht gesprochen. Das Züricher Team erhielt im selben Heft Gelegenheit zu einer Replik (*Nature* 575, E1–E2, 2019). Die Kritik der Kritik ist einigermaßen vernichtend. Wie die Gruppe um Fehr genüsslich aus der Berliner Studie zitiert, wusste ein Drittel von deren Testteilnehmern über die ältere, breit publizierte Studie aus Zürich Bescheid, war also besonders auf der Hut. Von 27 Bankinstituten, welche die Berliner Gruppe anfragte, erklärten sich nur zwei überhaupt zur Teilnahme bereit; alle übrigen äußerten Sorge um ihr Image. Somit fand ungewollt eine scharfe Auslese von Testpersonen in Richtung Wohlverhalten statt. Obendrein wurden diese von vornherein über das Ziel der Untersuchung, den Nachweis beruflicher Unmoral, ins Bild gesetzt, was sie wohl kaum besonders anregte, beim Münzwurf zu mogeln.

Das ganze Hin und Her demonstriert, wie viele Fallstricke sich aufspannen, wenn Sozialpsychologen Menschengruppen testen und damit öffentliche Aufmerksamkeit erregen – und wenn später andere Wissenschaftler versuchen, die Resultate zu überprüfen. Anders als Elementarteilchen oder Tiere können menschliche Versuchsobjekte mitdenken und -lesen. Die dadurch erzeugten Rückkopplungsschleifen erschweren es ungemein, die Grundforderung jeder Wissenschaft einzulösen: dass sich einmal im Experiment gewonnene Erkenntnisse beliebig oft wiederholen lassen.

MEERESKUNDE TEAMGEIST IN DER TIEFSEE

Marine Mikroorganismen zeichnen sich durch eine erstaunliche Kooperationsfähigkeit aus. Diese Zusammenarbeit prägte vermutlich schon früh das Leben auf der Erde – und ermöglichte vielleicht erst unsere Existenz.



Jeffrey Marlow (links) ist promovierter Mikrobiologe und forscht an der Harvard University in Cambridge (USA) über mikrobielle Stoffwechsellaktivitäten in komplexen Ökosystemen. **Rogier Braakman** ist promovierter Chemiker und untersucht am Massachusetts Institute of Technology Rückkopplungsprozesse zwischen der Erde und ihren Lebewesen.

► spektrum.de/artikel/1686866

► In etwa 800 Meter Wassertiefe enthüllen die flackernden Scheinwerfer des Tauchboots »Alvin« eine farbenprächtige Oase. Plüschteppiche aus weißen, gelben und orangefarbenen Mikroorganismen bedecken den von Muschelfeldern durchsetzten Meeresboden. Rote Felsenbarsche beobachten mit ihren hervorstehenden, milchig-trüben Augen argwöhnisch das Unterwasserfahrzeug; gleichzeitig blubbert es aus bizarr geformten Kalkschloten. Der Lichtkegel bietet unerwartete Einblicke und lockt uns immer tiefer in diese fremdartige Unterwasserwelt, von der das meiste verborgen im Dunkeln liegt.

Auf jener Expedition im Jahr 2010 hatte sich einer von uns (Marlow) zusammen mit zwei weiteren Forschern wenige Stunden zuvor in die enge Titanglaskugel der Alvin gezwängt. Wir drückten unsere Nasen an die kreisrunden Bullaugen, während wir durch das Blau der Tiefe hinabsanken. Unser Ziel war der Hydratrücken vor der Küste Oregons – ein felsiger Bereich des Meeresbodens, an dem beträchtliche Mengen Methan aus der Erdkruste gepresst werden. Da immer mehr dieser unterseeischen Methanquellen entdeckt wurden (allein auf einer Expedition im Ostpazifik stieß man 2016 auf 450 Exemplare), interessieren sich Wissenschaftler zunehmend dafür, wie sich diese Regionen auf die Umwelt auswirken. Schließlich gilt Methan als starkes Treibhausgas: Obwohl es lediglich 0,00018 Prozent der Atmosphäre ausmacht, trägt es 20 Prozent zum Erderwärmungspotenzial bei. Schätzungen zufolge stammt etwa ein Zehntel des Methans, das jährlich in die Atmosphäre gelangt, aus jenen Quellen am Meeresgrund. Ein solch unkontrollierter Gasblasenstrom würde sich verheerend auf unser Klima auswirken – wenn es nicht etwas

gäbe, das eine übermäßige Gasanreicherung in der Atmosphäre verhindert: Mikroorganismen.

Jene Kleinstlebewesen, die unter den weißen Matten und Muschelschalen leben, verzehren Methan mit beachtlichem Appetit. Als Individuen winzig, doch in Gemeinschaft mächtig, wirken sie in vielfältiger Weise zusammen: Sie gestalten und versorgen ihre Ökosysteme und beeinflussen das Klima unseres Planeten. Zwar kennen Forscher sie schon seit Jahrzehnten, vieles blieb bei den Mikroorganismen jedoch rätselhaft. Vor allem das tatsächliche Ausmaß ihres Einflusses ist unbekannt. Beschränkt sich ihr Lebensraum nur auf wenige Bereiche des Meeresbodens oder sind sie allgegenwärtig? Und stehen sie in einem ständigen Konkurrenzkampf um Ressourcen, wie Wissenschaftler lange vermuteten? Um das herauszufinden, suchten wir jenen fernen Ort in der pechschwarzen Tiefe auf.

Unsere Forschungsreise zu den Mikroben der Tiefsee fügt sich nahtlos in das Bestreben der Wissenschaft, die Funktionsweise unseres Planeten besser zu verstehen. Es geht darum herauszufinden, wie die chemischen Elemente Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor zwischen den verschiedenen Ökosystemen zirkulieren oder wie sie als Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen. Schließlich leben wir in einer Welt voller Mikroben: Von Gesteinen tief unten im Meeresboden bis hin zu Wüstenstaubpartikeln hoch oben in der Atmosphäre – Mikroorganismen gibt es nahezu überall. Und schon lange haben Forscher erkannt,



WILLIAM B. HAAS / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2016; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Mikroorganismen des Meeres wie das Zyanobakterium *Prochlorococcus* und das Bakterium *Pelagibacter* bilden enge Kooperationen.

welch wichtige Rolle diese Lebewesen bei der Verbreitung chemischer Elemente und Verbindungen spielen, so dass sie letztlich die Erde zu dem gemacht haben, was sie heute ist: ein Planet, auf dem wir problemlos leben können.

Allerdings verloren die Wissenschaftler bei der Erforschung von Mikroorganismen den Blick fürs Ganze. Denn jahrzehntlang konzentrierten sie sich auf individuelle Arten und deren molekulare Bestandteile. So isolierten sie einzelne Organismen aus den zwischen Sandkörnern herumwuselnden Mikrobenmassen, um mit unterschiedlichsten Methoden deren Biochemie oder Genfunktionen zu ergründen. Damit gewannen sie nicht nur eine Fülle an Informatio-

AUF EINEN BLICK GUTE ZUSAMMENARBEIT

- 1** Mikrobielle Lebensgemeinschaften prägten entscheidend die Biosphäre unseres Planeten. Dabei galt lange die Ansicht, dass hierbei ein Konkurrenzkampf um lebenswichtige Ressourcen vorherrscht.
- 2** Marine Mikroben zeichnen sich jedoch durch eine erstaunliche Kooperationsfähigkeit aus, indem sie zusammen Stoffwechselwege erschließen, die ihnen allein unzugänglich blieben.
- 3** Demnach könnte Teamfähigkeit statt Wettstreit im Zentrum des Lebens auf der Erde stehen.

nen über die jeweiligen Spezies, sondern fanden auch heraus, wie Zellen und Biomoleküle allgemein funktionieren. Als die Forscher jedoch auf der Grundlage ihrer zusammengetragenen Erkenntnisse über einzelne Mikrobenarten versuchten, die Biosphäre als Ganzes zu verstehen, offenbarten sich umfangreiche Wissenslücken. Nur ein kleiner Teil der Mikroorganismen ließ sich kultivieren – offenbar bilden sie komplex miteinander verwobene Lebensgemeinschaften, die unter Laborbedingungen kaum reproduzierbar sind. Und genau diese Koexistenz zahlreicher, oft einander ergänzender Mikrobenspezies schien der gängigen Lehrmeinung krass zu widersprechen, nach der es in mikrobiellen Ökosystemen letztlich nur darum geht, wer im Kampf um die Ressourcen der Stärkere ist.

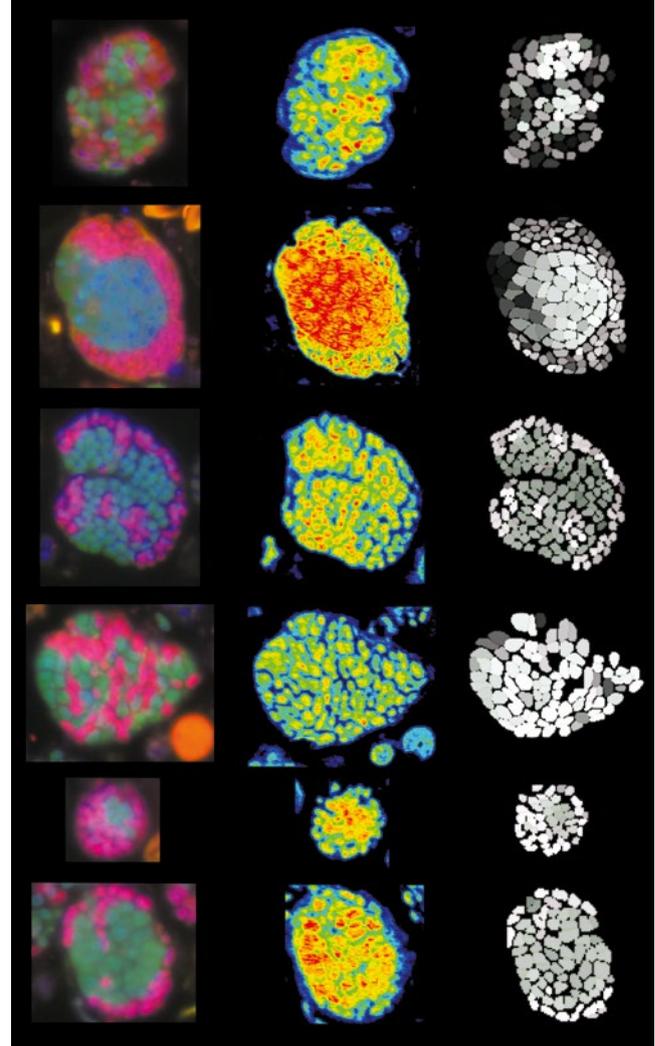
Kooperation als entscheidende Triebkraft

Darüber hinaus stimmten die in Laborexperimenten gemessenen Raten der Stoffwechselaktivität – etwa die Geschwindigkeit, mit der einzelne Mikroorganismen Sauerstoff produzieren oder Stickstoff verbrauchen – nur selten mit den tatsächlichen Werten in der Natur überein, da die wenigen kultivierbaren Mikroben das Gesamtbild verfälschen. Mit anderen Worten: Das große Ganze glich niemals exakt der Summe seiner Teile; manchmal war es mehr, manchmal aber auch weniger.

Hier hilft es, die Interaktionen zwischen Organismen stärker zu beachten. Dank technologischer Fortschritte im letzten Jahrzehnt, etwa bei der Sequenzierung von Biomolekülen oder der mikroskopischen Bildgebung, können Wissenschaftler mikrobielle Gemeinschaften ganzheitlicher studieren als jemals vorher. Die jüngsten Forschungsergebnisse zeigen, dass Kooperation als entscheidende Triebkraft innerhalb der Biosphäre wirkt. Sobald einzelne Lebewesen Energie, genetische Informationen und Stoffwechsell Aufgaben austauschen, bereiten sie den Boden für neue Lebensformen und erschließen sich Habitate, die zuvor unzugänglich blieben.

Am Hydratrücken vor der Küste Oregons drückt derweil Alvin's Roboterarm ein durchsichtiges Kunststoffrohr in eine flaumige Mikrobenmatte. Zunächst gleitet das Probenahmegefäß problemlos in den Meeresboden, bleibt dann aber stecken, so dass das ganze Tauchboot durch den Widerstand unerwartet ruckelt. Nach einem erneuten kräftigen Druck schiebt sich das Plastikrohr schließlich durch die widerspenstige Schicht und entnimmt eine Probe, die der Greifarm des Unterwasserfahrzeugs, umnebelt von einer feinen Sedimentstaubwolke, zu einem Sammelbehälter befördert.

Später an jenem Nachmittag untersuchen wir im geräumigen Labor an Bord des Forschungsschiffs den etwa 30 Zentimeter tiefen Querschnitt des Meeresbodens, den wir auf unserer Tauchfahrt gewonnen hatten. Unterhalb der weißen Mikrobenmatte folgt eine Zone aus beigefarbenem Schlamm, der in eine schwarze, von Gesteinsbrocken durchsetzte Schmiere – jene Kruste, die uns bei der Probennahme kurzfristig Widerstand leistete – und schließlich in ein Gemisch aus dunkelgrauer Farbe übergeht. Unsere mikroskopische Jagdbeute verbirgt sich in der dunkelsten Schicht, die penetrant nach faulen Eiern



MCGRAW, S.E. ET AL.: SINGLE CELL-BASED DIRECT ELECTRON TRANSFER IN METHANOTROPHIC CONSORTIA. NATURE 526, 2015, FIG. 1. NUTZUNG GEBÜHRT VON SPRINGER NATURE / CC

Bildgebende Verfahren verraten, was sich in Zellaggregaten von untermeerischen Methanquellen verbirgt. In jeder Spalte ist ein anderer Stoffwechselweg markiert, so dass anaerobe Methanotrophe und Sulfatreduzierer in jeweils unterschiedlichen Farben erscheinen.

stinkt. Das ist die Zone, in der das in tieferen Bodenhorizonten gebildete Methan und das aus dem Meerwasser stammende Sulfat verbraucht werden, wie Untersuchungen in den 1980er Jahren nachgewiesen hatten. Allerdings scheiterten bislang die Versuche zahlreicher Wissenschaftler, hier eine Mikrobenspezies aufzuspüren, die sowohl Methan als auch Sulfat aufnimmt. Andere Forscher setzten Methan und Sulfat im Labor als Köder ein, um den Unbekannten aus seinem Versteck zu locken. Erst durch akribische Detektivarbeiten kam zu Beginn der 2000er Jahre schließlich heraus, dass es sich nicht um einen Einzeltäter, sondern um ein Team handelte: Aus zwei verschiedenen Mikrobenarten bestehende Zellaggregate leuchteten in den Experimenten verräterisch auf – ein Beweis für ihre Stoffwechselaktivität (siehe Bilder oben). Einer der beiden Partner verspeiste Methan, der andere veratmete dagegen Sulfat.

Dieser Prozess, die anaerobe Methanoxidation, kann allerdings nur ablaufen, wenn die entsprechenden Mikroorganismen eng miteinander gekoppelt sind. Methan ist ein energiereiches, aber außerordentlich stabiles Molekül.

Seine Bindungen lassen sich nur schwer aufbrechen, um die für den Stoffwechsel erforderlichen Elektronen freizusetzen. So genannte anaerobe methanotrophe Archaeen – nicht zu den Bakterien gehörende Mikroorganismen, die Methan ohne Sauerstoff verstoffwechseln – sind zwar in der Lage, das Methanmolekül zu knacken; dabei produzieren sie jedoch einen beträchtlichen Elektronenüberschuss, der ihren Stoffwechsel normalerweise zum Erliegen bringen sollte. Aber des einen Müll ist des anderen Schatz: Sulfat reduzierende Bakterien machen sich jenes Übermaß an Elektronen zu Nutze, um Sulfat in Sulfid umzuwandeln (das dem Sediment seinen fauligen Gestank verleiht) und den daraus resultierenden Energiegewinn einzustreichen. Es handelt sich um eine klassische Symbiose: Während die anaeroben Methanotrophen von einem flink arbeitenden Müllentsorgungsservice profitieren, genießen die Sulfat reduzierenden Bakterien die Vorzüge eines Kraftwerks in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft (siehe »Das Geheimnis der fehlenden Moleküle«, S. 43).

Wie wir bei unserer Expedition zum Hydratrücken beobachteten, geschieht der symbiotische Methanabbau nicht nur im Sediment, wo man dieses Phänomen erstmalig entdeckte, sondern auch im Inneren des Karbonatgesteins, das sich um die Methanquellen zu riesigen Hügeln auftürmt. Die Wechselwirkungen zwischen anaeroben methanotrophen Archaeen und Sulfat reduzierenden Bakterien mögen zwar nur im Mikromaßstab ablaufen – Untersuchungen im Schwarzen Meer, im Golf von Mexiko sowie in anderen Meeresgebieten belegen jedoch, dass es sich hierbei um einen weltweit verbreiteten Prozess handelt, der etwa 80 Prozent des aus dem Meeresboden austretenden Methans beseitigt.

Genetische Minimalisten ergänzen sich gegenseitig zum beiderseitigen Vorteil

In den mächtigen Gesteinsschichten unter der Erdoberfläche finden sich zahllose Beispiele für derartige mikrobielle Wechselwirkungen. Zudem machen die in den letzten Jahren analysierten DNA-Sequenzen von Mikroorganismen aus Tiefseesedimenten sowie auch aus dem Grundwasser deutlich, wie umfassend die Mitglieder solcher Gemeinschaften tatsächlich miteinander vernetzt sind. Die Genanalysen führten zu zwei verblüffenden Erkenntnissen: Zum einen unterscheiden sich die ursprünglichen Archaea von den Bakterien wesentlich stärker als bislang angenommen – die Anzahl der Verzweigungen im Stammbaum des Lebens stieg geradezu explosionsartig an.

Vielleicht noch überraschender ist die Entdeckung, wie klein die Genome dieser Mikroorganismen sind. Etliche von ihnen besitzen nicht einmal genügend genetische Informationen für eine voll funktionsfähige Zelle oder für einen kompletten Energiestoffwechsel. »Bei der Erforschung neuer Lebensräume fällt uns immer wieder auf, dass die gesamte Mikrobengemeinschaft durchaus in der Lage ist, bestimmte Prozesse wie etwa den Stickstoffumsatz durchzuführen«, erklärt die Umweltmikrobiologin Laura Hug von der kanadischen University of Waterloo, die an der Entdeckung zahlreicher, zuvor unbekannter Mikrobenarten beteiligt war. »Alle Einzelteile sind vorhanden, aber einen Orga-

nismus, der dafür alles in seinem Genom hat, findet man kaum.«

So fehlen in der genetischen Ausstattung neu entdeckter Mikroorganismen oft die Informationen für sämtliche zum Proteinbau notwendigen Aminosäuren oder für die Nukleotide der DNA – was darauf schließen lässt, dass sie die entsprechenden Bausteine von benachbarten Zellen bekommen, die diese im Überschuss produzieren. Energie gewinnen die Mikrobengemeinschaften offenbar ebenfalls kollektiv: Einzelne Zellen führen bestimmte chemische Umwandlungen durch und geben das Produkt an nachgeschaltete Zellen weiter, bei denen entsprechende Folgereaktionen ablaufen. Diese gemeinschaftliche Nutzung von Energieressourcen sowie der gegenseitige Austausch von Zellbausteinen erfordert und ermöglicht gleichermaßen das Zusammenleben der verschiedenen Organismen.

Auch wenn nah verwandte Zellen um dieselben Ressourcen konkurrieren mögen, offenbart die Fülle an genetischen Erkenntnissen, dass die Evolution auf höherer Ebene Spezialisierung und Zusammenarbeit förderte. Ähnlich wie die Weltwirtschaft von den regionalen Stärken einzelner Länder und dem internationalen Warenaustausch profitiert, setzen die mikrobiellen Gemeinschaften der Tiefsee und des Grundwassers auf Arbeitsteilung, um aus einem spärli-

Kurz erklärt

Archaea (von griechisch *archaios* = alt, ursprünglich) sind einzellige Mikroorganismen ohne Zellkern, die nicht mit den Bakterien verwandt sind und daher als eigenständige Domäne des Lebens gelten. Unter ihnen gibt es welche, die ohne molekularen Sauerstoff – also **anaerob** – Methan (CH_4) als Kohlenstoffquelle nutzen und es dabei oxidieren. Sie werden **Methanotrophe** (von griechisch *trophē* = Ernährung) genannt.

Damit der Prozess ablaufen kann, müssen die bei der Methanoxidation frei werdenden Elektronen auf einen Elektronenakzeptor übertragen werden. Das können **Sulfat reduzierende Bakterien** bewerkstelligen, indem sie zur Energiegewinnung Sulfat (SO_4^{2-}) chemisch zu Sulfid (S^{2-}) reduzieren. Man spricht hier auch von Sulfatatmung. Das Sulfid-Anion S^{2-} reagiert im Wasser zum Hydrogensulfid-Anion (HS^-) und tritt schließlich als gasförmiger, übelriechender Schwefelwasserstoff (H_2S) aus.

Zur Domäne der Bakterien gehören die **Zyanobakterien**, die wie höhere Pflanzen Photosynthese betreiben und dabei Sauerstoff produzieren. Auf Grund ihrer blaugrünen Färbung (griechisch *kyanos* = blau) wurden sie früher als »Blualgen« bezeichnet, sind aber mit Algen nicht verwandt.

chen Angebot effizient Ressourcen zu gewinnen. Auf diese Weise verwandeln sie selbst lebensfeindliche Umgebungen in bewohnbare Habitats.

Aber wie entstehen solche lebenswichtigen Kooperationen? Nach Ansicht einiger Wissenschaftler liegt ein entscheidender Faktor in der räumlichen Nähe: Vermehren sich eng verbundene Organismen, werden auch ihre Nachkommen in der Umgebung bleiben, denn dadurch sichern sie sich den Zugang zu elterlichen Ressourcen – wie ein Student, der bei seinen Eltern wohnt und nach wie vor die heimische Waschmaschine benutzt. Verharren aufeinander folgende Generationen dicht beieinander, begünstigt die natürliche Selektion jene Gene, die für die Herstellung der gemeinsam genutzten Ressourcen verantwortlich sind. Doch sobald sich die räumliche Distanz zwischen Eltern und Nachkommen vergrößert, tauchen durch Mutation Zellen mit einer anderen genetischen Ausstattung auf. Dann können schmarotzende Mutanten einen Selektionsvorteil gewinnen. Sie profitieren von den Gemeinschaftsressourcen, ohne die Kosten für deren Produktion zu tragen, machen sich innerhalb der Lebensgemeinschaft breit und verringern die Gesamtausbeute der kollektiven Stoffproduktion. Das Szenario gleicht der »Tragik der Allmende«: Wenn Bauern eine gemeinschaftliche Landfläche nutzen, wird jeder einzelne bestrebt sein, möglichst viel Vieh zu halten, was schließlich zur Überweidung und zum finanziellen Ruin aller führt. Diese Dynamik verdeutlicht, dass Zusammenarbeit und Teilen nur dann funktioniert, wenn viele Generationen derselben Spezies in enger Nachbarschaft leben – ein Prinzip, das auch als Gruppenselektion bezeichnet wird.



EPICSTOCKMEDIA / FOTOLIA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Doch erklärt der Selektionsmechanismus wirklich umfassend die weit verbreitete mikrobielle Zusammenarbeit, oder mischen hier noch andere Faktoren mit? Indizien für Letzteres stammen aus den sonnendurchfluteten Oberflächengewässern des offenen Ozeans. In dieser, viele hundert Meter über den Methanquellen der Tiefsee gelegenen Zone ist Sonnenenergie in Hülle und Fülle vorhanden; an lebenswichtigen Nährstoffen wie Stickstoff oder Phosphor mangelt es allerdings. Tatsächlich galten die oberflächlichen Wasserschichten der Tropen und Subtropen lange als »ozeanische Wüsten«, bis Wissenschaftler diese Lebensräume Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre genauer in Augenschein nahmen und dabei dort massenhaft herumwimmelnde Mikroben fanden. Wie die erst später entdeckten Mikroorganismen des Grundwassers und der Tiefsee besitzen die an der Meeresoberfläche lebenden Mikroben ein verkleinertes Genom und können im

Labor nicht ohne zusätzliche Nährstoffe kultiviert werden – was darauf hinweist, dass auch diese Arten einander zum Überleben brauchen. Während die Sedimentmikroben allerdings in ihren engen Mineralkäfigen festsitzen – eine perfekte Voraussetzung für Gruppenselektion –, treiben die im Oberflächenwasser lebenden Spezies frei umher und werden immer wieder durcheinandergewirbelt. Da somit eine verlässliche Nähe zum Nachbarn fehlt, kann hier die Gruppenselektion nicht greifen. Es müssen also andere Kräfte am Werk sein.

Lästiger Abfall für den einen – wertvolle Ressource für den anderen

Ein einziger Tropfen Oberflächenwasser eines tropischen Meeres enthält etwa eine Million Mikroorganismen. Bei jedem zehnten handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um ein Zyanobakterium namens *Prochlorococcus*, dem kleinsten und häufigsten fotosynthetisch aktiven Organismus unseres Planeten. Um herauszufinden, wie sich der Stoffwechsel von *Prochlorococcus* im Lauf der Evolution über viele hundert Millionen Jahre entwickelte, hat sich einer von uns (Braakman) intensiv mit dessen DNA beschäftigt. Wir analysierten die Variationen im metabolischen Netzwerk – also in der Gesamtheit aller biochemischen Reaktionen zur Umwandlung von aufgenommenen Nährstoffen in Zellbausteine – und schufen damit einen genetischen Stammbaum, der die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen diversen *Prochlorococcus*-Vertretern widerspiegelt. Wie der Vergleich dieses Stammbaums mit den großräumigen vertikalen Licht- und Nährstoffgradienten in den Lebensbereichen der jeweiligen *Prochlorococcus*-Untergruppen offenbarte, hatte die Evolution jene Zellen herausselektiert, die vermehrt Sonnenenergie absorbieren und die spärlich vorhandenen Nährstoffe am besten aufnehmen können. Die verstärkte Energiegewinnung führte wiederum zu einem Kohlenstoffüberschuss, so dass die Organismen energiereiche, mit organischem Kohlenstoff voll gepackte Moleküle als Abfall entsorgen mussten. Dieser Mechanismus stellte eine Art Auslass des leistungsstarken Staubsauers *Prochlorococcus* dar, der die immer knapper werdenden Nährstoffe effizient aufsaugte. Das Zyanobakterium entwickelte sich zu einer zellulären Fabrik, die Sonnenlicht aufnahm und organischen Kohlenstoffabfall ausspuckte.

Jener Abfallstrom erwies sich seinerseits als begehrte Ressource für Mikroben, die nicht dazu in der Lage sind, ihre eigene Nahrungsenergie herzustellen. Zu ihnen zählt etwa *Pelagibacter*, ein weiterer einzelliger Meeresbewohner, der in tropischen und subtropischen Oberflächengewässern bezeichnenderweise fast genauso häufig vorkommt wie *Prochlorococcus*. Um die Beziehung zwischen den beiden Mikroorganismen näher zu erforschen, stellten wir auch für *Pelagibacter* einen metabolischen Stammbaum auf. Dabei zeigte sich, dass sich zwischen beiden Gattungen ein Kooperationskreislauf entwickelt hat: Während *Prochlorococcus* Kohlenstoffdioxid verbraucht und organische Kohlenstoffverbindungen abgibt, nimmt *Pelagibacter* die Exkretionsprodukte auf und setzt wiederum andere Moleküle frei, die *Prochlorococcus* als Energiequelle nutzen kann, sobald das Sonnenlicht fehlt. In dieser Part-

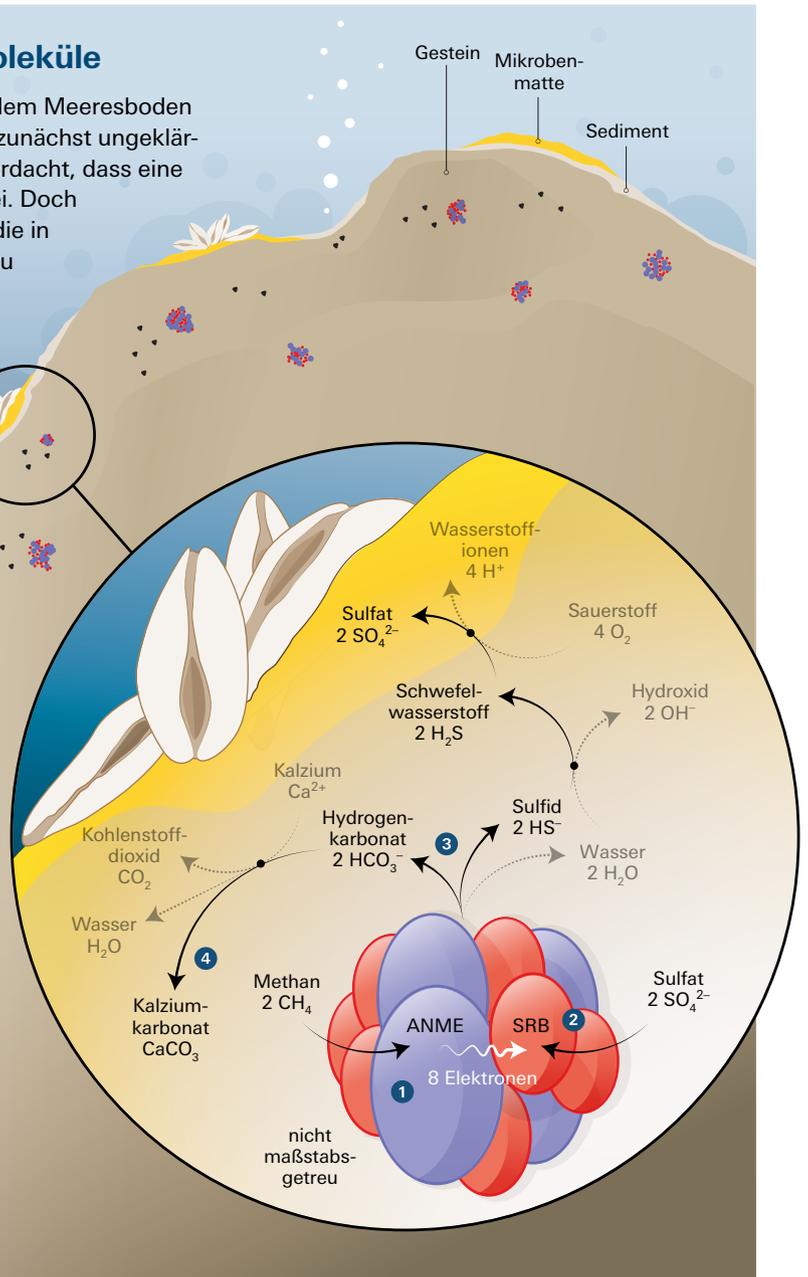
Das Geheimnis der fehlenden Moleküle

In den Sediment- und Gesteinsschichten unter dem Meeresboden verschwinden Methan- und Sulfatmoleküle auf zunächst ungeklärte Weise. Lange hegten Wissenschaftler den Verdacht, dass eine Mikrobe für dieses Phänomen verantwortlich sei. Doch niemand konnte eine einzelne Art nachweisen, die in der Lage wäre, sowohl Methan als auch Sulfat zu verzehren. Schließlich konnten die Forscher zwei miteinander kooperierende Mikroben als Täter überführen.

TARA TOURA, NACH BRETHER, A. ET AL.: A MARINE MICROBIAL CONSORTIUM APPROPRIATELY MEDICINE: AMEROBIC CO-OXIDATION OF METHANE. NATURE 407 2005. NACH MOSEYAN, S. ET AL.: SINGLE CELL ACTIVITY REVEALS DIRECT ELECTRON TRANSFER IN METHANOTROPIC CONSORTIA. NATURE 506 2015. NACH BECKMANN, J. ET AL.: METHANE-DERIVED CARBONATES AND AUTHENTIC PRITE FROM THE NORTHWESTERN BLACK SEA. MARINE GEOLOGY 177, 2001 / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2018

Eine klassische Symbiose

Methan ist ein energiereiches Molekül; auf Grund seiner hohen chemischen Stabilität ist diese Energie jedoch äußerst schwer zugänglich. Bestimmte Mikroorganismen, die anaeroben Methanotrophen (ANME), können zwar Methanmoleküle aufbrechen, doch dabei werden Elektronen frei **1**, die ihren Stoffwechsel verlangsamen würden. Hier springen in der Nachbarschaft lebende, Sulfat reduzierende Bakterien (SRB) ein, die zur Energiegewinnung den Elektronenüberschuss aufnehmen **2** und damit Sulfat (SO_4^{2-}) in Sulfid (S^{2-} beziehungsweise HS^-) umwandeln **3**. Ein Großteil des im Methan enthaltenen Kohlenstoffs fällt letztlich als Kalziumkarbonatgestein (CaCO_3) aus **4** und formt die gewaltigen Hügel an den Rändern der unterseeischen Methanquellen.



nerschaft verwerten beide Organismen die Abfallprodukte des anderen und gewinnen dadurch Energie, die sonst ungenutzt bliebe (siehe »Der Beginn einer wunderbaren Freundschaft«, S. 44).

Die 2017 veröffentlichten Ergebnisse beeinflussten maßgeblich, wie sich Wissenschaftler die Evolution von Mikrobengemeinschaften in den Oberflächengewässern des Ozeans sowie in weiteren Lebensräumen vorstellen: Als die Mikroorganismen das knappe Nahrungsangebot besser nutzen konnten, verringerten sie die Nährstoffkonzentrationen immer weiter und diktierten somit die Bedingungen für alle anderen Organismen. Trittbrettfahrer haben unter diesen Umständen schlechte Karten, denn wenn sie organischen Kohlenstoff lediglich konsumieren statt selbst herzustellen, sind sie weniger fähig, sich weitere Nährstoffe wie etwa Stickstoff oder Phosphor zu beschaffen. Die enge

Verknüpfung zwischen Nährstoffverbrauch und Abfallproduktion festigte dagegen immer mehr die Verbindung zwischen *Prochlorococcus* und *Pelagibacter*. Dieses leistungsfähige Arrangement verdeutlicht, dass der Selektionsdruck kollaborative Interaktionen nicht nur bei eng benachbarten Gruppen nah verwandter Organismen förderte. Zumindest in manchen Fällen könnte die Evolution der Gemeinschaft schlicht aus der auf einzelne Zellen wirkenden Selektion resultieren – als sich selbst verstärkende Rückkopplungsschleife.

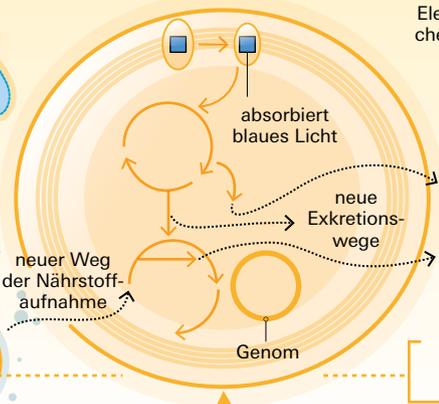
Die Partnerschaft zwischen *Prochlorococcus* und *Pelagibacter* mag vielleicht nur aus geringfügigen genetischen Veränderungen entsprungen sein – langfristig wirkte sie sich jedoch erheblich aus. Als die Vorfahren dieser beiden Mikroorganismen vor 600 bis 800 Millionen Jahren die Weltmeere besiedelten, waren die Gewässer noch weit-

Der Beginn einer wunderbaren Freundschaft

Vor etlichen hundert Millionen Jahren schlossen sich zwei der heute am häufigsten vorkommenden Meeresbewohner – die Mikroorganismen *Prochlorococcus* und *Pelagibacter* – zur gegenseitigen Verwertung ihrer Abfallprodukte zusammen. Diese Kooperation schuf wahrscheinlich die Voraussetzungen für eine Sauerstoffanreicherung in den Weltmeeren – und veränderte damit grundlegend das Leben auf der Erde.

Um die Evolution des Zyanobakteriums *Prochlorococcus* zu rekonstruieren, kreierte die Wissenschaftler aus gemessenen Stoffwechselvariationen einen Stammbaum der verschiedenen Untergruppen. Demnach gelang es den Vorfahren des Mikroorganismus immer besser, Sonnenlicht zu absorbieren; sie setzten dabei zugleich verstärkt organischen Kohlenstoff als Abfallprodukt frei. Das Bakterium *Pelagibacter* entwickelte ein hierzu komplementäres Stoffwechselnetzwerk, wobei es die von *Prochlorococcus* produzierten Abfallstoffe verwertet und seinerseits Substanzen absondert, aus denen *Prochlorococcus* nachts seine Energie gewinnt.

Pelagibacter



Prochlorococcus HL II

Prochlorococcus HL I

Prochlorococcus LL I

Prochlorococcus LL II/III

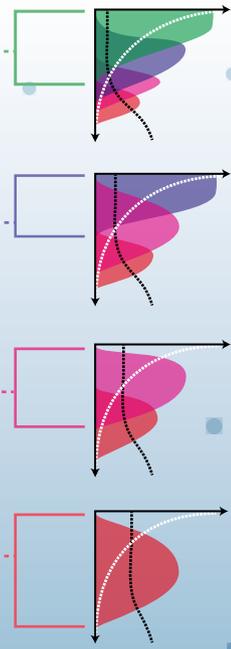
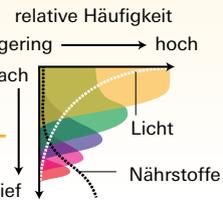
Prochlorococcus LL IV

Synechococcus

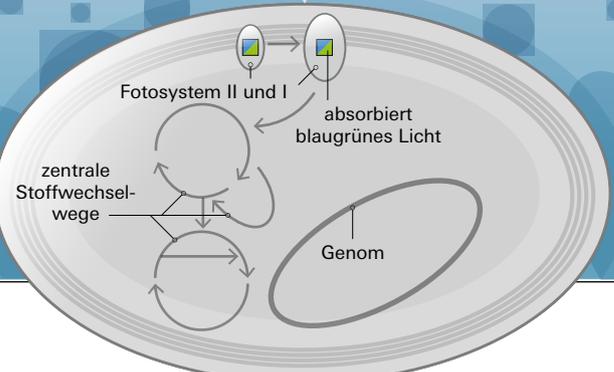
ursprüngliches Zyanobakterium

Im Lauf der Evolution von *Prochlorococcus* verkleinerte sich sein Genom, und wichtige Stoffwechselwege veränderten sich. Unter anderem verschob sich das Absorptionsspektrum des Photosynthesystems, so dass es statt ursprünglich im blaugrünen Bereich inzwischen hauptsächlich Wellenlängen im blauen Spektralbereich des Sonnenlichts absorbiert.

Die Populationen der frühen *Prochlorococcus*-Formen kamen einst in einem weiten Bereich der vom Sonnenlicht durchfluteten Wasserzone vor (untere Grafik). Nach und nach begünstigte die natürliche Selektion jene *Prochlorococcus*-Zellen, die mehr Sonnenlicht absorbieren konnten und am besten dazu in der Lage waren, sich die spärlich vorhandenen Nährstoffe zu beschaffen. Dadurch sanken die Konzentrationen der lebensnotwendigen Elemente an der Wasseroberfläche kontinuierlich und drängten Zellen mit einem höheren Nährstoffbedarf in tiefere Wasserschichten. Somit entstand schließlich das heutige Verteilungsmuster der verschiedenen *Prochlorococcus*-Untergruppen (obere Grafik).



ursprüngliches Zyanobakterium



gehend sauerstofffrei, dafür aber sehr eisenhaltig. Das Element Eisen bildet einen essenziellen Bestandteil von Fotosyntheseproteinen, die letztlich Sauerstoff produzieren; allerdings ist Eisen in Gegenwart von Sauerstoff unlöslich und kann daher nicht in die entsprechenden Proteine eingebaut werden. Dieses Dilemma sollte fotosynthetische Organismen daran hindern, sich im offenen Ozean auszubreiten, da ihre Sauerstoffproduktion das im Meerwasser gelöste Eisen verknappert hätte. Die kohlenstoffreichen Abfallprodukte von *Prochlorococcus* – angekurbelt durch das Zusammenleben mit *Pelagibacter* – besaßen jedoch die bemerkenswerte Fähigkeit, Eisen zu binden, und steigerten dadurch dessen Verfügbarkeit trotz Anwesenheit von Sauerstoff. Wir vermuten daher, dass *Prochlorococcus* und *Pelagibacter* durch die Wechselwirkung zwischen organischen Abfallprodukten und dem kritischen Element Eisen letztlich den Weg für Fotosynthese und Sauerstoffproduktion in unseren Weltmeeren ebneten. Die Entwicklung des Lebens auf der Erde nahm somit eine völlig neue Richtung.

Günstige Beziehungen sind eher die Ausnahme

Wechselbeziehungen zwischen Mikroorganismen verlaufen jedoch keineswegs immer harmonisch. Einige Wissenschaftler halten stabile, für beide Seiten günstige Beziehungen eher für die Ausnahme. »In dieser Welt da draußen gewinnt der Stärkste«, konstatiert der Biologe John McCutcheon von der University of Montana. »Sogar Beziehungen, die sich vorübergehend als vorteilhaft erweisen, können unter leicht veränderten Umständen in Parasitismus oder Konkurrenz umschlagen.« McCutcheons skeptisches Weltbild rührt zum Teil von seinen wissenschaftlichen Studien her: Er beschäftigt sich mit dem Phänomen der Endosymbiose, bei der einer der beiden Partner im Inneren des anderen lebt. Unsere Zellkraftwerke, die Mitochondrien, waren beispielsweise ursprünglich frei lebende Organismen aus der Gruppe der so genannten Alphaproteobakterien. Endosymbiose führte zu einigen der wichtigsten Durchbrüche in der Geschichte des Lebens; sie brachte die charakteristischen Bestandteile komplexer Zellen hervor und ebnete den Weg für die Evolution von Pflanzen und Tieren. Angesichts dessen »stellt man sich die Endosymbiose gern als ein friedliches Miteinander vor«, warnt McCutcheon, »doch meiner Ansicht nach ist diese Wechselbeziehung eher von Ausbeutung geprägt«. Schließlich stecke die Evolutionsgeschichte voller erfolgloser Versuche zur Endosymbiose, die sich zu räuberischen oder parasitären Beziehungen entwickelt hätten, ergänzt der Biologe.

Wissenschaftler konnten zudem bei Endosymbionten eine recht hohe Fluktuationsrate nachweisen. Wie bei einer Wohngemeinschaft, in der das Zusammenleben mit einem Mitbewohner nicht funktioniert, stoßen die Wirtsorganismen ihre eingeschlossenen Symbionten häufig wieder ab und nehmen neue Untermieter auf – was die zuweilen angespannte Beziehung zwischen den Partnern einer solchen Lebensgemeinschaft verdeutlicht. McCutcheons Forschungsarbeiten bestätigen zwar, dass Wechselwirkungen zwischen Organismen tatsächlich die Evolution vorantrieben – der Forscher mahnt jedoch zur Vorsicht: »Jeder

Organismus ist letztlich sich selbst der Nächste, und nicht alle Wechselbeziehungen verlaufen für jeden Beteiligten vorteilhaft.«

Darüber hinaus weisen die komplex verknüpften Mikrobengemeinschaften eine fundamentale Schwachstelle auf: Wird ein Mitglied der Gemeinschaft von einem schweren Schlag getroffen, könnte dies das gesamte Mikrobennetz zusammenbrechen lassen. Theoretisch sollten demnach hochgradig kollaborative Gemeinschaften von metabolisch zusammengeschlossenen Mikroorganismen anfälliger auf Störungen reagieren als Verbünde aus unabhängigen Organismen, bei denen sich jedes Individuum um seine eigenen Angelegenheiten kümmert.

Die Mikrobiologin Ashley Shade von der Michigan State University und ihre Kollegen durchforsteten 378 Studien, die Mikrobiome aus Böden, Meeres- und Süßwasser, bioindustriellen Anlagen sowie aus Tierdärmen untersucht hatten. Die Wissenschaftler fahndeten dabei nach allgemeinen Prinzipien für die Widerstandsfähigkeit biologischer Gemeinschaften gegenüber Störungen sowie für ihre Fähigkeit, wieder in den Ausgangszustand zurückzukehren. In 56 Prozent der Studien ließen sich umfassende Stoffwechselveränderungen nach einer äußeren Störung beobachten; eine im Boden lebende Mikrobengemeinschaft reagierte beispielsweise auf Wärme, indem sie ihren Stickstoffverbrauch vollständig einstellte. Nur zehn Prozent der gestörten Mikroorganismengruppen kehrten zum Ursprungszustand zurück. Trotz dieser, allerdings mit Vorsicht zu interpretierenden Ergebnisse erweist sich unsere Biosphäre als erstaunlich widerstandsfähig und hat sich immer wieder von größeren Störungen erholt – andernfalls gäbe es uns Menschen nicht. Dennoch bleibt unklar, wie solche Regenerationsprozesse ablaufen, wie schnell sie erfolgen und welche langfristigen Veränderungen sie nach sich ziehen.

Nach den bisherigen Erkenntnissen scheinen enge, stoffwechselbezogene Partnerschaften die Evolution beschleunigt und zu einer großflächigen Erschließung neuer Lebensräume geführt zu haben. Wissenschaftler kennen aber erst einen Bruchteil der Wechselbeziehungen jenseits der mikroskopischen Ebene, und es bleiben etliche Fragen offen: Wie viele Arten interagieren effektiv miteinander? Wie verändern sich solche Interaktionen in einer veränderten Umwelt oder in verschiedenen Raum- und Zeitskalen? Ein engmaschiges Geflecht aus kooperierenden Mikroben könnte zur Folge haben, dass sich menschliche Umwelteinflüsse wellenartig über die gesamte Netzstruktur ausbreiten – mit weltweiten, derzeit unvorhersehbaren Konsequenzen. Diese mikrobiellen Verflechtungen sind also von entscheidender Bedeutung, insbesondere angesichts des dramatischen globalen Wandels, den wir zurzeit erleben. ◀

QUELLEN

Braakman, R. et al.: Metabolic evolution and the self-organization of ecosystems. PNAS 114, 2017

Marlow, J. J. et al.: Carbonate-hosted methanotrophy represents an unrecognized methane sink in the deep sea. Nature Communications 5, 5094, 2014

EVOLUTION ZUM LAUFEN GEBOREN

Wir Menschen müssen uns viel bewegen, um gesund zu bleiben – im Gegensatz zu unseren nächsten Verwandten im Tierreich. Der Grund dafür liegt in unserer evolutionären Vergangenheit.



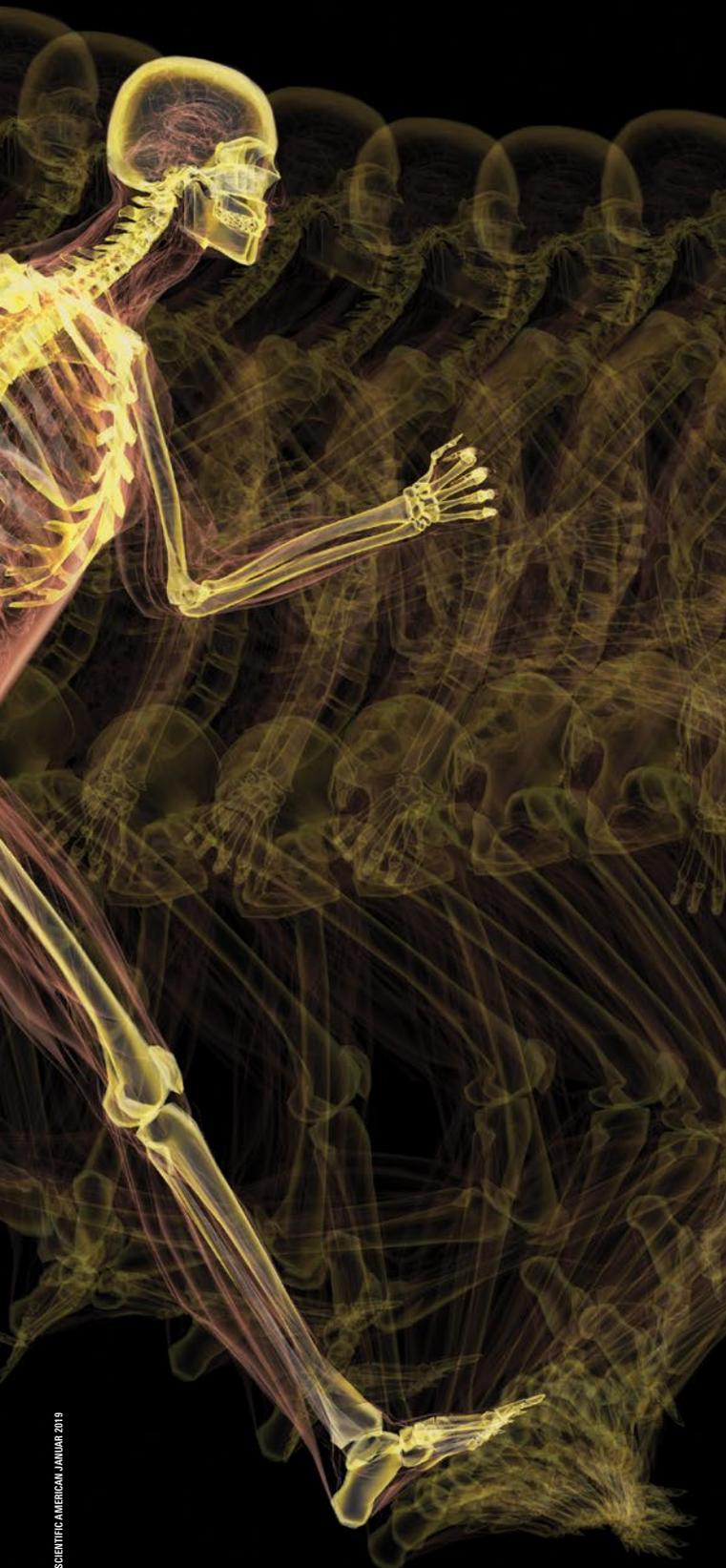
Herman Pontzer ist außerordentlicher Professor für evolutionäre Anthropologie an der Duke University (Durham, USA). Er erforscht, wie evolutionäre Vorgänge die Physiologie des Menschen geprägt haben.

» [spektrum.de/artikel/1686874](https://www.spektrum.de/artikel/1686874)

AUF EINEN BLICK DAUERND AUF DEN BEINEN

- 1** Die eng mit uns verwandten Menschenaffen sind körperlich wenig aktiv, aber dennoch kaum von Übergewicht, Diabetes, Bluthochdruck oder Arteriosklerose betroffen.
- 2** Bei den heutigen Menschen hingegen kommt es infolge ihres bewegungsarmen Lebensstils zu einer Häufung von Zivilisationskrankheiten.
- 3** Studien zufolge ist das ein Erbe unserer Vorfahren, die sich offenbar an die exzessive körperliche Aktivität des Jagens und Sammelns angepasst hatten.

Laufen wir permanent deutlich weniger als 10000 Schritte pro Tag, steigt unser Risiko, schwer zu erkranken. Unter den Menschenaffen sind wir damit eine Ausnahme.



▶ An einem diesigen Morgen vor 20 Jahren in Uganda erblickte ich in den üppigen Baumkronen über mir plötzlich eine Gruppe schlafender Schimpansen. Unser Team – drei Forscher und zwei Feldassistenten – war schon seit einer Stunde auf den Beinen. Schlaftrunken, in Gummistiefeln, mit hastig geschnürten Rucksäcken und ausgerüstet mit Stirnlampen, hatten wir uns über schlammige Pfade gequält. Nun, am Ziel angekommen, schalteten wir unsere Lampen aus und bemühten uns, keinerlei Geräusch zu machen, damit die Menschenaffen über uns nicht aufwachten. Sie schnauften und wälzten sich in ihren Laubnestern in 30 Meter Höhe, während uns der dunkle Ozean aus Bäumen einhüllte.

Als junger Doktorand, der über die Evolution der Menschenaffen forschte, war ich in jenem Sommer im Kibale-Nationalpark unterwegs, um zu untersuchen, wie viel Schimpansen täglich klettern. Ich vermutete damals, dass die Energie, die die Tiere dafür aufzuwenden haben, ein wichtiges Selektionskriterium sein müsse und die Evolution sicherlich darauf hingewirkt habe, den Körperbau der Schimpansen in Richtung effizienteren Kletterns zu verändern. Das – so glaubte ich jedenfalls – würde den Kalorienumsatz senken, der für Körperbewegungen erforderlich ist, und somit mehr Ressourcen für die Fortpflanzung und andere lebenswichtige Aufgaben bereitstellen. An meinem Schreibtisch an der Harvard University hatte ich mir Affen vorgestellt, die permanent ums Überleben kämpfen und sich dabei täglich aufs Härteste abmühen.

In besagtem Sommer jedoch, als ich Schimpansen intensiv beobachtete und ihnen von früh bis spät folgte, kam ich zu einem anderen Schluss. Ich stellte fest, dass die Tiere jede Menge Zeit mit Faulenzen verbringen. Und es sollten noch einmal viele Jahre vergehen, bis mir klar wurde, was dies über die Evolution des Menschen aussagt.

Der Affe in uns

Wir sind von Menschenaffen fasziniert, weil wir in ihnen vieles wiederzufinden meinen, was wir von uns selbst kennen. Nicht nur, dass 97 Prozent unserer DNA mit der von Orang-Utans, Gorillas, Schimpansen und Bonobos übereinstimmen. Die Tiere sind auch schlau, wissen Werkzeuge einzusetzen, bekämpfen sich, schließen wieder Frieden miteinander und haben heimlich Sex. Einige töten ihre Nachbarn im Streit und jagen Vertreter anderer Spezies, um sie zu fressen. Die Kleinen lernen von den Müttern, ringen und spielen miteinander und zeigen Trotzanfalle.

Je weiter wir in der Entwicklungsgeschichte zurückgehen, umso mehr ähneln die Fossilien unserer Vorfahren denjenigen von Affen. Alle Arten sind in ständigem Wandel begriffen; dennoch verrät ein Blick auf die heute lebenden Menschenaffenspezies etwas darüber, woher wir kommen und welche unserer Merkmale im Lauf der Stammesgeschichte weitgehend unverändert geblieben sind.

Allerdings sind es nicht so sehr die Ähnlichkeiten, sondern vor allem die Unterschiede zwischen uns und den tierischen Verwandten, die unseren Organismus in einem neuen Licht erscheinen lassen. Fossilienanalysen ebenso wie Untersuchungen in Zoos und Forschungslaboren belegen immer deutlicher, wie radikal sich der menschliche

Körper während der zurückliegenden zwei Millionen Jahre gewandelt hat. Experten wissen seit Jahrzehnten, dass dieses jüngste Kapitel unserer Evolution von wichtigen anatomischen und ökologischen Veränderungen gekennzeichnet war. Hierzu zählen die rasante Größenzunahme des Gehirns, das zunehmend effektive Jagen und Sammeln von Nahrung, das Herstellen immer komplexerer Steinwerkzeuge und eine steigende Körpergröße. Die Forscher gingen jedoch im Allgemeinen davon aus, es habe sich hier um Modifikationen der Körperform und des Verhaltens gehandelt und nicht um grundlegende funktionelle Umgestaltungen auf zellulärer Ebene. Neuere Erkenntnisse belegen jedoch, dass sich unsere Vorfahren auch physiologisch verändert haben. Im Gegensatz zu unseren Menschenaffenverwandten hängen wir von körperlicher Aktivität ab: Wir müssen uns bewegen, um zu überleben.

Der typische Tagesablauf eines wilden Schimpansen ähnelt dem eines lethargischen Kreuzfahrtpassagiers, ist allerdings längst nicht so organisiert wie dieser. Er lässt sich wie folgt beschreiben: Wache bei Tagesanbruch auf und frühstücke Obst, bis du satt bist. Dann suche dir einen netten Platz für ein Nickerchen und eventuell für eine leichte Fellpflege. Nach einer Stunde oder so begib dich zu einem sonnenbeschienenen Feigenbaum und labe dich an den Früchten. Vielleicht triffst du anschließend ein paar Freunde, betreibst noch ein bisschen Fellpflege und machst ein weiteres Nickerchen. Gegen 5 Uhr nachmittags nimm ein Dinner zu dir mit noch mehr Früchten und nach Belieben einigen Blättern. Dann ist es Zeit, sich einen schönen Schlafplatz in einem Baum zu suchen. Baue dir dort ein Laubnest und lass es Nacht werden.

Schimpanzen verbringen den Tag wie lethargische Kreuzfahrtpassagiere

Natürlich gibt es an einem solchen Tag auch die eine oder andere Aufregung. Zum Beispiel frenetisches Gejohle, wenn die Früchte wirklich köstlich sind, oder gelegentliches Raufen und Sich-gegenseitig-Jagen. Hin und wieder legt das Alphamännchen einen Auftritt hin, verdrischt ein paar Opfer oder stellt auf andere Art seine Macht zur Schau. Im Allgemeinen jedoch führen Schimpanzen ein recht unbeschwertes Leben.

Das gilt ebenso für Orang-Utans, Gorillas und Bonobos. Alle Menschenaffen frönen dieser Art von Müßiggang. Die Tiere verbringen acht bis zehn Stunden am Tag mit Ruhen, Fellpflege und Essen, bevor sie sich am Abend für neun bis zehn Stunden zum Nachtschlaf niederlegen. Schimpanzen und Bonobos laufen etwa drei Kilometer täglich, Gorillas und Orang-Utans nicht einmal das. Und was ist mit Klettern? Wie ich in jenem Sommer in Uganda feststellte, legen Schimpanzen pro Tag eine Strecke von rund 100 Metern klimmend zurück, was dem Kalorienumsatz von weite-

ren anderthalb Kilometern Laufstrecke entspricht. Orang-Utans verhalten sich ähnlich, und Gorillas dürften noch weniger an Bäumen emporsteigen, auch wenn dies bei ihnen bisher nicht gemessen worden ist.

Eine derart bescheidene körperliche Aktivität würde uns in kurzer Zeit ernste gesundheitliche Probleme bescheren. Wenn wir weniger als 10 000 Schritte pro Tag gehen, steigt unser Risiko für Herz-Kreislauf- und Stoffwechselerkrankungen. In den USA bringen es Erwachsene in der Regel auf zirka 5000 Schritte pro Tag – was zu den alarmierend hohen Raten an Diabetes Typ 2 beiträgt, von dem jeder zehnte US-Bürger betroffen ist, sowie zu den vielen Herzerkrankungen, die jeden vierten Todesfall in den Vereinigten Staaten verursachen. So gesehen, müsste es wilden Menschenaffen eigentlich ziemlich schlecht gehen. Wir können ihr Bewegungspensum in Schritte pro Tag umrechnen, um es direkt mit unserem zu vergleichen. Wenn wir das tun, stellen wir fest, dass sie kaum je über das Aktivitätsniveau bewegungsfauler Menschen hinauskommen – und niemals den für uns geltenden Richtwert von 10 000 Schritten pro Tag erreichen.

»Abhängen« vor dem Fernseher verschwendet Lebenszeit nicht nur, sondern verkürzt sie auch

Menschen, die viele Stunden am Schreibtisch oder vor dem Fernseher verbringen, werden eher krank und leben weniger lang, selbst wenn sie zu anderen Zeiten Sport treiben. Weltweit gilt körperliche Inaktivität als ebenso gesundheitsschädigend wie Rauchen: Schätzungsweise mehr als fünf Millionen Menschen sterben jährlich auf Grund bewegungsarmer Lebensweise. Untersuchungen zufolge nimmt bei Menschen, die mehrere Stunden pro Tag fernsehen, die Häufigkeit von Herzinfarkten und Schlaganfällen deutlich zu. Forscher um Michelle McDonnell von der University of South Australia beispielsweise stellten ein 1,4-mal so hohes Risiko für Schlaganfälle bei täglich mehr als vier Stunden TV-Konsum fest. Eine andere australische Studie ergab sogar, dass die Lebenserwartung mit jeder Stunde vor dem TV-Gerät um 22 Minuten sinkt. Falls das stimmt, würde es bedeuten, dass jeder, der die insgesamt 63,5 Stunden der Serie »Game of Thrones« anschaut, einen Tag auf diesem Planeten verliert.

Schimpanzen und andere Menschenaffen dagegen sind trotz ihres geringen Bewegungspensums bemerkenswert gesund. Selbst in Gefangenschaft erkranken sie nur selten an Diabetes, und ihr Blutdruck nimmt mit dem Alter nicht zu. Obwohl ihre Cholesterinwerte von Natur aus hoch sind, leiden sie nicht unter Arteriosklerose. Folglich sind diese Tiere weder von Herzinfarkten noch von anderen Komplikationen betroffen, die von verschlossenen Herzkranzgefäßen herrühren. Und sie bleiben schlank. 2016 untersuchte ich gemeinsam mit Stephen Ross vom Lincoln Park Zoo und einem Mitarbeiterteam den Stoffwechselumsatz und die Zusammensetzung des Körpergewebes von Menschenaffen in US-amerikanischen Zoos. Die Ergebnisse waren verblüffend: Obwohl sie in Gefangenschaft lebten, wiesen die Gorillas und Orang-Utans nur 14 bis 23 Prozent Körperfett auf. Bei Schimpanzen waren es sogar weniger als zehn Prozent – ähnlich wie bei olympischen Athleten.



JULIANPANE / GETTY IMAGES / ISTOCK

Faulenzen in Ruanda: Eine Berggorillafamilie futtert entspannt im Grünen. Obwohl diese Menschenaffen nach unseren Maßstäben ziemlich faul sind, beeinträchtigt das ihre Gesundheit nicht.

Unter unseren Primatenverwandten sind wir Menschen also eindeutig die Ausnahme. Aus irgendwelchen Gründen benötigt unser Körper viel mehr körperliche Aktivität, um normal zu funktionieren. Stundenlang herumzusitzen, das Fell zu pflegen und alle fünf gerade sein zu lassen, hat sich von einem Standardverhalten zu einem Gesundheitsrisiko gewandelt. Aber warum? Fossilien helfen uns, dieses Rätsel Stück für Stück zu lösen.

Vor etwa sechs oder sieben Millionen Jahren, am Ende des Miozäns, haben sich die Hominini (Gattungsgruppe Mensch) von der Linie der Schimpansen und Bonobos abgespalten. Bis vor rund 25 Jahren kannten Forscher nur wenige Fossilien aus dieser Gruppe, die in die Zeit kurz nach der Abspaltung datieren. Um die Wende vom 20. zum 21. Jahrhundert jedoch entdeckten Paläoanthropologen im Tschad, in Kenia und Äthiopien kurz hintereinander die Überreste dreier homininer Gattungen aus jener Periode: *Sahelanthropus*, *Orrorin* und *Ardipithecus*.

Jeder dieser frühen Hominini unterschied sich hinsichtlich anatomischer Details des Schädels, der Zähne und des Skeletts von heute lebenden Menschenaffen. Ihr Lebenswandel allerdings ähnelte offenbar demjenigen heutiger Arten, sieht man einmal von der Fortbewegung auf zwei Beinen ab. Ihre Mahlzähne glichen in Größe und Schärfe denjenigen von Schimpansen; ihr etwas dickerer Zahnschmelz lässt auf eine gemischte Diät aus Früchten und anderen Pflanzenteilen schließen.

Ardipithecus, gefunden in 4,4 Millionen Jahre alten Ablagerungen in Äthiopien und der bei Weitem am besten bekannte frühe Hominine, besaß lange Arme, lange gekrümmte Finger und Greiffüße. Demnach hielt er sich oft im Geäst auf. Neueren biomechanischen Analysen zufolge, die

meine Mitarbeiterin Elaine Kozma an der City University of New York durchgeführt hat, war das Becken von *Ardipithecus* anatomisch so verändert, dass er sich voll aufrichten und mit geringem Energieaufwand laufen konnte – ohne freilich seine Kletterfähigkeit einzubüßen. Vermutlich war er, der unseren Vorfahren verwandtschaftlich zumindest nahestand, in zwei Welten zu Hause: auf dem Boden und in den Wipfeln der Bäume (siehe auch den Artikel ab S. 26).

In der Zeit von etwa vier bis zwei Millionen Jahren vor heute dominiert die Gattung *Australopithecus* den homininen Stammbaum. Forscher kennen mindestens fünf Arten, darunter die berühmte »Lucy« und ihre Verwandten. Anatomische Veränderungen der unteren Gliedmaßen deuten auf ein verbessertes Gehvermögen hin, weshalb diese Menschenaffen mehr Zeit am Boden verbracht haben dürften als frühere Arten. *Australopithecus* besaß keine Greiffüße mehr; die große Zehe stand in einer Linie mit den übrigen Zehen; die Beine waren verlängert und zeigten bereits dasselbe Verhältnis von Beinlänge zu Körpermasse wie beim modernen Menschen. Analysen der Hüfte durch Kozma sowie jüngere Untersuchungen fossiler Fußabdrücke aus Laetoli (Tansania) sprechen dafür, dass diese Hominini eine ziemlich moderne Gangart pflegten. Ihren langen Armen und Fingern zufolge kletterten sie allerdings immer noch regelmäßig in Bäume und schliefen dort möglicherweise auch. Abriebmuster an ihren Zähnen lassen vermuten, dass sich die *Australopithecus*-Spezies hauptsächlich pflanzlich ernährten. Auf Grund ihrer großen, mit dickem Zahnschmelz ummantelten Mahlzähne dürften sie oft harte und faserreiche Nahrung zerkaut haben.

Das Entstehen eines aufrecht schreitenden Gangs auf zwei Beinen ist bei diesen frühen Hominini von besonderer Bedeutung, denn er geht mit einer neuen Art der Orientierung im Raum einher. Weil sich damit größere Distanzen bei geringem Kalorienumsatz überwinden ließen, waren diese Arten in der Lage, ihren Aktionsradius zu erweitern und in diverse Habitate vorzudringen, die zuvor schwer erreichbar gewesen waren. Weitere wichtige Veränderungen

gen gesellten sich hinzu, etwa der Verlust der großen, scharfen Eckzähne bei den Männchen, dem offenbar Veränderungen im Sozialverhalten zu Grunde lagen. Doch die primär pflanzliche Ernährung und das Beibehalten der Kletterfähigkeit sprechen dafür, dass diese Spezies bezüglich der Nahrungssuche und des alltäglichen Lebenswandels affenähnlich blieben. Die Entfernungen, die sie täglich zurücklegten, waren wahrscheinlich immer noch relativ bescheiden und unterbrochen von vielen Ruhepausen zum Verdauen der faserigen Pflanzenkost.

Tiere jagen und mit Werkzeugen zerlegen: Seit mindestens zwei Millionen Jahren üblich

Für die Zeit vor etwa zwei Millionen Jahren häufen sich Indizien für die Existenz erfindungsreicher Hominini. Schon 3,3 Millionen Jahre alte Sedimente vom Westufer des Turkana-Sees (Kenia) enthalten große unhandliche Steinwerkzeuge, von denen einige rund 15 Kilogramm wiegen, wie Sonia Harmand von der Stony Brook University und ihr Team 2015 entdeckten. In 2,6 Millionen Jahre alten Ausgrabungsstätten in Äthiopien und Kenia fanden Forscher diverse Steinwerkzeuge zusammen mit versteinerten Tierknochen – wobei die Letzteren Rillen und Kratzer aufweisen, die zweifelsfrei von Schlachtungen herrühren. An Fundstätten von vor 1,8 Millionen Jahren sind Knochen mit Schnittspuren und Steinwerkzeuge bereits die Norm, und es waren offensichtlich nicht nur kranke und verletzte Individuen, die den damaligen Jägern zum Opfer fielen: Überreste von geschlachteten Tieren aus der Olduvai-Schlucht in Tansania belegen, dass zur Beute vor allem Huftiere im besten Alter gehörten. Ebenso bedeutsam ist die Erkenntnis, dass Hominini vor 1,8 Millionen Jahren erstmals von Afrika nach Eurasien wanderten und ihre Siedlungsgebiete dramatisch ausdehnten – bis zu den Ausläufern des Kaukasus und den Regenwäldern Indonesiens. Unsere Vorfahren hatten kontinentale Grenzen überwunden.

Der Gebrauch von Steinwerkzeugen, die Einführung einer Diät mit fleischlicher Kost und die Entwicklung von Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften sorgten dafür, dass sich die Entwicklungslinie des Menschen von derjenigen der Affen abkoppelte, und zwar unumkehrbar. Diese gravierenden Veränderungen markieren den evolutionären Beginn der Gattung *Homo*, der wir angehören.

In der Ökologie und in der Evolution dreht sich fast alles um die Ernährung. Die Art der Nahrung bestimmt nicht nur über die Form der Zähne und über die Beschaffenheit des Verdauungsapparats, sondern über die gesamte Physiologie und Lebensweise. Spezies, die reichlich vorhandene und unbewegliche Kost verzehren, müssen weder umständlich danach suchen noch intelligente Strategien anwenden, um an ihr Futter zu kommen – Gras versteckt sich nicht und rennt nicht weg. Beute jedoch, die schwierig aufzuspüren oder zu fangen ist, erfordert ausgedehnte Streifzüge und oft auch eine größere kognitive Leistungsfähigkeit. Früchte fressende Klammeraffen in Mittel- und Südamerika etwa besitzen ein größeres Gehirn und legen täglich fünfmal weitere Strecken zurück als Blätter verzehrende Brüllaffen, mit denen sie sich die Wälder teilen. Raubtiere in der afrikanischen Savanne bewältigen durch-

schnittlich dreimal so große Entfernungen am Tag wie die Pflanzenfresser, auf die sie Jagd machen.

Der Übergang vom reinen Sammlerleben der frühen Hominini zur Jäger-und-Sammler-Strategie der neuen Gattung *Homo* hatte weit reichende Konsequenzen. Zum einen stärkte er den Zusammenhalt dieser sozialen Primaten. Sich von Beutetieren zu ernähren, macht es erforderlich, zu kooperieren und zu teilen – schon deshalb, weil es für einen einzelnen Menschen mit einer Steinzeitausrüstung fast unmöglich ist, etwa ein Zebra zu töten und zu verzehren. Fleisch zu erbeuten, ist schwierig und nicht immer von Erfolg gekrönt, daher bietet eine verlässliche Grundversorgung mit pflanzlicher Kost überhaupt erst die Voraussetzung dafür, regelmäßig auf Jagd gehen zu können. Heutige Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften beziehen ungefähr die Hälfte ihrer Kalorienzufuhr aus Pflanzen. Neuere Analysen von fossilem Zahnstein haben gezeigt, dass selbst die meisterhaft jagenden, wuchtig gebauten und reichlich Fleisch verzehrenden Neandertaler eine gemischte Diät mit einem hohen pflanzlichen Anteil einschließlich Körnern zu sich nahmen.

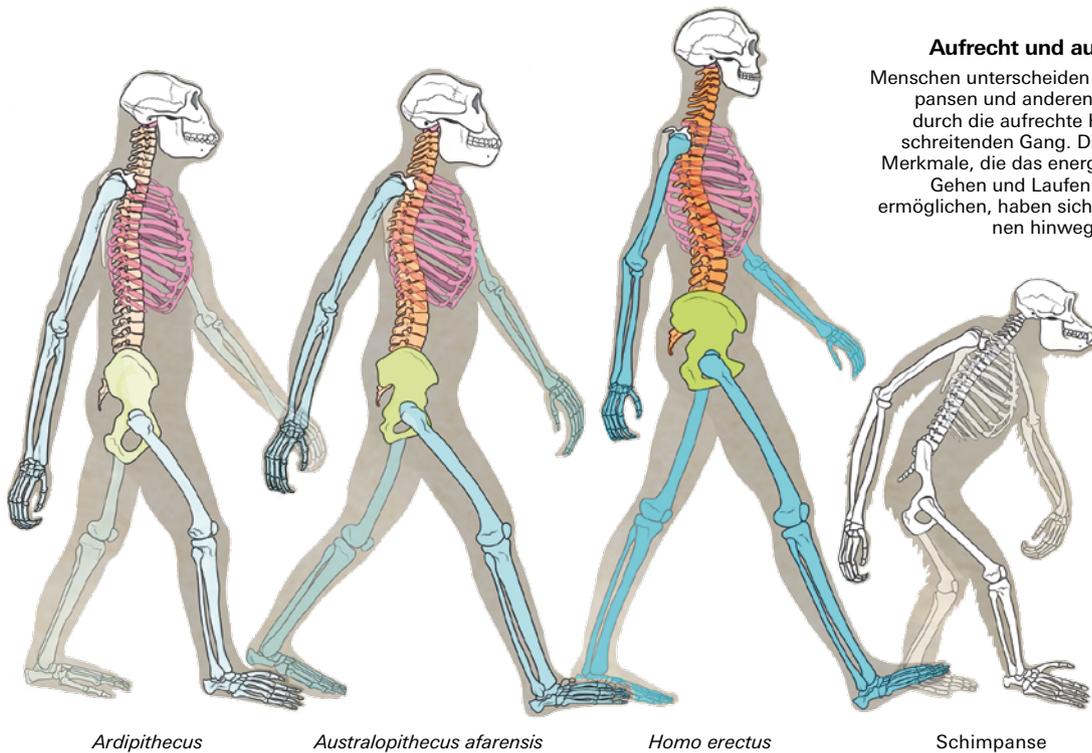
Jagen und Sammeln förderte auch die Entwicklung von Intelligenz. Technische Innovationen und kreative Jagdtaktiken brachten mehr Beute ein, was bedeutete, mehr Kalorien für die Reproduktion zur Verfügung zu haben. Soziale Intelligenz dürfte von unschätzbarem Wert gewesen sein, als unsere Vorfahren damit begannen, Kommunikation und Koordination zu festen Bestandteilen ihrer Überlebensstrategie zu machen. Das bestätigen Funde, die Allison Brooks von der George Washington University und Richard Potts vom Smithsonian National Museum of Natural History gemacht haben. Im kenianischen Olorgesailie-Becken entdeckten sie Indizien dafür, dass die kognitiven Leistungen der Hominini vor 320 000 Jahren ein Niveau erlangt hatten, das an jenes der heutigen Menschen heranreichte. Dafür sprechen der Gebrauch von schwarzen und roten Pigmenten für bildhafte Darstellungen sowie die offensichtliche Existenz großräumiger Handelsnetze, um Rohstoffe für Steinwerkzeuge einzutauschen. Das Alter dieser Funde stimmt gut mit dem der bisher ältesten *Homo-sapiens*-Fossilien überein (rund 300 000 Jahre), die 2017 an der Höhlenfundstelle Djebel Irhoud in Marokko zu Tage traten.

Auf der Suche nach Fleisch

Als Wildbeuter mussten sich die Hominini für den Nahrungserwerb zudem mehr anstrengen. Je weiter man in der Nahrungskette nach oben steigt, umso seltener wird die Beute und umso größer der Aufwand, sie zu finden: In den meisten Habitaten überwiegen die pflanzlichen Kalorien die tierischen bei Weitem. Jäger und Sammler sind bemerkenswert aktiv und legen typischerweise 9 bis 14 Kilometer täglich zu Fuß zurück – das entspricht zirka 12 000 bis 18 000 Schritten. Studien, die David Raichlen von der University of Southern California und ich bei den Wildbeutern der Hadza in Nordtansania durchgeführt haben (siehe **Spektrum** November 2017, S. 20), zeigen dies eindrücklich. Ihre Männer und Frauen leisteten an einem Tag körperlich mehr als typische US-Amerikaner in einer Woche und legen täglich drei- bis fünfmal so große Distanzen zurück wie irgendeiner von

Ausdauer-Experten

Weil unsere Hominini-Vorfahren anatomische Merkmale entwickelten, die den aufrechten Gang ermöglichten (Bildfolge), konnten sie größere Entfernungen bei geringerem Kalorienumsatz zurücklegen und somit in neue Lebensräume vorstoßen. Als sie dann noch angingen, Tiere zu jagen, nahm ihre körperliche Aktivität weiter zu, einhergehend mit einem erhöhten Aktionsradius für die Nahrungssuche. Ihre Physiologie passte sich diesem bewegungsreichen Lebensstil an. Da wir ihr Erbgut in uns tragen, müssen wir unserer Gesundheit zuliebe Sport treiben.



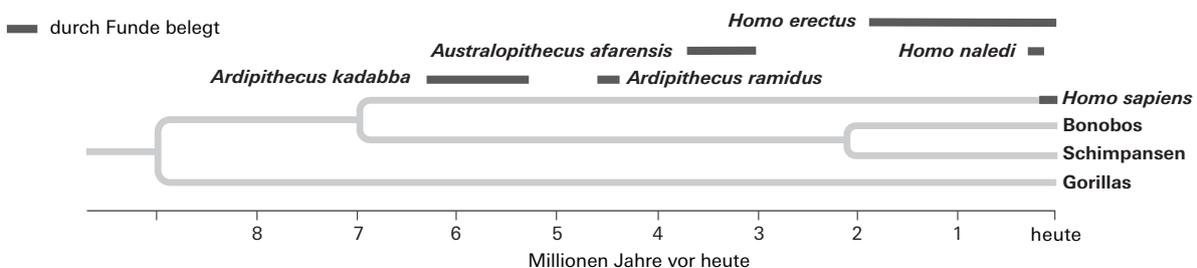
Aufrecht und auf zwei Beinen

Menschen unterscheiden sich von Schimpansen und anderen Menschenaffen durch die aufrechte Haltung und den schreitenden Gang. Die anatomischen Merkmale, die das energetisch effiziente Gehen und Laufen auf zwei Beinen ermöglichen, haben sich über Jahrmillionen hinweg herausgebildet.

vertikaler Torso und zentrales Loch an der Schädelbasis für Durchtritt des Rückenmarks		
Form der Wirbelsäule unbekannt	s-förmige Wirbelsäule	vergrößerte Lendenwirbel
muldenförmiges Becken	verkleinertes Sitzbein (Ischium)	robusteres Becken
kurze untere Gliedmaßen, lange obere Gliedmaßen	untere und obere Gliedmaßen verlängert	lange untere Gliedmaßen, obere Gliedmaßen und Finger dagegen kurz

Evolution in kleinen Schritten

Unsere frühen Vorfahren wie *Ardipithecus* und *Australopithecus* bewegten sich bereits auf zwei Beinen fort, wiesen aber noch viele Merkmale baumbewohnender Primaten auf. Genau wie die heutigen Menschenaffen ernährten sie sich überwiegend pflanzlich; ihr Verbreitungsgebiet beschränkte sich auf Afrika. Vor rund 1,8 Millionen Jahren hatte *Homo* die heutigen Körperproportionen entwickelt, schwenkte auf die pflanzlich-tierische Mischkost von Jägern und Sammlern um und breitete sich nach Eurasien aus.



unseren Menschenaffenverwandten. Frühe Vertreter unserer Gattung, die noch nicht über technische Innovationen wie Pfeil und Bogen verfügten, dürften sogar noch aktiver gewesen sein. Dennis Bramble von der University of Utah und Daniel Lieberman von der Harvard University schrieben 2004 in einem viel beachteten Aufsatz, unsere Vorfahren seien dahingehend evolviert, ihre Beute bis zur völligen Erschöpfung zu hetzen. Zur Untermauerung führten die Autoren mehrere Skelettmerkmale bei *Homo erectus* an, die für ausdauerndes Laufvermögen sprechen.

Die stetige Größenzunahme des Gehirns und die wachsende technische Komplexität im Verlauf der vergangenen zwei Millionen Jahre scheinen sich auf den ersten Blick zwangsläufig und unaufhaltsam entwickelt zu haben, doch dieser Eindruck täuscht. Die Evolution folgt keinem Plan. 2015 stellten Lee Berger von der University of the Witwatersrand und sein Team ihre Entdeckung hunderter Fossilien von *Homo naledi* vor. Die Wissenschaftler hatten die Überreste dieser Menschenart aus tief gelegenen Ablagerungen eines Höhlensystems geborgen und auf ein Alter von 236 000 bis 335 000 Jahren datiert. Mit einem Gehirn, das nur zehn Prozent größer als jenes von *Australopithecus* war, und einer Körpergröße, wie man sie bei frühen Vertretern der Gattung *Homo* findet, repräsentiert dieser Homine offenbar eine eigene Linie innerhalb unserer Gattung. Sie endete irgendwann im Pleistozän, nachdem *Homo naledi* sich mehr als eine Million Jahre lang ohne die Größenzunahme des Gehirns behauptet hatte, die für andere *Homo*-Arten typisch war. Er erinnert uns daran, dass die Evolution kein Ziel hat und demzufolge auch wir nicht ihr unvermeidliches Ergebnis sind.

Kein Körpermerkmal entsteht isoliert. Das Gehirn muss bequem im Schädel Platz finden, die Zähne müssen in die Kiefer passen, Muskeln, Nerven und Knochen müssen harmonisch aufeinander abgestimmt sein. Das gilt ebenso für Verhaltensmerkmale. Wenn eine Strategie wie das Jagen und Sammeln zur Norm wird, passt sich die Physiologie daran an und wird sogar davon abhängig.



SHARIF CHE LAH / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Ein Beispiel ist das Vitamin C. In frühen Säugetieren entwickelte sich ein mehrstufiger Stoffwechselprozess, bei dem sich dieses wichtige Vitamin selbst bildete. Die Kaskade, an der mehrere Gene mitwirken, ist bei Nagetieren, Fleischfressern und vielen anderen Säugern bis heute intakt. Als unsere Primatenvorfahren vor zehn Millionen Jahren Vitamin-C-reiche Früchte zu ihrer bevorzugten Kost machten, stoppte die Eigenproduktion dieses Stoffs jedoch, weil sie nicht mehr darauf angewiesen waren. Ihre Physiologie passte sich ihrem Verhalten an, indem jenes Gen

mutierte, das für den letzten Schritt der Vitamin-C-Synthese zuständig war. Infolgedessen können die heutigen Primaten – darunter die Affen und Menschenaffen – den Stoff nicht mehr selbst bilden. Wird er uns nicht von außen zugeführt, etwa als Nahrungsbestandteil, erkranken wir an Skorbut und sterben.

Die Evolution einer speziellen Atemtechnik bei manchen Hai-, Makrelen- und Tunfischarten liefert ein etwas entfernteres, aber dennoch treffendes Beispiel. Diese Spezies haben eine hochaktive Form der Nahrungssuche entwickelt, indem sie Tag und Nacht pausenlos schwimmen. Ihre Anatomie und Physiologie hat sich mittels einer »Staudruck-Atmung« daran angepasst: Wegen der ständigen Vorwärtsbewegung strömt Wasser über das Maul ein und an den Kiemen vorbei. Die Tiere müssen es deshalb nicht aktiv zu den Kiemen pumpen, weshalb sie keine Kiemenmuskulatur mehr ausbilden. Das spart Energie, bringt diese Fische aber in Erstickungsgefahr: Wenn sie aufhören zu schwimmen, sterben sie.

Sieben Stunden Schlaf reichen uns – das ist vergleichsweise wenig

Wir wissen zwar schon seit Langem, dass uns körperliche Aktivität guttut. Doch auf welcher vielfältigen Weise sich unsere Physiologie an die bewegungsintensive Lebensweise des Jagens und Sammelns angepasst hat, beginnen wir gerade erst zu verstehen. Fast jedes Organ ist bis hinunter auf die zelluläre Ebene davon betroffen. Das gilt in besonders faszinierender Weise für das Gehirn. Es kann mit erstaunlich wenig Schlaf auskommen, selbst in Gemeinschaften, die kein künstliches Licht oder andere technische Ruhestörer nutzen. Rund um den Globus – egal ob bei den Hadza in der afrikanischen Savanne, bei den Tsimane im Amazonas-Regenwald oder bei den Stadtbewohnern von New York – brauchen Erwachsene rund sieben Stunden Schlaf pro Nacht und damit weitaus weniger als andere Menschenaffen.

Wie David Raichlen und seine Mitarbeiter belegen konnten, ist unser Gehirn so evolviert, dass es anhaltende körperliche Aktivität belohnt. Auf Dauerlauf beispielsweise reagiert es mit der Produktion von Endocannabinoiden, die den Läufer in eine Art Rausch versetzen. Raichlen und andere Forscher postulieren sogar, exzessive körperliche Aktivität habe zur massiven Größenzunahme unseres Gehirns beigetragen, und wir bräuchten viel Bewegung, damit sich unser Denkorgan normal entwickle. Sport führt zur Freisetzung neurotropher Substanzen, die das Nerven- und Gehirnwachstum ankurbeln; zudem verbessert er die Gedächtnisleistung und verzögert den altersbedingten kognitiven Abbau.

Unser Stoffwechsel hat sich ebenfalls an einen bewegungsintensiven Lebenswandel angepasst. Die maximale Sauerstoffaufnahme als obere Grenze der Ausdauerleistung ist beim Menschen mindestens viermal so hoch wie bei Schimpansen. Dafür zeichnen vor allem unsere Beinmuskeln verantwortlich: Sie sind um 50 Prozent größer und haben einen viel höheren Anteil an langsamen, ausdauernd arbeitenden Fasern als die Beinmuskeln der anderen Menschenaffen. Unser Blut enthält außerdem mehr Erythrozyten (rote Blutzellen), die Sauerstoff in den Körper transpor-

tieren. Doch die Anpassungen gehen noch weiter: Ansheinend ist auch der Kalorienumsatz unserer Zellen erhöht. Wie Stephen Ross, Raichlen, ich und weitere Wissenschaftler zeigten, haben Menschen einen beschleunigten Stoffwechsel entwickelt, der den Treibstoff für erhöhte körperliche Aktivität und andere energetisch aufwändige Merkmale liefert, einschließlich des größeren Gehirns.

All diese Erkenntnisse sollten uns dazu anregen, die Bedeutung körperlicher Aktivität neu zu überdenken. Regelmäßige Bewegung wird oft als Mittel zur Gewichtsreduktion angepriesen oder als gesundheitsfördernde Maßnahme, die einen bewussten Lebensstil ergänzt. Aber sie ist keine Option, sondern ein Muss. Und die Minderung des Körpergewichts dürfte zu jenen Nutzeffekten zählen, die Sport am wenigsten erbringt. Unser Organismus ist auf tägliche körperliche Aktivität ausgelegt; gewähren wir sie ihm, arbeitet er nicht *mehr*, sondern *besser*. Wie ich und andere herausgefunden haben, wirkt sich physische Aktivität kaum auf den täglichen Gesamtenergieaufwand aus: Die Jäger und Sammler des Hadza-Volks setzen etwa genauso viel Kalorien pro Tag um wie westliche Stubenhocker (siehe **Spektrum** November 2017, S. 12). Darum ist es so unglaublich schwierig, Körpergewicht mittels sportlicher Betätigung abzubauen. Sport lässt nicht unbedingt die Pfunde purzeln, doch er reguliert, wofür der Organismus Energie bereitstellt und wie er seine lebenswichtigen Funktionen koordiniert.

Sport lässt unseren Organismus nicht *mehr*, sondern *besser* arbeiten

Laut neuen Erkenntnissen der Stoffwechselforschung setzt Muskeltraining hunderte Signalsubstanzen im Körper frei. Was diese physiologisch alles bewirken, haben wir bislang nur in Ansätzen verstanden. Sicher ist, dass Ausdauertraining chronische Entzündungen dämpft, einen bedeutenden Risikofaktor für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Es senkt zudem die Ruhespiegel der Steroidhormone Testosteron, Östrogen und Progesteron. Infolgedessen erkranken Erwachsene, die regelmäßig ausdauernd trainieren, seltener an hormonabhängigen Tumoren der Geschlechtsorgane und -drüsen.

Körperliche Aktivität kann auch dem morgendlichen Anstieg des Stresshormons Kortisol entgegenwirken. Zudem macht sie Körperzellen empfindlicher gegenüber Insulin, senkt damit das Risiko eines Diabetes Typ 2 und bringt den Organismus dazu, Glukose vermehrt in muskuläres Glykogen umzuwandeln statt in Fett. Bei regelmäßigem Bewegungstraining wehrt unser Immunsystem infektiöse Krankheitserreger effektiver ab, besonders im Alter. Selbst leichte Aktivität, etwa Stehen statt Sitzen, veranlasst die Muskeln zum Bilden von Enzymen, die Blutfette abbauen.

Es ist daher wenig verwunderlich, dass Herzkomplikationen, Diabetes und andere typische Zivilisationskrankheiten

bei Jägern und Sammlern wie den Hadza praktisch unbekannt sind. Wir müssen aber nicht deren Lebensweise übernehmen oder Marathon laufen, um von ähnlichen Effekten zu profitieren. Die Lektion, die wir von den Hadza, Tsimane und anderen lernen: Es kommt vor allem auf die Menge an und weniger auf die Intensität. Diese Menschen sind von früh bis spät auf den Beinen und täglich etliche Stunden körperlich aktiv, überwiegend in Form von Laufen. Wir können uns dem annähern, indem wir gehen oder radeln, statt Auto zu fahren, Treppen steigen, statt den Fahrstuhl zu nehmen, und generell bei jeder sich bietenden Gelegenheit unseren Allerwertesten bewegen. Eine kürzlich publizierte Studie von Forschern um William Tigbe von der University of Warwick hat gezeigt, wie das aussehen kann. Sie ergab, dass Glasgower Postangestellte umso gesünder sind, je mehr sie sich körperlich betätigen, etwa beim Austragen der Post: Jene, die täglich 15000 Schritte absolvierten oder sieben Stunden auf den Beinen waren (was dem Aktivitätsniveau der Hadza entspricht), wiesen die wenigsten Anzeichen für Herz-Kreislauf- und Stoffwechselerkrankungen auf.

Wenn wir schon dabei sind, sollten wir noch weitere Lehren aus dem Verhalten der Hadza und anderer Wildbeute ziehen. Neben viel Bewegung und Vollwertkost ist der Alltag dieser Menschen von ausgiebigen Aufenthalten an der frischen Luft sowie von Freundschaften und familiärem Zusammensein geprägt. Es gibt keine ausgeprägten Hierarchien bei ihnen und auch keine großen Unterschiede in ihrem ökonomischen Status. Wir wissen zwar nicht genau, wie dies ihre Gesundheit beeinflusst, aber es ist bekannt, dass große sozioökonomische Unterschiede in den Industrieländern zu chronischem Stress beitragen, was wiederum Zivilisationskrankheiten fördert.

Freude an einer körperlich aktiveren Lebensweise zu finden, wäre einfacher, wenn wir nicht mit dem Gorilla in unserem Kopf ringen müssten: Wir hören zu viel auf den Menschenaffen in uns, was unsere Lebensgestaltung anbelangt. Wir schlagen uns die Bäuche mit Schnellgerichten voll, sehen uns wandelnde Zombies an, statt selbst zu laufen, und pflegen Freundschaften im Sessel mit dem Smartphone in der Hand, statt unsere Bekannten zu besuchen. Wir sind fasziniert davon, uns in den großen Menschenaffen wiedererkennen, doch auf Grund unseres evolutionären Hintergrunds unterscheiden wir uns in Wirklichkeit ziemlich stark von ihnen. ◀

QUELLEN

Pontzer, H.: The crown joules: energetics, ecology, and evolution in humans and other primates. *Evolutionary Anthropology* 26, 2017

Pontzer, H.: Economy and endurance in human evolution. *Current Biology* 27, 2017

Raichlen, D.A. et al.: Differential associations of engagement in physical activity and estimated cardiorespiratory fitness with brain volume in middle-aged to older adults. *Brain Imaging and Behavior*, 2019

Tigbe, W. et al.: Time spent in sedentary posture is associated with waist circumference and cardiovascular risk. *International Journal of Obesity* 41, 2017

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern

2020 wieder drei besondere Reisen

Leserreisen

ZWEITES HALBJAHR 2020



UNSPLASH / MARTIN BRECHTL (<https://unsplash.com/photos/u21f5kAGZ0>)



MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON WITTMANN TRAVEL



FG TRADE / GETTY IMAGES / ISTOCK

HERBSTFARBEN ERLEBEN UND FOTOGRAFIEREN

Bei dieser Leserreise erleben wir wildschroffe Naturschönheiten und besondere atmosphärische Phänomene der Insel im Rahmen eines Fotoseminars.

Stefan Seip, einer der führenden Astrofotografen Deutschlands, ist in den Bereichen Naturfotografie, Porträt und Schwarz-Weiß-Fotos außerordentlich versiert. Wer die zarten, geisterhaften Schleier des Polarlichts erfolgreich fotografieren möchte, braucht einen wirklich dunklen Standort abseits künstlicher Lichtverschmutzung: etwa Myvatn im Nordosten Islands. Von dort aus unternehmen wir an 6 Tagen der insgesamt 10 Tage dauernden Reise unsere Touren. Die Geografie und Geologie dieser Insel mit den bedeutendsten Vulkanlandschaften der Erde sind weitere spannende Themen. Die Reise findet mit örtlicher Reiseleitung und thematischer Betreuung statt.

Reisedatum: 12.–21.9.2020, 10-tägig
Preis DZ/HP: € 3.680,–
Thematische Betreuung:
Stefan Seip

PATAGONIEN UND DIE TOTALE SONNENFINSTERNIS

Diese Reise führt uns in das wunderschöne Seengebiet zwischen Puerto Montt und Pucón im chilenischen Patagonien. Das Gebiet in der Provinz Araucania, das durch blaugrün leuchtende Seen, schneebedeckte Vulkane und unberührte Regenwälder geprägt ist, wird auch »chilenische Schweiz« genannt.

Der Höhepunkt dieser Reise ist die totale Sonnenfinsternis am 14. Dezember 2020, die wir in der Nähe von Lonchoche beobachten wollen. Die Reise wird thematisch von Dr. Uwe Reichert, dem ehemaligen Chefredakteur des Magazins »Sterne und Weltraum«, betreut.

Eine 6-tägige Verlängerung führt zum berühmten Nationalpark Torres del Paine mit Zwischenstationen in Puerto Natales und Punta Arenas. Eine individuelle Verlängerung zu den Osterinseln ist buchbar.

Reisedatum: 5.–18.12.2020, 14-tägig
Preis im DZ/HP: € 6.180,–
Thematische Betreuung: Dr. Uwe Reichert

ESA-WELTRAUMBahnHOF UND TROPENPARADIES

Zu mehr als 90 Prozent ist Französisch-Guayana von unberührtem tropischem Regenwald bedeckt. Inmitten dieses Naturparadieses besuchen wir den großen europäischen Weltraumbahnhof der European Space Agency (ESA) in Kourou mit seinen Ariane-, Sojus- und Vega-Raketen. Er gehört zu den größten Raketenstartplätzen der Erde. Weiterhin steht das Kennenlernen des Urwaldes auf dem Programm: Eine Übernachtung im Dschungelcamp ist eingeplant. Ganz im Süden des Landes befindet sich das Naturschutzgebiet von Kaw. Dort erwartet uns inmitten dieser tropischen Wasserlandschaft eine Übernachtung auf einem 4-Sterne-Hausboot mit abendlicher Ausfahrt zu den Kaimaninseln. Zur Einreise nach Französisch-Guayana ist eine Gelbfieberschutzimpfung gesetzlich vorgeschrieben. Die Reise findet mit örtlicher Reiseleitung und thematischer Betreuung statt.

Hauptreise: 24.9.–3.10.2020, 10-tägig
Preis im DZ/HP: € 3.950,–
Thematische Betreuung: Joachim Biefang

Infopakete bei unserem Reiseveranstalter:

WITTMANN TRAVEL, 21129 Hamburg, Urenfleet 6e, Tel.: 040 85105-376, Fax: 040 85105-377, E-Mail: info@wittmann-travel.de

www.wittmann-travel.de



FRANZI SCHÄBEL / FLORIAN FREISTETTER (DEPRESSE) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS) (DE/SA/4.0/LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT KREATIONISTISCHE MATHEMATIK

Eine täuschend einfach aussehende
Zahlenspielererei für Hobbymathematiker.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und
Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

» spektrum.de/artikel/1686878

In einem schon etwas älteren Buch über Mathematik bin ich kürzlich über folgende Formel gestolpert:

$$81 = (2^{2+1} + 1)^2$$

Sie fiel mir wegen ihrer scheinbaren Sinnlosigkeit auf. Schließlich handelt es sich dabei nicht um eine echte Formel, sondern um eine Berechnung. Eine unnötig komplizierte dazu, selbst wenn sie korrekt ist, wie man leicht überprüfen kann. Nun wollte ich natürlich wissen, was sie in dem Buch »Wonders of Numbers« des US-amerikanischen Autors Clifford Pickover zu suchen hat. Welche mathematischen »Wunder« verbergen sich hinter der seltsamen Berechnung?

Pickover beschäftigt sich im entsprechenden Kapitel mit so genannten Kreationzahlen. Diese definiert er als die kleinstmögliche Anzahl von Ziffern, die man braucht, um eine bestimmte Zahl zu konstruieren. Die Aufgabe besteht darin, dabei nur die Ziffern eins und zwei zu verwenden und diese bloß zu addieren, subtrahieren, multiplizieren oder zu potenzieren.

In der oben gezeigten Formel lässt sich die 81 durch lediglich fünf Ziffern darstellen (je einmal die zwei und die eins und dann noch einmal zwei, eins und zwei beim Potenzieren). Da es möglich sein könnte, weniger Einsen und Zweien zu nutzen, könnte die Kreationszahl auch kleiner als fünf sein.

In einem Forum rief der Autor den »Creator Numbers Contest« ins Leben. Die Zahlen 20, 120 und 567 sollten mit so wenigen Einsen und Zweien wie möglich ausgedrückt werden. Im letzten Fall bestand eine der ersten eingereichten Konstruktionen aus der Rechnung $567 = 2 \cdot 2 \cdot [(2 \cdot (2 \cdot 2 + 2))^2 - 2] - 1$. Achtmal die Ziffer zwei und einmal die Eins, woraus sich eine Kreationszahl von neun ergibt.

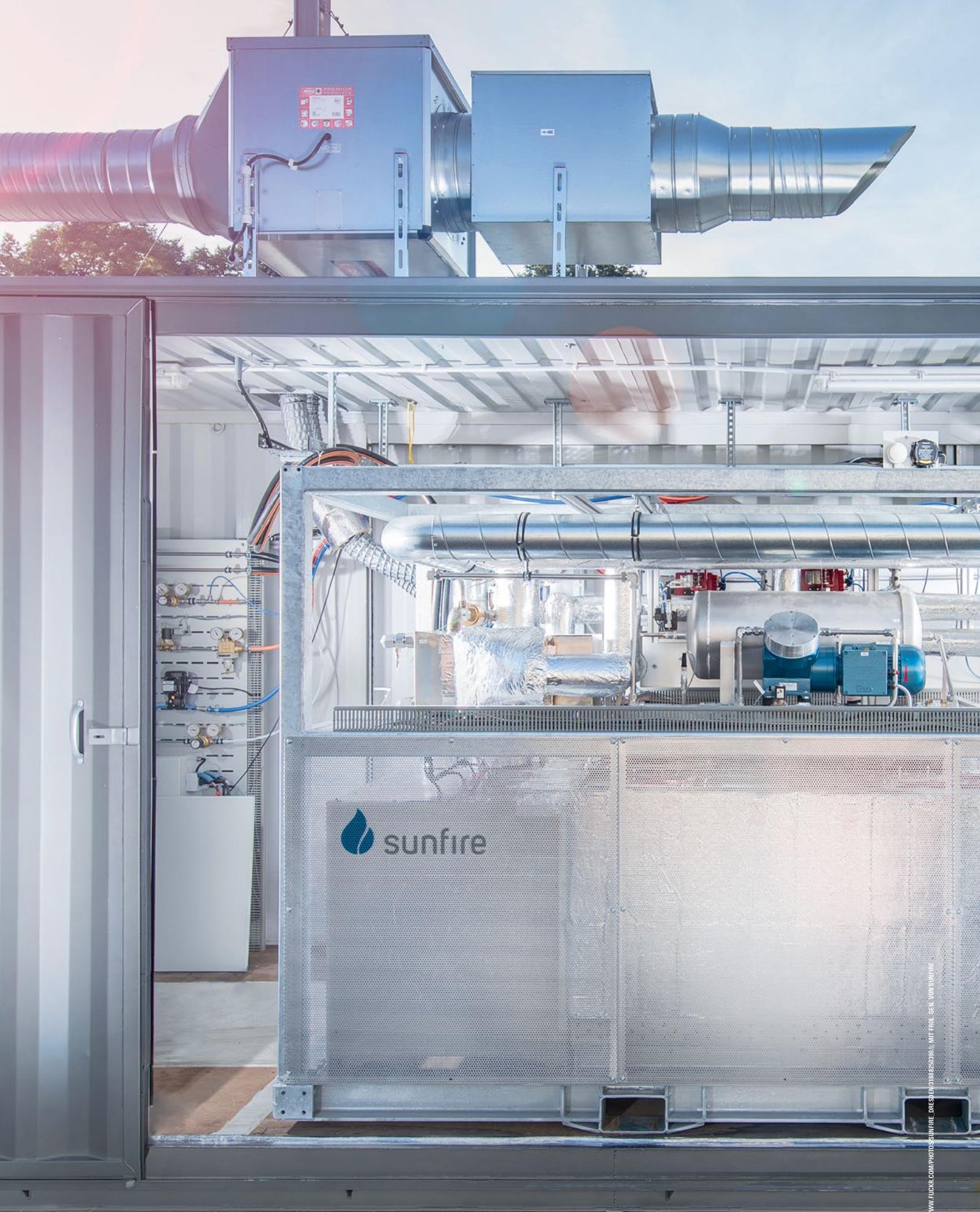
Doch es geht besser, wie sich im Lauf des Wettbewerbs zeigte: Bei $567 = (2^{(2+2+2)} - 1) \cdot (2 + 1)^2$ benötigt

man nur noch acht Ziffern. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer bemerkten schnell, dass die Vorgaben des Wettbewerbs es nicht explizit ausschließen, mehrstellige Zahlen zu verwenden – und dadurch Konstruktionen wie diese hier zu ermöglichen: $567 = (2 + 1)^{(2+1)} \cdot 21$, bei der nur sechs Ziffern vorkommen. Eine sparsamere Rechnung ließ sich nicht finden, deshalb geht man davon aus, dass die Kreationszahl von 567 tatsächlich sechs ist.

Die Teilnehmer am »Creator Numbers Contest« fanden ihre Lösungen meist durch Ausprobieren. Aber einige ehrgeizige Mitstreiter verfassten komplizierte Computerprogramme, um ihre Berechnungen zu automatisieren und zu überprüfen. Dabei stießen sie auf weitere Darstellungsmöglichkeiten, etwa indem sie negative Exponenten einsetzten. Die Zahl 567 lässt sich dann beispielsweise als $(2^{2^2} + 2)^2 \cdot (2 - 2^{-2})$ schreiben. Zwar tauchen so nicht weniger Ziffern auf als in der vorherigen Rechnung, doch bei anderen Zahlen lässt sich die Kreationszahl durch den geschickten Einsatz negativer Exponenten durchaus senken.

Daraufhin gingen Hobbymathematiker noch weiter. Statt ganzzahliger Exponenten verwendeten sie Brüche und konnten damit sogar irrationale Zahlen konstruieren. Ob das aber dabei hilft, ganze Zahlen möglichst effizient durch Einsen und Zweien auszudrücken, ist unklar.

Zugegebenermaßen dient die Beschäftigung mit Kreationzahlen eher der Unterhaltung als echter Forschung. Aber allein die Tatsache, dass eine simple Aufgabenstellung im Rahmen des »Creator Numbers Contest« so viele Menschen motiviert hat, sich ausführlich mit einem mathematischen Problem zu beschäftigen, zeigt, dass die Angelegenheit nicht ohne Wert ist. Tatsächlich können einfache Spielereien in der Mathematik sehr schnell extrem komplex werden. Wer weiß, vielleicht finden Kreationszahlen irgendwann doch noch ihren Platz in der Wissenschaft.



ENERGIEWIRTSCHAFT WEGE ZUM WASSERSTOFF

Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen soll der Energieträger der Zukunft werden! Forschergruppen weltweit liefern sich ein Rennen um die klimafreundlichste Herstellung.

Katja Maria Engel ist promovierte Ingenieurin der Materialwissenschaften und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.



► spektrum.de/artikel/1686882

Mit Hilfe von Strom stellt ein Elektrolyseur in Dresden Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser her.

► Rennwagen stehen nicht gerade für nachhaltigen Umweltschutz. Das soll sich jetzt ändern: Ende September 2019 ging auf der Teststrecke in den Ardennen ein wasserstoffgetriebener Bolide mit insgesamt fast 1000 PS an den Start – als Symbol für die klimafreundliche und grüne Zukunft der Mobilität. Der blau-weiße Prototyp preschte in elf Sekunden schon die ersten 400 Meter voran, und dabei dampfte aus seinem Auspuff nichts als reines Wasser.

Weil bei seiner Verbrennung kein CO_2 entsteht, gilt das Gas mit der Formel H_2 als Energieträger der Zukunft. Es soll Sonnen- und Windenergie zwischenspeichern, als Ersatz für Erdgas Haushalte beheizen, Flugzeuge und Schiffe antreiben und ganze Industrien CO_2 -frei machen. Im November 2019 hat die Bundesregierung bekannt gegeben, dass sie noch bis Ende des Jahres eine nationale Strategie für den »Schlüsselrohstoff« verabschieden will. Die Bundesländer wetteifern regelrecht um Förderung für neue Wasserstoffzentren, mit denen sie sich neue Wirtschaftskraft erhoffen. Hamburg kündigt sogar den weltgrößten Produktionsstandort an, ohne dass bisher ein Spatenstich erfolgt ist. Die Stahlindustrie, die momentan rund sieben Prozent der weltweiten CO_2 -Emissionen verursacht, will ihren ökologischen Fußabdruck verringern, indem sie Wasserstoff statt Kohle als Reduktionsmittel einsetzt. Schon in den nächsten Jahren soll es das Gas an jeder Tankstelle geben. Manch einer erwartet nicht weniger als ein Zeitalter voll unendlich viel »sauberer« Energie.

Doch der grüne Hoffnungsträger hat bislang eine rabenschwarze Klimabilanz. »96 Prozent des Wasserstoffs, der auf der Erde produziert wird, stammen aus fossilen Brennstoffen. Und der elektrische Strom für die Elektrolyse, mit der die restlichen vier Prozent hergestellt werden, kommt meist wiederum aus fossilen Quellen«, rechnet Roel van de Krol, Leiter des Helmholtz-Instituts für Solare Brennstoffe in Berlin, vor.

Bereits jetzt verschlingt die Industrie diesen Stoff regelrecht: Jedes Jahr werden weltweit um die 70 Millionen Tonnen reinen Wasserstoffs verbraucht (siehe Grafik rechts). Allein die deutsche Industrie benötigt jährlich mehr als

50 Milliarden Kubikmeter davon – das entspricht dem Wasservolumen des Bodensees. Die Chemiebranche stellt damit Dünger her, in Raffinerien hilft er, Erdöl in leichtere Brennstoffe umzuwandeln oder zu entschwefeln, und zunehmend werden synthetische Kraftstoffe daraus erzeugt. Ob Grundchemikalien, Pflanzenschutzmittel oder Pharmaka: Sie alle benötigen zur Herstellung Wasserstoff.

Und diesen erhält man nach wie vor aus Kohle, Gas oder Erdöl. Den Löwenanteil der Produktion macht mit etwa 50 Prozent die Dampfreformierung aus Erdgas aus, bei der Methan und Wasser zu Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid umgesetzt werden. Sowohl bei der Reaktion selbst als auch durch die großen Energiemengen, die zum Beheizen benötigt werden, entsteht viel CO_2 . 2019 stellten dänische Wissenschaftler einen Reformer vor, der durch elektrischen Strom beheizt wird und auf diese Weise erhebliche Mengen an Kohlenstoffdioxid einspart (siehe »Altes Verfahren neu gedacht«, S. 60). Das Kernproblem aber, dass allein durch die Reaktion CO_2 entsteht, bleibt. »Würde die Produktion über die Spaltung von Wasser durch mit erneuerbarem Strom betriebene Elektrolyse oder solar beheizte thermochemische Prozesse erfolgen, könnten auch die 59 bis 83 Prozent CO_2 -Emissionen, die durch die Reaktion des Erdgases entstehen, vermieden werden«, gibt Christian Sattler zu bedenken, Leiter der Abteilung Solare Verfahrenstechnik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln.

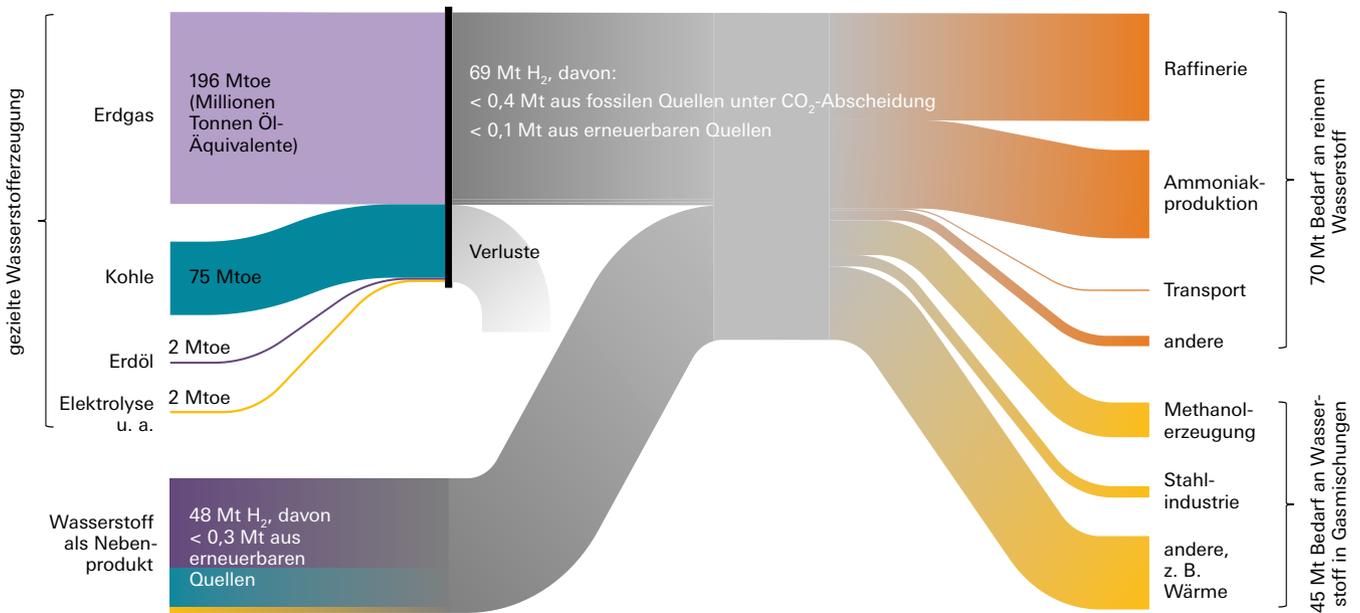
Forscher entdeckten die Wasserelektrolyse per Zufall

Diese Reaktion der von ihm genannten Elektrolyse ist schon lange bekannt: Fließt durch eine wässrige Lösung mit frei beweglichen Ionen ein elektrischer Gleichstrom, bildet sich an der Kathode (der negativ geladenen Elektrode) Wasserstoff und an der Anode (der positiv geladenen Elektrode) Sauerstoff. Insgesamt entstehen so aus zwei Molekülen Wasser zwei Moleküle Wasserstoff und ein Molekül Sauerstoff. Durch die chemische Reaktion selbst geht bei der Wasserelektrolyse also kein Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre aus.

Bereits im Jahr 1800 entdeckten neugierige Forscher dieses Phänomen der Wasserspaltung per Zufall. Am 20. März 1800 schickte der Physiker Alessandro Volta einen Brief aus Italien nach London, in dem er den Aufbau der ersten kontinuierlich funktionierenden Batterie skizzierte. Die Empfänger in England, die Chemiker Anthony Carlisle und William Nicholson, bauten seine Apparatur anhand des mitgelieferten Bauplans nach. Doch da Volta sich mehr für die Zuckungen des menschlichen Körpers begeisterte, die auftraten, sobald er ihn unter elektrischen Strom setzte, bemerkte er nicht, dass die Batterie undicht war. Die Engländer verpassten sich zwar auch den obligatorischen Elektroschock, analysierten anschließend aber den fehlerhaften Versuchsaufbau. Immer wieder tröpfelten die beiden Wasser auf den Apparat, der aus einem Stapel Metallmünzen, feuchten Lappen und ein paar Drähten bestand, um das Austreten eines noch nicht näher identifizierten Gases zu unterbinden. Dabei stellten sie schnell fest, dass sie gerade die Bindungen der Wassermoleküle gespalten hatten. Als sie die Batterie daraufhin ganz untertauchten,

AUF EINEN BLICK AUF DEM WEG ZUM GRÜNEN WASSERSTOFF

- 1** Wasserstoff wird als klimafreundlicher Energieträger der Zukunft gehandelt. Seine Herstellung, etwa aus Methan, verursacht momentan jedoch viel CO_2 .
- 2** Eine Verbesserung soll die Reduktion mittels Elektrolyse von Wasser bringen, die allerdings immense Mengen an Strom benötigt.
- 3** Noch in den Kinderschuhen stecken Technologien, die ohne Stromzufuhr auskommen, wie die künstliche Fotosynthese.



Derzeit stammt Wasserstoff fast komplett aus fossilen Quellen. Elektrolyse mit »grünem« Strom wird als saubere Alternative gehandelt. Gleichzeitig soll der Bedarf (2018: 70 Millionen Tonnen (Mt)) rasant steigen.

sprudelten Wasserstoff und Sauerstoff nur so hervor. Gleich im Juli desselben Jahres publizierte Nicholson in seinem Wissenschaftsmagazin »Journal of Natural Philosophy, Chemistry & the Arts« unter dem Titel »Bericht über eine neue elektrische Apparatur« die Sensation der Wasserspaltung.

Weil die Kosten für regenerativ erzeugten Strom weltweit sinken, prognostizieren Experten jetzt – 220 Jahre nach der Entdeckung der Wasserelektrolyse – den Aufstieg der Elektrolyseure. In der Nähe von Wasserkraftwerken, wo Strom günstig und dauerhaft verfügbar ist, findet man solche Anlagen bereits seit Mitte des letzten Jahrhunderts – beispielsweise am Assuan-Staudamm in Ägypten, wo ab 1960 das größte arbeitende Elektrolysekraftwerk der Welt Wasserstoff für die Düngemittelproduktion herstellte. Dort produzierte der Elektrolyseur mit einer Nennleistung von 156 Megawatt 33000 Kubikmeter Wasserstoff in der Stunde. Er basierte auf dem Verfahren der alkalischen Elektrolyse, bei welcher der Elektrolyseur mit einem Gemisch aus Wasser und Kalilauge gefüllt ist. »Die heute noch genutzte Technik ist im Grunde uralte«, sagt Tom Smolinka, Elektrolyseforscher am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg. »Dieser Typ an Elektrolyseur ist seit über 100 Jahren in der Industrie im Einsatz, aber im Fokus stehen hier eher Zuverlässigkeit und Robustheit. Der Wirkungsgrad war nicht so wichtig, da preiswerte Wasserkraft des Staudamms zur Verfügung stand.«

Mit verbesserter Technologie könnten solche Anlagen entscheidend zur Energiewende beitragen, schrieben Expertinnen und Experten des Zentrums für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg im Technologiebericht an das Bundeswirtschaftsministerium im

April 2018. Mittlerweile liege der Wirkungsgrad solcher Wasserstoffgeneratoren zwischen 51 und 79 Prozent (bezogen auf den Brennwert von Wasserstoff). Sie schätzen, dass eine konsequente Weiterentwicklung bis 2030 um die neun Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente an Treibhausgasen jährlich vermeiden könnte, 2050 zwischen 50 und 110 Millionen Tonnen. Voraussetzung sei, dass der benötigte Strom komplett aus regenerativen Quellen stammt. Und durch Nebeneffekte, beispielsweise den schrittweisen Ersatz von Diesel- und Benzin-Kraftstoffen durch H₂, prognostizieren die Experten sinkende Emissionen von Stickoxiden (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂) sowie Feinstaub.

26 Forschungs- und Pilotanlagen für die Elektrolyse von Wasser entstehen derzeit in Deutschland. Und der weltgrößte Wasserspalter mit 100 Megawatt Leistung soll bald in der Nähe des Hamburger Hafens stehen. »Davon ist man aber noch weit entfernt«, meint Tom Smolinka. »Technisch gesehen ist das machbar, aber es ist eine spannende Frage, wie schnell die Finanzierung geklärt wird.« Andere Städte wollen ebenfalls dabei sein: Siemens möchte in Görlitz mit der Fraunhofer-Gesellschaft ein Wasserstoff-Technologiezentrum errichten, um die Stadt als neuen Wirtschaftsstandort zu positionieren. Und Bayern hat ebenfalls ein Wasserstoff-Forschungszentrum angekündigt.

Das Wuppertal-Institut erwartet bis 2030 fast 60-prozentige Wachstumsraten für Neuzulassungen von Elektrolyseuren in Deutschland. Die zunehmende Kommerzialisierung und ein sich bildender Massenmarkt sollen im nächsten Jahrzehnt an die 400 Wasserstofftankstellen in Deutschland möglich machen. Derzeit bieten mehrere Anlagenhersteller schon große Elektrolysegeräte mit einem versprochenen Wirkungsgrad von über 80 Prozent an.

Auch diejenigen Industrien, die den Wasserstoff benötigen, stampfen große Initiativen für Pilotanlagen aus dem Boden. Shell und ITM Power bauen derzeit bei der Rheinland Raffinerie in Wesseling bei Köln die weltweit erste kommerzielle Membran-Elektrolyse-Anlage. Dieser zweite Typ von Elektrolyseur spaltet Wasser statt in einer alkali-

schen Flüssigkeit in einem sauren, festen Elektrolyten. Er eignet sich auch für einen dynamischen Betrieb – wenn also die zur Verfügung stehende Energie schwankt wie bei der Nutzung von Wind- oder Sonnenenergie. Erprobt ist die Technik bislang nur in kleinen Anlagen. Diejenige in Wesseling soll ab 2020 mit einer Kapazität von zehn Megawatt an die 1300 Tonnen Wasserstoff pro Jahr erzeugen, so der Hersteller. Das produzierte Gas will vor allem die Raffinerie nutzen, um ihre Produkte zu verarbeiten.

Die Stahlindustrie schreitet mit eigenen Projekten voran

Für Industriebetriebe, die den hergestellten Wasserstoff direkt in ihren Prozessen nutzen, ist wiederum ein noch wenig erprobter Typ interessant: die Hochtemperatur-Elektrolyse. In einer Pilotanlage stellt die Firma Sunfire mit dem Verfahren seit 2014 in Dresden Wasserstoff her und veredelt ihn zusammen mit CO₂ gleich zu synthetischen Kraftstoffen. Die Elektrolyse läuft dort bei 850 bis 1000 Grad Celsius mit Wasserdampf bei einem Druck von 20 bar ab. Aber die große Hitze erfordert eine aufwändige Dichtungs- und Regelungs-technik sowie robustes Material. Noch

besteht viel Forschungsbedarf an dieser dritten Variante der Wasserspaltung mit Strom, dafür ist sie jedoch die effizienteste mit Wirkungsgraden um 90 Prozent. Ihr Vorteil: Die Hitze trägt zur Spaltenergie bei. So kann die erforderliche Zellspannung um mehr als 0,5 Volt auf unter 1 Volt gesenkt werden, und weniger Strom wird für die Elektrolyse benötigt.

Zusätzlichen Auftrieb erhält die Forschung an dieser Form der Wasserspaltung durch die Stahlindustrie, die für sage und schreibe sieben Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich zeichnet. Um diese verheerende Bilanz deutlich zu senken, will die Salzgitter Flachstahl GmbH ab Ende 2020 in zwei Hochtemperatur-Elektrolyseuren mit Windenergie klimaneutralen Wasserstoff erzeugen. Zunächst soll dieser den bislang genutzten Wasserstoff aus fossilen Quellen ersetzen; langfristig könnte er aber sogar für die Reduktion von Eisenerz zum Metall verwendet werden, einen Prozessschritt, für den bislang Kohle eingesetzt wird. Das könnte die CO₂-Emissionen um bis zu 85 Prozent senken. Bis Ende 2022 sollen die beiden Anlagen etwa 100 Tonnen Wasserstoff liefern. Gefördert wird das Projekt mit europäischen Geldern durch das Innova-

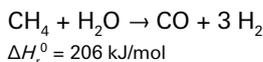
Altes Verfahren neu gedacht

Den Löwenanteil des weltweit hergestellten Wasserstoffs, nämlich gut die Hälfte, liefert derzeit die Dampfreformierung von Methan aus Erdgas. Dieses bewährte und etablierte Verfahren verbraucht viel Energie, denn der endotherme Prozess kommt erst bei 800 Grad Celsius richtig in Gang. Zudem setzt die chemische Reaktion selbst zusätzliches Kohlendioxid frei. Mit jedem Kilogramm Wasserstoff entstehen so je nach Anlage und Betriebsweise zwischen 6,6 und 9,3 Kilogramm CO₂. Die Dampfreformierung trägt damit rund drei Prozent zu den globalen Kohlenstoffdioxidemissionen bei.

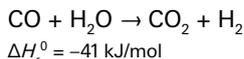
Um den erheblichen CO₂-Ausstoß des Alltagsverfahrens zu reduzieren, haben dänische Wissenschaftler um Sebastian Wisman jetzt eine elektrisch betriebene Alternative entwickelt.

Im bisherigen Verfahren leitet man Methan (CH₄) und Wasserdampf in einen 10 bis 14 Meter hohen Reaktor, der bis zu 100 000 Kubikmeter H₂ in einer Stunde produziert. Ein Metallkatalysator hilft,

unter einem Druck von etwa 25 bis 30 bar Wasserstoff und Kohlenmonoxid (CO) zu erzeugen:



In einem zweiten separaten Schritt (bekannt als Wassergas-Shift-Reaktion) reagiert das entstandene Kohlenstoffmonoxid mit Wasser zu CO₂ und weiterem Wasserstoff:

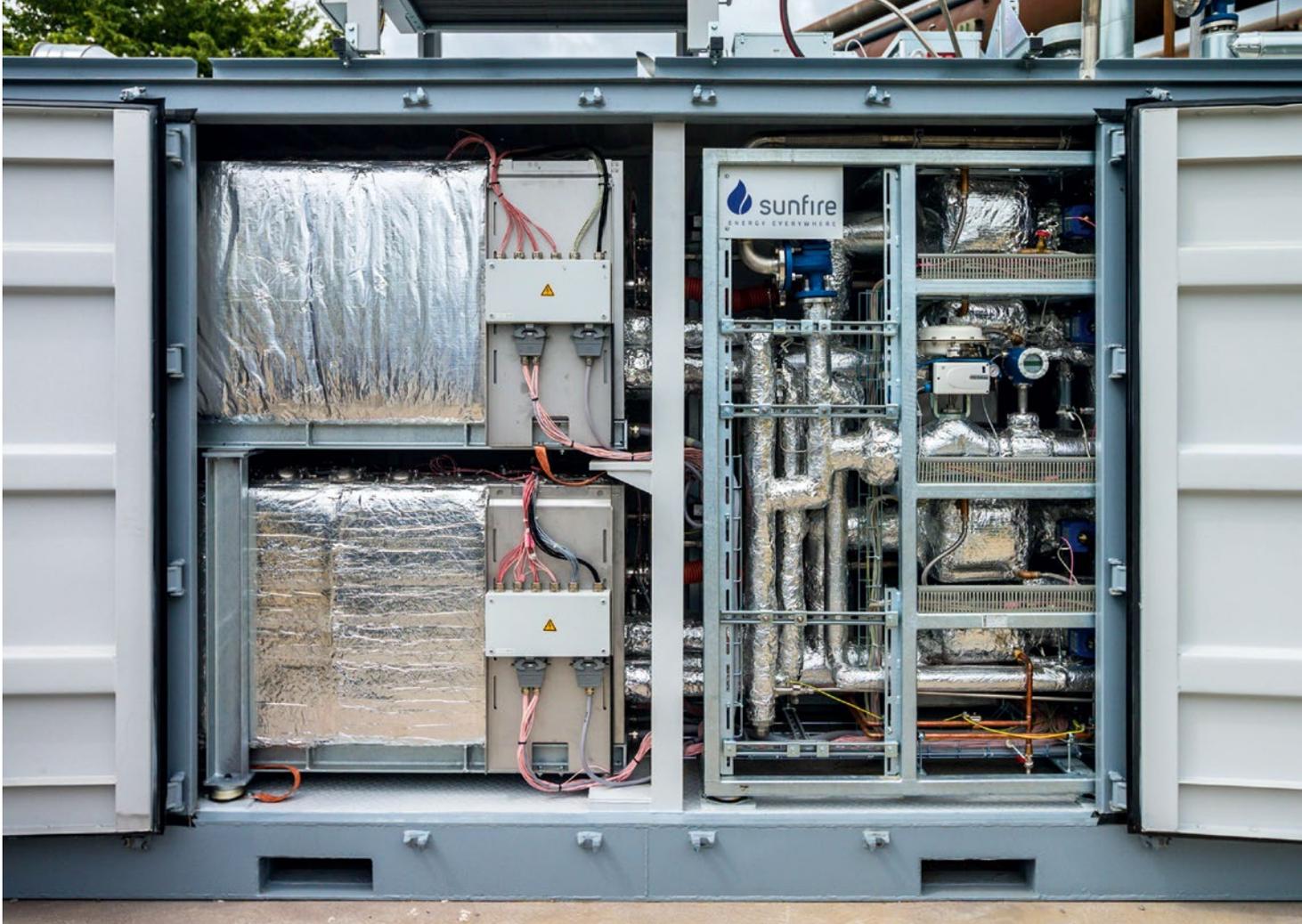


Kohlenstoffdioxid bildet sich also zum einen in der Reaktion selbst. Zum anderen entsteht es durch das Beheizen der Anlage: Um die benötigte Energie für die Reaktion aufzubringen (206 Kilojoule pro Mol Wasserstoff), wird etwa ein Fünftel des eingesetzten Methans verbrannt.

Die Tricks des Physikers Wisman und seiner Teamkollegen: Sie verzichten auf die Gasbrenner und beheizen die Reaktorwände mit elektrischem Strom. Dieser fließt durch die Innenwände und erhitzt

sie auf Grund des ohmschen Widerstands auf die benötigte Temperatur. So vermeiden sie, dass ein Großteil der Wärme verloren geht. Den Katalysator wiederum haben sie in einer dünnen Schicht auf die beheizten Wände aufgetragen, so dass er um 65 Prozent effektiver arbeitet. Die Wissenschaftler schätzen, dass ein typischer Industriereaktor mit diesem Aufbau 100-mal kleiner gebaut werden kann. Doch »wirksam wird die begrenzte CO₂-Ersparnis nur, wenn ausreichend erneuerbarer Strom zur Verfügung steht«, gibt Ralf Peters, Leiter der Abteilung Brenngaserzeugung und Systeme am Institut für Energie- und Klimafor-

sung des Forschungszentrums Jülich, zu bedenken. Dann biete die Technik eine Möglichkeit, Wasserstoff mit einem um etwa 20 Prozent kleineren CO₂-Fußabdruck bereitzustellen. Doch ob Wismanns Reformer sich in der Realität durchsetzt, hängt im Wesentlichen von den Kosten für den elektrischen Strom und Erdgas sowie vom Preis für CO₂ ab.



In Salzgitter sollen ab 2020 zwei Hochtemperatur-Elektrolyseure gekoppelt mit Windenergie klimaneutralen Wasserstoff für die Stahlindustrie erzeugen.

tionsprogramm Horizon 2020. Der gewaltige Pferdefuß, den alle Elektrolyseverfahren gemeinsam haben, sind die unbegrenzten Mengen an grünem Strom, die die Entwickler wie selbstverständlich voraussetzen. Emissionsfrei ist der Wasserstoff aus den Elektrolyseuren erst, wenn er Strom aus regenerativen Quellen nutzt. Im Jahr 2019 hatten regenerative Energien (Wasserkraft, Wind, Solarenergie und Biomasse) mit gut 210 Terawattstunden (TWh) immerhin einen Anteil von rund 46 Prozent an der deutschen Stromproduktion, betrachtet man nur den Strom, den Kraftwerke zur öffentlichen Stromversorgung herstellen. Zur Erzeugung eines Normkubikmeters Wasserstoff mittels Elektrolyse muss theoretisch eine Energie von 3,54 Kilowattstunden (kWh) aufgewendet werden. Praktisch liegen die Werte zwischen 3,6 und 4,9 kWh – je nach Art des Elektrolyseurs. Allein um mit Strom die 50 Kubikmeter H₂ zu erzeugen, die Deutschland derzeit jährlich verbraucht, müsste man also etwa 180 bis 245 Terawattstunden aufbringen. Und um genügend Wasserstoff für einen CO₂-neutralen Schiffs- und Flugverkehr in Deutschland zu gewinnen, seien allein 557 Terawattstunden Strom erforderlich, hat das Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE errechnet. »Mittel- und langfristig wird Deutschland CO₂-freien Wasserstoff in größerem Umfang importieren

müssen«, räumt die Bundesregierung in ihrem vorläufigen Papier zur nationalen Wasserstoffstrategie ein.

Geht es allerdings nach anderen Wissenschaftlern, dann sollte bei der Herstellung von Wasserstoff gar kein Strom zum Einsatz kommen. Bereits seit 2,5 Milliarden Jahren gelingt es Pflanzen mittels Photosynthese, die Energie des Sonnenlichts zu nutzen, um speicherbare Energieträger zu erzeugen. Die Zutaten erscheinen übersichtlich: Wasser, Licht und Kohlenstoffdioxid.

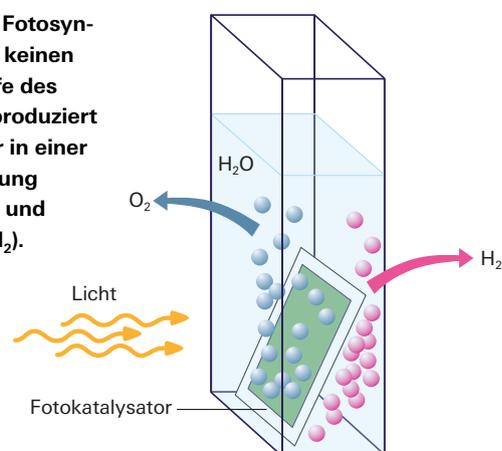
Das solle man sich von der Natur abschauen, forderte bereits 1912 der italienische Chemiker Giacomo Ciamician auf einem Fachkongress in New York und stellte die Idee der »künstlichen Photosynthese« vor. Er wollte so aus CO₂ und Wasserstoff Methan herstellen und rechnete seinen Zuhörern genau vor, mit wie viel Sonnenenergie man auf diese Weise wie viel Kilogramm Kohle umsetzen kann. Einige Jahrzehnte nach dieser Rede wurden dazu zwar Mitte der 1970er Jahre nach der Ölkrise einige Forschungsvorhaben angestoßen. Aber als Erdgas wieder billiger wurde, verfolgte man diese Alternativen nicht mehr mit dem gleichen Elan. Erst unter dem Eindruck des Zweiten Golfkriegs und den Warnungen vor einer Klimakatastrophe mit dem 3. IPCC-Bericht starteten ab 2001 wieder weltweit zahlreiche Forschungen und Entwicklungen zur künstlichen Photosynthese durch. Jetzt 2019 – mehr als 100 Jahre nach Ciamicians fruchtlosem Appell – fassen die deutschen Wissenschaftsakademien den Stand der Dinge in ihrem Bericht zusammen: »Die künstliche Photosynthese könnte die industrielle Kohlendioxid-Bilanz signifikant verbessern«,

und empfehlen eine rund zehnjährige intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Wünschenswert wäre es, so die Gutachter, am Ende eine erste Pilotanlage zu sehen.

Auftrieb erhielt das lange vernachlässigte Thema, Wasserstoff ohne elektrischen Strom herzustellen, durch den Artikel »The Artificial Leaf«, den Daniel Nocera vom Massachusetts Institute of Technology 2012 in der Zeitschrift »Accounts of Chemical Research« veröffentlichte. Sein Nachbau eines künstlichen Blatts aus der Natur war so groß wie eine Briefmarke und bestand aus einer Silizium-Solarzelle, die um spezielle Katalysatoren ergänzt war. Wenn er sie mit Sonnenlicht bestrahlte, setzte er damit Elektronen und positiv geladene »Löcher« frei. Und so blubberte aus dem kleinen Stückchen, eingetaucht in Wasser, der begehrte Wasserstoff – damals noch mit einem Wirkungsgrad von unter fünf Prozent (siehe Grafik rechts).

Aktuell steht der Wirkungsgradrekord bei 19,3 Prozent. Das ist ein Vielfaches von den 0,3 bis 1 Prozent, die Pflanzenproteine schaffen. Ihn hat ein großes Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der TU Ilmenau, des California Institute of Technology, der University of Cambridge, des Fraunhofer ISE und des Helmholtz-Zentrums Berlin 2018 aufgestellt. Um die vorherige Höchstmarke zu übertreffen, kombinierten sie eine Tandem-Solarzelle mit Rhodium-Nanopartikeln und weiteren funktionalen Schichten zu einer Fotoelektrode, die so viel Licht wie möglich einfangen soll. In einem wässrigen Elektrolyten bildet sich dann auf der Vorderseite (Kathode) Wasserstoff, auf der Rückseite (Anode) entsteht Sauerstoff. Der Clou sei eine Schicht aus kristallinem Titandioxid, denn dieses Material

Die künstliche Fotosynthese benötigt keinen Strom: Mit Hilfe des Sonnenlichts produziert ein Katalysator in einer wässrigen Lösung Sauerstoff (O₂) und Wasserstoff (H₂).



verringert die optischen Verluste durch Reflexion, verbessert den Ladungstransport und schützt den Katalysator vor Korrosion. Mittlerweile hält der Aufbau mehr als 100 Stunden durch.

»Die Schwierigkeit besteht im Grunde darin, drei Elemente zusammenzubringen: Wirkungsgrad, Stabilität und Skalierbarkeit«, erklärt der Materialwissenschaftler Roel van de Krol, der den bisherigen Rekordhalter mitentwickelt hat. »Es ist die Kombination der drei Komponenten, die das ganze Spiel so schwierig macht. Und in den letzten Jahren hat sich viel Forschung auf den Wirkungsgrad konzentriert.«

Ohne Stromzufuhr und teure, seltene Metalle: Der Traum vom ökologischsten Wasserstoff

Damit die künstliche Fotosynthese ähnlich produktiv funktioniert wie die konventionelle Elektrolyse, können größere Oberflächen der Katalysatoren helfen. Daran arbeitet Markus Antonietti vom Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Golm. Er will zudem die teuren Katalysatormaterialien ersetzen, die bis dato oft aus Metallkomplexen oder sehr seltenen Elementen wie Ruthenium oder Iridium bestehen. Für seine Forschung nutzt er mesoporphöses graphitisches Kohlenstoffnitrid, einen organischen Halbleiter, der gleichzeitig stabil und preiswert ist. Kohlenstoff- und Stickstoffatome wechseln sich in dem Material ab und bilden Schichten, die denen des Graphits ähneln. Regelmäßige Poren in Antoniettis Material vergrößern die Oberfläche um ein Tausendfaches und machen den Stoff somit zu einem leistungsfähigen Katalysator, denn die chemischen Reaktionen laufen an seinen Grenzflächen ab. In einem Gramm mesoporphösen Kohlenstoffnitrids verbirgt sich somit die innere Oberfläche von 1000 Quadratmetern. »Das ist, als sähe man auf einen Quadratmeter Fläche, in der sich aber unsichtbar die eines ganzen Fußballplatzes verbirgt«, sagt der Grenzflächenforscher.

Der Potsdamer Wissenschaftler ist sich sicher, dass er nicht nur am grünen Wasserstoff arbeitet, sondern auch am billigsten. Denn im Prinzip ist die künstliche Fotosynthese vergleichbar einer Solarzelle, deren elektrischer Strom in einen Elektrolyseur fließt – mit dem Vorteil, dass das künstliche Blatt weder Kabel noch Strom benötigt und daher lokal und dezentral ohne Transportverluste Energie erzeugen

Großbritanniens Wasserstoffwirtschaft

Eine britische Vereinigung von Ingenieuren hat Mitte 2019 visionär kalkuliert, dass das gesamte Gasnetz des Landes zu 100 Prozent von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt werden könnte. Zwar seien noch einige entscheidende Fragen offen, um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen. Der Zeitpunkt sei aber optimal, da bis 2030 im Gasnetz die meisten Metallrohre durch Polyethylenrohre ersetzt werden, die geeignet sind, Wasserstoff zu transportieren. Mit einem Schlag wäre so die größte Quelle für Kohlenstoffdioxidemissionen eliminiert. Denn zum Heizen verbranntes Erdgas verursacht auf der Insel fast 200 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid jährlich. Die Ingenieure schlagen für die Produktion des Wasserstoffs Elektrolyseure vor. ITM Power plant einen »HGAS«-Block mit 100 Megawatt Leistung. Um den Plan umzusetzen, bräuchte die Firma davon 1400 Stück, entsprechend dem Platzbedarf von 1500 Fußballfeldern – und zusätzlich so viel Wasser, wie 1,2 Millionen britische Haushalte jährlich verbrauchen.

gen könnte. »Es ist der grünste Wasserstoff, und das ist unsere Motivation, daran zu forschen«, ist auch Roel van de Krol überzeugt.

Doch trotz aller Teilerfolge lockt die Technologie noch keine Großinvestoren in den Hamburger Hafen oder nach Görlitz. »Wir sind so weit, dass wir kleine Bauelemente herstellen können«, sagt der Helmholtz-Forscher van de Krol. »Bislang waren alle zufrieden mit wenigen Quadratmillimetern. Der Wirkungsgrad war das wichtige Thema. Aber damit können wir die Welt nicht retten. Wir müssen von wenigen Quadratzentimetern in den nächsten Jahren auf 50 bis 100 Quadratzentimeter kommen.« Nur zum Vergleich: Eine CD-Hülle hat eine Fläche von 170 Quadratzentimeter. Auf eine erste kleine Pilotanlage hofft van de Krol erst in den nächsten fünf bis zehn Jahren.

Bis dahin soll der Anteil an Wasserstoff als Energieträger schon stark gestiegen sein. Um die Beimischung von H_2 ins deutsche Gasnetz zu testen, betreibt das Fraunhofer ISE seit August 2017 eine Anlage, mit der die Kunden des kommunalen Netzes in Freiburg bis zu zwei Prozent H_2 unter ihr Erdgas gemischt bekommen. Technisch möglich wären jetzt schon zehn Prozent. »Würde man die Kapazitäten voll ausschöpfen, um Wasserstoff einzuspeisen, ließe

Rekordhalter der künstlichen Fotosynthese ist ein Siliziumchip, der Wasser mit einem Wirkungsgrad von gut 19 Prozent spaltet (hier ist ein Vorläufer zu sehen).

sich ein beträchtlicher Input an erneuerbaren Energien im Gesamtsystem speichern«, sagt Christopher Hebling, Leiter Wasserstofftechnologien am Fraunhofer ISE. Großbritannien erwägt derweil, das gesamte Gasnetz auf den neuen Energieträger umzustellen (siehe »Großbritanniens Wasserstoffwirtschaft«, links). Japan und Australien haben ebenfalls große Vorhaben zur Wasserstofftechnologie angekündigt.

Dass die Wasserstoffwirtschaft eine recht hohe sozialpolitische und lokale Akzeptanz aufweist, wie das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung in seinem Technologiebericht 2018 schreibt, ist für die weitere Entwicklung sicher von Vorteil. Vielleicht auch, dass Wasserstoff im Jahr 2050 eine inländische Wertschöpfung in Deutschland von bis zu acht Milliarden Euro pro Jahr bewirken soll. Dabei sollte nicht unterschlagen werden, dass der zukünftige Stromverbrauch um das Dreifache steigen kann, erklärt Tom Smolinka vom Fraunhofer ISE. Bei einem derzeitigen Strombedarf um die 600 Terawattstunden pro Jahr in Deutschland erwarten die Fraunhofer-Forscher »gemäß der gerechneten Szenarien im Jahr 2050 einen Bedarf von 2000 TWh, der überwiegend durch Wind und Solar gedeckt werden wird.«

Im Moment scheint allerdings die Wasserelektrolyse auf dem Vormarsch – in Kombination mit einem massiven Ausbau erneuerbarer Energien. Bleiben bei dem Rennen dann vielleicht Verfahren auf der Strecke, die noch nicht einmal eine Pilotanlage vorweisen können wie die künstliche Fotosynthese? Der Max-Planck-Forscher Antonietti befürchtet das nicht: »Das ist Innovationstheorie«, hofft er. »Wir brauchen Einstiegstechnologien, damit der Markt vorbereitet ist. Wenn sich der Wasserstoff etabliert hat, dann ist auch Platz für alternative Technologien.« ◀

QUELLEN

Brinner, A. et al: Power-to-gas (Wasserstoff). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2018, S. 9–64

Cheng, W.-H. et al.: Monolithic photoelectrochemical device for direct water splitting with 19% efficiency. ACS Energy Letters 3, 2018

Dau, H. et al.: Künstliche Photosynthese. Besser als die Natur? Springer, 2019

Ghosh, I. et al.: Organic semiconductor photocatalyst can bifunctionalize arenes and heteroarenes. Science 365, 2019

Wismann, T. et al.: Electrified methane reforming: A compact approach to greener industrial hydrogen production. Science 364, 2019

LITERATURTIPPS

Diermann, R.: Strom im Tank. spektrum.de 11.7. 2019
Der Erfolg von grünem Wasserstoff und daraus hergestellten Brennstoffen hängt von politischen Faktoren ab, sagt der Autor.

Service, R.F.: Renewable bonds. Science 365, 2019
Was steckt hinter dem Aufstieg der elektrischen Herstellung von Wasserstoff und anderen Produkten?



MATTHIAS MAY, HELMHOLTZ-ZENTRUM BERLIN FÜR MATERIALEN UND ENERGIE

KOSMOLOGIE ANTIMATERIE IN NEUEM LICHT

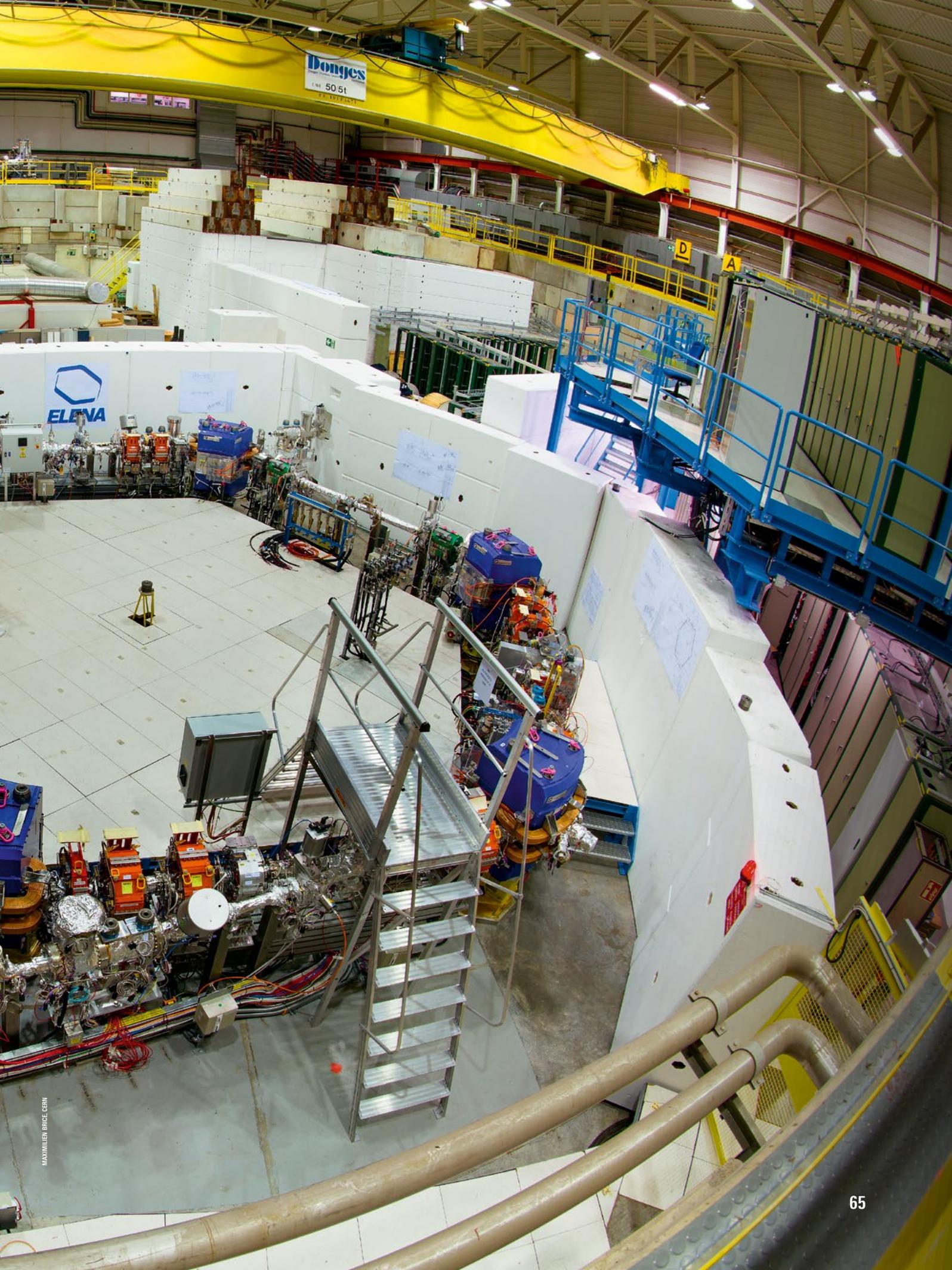
Seit über 80 Jahren erforschen Physiker Antiteilchen, doch einige Geheimnisse konnten sie ihnen nicht entlocken. Unterscheiden sie sich nur in ihrer Ladung, oder fällt auch ihre Masse anders aus? Diese gewagte Hypothese würde ein neuartiges Modell unseres Kosmos ermöglichen.



Gabriel Chardin ist wissenschaftlicher Leiter des CNRS in Frankreich.

» [spektrum.de/artikel/1686886](https://www.spektrum.de/artikel/1686886)

Am CERN bremst der Elena-Verzögerungsring Antiprotonen, um sie an Positronen zu binden und so Antwasserstoffatome zu erzeugen. Mit diesen können Physiker das Verhalten von Antimaterie in einem Gravitationsfeld testen.



Donges
ENI 50 St
5000000000

ELENA

Im 27 Kilometer langen Ring des LHC, des größten Teilchenbeschleunigers der Welt, prallen Protonen fast mit Lichtgeschwindigkeit aufeinander. Mit diesen hochenergetischen Kollisionen erforschen Physiker das Verhalten subatomarer Teilchen und suchen nach bisher unbekanntem Phänomenen. Einer ihrer größten Erfolge war bisher die Entdeckung des Higgs-Bosons, womit sie das letzte fehlende Puzzleteil des Standardmodells der Teilchenphysik gefunden haben.

Im Schatten des LHC finden aber auch kleinere Experimente statt, die nicht nach neuen Teilchen oder Wechselwirkungen suchen, sondern einen bereits bekannten Teil unserer Welt erforschen: die Antimaterie. Tatsächlich wimmelt es um uns herum nur so von Antiteilchen, die durch radioaktiven Zerfall entstehen und sich gleich wieder vernichten. Obwohl sie so allgegenwärtig sind, werfen sie immer noch viele Fragen auf. Unterscheiden sie sich beispielsweise nur in ihrer elektrischen Ladung von gewöhnlicher Materie, oder weichen sie auch in anderen Merkmalen ab?

Dass es so etwas wie Antimaterie geben könnte, erkannte der theoretische Quantenphysiker Paul Dirac bereits 1928, als er die Eigenschaften des Elektrons in Formeln packte. Nachdem es ihm gelungen war, die nach ihm benannte Dirac-Gleichung aufzustellen, bemerkte er, dass es ein noch nicht entdecktes Teilchen mit ähnlichen Eigenschaften wie das Elektron geben müsste. Seinen Berechnungen zufolge sollte dieses so genannte Positron die gleiche Masse, aber die entgegengesetzte elektrische Ladung und Energie besitzen. Bereits vier Jahre später wies der US-Amerikaner Carl Anderson das Positron im Labor nach, indem er kosmische Strahlung in einer Nebelkammer untersuchte.

Im Lauf der Jahre haben Physiker etliche weitere Antiteilchen entdeckt, etwa Antiquarks oder Antineutrinos. Inzwischen verbinden sie sogar Positronen und Antiprotonen zu ganzen Antiwasserstoffatomen. Die Mitarbeiter des Alpha-2-Experiments am CERN konnten kürzlich zeigen, dass die

spektroskopischen Eigenschaften von Antiwasserstoff bis auf Messunsicherheiten mit denen des gewöhnlichen Wasserstoffs übereinstimmen.

Alles deutet also darauf hin, dass Materie und Antimaterie sich bis auf ihre elektrische Ladung kaum unterscheiden. Allerdings ist es bisher noch nicht gelungen, das Verhalten eines Teilchens mit dem eines Antiteilchens in einem Gravitationsfeld zu vergleichen. Eine solche Messung wäre interessant, da aus manchen über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehenden Theorien folgt, dass Antimaterie mit einer anderen Geschwindigkeit fällt als gewöhnliche Materie – in einigen Modellen würden die seltsamen Teilchen sogar nach oben fallen! Diese gewagten Hypothesen werden die Experimente AEGIS, ALPHA-g und Gbar in den kommenden Jahren am CERN testen.

Die überwiegende Mehrheit der Physiker ist unterdessen der Meinung, dass man – wenn überhaupt – nur winzige Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie finden wird. Falls sich aber herausstellen sollte, dass Antiteilchen wirklich über eine negative Masse verfügen, wären die Folgen nicht nur für die Teilchenphysik enorm: Eine solche Beobachtung hätte außerdem eklatante Auswirkungen auf die Kosmologie.

Ein Widerspruch zur Relativitätstheorie?

2006 fing ich gemeinsam mit Aurélien Benoît-Lévy vom University College London an, physikalische Modelle zu untersuchen, in denen Antiteilchen mit negativer Masse auftauchen. Zuerst muss man jedoch prüfen, ob eine negative Masse überhaupt mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vereinbar ist. Denn diese fußt auf dem so genannten Äquivalenzprinzip, wonach träge Masse und schwere Masse gleich sind. Die träge Masse bezieht sich auf die Beschleunigung eines Objekts und drückt den Widerstand gegen Bewegungs- oder Richtungsänderung aus. Die schwere Masse ist dagegen diejenige, die im Gravitationsgesetz auftritt. Inzwischen gilt das Äquivalenzprinzip als sehr genau bestätigt: 2018 folgte aus den Daten des französischen Kleinsatelliten Microscope, dass beide Massen mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von 10^{-14} einander entsprechen.

Wie der in Österreich geborene Physiker Hermann Bondi in den 1950er Jahren zeigte, sind negative Massen mit dem Äquivalenzprinzip kompatibel, wenn sowohl die träge als auch die schwere Masse negativ sind. Solche Teilchen würden sich aber extrem seltsam verhalten. Während ein gewöhnliches massives Objekt alle anderen (mit positiver und negativer Masse gleichermaßen) anzieht, stößt ein Bondi-Teilchen negativer Masse alle anderen Objekte ab. Führt man wiederum zwei entgegengesetzte Massen gleichen Betrags unter idealisierten Bedingungen zusammen, das heißt in einem völlig leeren Raum ohne auf sie einwirkende Kräfte, ergibt sich eine Fluchtbewegung: Die Teilchen verfolgen sich und beschleunigen immer weiter, während ihr Abstand gleich bleibt. Da ihre Gesamtmasse null ist, kostet diese Beschleunigung keinerlei Energie.

Als Bondi seine Ergebnisse präsentierte, hielten sie die meisten Forscher für unphysikalisch, so dass sie die Idee von Teilchen negativer Masse verwarfen. Hinzu kam, dass

AUF EINEN BLICK FALLEN ANTITEILCHEN NACH OBEN?

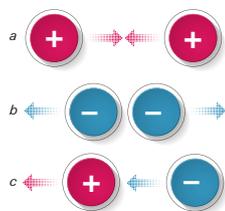
- 1 Die meisten Physiker gehen davon aus, dass sich Teilchen und Antiteilchen nur im Vorzeichen ihrer elektrischen Ladung unterscheiden. Doch vielleicht ist die Masse der Antimaterie negativ.
- 2 In einem solchen Fall würden sich Antiteilchen in einem Schwerfeld anders verhalten als gewöhnliche Partikel. In den kommenden Jahren werden Experimente am CERN diese Hypothese testen.
- 3 Wenn Antimaterie tatsächlich eine negative Masse hätte, könnte man ein kosmologisches Modell entwickeln, das ohne Dunkle Materie, Dunkle Energie und Inflation auskommt.

Überraschendes Verhalten

Falls Antiteilchen eine negative Masse haben, würden sie sich ungewöhnlich verhalten. Zwei Antiteilchen stoßen sich demnach gegenseitig ab, während ein Teilchen und ein Antiteilchen entgegengesetzter Masse sich unter idealisierten Bedingungen (im leeren Raum und ohne äußeren Kräfte) ewig nachjagen würden. In einem Gravitationsfeld fallen der allgemeinen Relativitätstheorie zufolge positive und negative Massen gleichermaßen nach unten. Doch einige Theorien, die über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen, deuten darauf hin, dass es anders sein könnte. Künftige Experimente werden zeigen, ob sie Recht behalten.

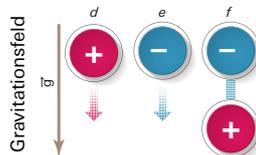
Theorie von Bondi

Hermann Bondi zeigte 1957, dass negative Massen nicht der allgemeinen Relativitätstheorie widersprechen. Während sich zwei positive Massen anziehen (a, beide Massen nähern sich), stoßen sich zwei negative ab (b, beide Massen entfernen sich). Eine positive und eine negative Masse gleichen Betrags jagen sich dagegen hinterher und halten dabei immer den gleichen Abstand (c).



Im Schwerfeld

1993 berechnete Richard Price, dass eine positive und eine negative Masse (d und e) in einem Schwerfeld gleichermaßen nach unten fallen. Wenn die Massen dagegen miteinander verbunden sind (wie bei einem virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paar) schwebt das System (f).



POUR LA SCIENCE, AVRIL 2019

mächtige Theoreme negative Massen und dadurch entstehende negative Energien auszuschließen schienen.

Doch in den nächsten Jahrzehnten brachten mehrere Phänomene diese scheinbar unumstößlichen Gesetze ins Wanken. Eines der wichtigsten Beispiele dafür ist die 1998 postulierte Dunkle Energie. Als zwei wissenschaftliche Arbeitsgruppen damals Supernovae vom Typ Ia untersuchten, erkannten sie, dass sich das Universum mit zunehmender Geschwindigkeit ausdehnt. Einige Kosmologen erklärten diese unerwartete Entdeckung damit, dass eine große Menge »Dunkler Energie« das Universum auseinanderreiben könnte. Worum es sich dabei genau handelt, weiß bis heute niemand. In den Energiegleichungen sorgt das seltsame Phänomen jedoch für negative Resultate, so dass nicht mehr klar ist, ob sämtliche Energie im Universum positiv ist, wie es einige Theoreme fordern. Vielleicht sind die Einwände gegen Antimaterie mit negativer Masse also gar nicht berechtigt.

1993 führte Richard Price von der University of Utah die Arbeit von Bondi fort, indem er negative Massen in einem Schwerfeld theoretisch untersuchte. Dadurch hoffte er, den scheinbaren Widerspruch von sich endlos hinterherjagenden Teilchen-Antiteilchen-Paaren zu umgehen.

Anders als man auf den ersten Blick annehmen würde, fällt ein isoliertes Teilchen negativer Masse nicht nach oben, sondern wie gewöhnliche Materie nach unten. Die Gravitationskraft zeigt zwar nach oben, weil die schwere Masse negativ ist; wegen der negativen trägen Masse neutralisieren sich die negativen Vorzeichen aber und die Beschleunigung zeigt wieder nach unten.

Doch wenn man zwei Objekte entgegengesetzter Masse über einen (masselosen) Faden verbindet, schwebt das Gesamtsystem. Die Gravitationskraft der negativen Masse zeigt nämlich nach oben, während die der anderen mit gleicher Stärke nach unten gerichtet ist. Beide Kräfte heben sich dann auf, und es gibt keine Beschleunigung nach unten. In einem solchen System wird sich die negative Masse immer so ausrichten, dass sie über der positiven schwebt, was Physiker als Polarisation bezeichnen (siehe »Überraschendes Verhalten«, links).

Den Ergebnissen von Price zufolge würden sich isolierte Teilchen und Antiteilchen in einem Schwerfeld also genau gleich verhalten. In der Realität gibt es so etwas wie ein völlig isoliertes Teilchen aber nicht. Selbst wenn man es in ein Vakuum steckt, wird es dort niemals ganz allein sein. Denn das Vakuum ist kein leerer Raum, sondern es tauchen immer wieder Teilchen-Antiteilchen-Paare aus dem Nichts auf und vernichten sich innerhalb kürzester Zeit wieder (siehe **Spektrum** Dezember 2019, S. 12). Das geschieht so schnell, dass man sie nicht direkt messen kann, weshalb man sie virtuell nennt. Weil die virtuellen Partikel verbunden sind, richten sie sich im Schwerfeld wie in Prices Beispiel so aus, dass virtuelle Antiteilchen immer über den Teilchen schweben. Wegen dieser Polarisation beeinflussen die virtuellen Partikel ein reelles Teilchen positiver Masse anders als ein reelles Antiteilchen negativer Masse, was sich in Experimenten beobachten lassen könnte.

Andere Theorien, die über das Standardmodell hinausgehen (wie die Supersymmetrie oder die Stringtheorie), sagen ebenfalls Asymmetrien zwischen Materie und Antimaterie voraus. Wenn eines dieser Szenarien die Natur richtig beschreibt, würden sich Antiteilchen anders durch das Schwerfeld bewegen als gewöhnliche Materie – im Extremfall könnte sie sogar nach oben fallen.

Von der Teilchenphysik in die Kosmologie

Sollte Antimaterie wirklich über eine negative Masse verfügen, würden sich daraus interessante Folgen für die Kosmologie ergeben. Insbesondere an Orten, wo die Schwerkraft extrem stark ist, etwa in der Nähe eines Schwarzen Lochs, gäbe es signifikante Effekte. Doch auch in schwachen Gravitationsfeldern hätte die Polarisation des Vakuums beobachtbare Auswirkungen, weil sie die newtonschen Gesetze für sehr schwache Beschleunigungen verändert. Das könnte eines der größten kosmologischen Rätsel lösen, an dem sich Physiker seit über 40 Jahren die Zähne ausbeißen.

Als Forscher in den 1970er Jahren die Rotationsgeschwindigkeiten von Spiralgalaxien beobachteten, stellten sie überrascht fest, dass sich die Himmelskörper am äußeren galaktischen Rand schneller bewegen als erwartet. Das Gravitationsfeld schien allerdings zu schwach, um die Objekte an sich zu binden; eigentlich müssten sie sich von der Galaxie losreißen. Aus diesem Grund führten Physiker die so genannte Dunkle Materie ein. Ihre Masse würde die Schwerkraft einer Galaxie erhöhen und damit die peripheren Objekte halten. Bis heute ist unbekannt, woraus Dunkle Materie genau besteht. Man weiß nur, dass sie sehr schwach bis gar nicht mit gewöhnlicher Materie wechselwirkt, was einen experimentellen Nachweis äußerst schwer macht.

Nicht alle Physiker sind mit dieser Erklärung zufrieden. 1983 entwickelte Mordehai Milgrom vom Weizmann-Institut in Israel daher eine andere Theorie, die das Problem lösen soll. In seiner modifizierten newtonschen Dynamik (MOND) geht er davon aus, dass die Bewegungsgleichungen bei sehr geringen Beschleunigungen, wie sie in den entferntesten Regionen von Galaxien herrschen, nicht mehr gelten. Indem er die Formeln für solche Fälle modifizierte, konnte er die Dynamik von Galaxien perfekt beschreiben. Sein Modell erklärt allerdings nicht, warum es zu dieser Abweichung vom newtonschen Gesetz kommt.

Eine Antwort darauf könnte Antimaterie mit negativer Masse liefern. Luc Blanchet vom Institut d'Astrophysique in Paris und Alexandre Le Tiec vom Pariser Observatorium

Wo versteckt sich die Antimaterie?

Das von Gabriel Chardin vorgeschlagene Dirac-Milne-Universum enthält genauso viel Materie wie Antimaterie. Doch wo versteckt sich dann die ganze Antimaterie?

Kosmologen haben festgestellt, dass es etwa eine Milliarde Mal mehr Photonen gibt als gewöhnliche Materie. Eine Erklärung dafür ist, dass sich Teilchen und Antiteilchen im jungen Universum gegenseitig vernichtet haben, wodurch massenhaft Photonen entstanden. Ein winziger Überschuss an Materie (eine Milliarde und ein Materieteilchen pro Milliarde Antimaterieteilchen) würde dann schon genügen, um zu erklären, warum wir heute bloß gewöhnliche Materie sehen.

Aber woher kommt dieser leichte Materieüberschuss? Irgendwie müssen sich Teilchen und Antiteilchen voneinander unterscheiden, wenn die eine Spezies häufiger auftritt. Und tatsächlich deutet das Standardmodell der Teilchenphysik auf kleine Abweichungen hin, die erklären könnten, warum heute mehr Materie übrig ist. Die Auswirkungen fallen allerdings zu klein aus, um sich mit den Beobachtungen zu decken.

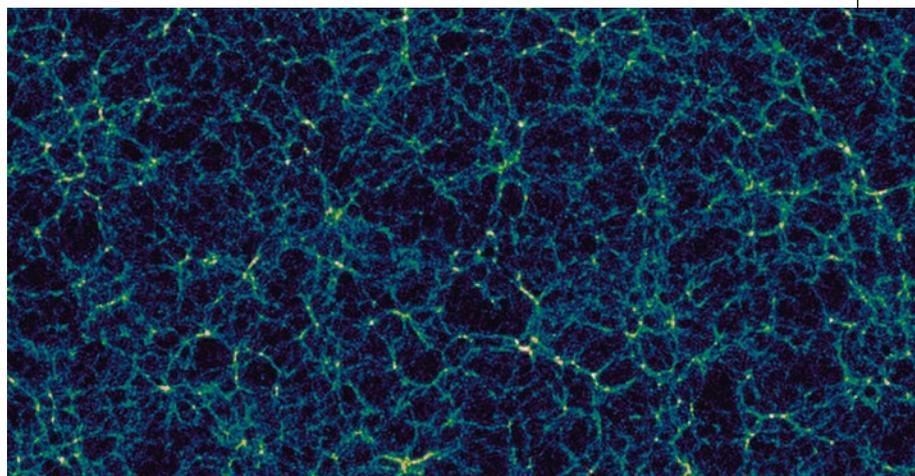
Bereits in den 1970er Jahren untersuchte Roland Omnès von der Universität Paris-Süd mit seinen Kollegen ein mögliches Szenario, wonach sich Teilchen und Antiteil-

chen zehn Mikrosekunden nach dem Urknall wie Öl und Wasser voneinander getrennt hätten. Wir würden demnach in einem Materiebereich leben. An den Grenzen der Materie- und Antimaterieregionen würden sich die Partikel ständig vernichten, was zu Gammastrahlen führen würde. Das Weltraumteleskop Fermi fand allerdings keine Hinweise auf eine solche Strahlung.

Auch im Dirac-Milne-Universum entstehen separierte Materie- und Antimateriebereiche. Die gegenseitige Vernichtung der Teilchen an den Übergängen hört allerdings auf, sobald das Universum auf eine

Temperatur von etwa 300 000 Kelvin abgekühlt ist. Ab diesem Zeitpunkt sind die verschiedenen Zonen dann völlig voneinander getrennt.

Während die Schwerkraft in diesem Modell dazu führt, dass aus der gewöhnlichen Materie große galaktische Strukturen entstehen, neigt die Antimaterie mit ihrer negativen Masse dazu, sich so weitläufig wie möglich zu verteilen, da sie sich abstößt. Regionen des Universums, die uns bislang leer erscheinen, sind dem Dirac-Milne-Modell zufolge mit kalten Gaswolken aus Antimaterie gefüllt.



Aus einer Simulation um die Entstehung großer galaktischer Strukturen folgt, dass sich Materie in Filamenten um riesige leere Flächen ansammelt. Diese Bereiche könnten mit kalten Antimateriewolken besetzt sein.

erkannten 2009, dass Dunkle Materie zu den gleichen Ergebnissen wie die MOND-Theorie führt, wenn sie sich im Schwerefeld polarisieren würde. Die beiden Physiker äußern allerdings nicht, worum es sich bei der Dunklen Materie handelt. Um Polarisation im Schwerefeld zu erreichen, braucht man aber gar keine Dunkle Materie! Daher verglich ich die Ergebnisse von Blanchet und Le Tiec mit einem Modell, in dem Antimaterie durch ihre negative Masse das Vakuum polarisiert. Und tatsächlich: Die Resultate scheinen übereinzustimmen. Allerdings muss man das Modell noch genauer untersuchen, um sicherzustellen, dass es wirklich die Vorhersagen der MOND-Theorie wiedergibt.

Selbst wenn wir gerade erst begonnen haben, das äußerst spekulative Szenario von Antiteilchen mit negativer Masse zu erforschen, liefert es neue Lösungen zu fundamentalen Fragen. Gerade im Bezug auf die Astrophysik erscheint das besonders wichtig, denn dem heutigen Standardmodell der Kosmologie zufolge macht Dunkle Materie etwa ein Viertel unseres Universums aus, während bloß 5 Prozent aus gewöhnlicher Materie besteht. Der Rest von etwa 70 Prozent ist demnach Dunkle Energie, von der man bislang kaum etwas weiß. Ein weiteres Rätsel stellt die so genannte Inflation dar, eine hypothetische kurze Phase des jungen Universums, in der es sich extrem schnell ausgedehnt haben soll.

Schlagartige Ausdehnung des Raums

Ein Problem des ursprünglichen Urknallmodells bestand bis Ende der 1970er Jahre darin, dass einige abgelegene Regionen des Kosmos nicht kausal miteinander verbunden sind, das heißt, sie konnten seit der Entstehung des Universums nicht miteinander wechselwirken. Dennoch ähneln sich diese Bereiche in fast allen Eigenschaften sehr, wodurch es unwahrscheinlich erscheint, dass sie sich unabhängig voneinander entwickelt haben. Eine Lösung liefert die Inflation. Sie stellt sicher, dass alle Regionen kurz nach dem Urknall kausal zusammenhängen. Danach habe sich das Universum schlagartig ausgedehnt. Allerdings gibt es keine fundamentale Theorie, die erklärt, was die Inflation ausgelöst und vor allem was sie wieder beendet hat.

Daher suchen einige Physiker neuartige kosmologische Modelle, die ohne Annahmen wie Dunkle Materie, Dunkle Energie und Inflation auskommen. Subir

Indem Astrophysiker bestimmen, wie weit eine Supernova vom Typ Ia von der Erde entfernt ist und wie schnell sie sich von uns fortbewegt, können sie die Expansion des Universums untersuchen. Die dabei gesammelten Daten (Punkte) stimmen mit zwei theoretischen Modellen (Kurven) überein: dem Standardmodell der Kosmologie und dem Milne-Modell.

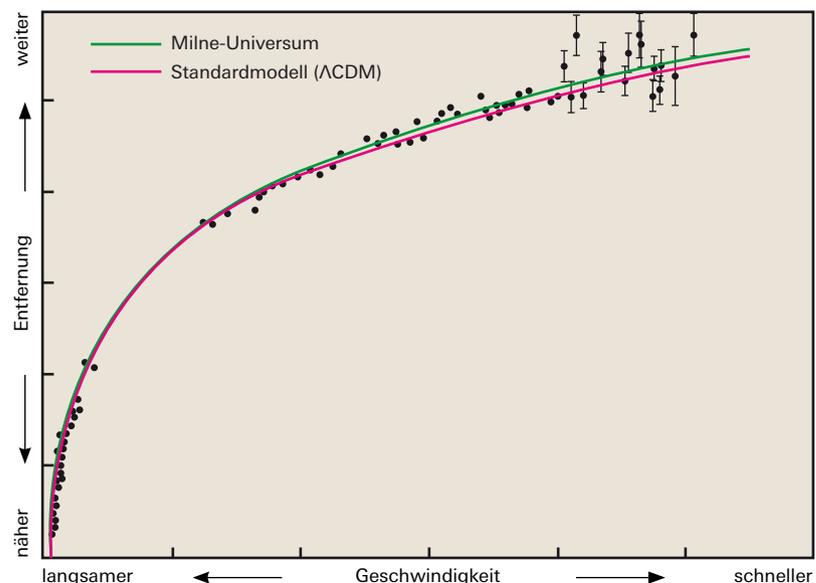
Sarkar von der Oxford University verglich 2016 gemeinsam mit seinen Kollegen Daten über Supernovae, die über 20 Jahre lang gesammelt wurden, mit zwei verschiedenen kosmologischen Theorien. Sie stellten fest, dass die Messwerte sowohl zum Standardmodell der Kosmologie passen, die Inflation, Dunkle Materie und Dunkle Energie enthält, als auch zu einer ganz anderen Theorie: dem gravitativ leeren Universum, das der Brite Edward Arthur Milne in den 1930er Jahren entwickelt hat (siehe Abbildung unten).

Die bisherigen Daten genügen jedoch nicht, um die Vorhersagen beider Modelle klar zu unterscheiden. Dazu müsste man erst Supernovae in extrem weiter Ferne beobachten, was mit dem James-Webb-Weltraumteleskop, das 2022 starten soll, oder großen galaktischen Vermessungsprogrammen wie das für 2023 geplante LSST möglich wird.

Das Universum von Milne ist eine Lösung der allgemeinen Relativitätstheorie für einen Kosmos, in dem die Energiedichte null ist. Das Universum dehnt sich daher weder beschleunigt noch verzögert aus. Dennoch sind alle beobachtbaren Regionen des Kosmos in dieser Theorie auch ohne Inflation kausal miteinander verbunden, wodurch er seine homogene Struktur erhält. Selbst wenn dieser Ansatz interessant erscheint, passt er nicht zu unserem Universum, das nicht leer ist, sondern voll Materie steckt.

Wenn es allerdings insgesamt genau so viele Teilchen wie Antiteilchen negativer Masse gäbe, wäre ein Milne-Universum zumindest auf großer Skala realisiert. Ein solches kosmologisches Modell haben Aurélien Benoît-Lévy und ich Dirac-Milne-Universum genannt. Es kommt ohne Dunkle Energie und Inflation aus, und durch die Polarisation des Vakuums im Gravitationsfeld können wir auch auf die Dunkle Materie verzichten!

Doch bevor man in Jubel ausbricht, muss man überprüfen, ob das Dirac-Milne-Universum überhaupt zu den bisherigen kosmologischen Beobachtungen passt. Schließlich ist genau das eine der Stärken des Standardmodells der Kosmologie.



Zu den größten Erfolgen des Standardmodells zählt, dass es die Entstehung der ersten leichten Elemente wie Wasserstoff, Helium, Deuterium und Lithium, die so genannte primordiale Nukleosynthese, in den ersten Minuten nach dem Urknall erklärt. Diese Reaktionen mussten extrem schnell ablaufen, denn bereits nach 20 Minuten war das Universum nicht mehr heiß und dicht genug, um Kernfusionen weiter voranzutreiben.

Im Dirac-Milne-Universum sinkt die Temperatur dagegen langsamer ab. Damit hätte die Nukleosynthese mehr als 30 Jahre lang andauert. Trotz dieses enormen Unterschieds – ein Faktor von fünf Millionen – entsteht auch im Dirac-Milne-Universum Helium-4, Lithium und Deuterium. Die Ergebnisse passen dabei ebenso gut zu den experimentellen Beobachtungen wie zu denen des Standardmodells.

Helium-3 ist das einzige Element, bei dem sich die Vorhersagen beider Szenarien deutlich voneinander unterscheiden. Im Dirac-Milne-Modell taucht es fünf- bis zehnmal häufiger auf als im Standardmodell. Welches Recht hat, lässt sich allerdings nicht sagen, denn Helium-3 ist äußerst instabil. Aus den heutigen Beobachtungen kann

Im AEGIS-Experiment am CERN fängt die magnetische Röhre (links im Bild) Antiprotonen, die dann mit von oben kommenden Positronen zu Antiwasserstoffatomen verbunden werden. Ein Detektor misst anschließend, wie stark und in welche Richtung sie durch das Schwerfeld abgelenkt werden.

man kaum abschätzen, wie hoch der primordiale Anteil tatsächlich war.

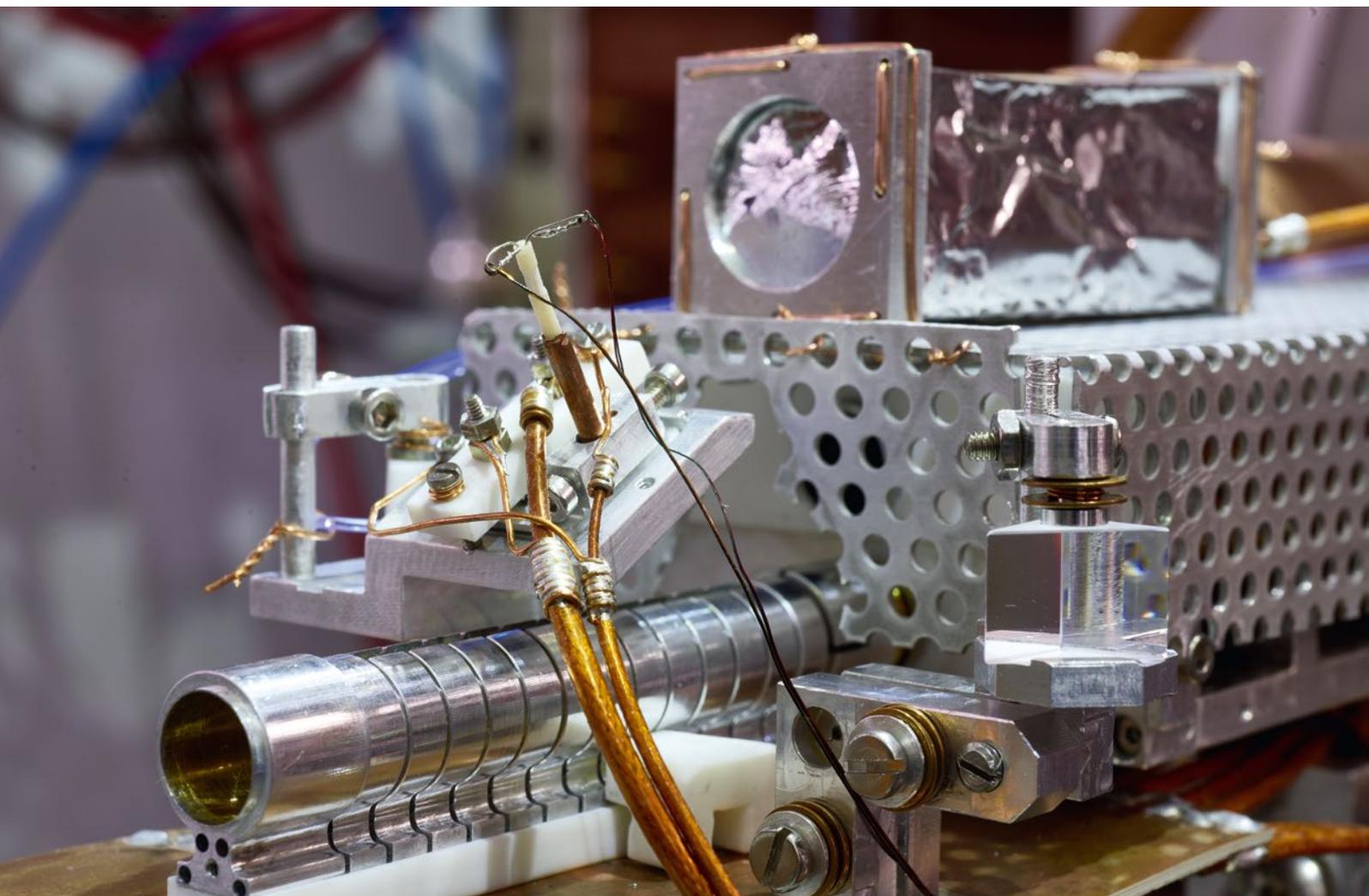
Eine weitere Eigenschaft des Universums, die das Standardmodell der Kosmologie gut beschreibt, ist die Entstehung großer Strukturen wie Galaxien oder Galaxienhaufen. 2018 hat Giovanni Manfredi von der Universität de Strasbourg mit seinen Kollegen und mir dieses Phänomen im Dirac-Milne-Universum untersucht. Wir wollten sehen, ob computergestützte Simulationen die beobachtete Verteilung von Materie im Universum korrekt wiedergeben.

Weil das Dirac-Milne-Modell keine freien Parameter hat, die man nachjustieren könnte, damit sie zu den bisher gesammelten Daten passen, sind solche Computersimulationen ausschlaggebende Tests. Wenn die Ergebnisse nicht zu den Beobachtungen passen, ist das Modell widerlegt.

Neuartige Sicht auf unseren Kosmos

Unsere Arbeit ergab, dass sich große Strukturen im Dirac-Milne-Universum viel früher ausbilden, als es das Standardmodell vorhersagt: Bereits wenige zehn Millionen Jahre nach dem Urknall entstehen in unseren Simulationen die ersten massiven Objekte. Diese Gaswolken kollabieren unter der Schwerkraft nach und nach zu immer größeren Strukturen, die sich wie Filamente über den gesamten Kosmos verteilen. Tatsächlich stimmen die Resultate gut mit den Beobachtungen von Projekten wie SDSS (Sloane Digital Sky Survey) überein.

Bisher hat das Dirac-Milne-Universum also zwei Prüfungen standgehalten. Daher wollten wir das Modell schließ-



lich noch mit der kosmologischen Hintergrundstrahlung vergleichen.

Diese entstand etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall, als sich das Universum genug abgekühlt hatte, so dass sich Elektronen und Atomkerne im kosmischen Plasma zu neutralen Atomen verbanden. Nun konnten Photonen erstmals aus dem dichten Plasma entfliehen und sich frei verbreiten. Sie erreichen uns noch immer, allerdings in Form von Mikrowellenstrahlung.

Besonders beeindruckend ist, dass das Standardmodell der Kosmologie die Temperatur dieser Strahlung korrekt voraussagt. Doch nicht nur das: Das Modell beschreibt die winzigen beobachteten Temperaturschwankungen in der Größenordnung von etwa 10^{-5} Kelvin. Die kosmologische Hintergrundstrahlung ist zwar ziemlich homogen, was dafür spricht, dass sich alle Bereiche des Universums bereits sehr früh ähnelten, doch es gibt kleinere Abweichungen. Das haben der Cobe-Satellit 1992 sowie später die Satelliten WMAP und Planck bestätigt. Durch immer präzisere Messungen können Physiker die räumliche und statistische Verteilung der Schwankungen genau bestimmen, was die Möglichkeiten erheblich einschränkt, wie das frühe Universum ausgesehen haben könnte. Ein kosmologisches Modell muss zu diesen Bedingungen passen – ein harter Test für Konkurrenten des Standardmodells.

Das Dirac-Milne-Universum sagt voraus, dass sich Materie und Antimaterie im kosmischen Plasma gegenseitig vernichtet haben, wodurch akustische Wellen entstanden. Die Verteilung dieser Wellen passt zu den beobachteten Schwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Allerdings kann unser Modell noch nicht die Stärke der Schwankungen erklären. Sollte das gelingen, werden sich künftig sicherlich zahlreiche Kosmologen intensiv mit dem Dirac-Milne-Modell beschäftigen.

Bis dahin ist es noch ein weiter Weg. Dennoch ist die Aussicht auf eine Theorie, die ohne Dunkle Materie, Dunkle Energie und Inflation auskommt, überaus attraktiv. Ein weiterer Vorteil unseres Modells ist, dass es sich durch Experimente an Teilchenbeschleunigern testen lässt.

Insbesondere wäre eine Bestätigung des vorhergesagten ungewöhnlichen Verhaltens von Antiteilchen im Schwerfeld der Erde ein starker Indikator für das Dirac-Milne-Modell. Bereits Ende der 1960er Jahre versuchten Fred Witteborn und William Fairbank von der Stanford University die schwere Masse des Elektrons und des Positrons im Labor zu bestimmen. Weil die Teilchen aber extrem leicht sind, gingen die Messergebnisse im Rauschen anderer Umgebungsfaktoren unter.

Nach dem gescheiterten Versuch entwickelten Michael Holzschneider und seine Kollegen am CERN das PS-200-Experiment, um eine ähnliche Messung an Antiprotonen durchzuführen, die viel schwerer als Positronen sind. Doch auch das endete erfolglos. Ab Mitte der 1990er Jahre wurde deutlich, dass die starken elektromagnetischen Kräfte geladener Teilchen es schier unmöglich machen, die schwachen Gravitationseffekte einzelner Antiteilchen zu messen. Daher sollen die künftigen Experimente AEGLS, Gbar und ALPHA-g die gravitativen Eigenschaften von elektrisch neutralen Antiwasserstoffatomen bestimmen.

Die Versuche werden an einem neuen CERN-Bremsring namens Elena (für: extremely low energy antiproton ring) stattfinden, wo Antiprotonen, die zuvor in hochenergetischen Kollisionen entstehen, auf Energien von nur 0,1 Megaelektronenvolt abgebremst werden. Erst dann ist es möglich, sie mit Positronen zu kombinieren, die ein Linearbeschleuniger produziert, indem Elektronen auf einen Wolframblock knallen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



GENERALFMV / STOCK.ADOBE.COM

Die so erzeugten Antiatome sind extrem instabil: Sobald sie mit gewöhnlicher Materie in Kontakt kommen, werden sie vernichtet. Daher muss man sie von ihrer Umgebung abschirmen, was sich am besten mit einer elektromagnetischen Falle bewerkstelligen lässt. Aus diesem Grund stattet man die Antiprotonen im Gbar-Experiment mit zwei Positronen aus, so dass sie eine negative elektrische Ladung erhalten und sicher gefangen werden können. Danach kühlt man sie auf eine Temperatur von einigen dutzend Mikrokkelvin ab, wodurch sie nur noch etwa einen Meter pro Sekunde zurücklegen. Erst dann entfernt man mit einem Laser wieder eines der beiden Positronen.

Während eines freien Falls von etwa 20 Zentimetern wollen die Forscher die Bewegung der Antiwasserstoffatome untersuchen, um zu prüfen, ob sie sich von der normalen Materie unterscheidet. Die drei Experimente tun das auf jeweils unterschiedliche Weise (siehe Abbildung links), damit die Physiker ihre Ergebnisse vergleichen können.

Seit November 2018 sind die Anlagen des CERN für zweieinhalb Jahre geschlossen. Währenddessen wird der LHC überholt, um eine höhere Kollisionsfrequenz zu erreichen und die Experimente zu verbessern. In diesem Zeitraum werden keine Antiprotonen produziert. Sobald der Teilchenbeschleuniger 2021 aber wieder in Betrieb ist, können die Teams von AEGLS, Gbar und ALPHA-g prüfen, welche Unterschiede es zwischen Materie und Antimaterie gibt – und ob Antiwasserstoff nach oben fällt. ◀

QUELLEN

Benoît-Lévy, A., Chardin, G.: Introducing the Dirac-Milne universe. *Astronomy & Astrophysics* 537, 2012

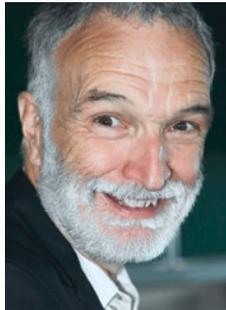
Chardin, G.: L'insoutenable gravité de l'univers. Le Pommier, 2018

Indelicato, P. et al.: The GBAR project, or how does antimatter fall? *Hyperfine Interactions* 228, 2014

Manfredi, G. et al.: Cosmological structure formation with negative mass. *Physical Review D* 98, 2018

Price, R. H.: Negative mass can be positively amusing. *American Journal of Physics* 61, 1993

SCHLICHTING! PRICKELNDE PHYSIK



Die Blasen in Sekt und anderen kohlendioxidhaltigen Getränken faszinieren Forscher – besonders wenn sie an der Oberfläche zerplatzen. Dabei springen feine Tröpfchen hoch, die Aromastoffe verteilen.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

» spektrum.de/artikel/1686888

Würden alle Dinge zu Rauch, mit der Nase wüsste man sie zu unterscheiden

Heraklit (um 520–460 v. Chr.)

► Viele Getränke enthalten Kohlendioxid. Unmittelbar nach dem Einschenken bildet es Blasen, steigt auf und geht schließlich in die Luft über. Doch bis dahin ist es ein physikalisch ereignisreicher Weg.

Ursprünglich löst sich das Gas in den Getränken unter hohem Druck. Die Flaschen trennen es dann luftdicht von der Außenwelt. Die Löslichkeit von Kohlendioxid steigt mit dem Druck. Champagner und Sekt enthalten im Vergleich zu Bier und Sprudelwasser sehr viel CO_2 und brauchen darum besonders dicke Wände, um dem standzuhalten.

In der verschlossenen Flasche stellt sich zwischen der Flüssigkeit und der Gasschicht im Hals ein Gleichgewichtsdruck ein. Hierbei verlassen im zeitlichen Mittel genauso viele Gasteilchen die Flüssigkeit, wie diese aufnimmt. Wenn man die verschlossene Flasche schüt-

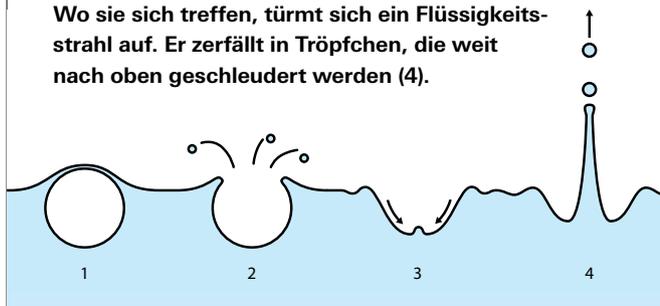
telt, entstehen vermehrt Bläschen im Inneren, und der Druck des Gases im Flaschenhals erhöht sich. Sobald Ruhe einkehrt, stellt sich das stationäre Gleichgewicht wieder ein – das zwischenzeitlich befreite CO_2 geht erneut in die Lösung.

Beim Öffnen der Flasche kommt es zum Druckausgleich mit der Umgebung. Er macht sich je nach der Vorbehandlung der Flasche und der Temperatur akustisch und strömungstechnisch gegebenenfalls spektakulär bemerkbar (siehe »Lasst die Korken knallen«, **Spektrum** Januar 2017, S. 62).

Nach dem Einschenken in ein Glas ist das Getränk weiterhin dem wesentlich niedrigeren Umgebungsdruck ausgesetzt, und die Flüssigkeit gibt allmählich den Rest des überschüssigen gelösten Gases ab. Es sammelt sich in kleinen Bläschen, die nach und nach aufsteigen. Sie entstehen nicht an beliebigen Stellen, sondern meistens an bestimmten Bereichen der Glaswand. Dort befinden sich in der Regel mikroskopisch kleine Kratzer oder Verunreinigungen, zum Beispiel winzige Fasern des Handtuchs, mit dem das Glas abgetrocknet wurde. Diese so genannten Keime enthalten meist etwas Luft, an welcher die angehenden Blasen andocken können. Ohne solche Starthilfen wäre für die Entstehung theoretisch ein unendlich großer Druck nötig, denn der ist in einer Blase umgekehrt proportional zu ihrem Radius.

Während die Blase größer wird, kommt die Schwerkraft ins Spiel, nämlich in Form des Auftriebs. Dieser wächst mit dem Volumen, also wie der Radius hoch drei. Die Adhäsionskraft, mit der die Blase ihrem Entstehungsort zunächst verbunden bleibt, steigt aber nur proportional zu der Kontaktfläche, also wie der Radius hoch zwei. Irgendwann übertrifft der Auftrieb die Adhäsion. Dann löst sich die Blase ab. Nur ein Rest bleibt hängen, an dem sofort die nächste heranwächst und so weiter. Die Bedingungen, unter denen die Gasteilchen in die Blase gelan-

Eine aufgestiegene Gasblase (1) platzt nach einiger Zeit (2). Daraufhin bewegen sich Kapillarwellen entlang der Oberfläche vom Rand zur Mitte, um das Loch zu schließen (3). Wo sie sich treffen, türmt sich ein Flüssigkeitsstrahl auf. Er zerfällt in Tröpfchen, die weit nach oben geschleudert werden (4).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS



Blasen in einem CO₂-haltigen Getränk entstehen an mehreren Stellen an der Glaswand und werden auf ihrem Weg nach oben größer.

gen, verändern sich innerhalb üblicher Beobachtungszeiten nicht besonders. Darum ist die Zeitspanne zwischen zwei Ablösevorgängen ebenfalls dieselbe. Die Bläschen folgen daher im gleichen Takt aufeinander und steigen meist in einer Art Perlenschnur senkrecht auf. Bei Getränken mit sehr hoher CO₂-Konzentration muss man sich dafür oft etwas gedulden – hier gibt es anfangs häufig eher turbulente Bewegungen der emporwandernden Blasen.

Höher, schneller, weiter

Im Verlauf des Aufstiegs nehmen dann die Abstände zwischen zwei benachbarten Blasen zu. Liegt das etwa an deren Beschleunigung durch die Auftriebskraft? Allerdings muss die Flüssigkeit den winzigen Blasen wie Sirup vorkommen. In einer solchen Situation erreicht die Reibungskraft, die mit der Geschwindigkeit wächst, bereits nach sehr kurzer Strecke den Wert des Auftriebs. Beide sollten sich also rasch ausgleichen und zu einer gleichförmigen Bewegung führen.

Schaut man sich die Perlenketten genauer an, so stellt man vielmehr fest, dass nicht nur der Abstand mit der Aufstiegshöhe zunimmt, sondern auch die Größe der Blasen. Mehr Volumen bedeutet mehr Auftriebskraft und damit eine höhere Geschwindigkeit.

Doch warum werden die Blasen größer? Man könnte auf den Gedanken kommen, das läge an der geringer werdenden Last durch immer weniger darüber befindliches Wasser. Doch dieser so genannte hydrostatische Druck beträgt bei einer Wassersäule von typischerweise zehn Zentimeter nur ein Hundertstel des atmosphärischen Luftdrucks – dieser entspricht einer etwa zehn Meter hohen Wassersäule. Daher dürfte der Einfluss

vernachlässigbar klein sein. Entscheidend für das Wachstum der Blasen ist vielmehr, dass sie während ihrer Bewegung nach oben weiterhin CO₂ aufnehmen.

An der Oberfläche scheiden sie spektakulär aus ihrem kurzen Leben. Sie verbleiben dort noch eine mehr oder weniger kurze Zeit und wachsen weiter. Schließlich platzen sie und entlassen das Kohlendioxid in die Atmosphäre. Da der Genuss insbesondere von hochwertigem Sekt und Champagner von kleinsten Details der physikalischen Vorgänge abhängt, spielen auch diese Miniexplosionen eine besondere Rolle. Denn dabei entstehen Fontänen winziger Tröpfchen, die in schlanken Wurfparabeln bis zirka 20 Zentimeter über das Glas hinaussteigen und Aromastoffe in die Luft transportieren. Hinzu kommt die rauschende akustische Untermalung durch die Summe der feinen Klickgeräusche der platzenden Blasen.

2014 haben französische Forscher das Platzen mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsmikroaufnahmen dokumentiert und in mathematischen Modellen beschrieben. Sie erkannten: Bei den auf der Oberfläche driftenden Blasen fließt unter anderem auf Grund der Schwerkraft Flüssigkeit aus dem dünnen Häutchen ab, welches das eingeschlossene CO₂ nach außen abdichtet. Der Film wird bereits nach sehr kurzer Zeit so dünn, dass der Überdruck in der Blase ausreicht, ihn zu zerfetzen. Daraufhin entsteht kurzfristig eine Vertiefung, die die allseitig zusammenströmende Flüssigkeit anschließend wieder füllt. Dabei ist nicht die Schwerkraft entscheidend, sondern die stets angestrebte Minimierung der Oberflächenenergie. Bei dem Vorgang treffen so genannte Kapillarwellen in der Mitte aufeinander und lassen eine Minifontäne hochschießen (siehe Illustration links).

Die Fontäne zerfällt in Tröpfchen – wiederum, um die Oberflächenenergie zu minimieren (siehe »Winzige Tröpfchen ganz groß«, *Spektrum* Juli 2018, S. 64). Die kleinsten von ihnen driften mitsamt der darin gelösten Aromen noch einige Zeit als Aerosol in der Luft. Teilweise kann man die Geschosse sogar als kleine Pikser spüren, wenn sie auf der Haut niedergehen. Das liegt nicht nur an der Empfindlichkeit dieses Organs, sondern außerdem an der großen Verdampfungsenergie des Wassers, aus dem der Sekt ja zum größten Teil besteht. Während er in den gasförmigen Zustand übergeht, entzieht er der Haut Wärme.

Ein weiteres interessantes Untersuchungsergebnis: Die Tröpfchen sind – anders, als man es vielleicht erwarten würde – umso kleiner und schneller, je zäher die Flüssigkeit ist, aus der sie bestehen. Solche Erkenntnisse könnten Hersteller anregen, die Viskosität ihres Produkts gezielt zu verändern, um die Ausbreitung der Tröpfchen in der Luft zu beeinflussen – und damit auch den Genuss des prickelnden Getränks.

QUELLE

Ghabache, E. et al.: On the physics of fizziness: How bubble bursting controls droplets ejection. *Physics of Fluids* 26, 2014



In den modernen Volkswirtschaften geht die Schere zwischen Arm und Reich immer weiter auf (im Bild: Rio de Janeiro).

DAVID / GETTY IMAGES / ISTOCK

MODELLIERUNG GEFANGEN IM KASINO

Physiker haben ein Modell entwickelt, um die Vermögensverteilung in Volkswirtschaften zu beschreiben. Trotz seiner Einfachheit liefert es erstaunlich genaue Ergebnisse und erklärt, warum Ungleichheit in unserer Welt unausweichlich ist.

Bruce M. Boghosian ist Professor für Mathematik an der Tufts University in Massachusetts.

» spektrum.de/artikel/1686890

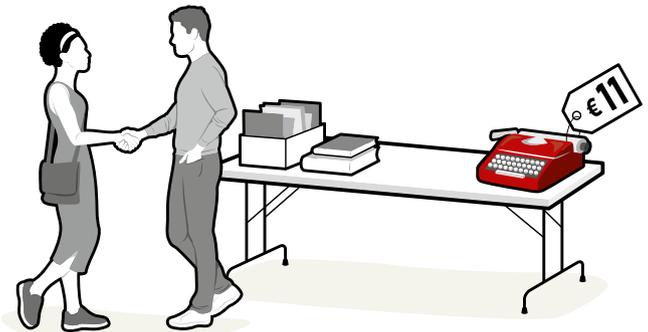
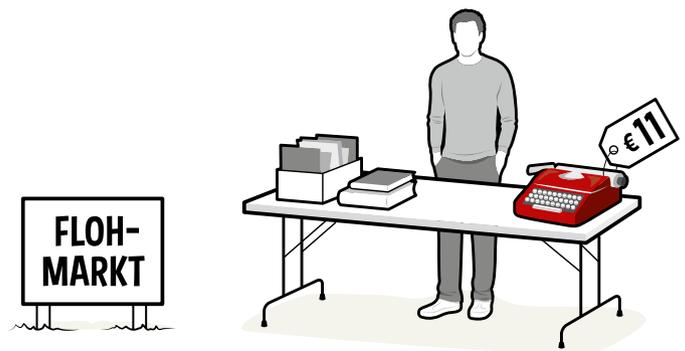


► In den unterschiedlichsten Ländern wächst die soziale Ungleichheit mit alarmierender Geschwindigkeit an, sei es in den USA, Russland, Indien, Brasilien oder vielen EU-Staaten. Während laut der Investmentbank Credit Suisse 2008 das reichste Prozent der Bevölkerung über 42,5 Prozent des weltweiten Vermögens verfügte, besaßen sie zehn Jahre später sogar 47,2 Prozent. Anders ausgedrückt: 2010 waren 388 Personen zusammen so reich wie die gesamte ärmere Hälfte aller Menschen – inzwischen schätzt der Verbund einiger internationaler Hilfsorganisationen Oxfam die Anzahl dieser Superreichen auf 26. In fast allen Staaten, die Haushaltsbefragungen durchführen, zeigt sich ein derartiger Trend. Die Statistiken deuten darauf hin, dass sich der Großteil des Vermögens zunehmend auf wenige Personen verteilt.

Seit Jahrzehnten diskutieren verschiedene Experten über die Ursachen dafür, allerdings ohne einstimmiges Ergebnis. Ein neuer Ansatz von Physikern und Mathematikern, an dem unter anderem meine Arbeitsgruppe von der Tufts University beteiligt war, weist nun darauf hin, dass die ungerechte Situation in unserem Wirtschaftssystem unausweichlich ist: Sie entsteht durch einfache arithmetische Gesetzmäßigkeiten.

Zu dem Schluss gelangten wir, indem wir das makroökonomische System moderner Industriestaaten durch ein mathematisches Modell simulierten. Dieses umfasst extrem viele einzelne Akteure, die paarweise miteinander handeln, um jeweils ihre finanzielle Situation zu verbessern. Tatsächlich scheint nichts natürlicher als zwei Parteien, die sich auf einen Preis einigen, um Waren gegen Geld oder andere Güter auszutauschen.

Unser Modell beschreibt die Vermögensverteilung unterschiedlicher Länder erstaunlich gut und zeigt auf,



Gewinner und Verlierer

Im einfachen Flohmarktmodell, das der Physiker Anirban Chakraborti im Jahr 2000 entwickelt hat, wandert der Reichtum von einer Person zur anderen, wenn Erstere einen Fehler in einem wirtschaftlichen Austausch macht. Entspricht der für ein Objekt gezahlte Betrag seinem Wert, wechselt kein Vermögen den Besitzer. Falls der Käufer aber zu viel bezahlt oder der Verkäufer weniger als den Wert des Gegenstandes akzeptiert, gibt es einen Vermögensfluss.

Da niemand pleite gehen will, ging Chakraborti davon aus, dass der Betrag, den eine Person verlieren kann, immer nur dem Bruchteil des Reichtums der ärmeren Person entspricht. Selbst wenn das Ergebnis jeder Transaktion durch einen fairen Münzwurf bestimmt wird, fällt durch viele solcher Verkäufe und Käufe der gesamte Reichtum unweigerlich in die Hände einer einzigen Person. Das Modell führt stets zu extremer Ungleichheit.

dass sich der Reichtum vorwiegend auf kleine Gruppen konzentriert. Zwar enthält der Ansatz nicht alle verworrenen Details eines realen volkswirtschaftlichen Systems, doch wie ein Röntgenbild ermöglicht es einen Blick auf das zu Grunde liegende Skelett. Wir hoffen, dadurch einen Einblick in die treibenden Mechanismen zu erhalten, die zu Armut und Ungleichheit führen.

Viele Personen sehen ein scheinbar stabiles Wirtschaftssystem, das sich aus einem Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage ergibt, als Höhepunkt des aufklärerischen Denkens an. Einige Menschen setzen sogar den freien Markt mit dem Begriff von Freiheit selbst gleich. Unsere aktuelle Arbeit legt jedoch nahe, dass man diesen Standpunkt ernsthaft überdenken sollte.

Das erste analytische Wirtschaftsmodell, das aus paarweisen Transaktionen folgt, beschrieb der Sozialwissenschaftler John Angle 1986. Die handelnden »Agenten« können dabei sowohl Einzelpersonen als auch Haushalten, Unternehmen, Fonds oder anderen Einheiten entsprechen. In den folgenden Jahren entwickelten Forscher etliche andere agentenbasierte Modelle, darunter das von Anirban Chakraborti, damals am Saha Institute of Nuclear Physics in Kalkutta, ausgearbeitete Flohmarktmodell (englisch: Yard-Sale model). Als Chakraborti seinen Ansatz am Computer simulierte, erkannte er, dass es zwangsläufig zu einer Oligarchie führt, bei der sich das Vermögen auf wenige Akteure konzentriert.

Sein Modell ist dabei keine Ausnahme: In etlichen Wirtschaftssimulationen fließt der Wohlstand unaufhaltsam von einem Akteur zum anderen, selbst wenn die Agenten gleichberechtigt sind und unter fairen Bedingungen miteinander handeln. Viele Wissenschaftler versuchen herauszufinden, woran das liegt – und vor allem, wie man diesen Fluss aufhalten kann.

Ein Spiel, bei dem man nur gewinnen kann – oder?

Einen wichtigen Schritt machten die Physiker Slava Ispolatov, Pavel L. Krapivsky und Sidney Redner, die damals an der Boston University zusammenarbeiteten, sowie Adrian Dragulescu, heute bei der Constellation Energy Group, und Victor Yakovenko von der University of Maryland, als sie zeigten, dass sich agentenbasierte Wirtschaftsmodelle mit Methoden der statistischen Physik untersuchen lassen. Das half den Forschern, die zu Grunde liegenden Mechanismen besser nachzuvollziehen.

Überraschenderweise lassen sich die Ursachen für soziale Ungleichheiten schon durch das anschauliche Beispiel eines Casinos verstehen. Stellen Sie sich ein Spiel vor, bei dem man 100 Euro setzen muss. Es wird eine faire Münze geworfen; zeigt sie Kopf, erhält man 20 Prozent seines Einsatzes, so dass man dann 120 Euro besitzt. Wenn dagegen Zahl oben liegt, zahlt man dem Kasino 17 Prozent, wodurch 83 Euro übrig bleiben. Man kann das Geld so lange auf dem Tisch liegen lassen und das Spiel so oft wiederholen, wie man möchte. Würden Sie es spielen?

Es gibt überzeugende Argumente dafür und dagegen. Einerseits hat man eine 50-prozentige Chance, 20 Euro zu gewinnen, und verliert mit gleicher Wahrscheinlichkeit 17 Euro. Der erwartete Gewinn beträgt daher einen positiven

AUF EINEN BLICK NATÜRLICHE UNGLEICHHEIT

- 1 Der Unterschied zwischen Arm und Reich wächst in vielen Ländern immer weiter. Um die Ursachen dafür zu verstehen, simulieren Forscher die Vermögensverteilung mit mathematischen Modellen.
- 2 Die Modelle enthalten überraschenderweise gleiche Merkmale wie komplexe physikalische Systeme, etwa Phasenübergänge und Symmetriebrechungen.
- 3 In Wirtschaftssimulationen ergeben sich zwangsläufig ungleiche Vermögensverteilungen. Die Modelle könnten künftig auch Lösungen liefern, um die Situation zu verbessern.

Wert: $\frac{1}{2} \cdot 20 - \frac{1}{2} \cdot 17 = 1,50$. Auch wenn die Wahrscheinlichkeiten ausgeglichen sind, übersteigt der Gewinn den Verlust und führt zu einem positiven Erwartungswert. Deswegen scheint es vorteilhaft, einzusteigen.

Wenn man andererseits wie ein Schachspieler mehrere Züge vorausdenkt, ergibt sich ein anderes Bild. Bleibt man beispielsweise über zehn Durchläufe im Spiel, dann ist es wahrscheinlich, dass je fünfmal Kopf und Zahl erscheint. Bei Kopf erhöht sich der Einsatz jedes Mal um den Faktor 1,2, bei Zahl verringert er sich dagegen um den Faktor 0,83. Am Ende hat man demnach $1,2^5 \cdot 0,83^5 \cdot 100 = 98,02$ Euro übrig. Das heißt, man verliert nach zehn Durchgängen etwa 2 Euro von den ursprünglichen 100. Mit etwas mehr Rechenaufwand lässt sich zeigen, dass man 93 Siege braucht, um 91 Verluste auszugleichen. So gesehen sollte man also nicht an dem Spiel teilnehmen.

Der scheinbare Widerspruch zwischen beiden Aussagen mag überraschen, ist aber unter Spieltheoretikern schon lange bekannt. Dass dieses Phänomen mit der ungleichen Verteilung des Vermögens in modernen Wirtschaftssystemen zusammenhängt, ist dagegen weniger klar.

Um das Beispiel des Spielkasinos auf ein stark vereinfachtes volkswirtschaftliches Modell zu übertragen, kann man sich 1000 Personen vorstellen, die jeweils den gleichen Reichtum besitzen. Dann wählt man zufällig zwei Agenten aus und lässt sie miteinander handeln, indem sie eine Münze werfen. Je nach Ausgang des Wurfs bereichert sich einer der beiden Akteure an der Transaktion, während der andere einen Verlust erleidet. Diesen Vorgang wiederholt man immer wieder mit zwei zufällig gewählten Perso-

Die soziale Ungleichheit wächst mit alarmierender Geschwindigkeit

nen und beobachtet, wie sich das Vermögen nach und nach verteilt.

Damit das Modell realistisch ist, muss man ein paar Rahmenbedingungen festlegen. Menschen versuchen beispielsweise fast immer Schulden zu vermeiden, so dass wir in unserem Modell davon ausgehen, dass der auf dem Spiel stehende Betrag Δw nur einen Bruchteil des Vermögens der ärmeren Person ausmacht. Wenn zwei Agenten, Anna und Sarah, einen Handel eingehen, kann sich die ärmere Sarah daher nicht verschulden, selbst wenn sie gegen die reichere Anna verliert. Diese Annahme ist durchaus begründet, denn die meisten Menschen legen sich eine solche Einschränkung instinktiv auf. Wie im Beispiel des Casinos kann man annehmen, dass Δw 20 Prozent von Sarahs Vermögen w ausmacht, falls sie gewinnt, und -17 Prozent von w beträgt, wenn sie verliert.

Meine Kollegen und ich haben ein symmetrisches Modell genutzt, in dem Δw bei Gewinn und Verlust gleich ist. Das Ergebnis ist in beiden Fällen qualitativ gleich: Ein größerer oder kleinerer Δw -Wert verkürzt oder verlängert nur die Zeitspanne (und damit die nötigen Transaktionen), bis das Modell ein unveränderliches Ergebnis liefert.

Bei jedem Handel wird also eine Münze geworfen. Wenn sie Kopf zeigt, bekommt Sarah 20 Prozent ihres Vermögens von Anna, bei Zahl muss sie dagegen 17 Prozent davon an Anna geben. Dieses Spiel wiederholt man etwa eine Million oder eine Milliarde Mal.

Die so durchgeführte Variante des Flohmarktmodells führt zu einem erstaunlichen Ergebnis: Nach einer großen Anzahl von Transaktionen endet ein einziger Agent als »Oligarch«, der praktisch das gesamte wirtschaftliche Vermögen besitzt, während die anderen 999 so gut wie nichts haben.

Die freie Marktwirtschaft ist ein Kasino, das man niemals verlassen kann

Dabei spielt es keine Rolle, dass alle Akteure mit dem gleichen Reichtum starten oder alle Münzwürfe absolut fair sind. Selbst dass der durchschnittlich erwartete Gewinn des ärmeren Agenten bei jeder Transaktion positiv ist und der des reicheren negativ, ist für das Resultat irrelevant. Allerdings hat jeder Agent die gleiche Wahrscheinlichkeit, als Oligarch zu enden — in diesem Sinn ist das Modell gerecht. Doch am Ende gibt es einen einzigen Gewinner. Alle anderen können dagegen nur zusehen, wie ihr durchschnittliches Vermögen immer weiter schwindet.

Viele Wirtschaftswissenschaftler wunderte es, dass ein vollkommen symmetrisches System, in dem jeder Agent mit dem gleichen Besitz startet und gleiche Gewinnchancen hat, in einen so ungleich verteilten Endzustand mündet. Phänomene dieser Art sind Physikern dagegen schon lange

als Symmetriebrechung bekannt (siehe »Die Physik der Ungleichheit«, S. 80). Symmetriebrechungen tauchen in den unterschiedlichsten komplexen Systemen auf und sind bestens untersucht. Daher konnten wir die abstrakten Werkzeuge der Mathematik und Physik nutzen, um agentenbasierte volkswirtschaftliche Modelle zu untersuchen.

Auch wenn das Vermögen anfangs symmetrisch aufgeteilt ist, fließt nach dem ersten Münzwurf Geld von einem Akteur zum anderen und schafft so ein Ungleichgewicht zwischen beiden. Sobald das System damit leicht aus der Balance gerät, setzt sich ein unaufhaltsamer Mechanismus in Gang: Der Reichtum wandert in den nachfolgenden Transaktionen systematisch von ärmeren zu reicheren Agenten, bis schließlich nur noch ein Oligarch übrig bleibt.

Faire Anfangsbedingungen führen zu ungleichen Endzuständen

Um diesen Vorgang besser zu verstehen, simulierten wir ein System, in dem der Reichtum von Anfang an ungleich verteilt ist. Dabei lässt sich erkennen, dass das Vermögen des ärmsten Akteurs mit großer Wahrscheinlichkeit am schnellsten sinkt. Der Besitz geht zwangsläufig an einen wohlhabenderen Agenten über, da es keine ärmeren gibt. Unterschreitet das Vermögen einer Person irgendwann eine Grenze, kann sie nicht mehr handeln, da in diesem Modell keine Schulden zugelassen sind. Für den Zweitärmsten sieht es nicht viel besser aus, sein Vermögen wird höchstwahrscheinlich ebenso bei einem Reicherem landen. Bis auf die reichsten Agenten verringert sich der Besitz der Akteure über die Zeit daher exponentiell, wobei der individuelle Besitz immer schwankt. 2015 konnte ich mit meinen Kollegen von der Tufts University sowie Christophe Chorro von der Universität Panthéon-Sorbonne dieses Ergebnis, das Chakraborti bereits in Computersimulationen beobachtet hatte, auch mathematisch beweisen.

Das bedeutet aber nicht, dass Ärmere einen Münzwurf nie gewinnen und Reichere nie verlieren. Stattdessen verhält es sich wie in einem Kasino: Jeder gewinnt und verliert mal, aber je länger man spielt, desto wahrscheinlicher verliert man auf Dauer. Die freie Marktwirtschaft ist so gesehen ein Kasino, das man nie verlassen kann. Bei 7,7 Milliarden Menschen, die Jahr für Jahr miteinander Handel betreiben, verwandelt sich der Vermögensfluss von Arm nach Reich zu einem regelrechten Strom. Durch die unzähligen scheinbar harmlosen Transaktionen wächst die soziale Ungleichheit zwangsläufig immer weiter an.

Doch das ist kein Grund zu verzweifeln. Denn selbst wenn das agentenbasierte Modell mathematisch korrekt ist, heißt das noch lange nicht, dass es die Realität widerspiegelt. Schließlich beschreibt es eine völlig instabile Wirtschaft, die ungeachtet der genauen Rahmenbedingungen in einer Oligarchie endet. In der realen Welt gibt es aber glücklicherweise keine vollständigen Oligarchien.

Um der Wirklichkeit näher zu kommen, habe ich mit meinen Kollegen Adrian Devitt-Lee, Merek Johnson, Jie Li, Jeremy Marcq, Hongyan Wang 2017 begonnen, das Flohmarktmodell zu verfeinern. In einem ersten Schritt berücksichtigten wir, dass man den Reichtum durch politische Mittel wie einer Vermögenssteuer umverteilen kann.

In unserem Modell trieben wir daher den Besitz jedes Agenten nach einem abgeschlossenen Handel zurück in Richtung des durchschnittlichen Reichtums. Wie drastisch der Eingriff ausfällt, machten wir davon abhängig, wie weit die Person vom Mittelwert entfernt ist. Diese Distanz χ führten wir als pauschale Vermögenssteuer für Reiche und gleichzeitige Subvention für Arme in unser Modell ein. Der Faktor überträgt den Reichtum von jenen, die über dem Mittelwert liegen, auf solche, die sich darunter befinden.

Die einfache Modifikation genügte schon, damit keine Oligarchie entstand. Zwar war der Reichtum dadurch immer noch nicht vollkommen gerecht verteilt, doch er konzentrierte sich nicht mehr nur auf einen einzigen Akteur.

Daher wollten wir überprüfen, ob sich dieses simple Modell eignen würde, um reale Wirtschaftssysteme zu

Ungleichheit messen

Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte der amerikanische Ökonom Max O. Lorenz eine Methode, um die Ungleichheit der Vermögensverteilung zu bestimmen. Er schlug vor, den Anteil des Besitzes, der von Personen mit einem Reichtum von mehr als einem Wert w gehalten wird, gegen den Anteil der Personen mit einem Reichtum von weniger als w aufzuwiegen. Da beide positive Zahlen zwischen null und eins sind, passt die Darstellung in das Einheitsquadrat. Indem man die Fläche zwischen dieser »Lorenzkurve« und der Diagonalen des Quadrats verdoppelt, erhält man den »Gini-Koeffizienten«. Dieser stellt ein Maß für die Ungleichheit in einem Wirtschaftssystem dar.

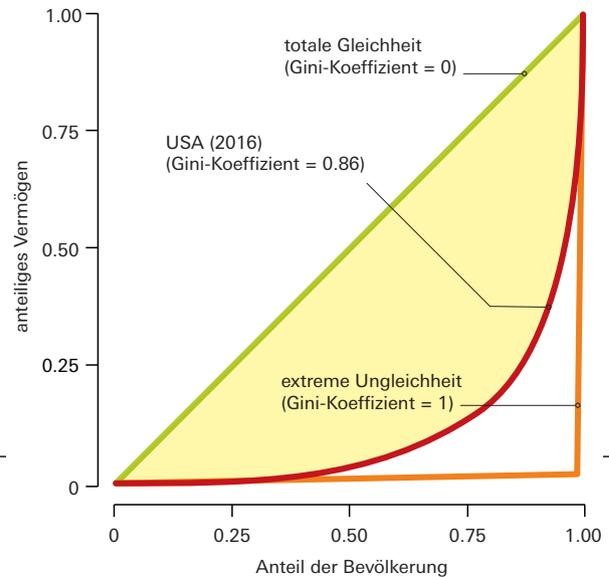
In einer Welt, in der jeder über das gleiche Vermögen verfügt, ist der Anteil der Bevölkerung gleich dem betrachteten Vermögensanteil (ein Viertel aller Menschen besitzt ein Viertel des gesamten Reichtums). Die Lorenzkurve ist in diesem Fall eine Diagonale (grüne Linie in A) und der Gini-Koeffizient ist null.

Wenn dagegen ein Oligarch den kompletten Reichtum besitzt und alle anderen nichts haben, dann ist die Lorenzkurve überall null, außer am Punkt eins: Dort hat sie den Wert eins. Die Fläche zwischen der Lorenzkurve (orangefarbene Linie) und der Diagonale hat den Wert $\frac{1}{2}$, somit ist der Gini-Koeffizient eins.

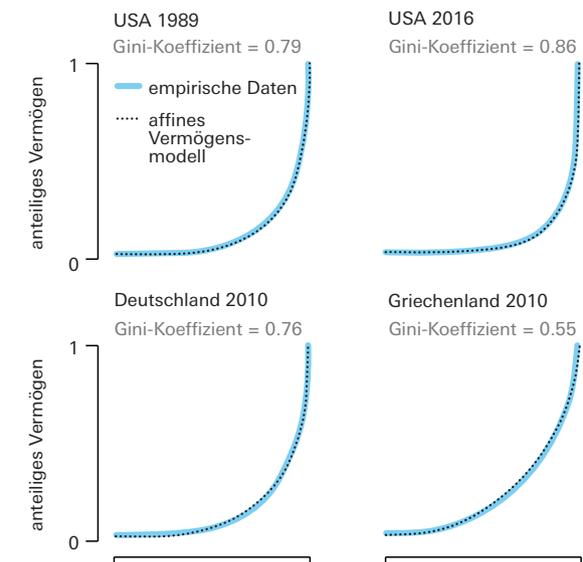
Insgesamt kann der Gini-Koeffizient also von null (absolute Gleichheit) bis eins (totale Oligarchie) variieren. In realen Wirtschaftssystemen liegt der Wert zwischen diesen beiden Extremen. Die rote Linie zeigt die Lorenzkurve für das US-Vermögen im Jahr 2016, basierend auf Daten aus dem »Survey of Consumer Finances« der Federal Reserve Bank. Die doppelte gelbe Fläche zwischen dieser Kurve und der Diagonale beträgt etwa 0,86 – und ist einer der höchsten Gini-Koeffizienten in einem Industriestaat.

Die vier kleinen Abbildungen (B) zeigen die theoretischen und empirischen Lorenzkurven verschiedener

A Lorenzkurven



B Empirische Daten, verglichen mit dem affinen Vermögensmodell



JEN CHRISTIANSEN / (B) DEUTSCHE UND GRIECHISCHE DATEN NACH EUROPÄISCHE ZENTRALBANK; US-DATEN NACH: 2016 SURVEY OF CONSUMER FINANCES (SCF), FEDERAL RESERVE BANK / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019

Industriestaaten zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die theoretischen Werte berechnen sich aus dem affinen Vermögensmodell. Die empirischen Daten stammen von der Federal Reserve Bank (für die USA) und der Europäischen Zentralbank (für Deutschland und Griechenland). Der Unterschied zwischen dem affinen Vermögensmodell und der Lorenzkurve beträgt für die USA weniger als ein Fünftel eines Prozent und für die beiden europäischen Länder weniger als ein Drittel eines Prozent. Der Gini-Koeffizient für die USA (siehe Grafik) stieg zwischen 1989 und 2016 an, was darauf hinweist, dass die Ungleichheit wächst. In Deutschland erhöhte sich ebenfalls der Koeffizient zwischen 2000 (0,67) und 2016 (0,79).

Die Physik der Ungleichheit

Wenn Wasser bei 100 Grad Celsius siedet, gibt es einen Phasenübergang – eine schlagartige Veränderung des Aggregatzustands. So nimmt beispielsweise das Volumen der Flüssigkeit ruckartig mit der Temperatur zu. Ebenso verliert ein Ferromagnet oberhalb der so genannten Curie-Temperatur T_C seine Magnetisierung (rote Linie in A).

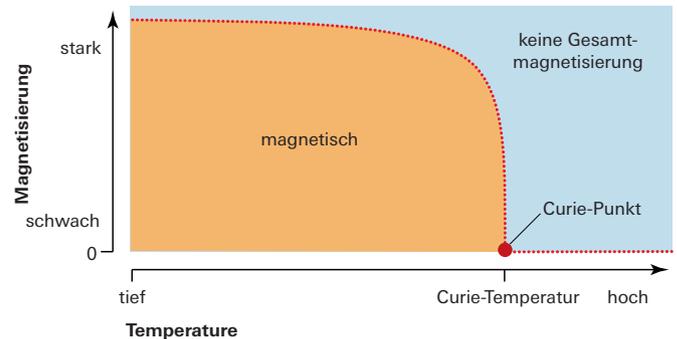
Kühlt man umgekehrt ein heißes ferromagnetisches Material ab, tritt unterhalb von T_C spontan eine Magnetisierung auf. Diese hat eine räumliche Ausrichtung, die in Abwesenheit eines äußeren Felds zufällig erfolgt. Da das Material oberhalb von T_C in jeder Ausrichtung identisch aussah, sprechen Physiker von einer spontanen Brechung der Rotationssymmetrie.

Doch nicht nur physikalische Systeme weisen Phasenübergänge auf. Tatsächlich können auch in Wirtschaftsmodellen solche ruckartigen Änderungen erfolgen. Wenn der vermögensbedingte Vorteil Z des affinen Vermögensmodells kleiner ist als der Umverteilungsparameter χ , führt das zu einem Wirtschaftssystem ohne Oligarchie (blaue Fläche in B). Wenn Z aber χ überschreitet, dann wandert ein Teil des gesamten Vermögens in die Hände weniger reicher Akteure. Das Verhältnis χ/Z übernimmt dann die Rolle der Temperatur in physikalischen Systemen.

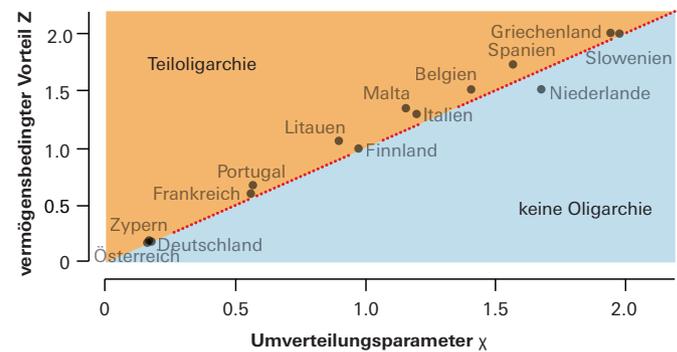
Erstaunlicherweise befinden sich die meisten Länder nahe am kritischen Punkt. Wenn man 14 der von der Europäischen Zentralbank betreuten Länder in der χ - Z -Ebene aufträgt, landen die meisten in der Nähe des Phasenübergangs. Alle Staaten – mit Ausnahme der Niederlande – liegen knapp oberhalb der entsprechenden Diagonalen, was darauf hindeutet, dass sie leicht

oligarchisch sind. Wir vermuten, dass die Ungleichheit natürlicherweise zunimmt, bis sich erste Teiloligarchien ausbilden, woraufhin politischer Druck entsteht, der durch Umverteilungen eine noch größere Ungleichheit verhindert.

A Phasenübergang bei einem Ferromagneten



B Phasenübergang in Wirtschaftssystemen



beschreiben. Dazu nahmen wir empirische Daten über die Verteilung des Haushaltsvermögens in den USA und Europa zwischen den Jahren 1989 und 2016, und verglichen sie mit unserem Modell. Indem wir den Parameter χ anpassten, konnte unser Modell die empirischen Daten erstaunlich gut nachbilden: Die Verteilungen wichen bloß um knapp zwei Prozent voneinander ab.

Selbst wenn jedes Land über etliche verschiedene Steuerregelungen und soziale Unterstützungsprogramme verfügt, die zu unübersichtlich sind, um sie einzeln zu modellieren, lassen sich ihre Auswirkungen also überraschend gut durch einen einzigen Parameter χ zusammenfassen. Mit diesen Ergebnissen gaben wir uns aber nicht zufrieden. Wir wollten weitere Eigenschaften realer Wirtschaftssysteme einschließen, um die theoretischen Modelle noch genauer zu gestalten.

Zum Beispiel genießen in unserer Gesellschaft wohlhabende Personen wirtschaftliche Vorteile wie niedrige Zinssätze für Darlehen und gute Finanzberatung, während ärmere Menschen unter Nachteilen wie den in England

verbreiteten Kurzzeitkrediten leiden. Der US-amerikanische Schriftsteller James Baldwin bemerkte dazu: »Jeder, der schon einmal mit Armut zu kämpfen hatte, weiß, wie teuer es ist, arm zu sein.«

Diesen vermögensbedingten Vorteil berücksichtigten wir, indem wir den Münzwurf etwas zu Gunsten der wohlhabenderen Person ausfallen ließen. Den Betrag der Verzerrung wählten wir proportional zu einem Wert Z , mal der Vermögensdifferenz dividiert durch den mittleren Reichtum. Das heißt, je stärker sich der Reichtum beider Agenten unterscheidet, desto besser fällt ein Handel für den wohlhabenderen Akteur aus.

Durch diese zusätzliche Verfeinerung stimmen die Ergebnisse des theoretischen Modells noch besser mit den empirischen Daten aus den USA und Europa überein: Die Verteilungen weichen lediglich um ein bis zwei Prozent für den Zeitraum von 1986 bis 2016 voneinander ab.

Außerdem erklärt der vermögensbedingte Vorteil, wie partielle Oligarchien in Wirtschaftssystemen entstehen. Sobald der vermögensbedingte Vorteil Z den Umvertei-

lungsfaktor χ übersteigt ($Z > \chi$), entwickelt sich das System in einen Zustand, in dem wenige Agenten den Anteil $1 - \chi/Z$ des gesamten Vermögens besitzen.

Denn wie die Physiker Jean-Philippe Bouchaud, heute an der École Polytechnique, und Marc Mézard von der École Normale Supérieure im Jahr 2000 herausfanden, entspricht dieser Punkt einem Phasenübergang. Wenn der vermögensbedingte Vorteil Z kleiner ist als der Umverteilungsfaktor χ , hat das System nur einen stabilen Endzustand: den ohne Oligarchie. Sobald Z aber χ übersteigt, führt das System in eine Teiloligarchie.

Ein solcher Phasenübergang könnte in einigen Ländern nach der Auflösung der Sowjetunion stattgefunden haben. In mehreren ehemaligen Staaten der UdSSR wandelten sich damals Zentralverwaltungswirtschaften innerhalb kürzester Zeit in freie Marktwirtschaften um, mit verheerenden Folgen: Quasi über Nacht floss der gesamte Reichtum in die Hände weniger Personen. Denn durch die Reformen gab es kaum noch Umverteilungsmaßnahmen χ , während die vermögensbedingten Vorteile Z durch die plötzliche Privatisierung und Deregulierungen stiegen. Das Verhältnis von χ zu Z sank schlagartig, und die ehemals kommunistischen Länder wurden zu Teiloligarchien. Bis heute hat sich in mindestens zehn der 15 ehemaligen Sowjetrepubliken wenig an diesem Zustand geändert.

Verschuldete Gesellschaft

Neben den vermögensbedingten Vorteilen und Umverteilungen beachteten wir 2019 in unserem Modell noch eine dritte Eigenschaft realistischer Wirtschaftssysteme: negative Vermögenswerte. Schulden sind einer der störendsten Aspekte der modernen Wirtschaft, aber auch deren zentraler Bestandteil. 2016 waren zum Beispiel rund 10,5 Prozent der US-Bevölkerung durch Hypotheken, Studienkredite und andere Faktoren verschuldet.

Deshalb haben wir einen dritten Parameter k eingeführt, der die Vermögensverteilung nach unten verschiebt und negative Werte zulässt. Dabei nahmen wir an, dass sich der ärmste Agent um höchstens S verschulden kann, wobei S mal k dem mittleren Reichtum entspricht. In unserem Modell liehen wir daher vor einer Transaktion beiden Agenten jeweils das Vermögen S , damit jeder mit einem positiven Wert startet. Die Personen handeln dann nach den festgelegten Regeln und zahlen anschließend ihre Schulden zurück.

Das Drei-Parameter-Modell mit χ , Z und k , das wir affines Vermögensmodell nennen, stimmt bis auf weniger als ein Sechstel Prozent mit den empirischen Daten über die Vermögensverteilung der USA mehrerer Epochen überein. Bei den europäischen Daten beträgt die Abweichung für das Jahr 2010 weniger als ein Drittel bis ein halbes Prozent (siehe »Ungleichheit messen«, S. 79).

Den Namen verdankt das Modell einem Prinzip aus der Mathematik: Dort beschreibt das Wort »affin« etwas, das multiplikativ skaliert und additiv verschoben wird. In diesem Fall beeinflussen einige Merkmale (wie der Faktor ΔW) den Reichtum eines Agenten multiplikativ, während andere Eigenschaften, etwa Schulden S , die Verteilung additiv verschieben.

»Jeder, der mit Armut zu kämpfen hatte, weiß, wie teuer es ist, arm zu sein«

James Baldwin, us-amerikanischer Schriftsteller

Um das affine Modell mit den realen Vermögensverteilungen zu vergleichen, mussten wir die Werte von χ , Z und k bestimmen, für welche die theoretischen Ergebnisse am besten mit den empirischen Daten übereinstimmen. Zum Beispiel lässt sich die Vermögensverteilung der US-Haushalte 2016 am genauesten durch $\chi = 0,036$, $Z = 0,050$ und $k = 0,058$ beschreiben. Wir haben das affine Vermögensmodell mit vielen weiteren Ländern und Epochen verglichen. Wie sich herausstellt, beschreibt es die empirischen Daten exakter als jedes andere uns bekannte Wirtschaftsmodell.

Besonders überraschend ist dabei, dass der Ansatz nicht auf einem vermeintlichen Gleichgewicht der Marktkräfte basiert und ohne Umverteilung vollkommen instabil wäre. Tatsächlich zeigen unsere Berechnungen, dass die »natürliche« Vermögensverteilung in einer freien Marktwirtschaft die einer vollständigen Oligarchie ist. Einzig die Umverteilung schützt uns vor diesem ungerechten Zustand.

Wenn man über unser Wirtschaftssystem spricht, stützen sich viele Menschen auf das Prinzip der Freiwilligkeit: Jeder tätigt seine Transaktionen freiwillig, dadurch trägt man die volle Verantwortung für seine wirtschaftlichen Ergebnisse. Zudem sind einige davon überzeugt, dass Reichtum eine Folge von Intelligenz oder Fleiß sei.

Es ist zwar wahr, dass das Vermögen einer Person in gewissem Maß mit solchen Attributen zusammenhängt. Dennoch lässt sich die globale Vermögensverteilung extrem gut durch ein statistisches Modell erklären, das diese Eigenschaften völlig ignoriert. Glück scheint eine viel wichtigere Rolle zu spielen, als üblicherweise zugegeben wird. Dadurch sind die dem Reichtum in der modernen Gesellschaft gemeinhin zugeschriebenen Tugenden — und ebenso die der Armut zugeschriebenen Laster — unbegründet.

Wenn man betrachtet, wie komplex reale Wirtschaftssysteme sind, erstaunt es, dass unser einfacher analytischer Ansatz die Vermögensverteilungen mehrerer Nationen mit beispielloser Präzision erfasst. Erschreckend ist dagegen, dass er zu Wirtschaftssystemen führt, die alles andere als fair und frei sind. ◀

QUELLEN

Angle, J.: The surplus theory of social stratification and the size distribution of personal wealth. *Social Forces* 65, 1986

Devitt-Lee, A. et al.: A nonstandard description of wealth concentration in large-scale economies. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 78, 2018

Li, J. et al.: The affine wealth model: an agent-based model of asset exchange that allows for negative-wealth agents and its empirical validation. *Physics A: Statistical Mechanics and Its Applications* 516, 2019

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN DER TOD KOMMT STETS ZU FRÜH

Das gilt selbst dann, wenn man realistisch mit seinem Ableben rechnet. Über einige Tücken des Konzepts vom Durchschnitt.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» spektrum.de/artikel/1686892

▶ In der Weihnachtserzählung »A Christmas Carol« von Charles Dickens bringen die drei Geister den menschenverachtenden radikalen Geizhals Ebenezer Scrooge zu der Erkenntnis, dass es gut ist, anderen Menschen etwas zu gönnen. Ein Zwischenstadium auf diesem Weg zur Tugend hat Dickens wohlweislich weggelassen: Scrooge hätte zunächst auf die Idee kommen können, sich selbst etwas zu gönnen. Genug Geld hat er ja angehäuft, und da das Ende seines irdischen Lebens nicht mehr allzu fern ist, könnte er sein Vermögen sorgfältig in Jahresraten aufteilen und jedes Jahr eine Rate für vergnügliche Dinge verprassen – wenn er denn wüsste, wie viele Jahre ihm noch beschieden sind.

Das wiederum möchte er möglichst genau wissen. Für seine Erben hatte er noch nie etwas übrig; der Gedanke, ihnen etwas zu hinterlassen, das er selbst hätte verjubeln können, ist ihm aufs äußerste zuwider, nur übertroffen von der Furcht, seine letzten Jahre im Armenhaus zuzubringen, weil er dann doch – zu dumm – länger lebt als eigentlich geplant.

Lebte Scrooge in modernen Zeiten, könnte er für diese Frage das Internet zu Hilfe nehmen. Die US-amerikanische Rentenversicherung (Social Security Administration, SSA) unterhält eine Website, auf der man nur sein Geschlecht und sein Geburtsdatum eingibt und umgehend erfährt, wie lange man noch zu leben hat. Im Durchschnitt, wohlge-merkt; mehr als einen Erwartungswert für die Restlebensdauer kann die SSA bei den mageren Eingabedaten einleuchtenderweise nicht bieten.

Für deutsche Verhältnisse liefert das Statistische Bundesamt vergleichbare Informationen, wenn auch nicht so komfortabel aufbereitet. Nehmen wir an, Scrooge wäre

heute 66 Jahre alt; dann könnte er dem umfangreichen Tabellenwerk entnehmen, dass er noch mit weiteren 17,14 Jahren zu rechnen hätte. Einer gleichaltrigen Frau stellt die deutsche Statistik immerhin noch 20,23 Jahre in Aussicht. Die amerikanische SSA gibt dem alten Griesgram sogar 18,3 Jahre und seinem weiblichen Gegenstück 20,7 Jahre.

Und wenn er sein prognostiziertes Todesdatum noch erlebt? Dann wird ihm die deutsche Statistik zu seinen 83 Jahren weitere 6,43 und die amerikanische zu den 84 Jahren noch 6,6 Lebensjahre prophezeien.

Das wirkt etwas merkwürdig, hat aber durchaus seine Richtigkeit. Die Basis derartiger Prognosen sind die so genannten Sterbetafeln; die zeichnen zunächst nur auf, wie alt die Angehörigen früherer Geburtsjahrgänge in der Vergangenheit geworden sind. Um das zu veranschaulichen, gehen wir einmal vorübergehend 40 Jahre in der Zeit zurück. Da die Angehörigen des Jahrgangs 1913 bis auf extrem wenige Ausnahmen inzwischen alle gestorben sind, ist es eine einfache Rechenaufgabe, zu bestimmen, wie viele Jahre diese Leute 1979, an ihrem 66. Geburtstag, im Durchschnitt noch vor sich hatten. Das gibt einen groben Anhaltspunkt für Scrooges zu erwartende Restlebensdauer. Dieser Wert lässt sich verbessern durch die Daten jüngerer Jahrgänge, selbst wenn diese natürlich unvollständig sind – von den Leuten, die nur wenig älter sind als 66 Jahre, leben ja noch ziemlich viele. Aber mit etwas mathematischer Modellierung und Extrapolation kommt man auf ganz brauchbare Werte. So lässt sich auch der Effekt berücksichtigen, dass sich die Leute von Jahr zu Jahr mit dem Sterben ein bisschen mehr Zeit lassen (**Spektrum** November 2011, S. 52). Wahrscheinlich



Vertraut man den Statistiken, können wir selbst im hohen Alter noch mit einer gewissen Lebenserwartung rechnen. Daher kommt der Tod stets zu früh. Wie kann das sein?

wird also Scrooge im Jahr 2036 oder 2037, in dem er eigentlich sterben sollte, sogar noch einen kleinen Zuschlag zu den 6,43 beziehungsweise 6,6 Jahren bescheiden bekommen – wenn er dieses Datum denn erlebt.

Der Durchschnitt wird stets über alle Angehörigen eines Geburtsjahrgangs gebildet, die am Stichtag noch leben. Diejenigen Altersgenossen, die in den nächsten Jahren sterben, fallen aus der Berechnung heraus, mit dem Ergebnis, dass der Durchschnitt der Restlebensdauer für die Überlebenden ansteigt. Das hat einen paradox anmutenden Effekt: In dem Moment, in dem der Sensenmann dem alten Geizhals tatsächlich gegenübertritt, hat der allen Anlass, sich zu beschweren, denn nach allen – mathematisch korrekt durchgeführten – Berechnungen ist er noch nicht an der Reihe; noch lange nicht.

Komplizierte Altersvorsorge

Nun pflegt sich der Tod, wenn er denn kommt, auf derlei Diskussionen ohnehin nicht einzulassen. Aber was bedeutet die Sache für Scrooges Budgetplanung? Nach heutigem Stand – noch 17 Jahre erwartete Restlebensdauer – wird er vernünftigerweise jedes Jahr ein 17tel seines angehäuften Vermögens dem Konsum anheimgeben, Effekte wie Inflation und Zinsen aufs Sparguthaben außer Acht gelassen.

Aber Vorsicht! Nächstes Jahr muss er schon wieder die Statistik konsultieren. Und die wird ihm nicht einfach 16 Jahre vorhersagen, sondern vielleicht 16,2. Entsprechend langsamer muss er sein Vermögen verprassen, im übernächsten Jahr noch langsamer, und so weiter. Und es hilft alles nichts: Im Moment seines Todes ist unweigerlich noch etwas übrig, da die Statistik ihm auch zu diesem Zeitpunkt noch Hoffnung auf ein paar Jährchen macht. Statt der verpassten Konsumgelegenheit nachzuweinen, sollte Scrooge sich wirklich beizeiten darum bemühen, Sympathien für seine Erben zu entwickeln.

Allgemein gilt: Wer realistisch ist, das heißt die Prognose seiner Restlebensdauer regelmäßig der Tatsache anpasst, dass er immer noch lebt, der überschätzt systematisch am Ende seine Lebenszeit. Und zwar nicht zu knapp: Über alle Amerikaner gemittelt ergeben sich 11,9 Jahre! Das haben David Hemenway von der Harvard University und sein Sohn Brett Hemenway von der University of Philadelphia aus den amerikanischen Sterbetafeln ausgerechnet.

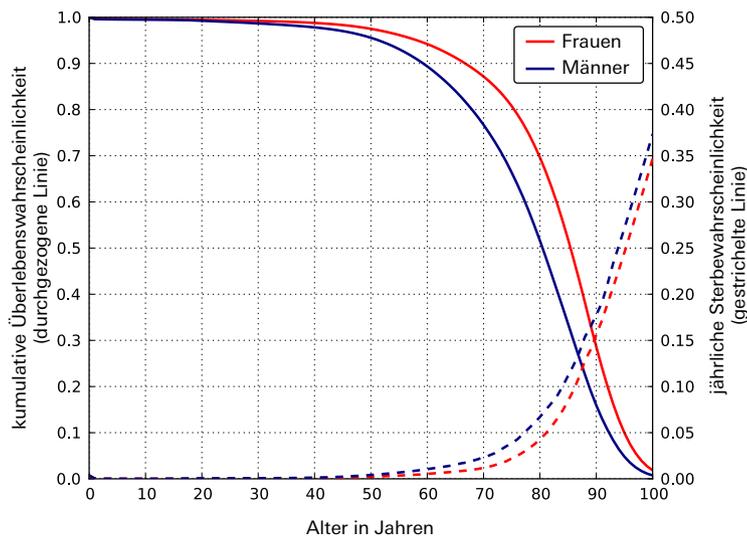
Um das genauer zu untersuchen, ist es wie üblich hilfreich, statt der unübersichtlichen Realität über radikal vereinfachte Szenarien nachzudenken. Nehmen wir an, die Hälfte der Menschheit stirbt mit 50 Jahren und die andere wird genau 100 Jahre alt. Dann beträgt die durchschnittliche Gesamtlebensdauer des Menschen bei seiner Geburt 75 Jahre, und das bleibt so, bis er 50 Jahre alt wird. Die Unglücklichen, die dann dahingerafft werden, haben bis zum Schluss ihre Lebensdauer um 25 Jahre überschätzt, während die Überlebenden die inzwischen revidierte Erwartung von 100 Lebensjahren genau einhalten. Das macht eine durchschnittliche Überschätzung von $\frac{1}{2} \cdot 25 + \frac{1}{2} \cdot 0 = 12,5$ Jahren – für das absolut

unrealistische Szenario ist das ein überraschend realitätsnaher Wert.

In der Wirklichkeit sterben die Leute nicht an einem von zwei festgelegten Daten, sondern gleichmäßig über die Zeit. Dem entspricht ein Modell mit konstanter Sterbewahrscheinlichkeit (Sterbewahrscheinlichkeitsdichte, um genau zu sein). Es ist einfach zu durchschauen, selbst wenn es immer noch weit von der Realität entfernt ist. Nach dieser Modellvorstellung wäre das Leben eine verallgemeinerte Form des russischen Roulettes: An jedem Geburtstag muss der Mensch in einen Sack mit 84 Kugeln greifen (wir unterstellen eine Lebenserwartung bei Geburt von 84 Jahren) und blindlings eine herausholen. Erwischt er eine der 83 weißen Kugeln, passiert nichts; aber die eine schwarze Kugel im Sack bringt ihn auf der Stelle um, wenn er sie greift. In diesem Modell ist – zu jedem Zeitpunkt, einerlei, wie alt er bis dahin geworden ist – die erwartete Restlebensdauer des Menschen 84 Jahre. Das gilt auch in dem Moment, in dem er die schwarze Kugel aus dem Sack holt. Also beträgt die durchschnittliche Überschätzung am Ende des Lebens 84 Jahre. Eigentlich hatte man im Moment seines Todes das ganze Leben noch vor sich, ein Gedanke, an den man sich erst gewöhnen muss.

In anderen Zusammenhängen erscheint dieses Phänomen weitaus weniger merkwürdig. Der radioaktive Zerfall ist ebenfalls ein Prozess mit konstanter Sterbewahrscheinlichkeitsdichte; man nennt sie Zerfallsrate oder auch Ausfallrate, wenn es etwa um das Versagen eines Bauteils geht. Aus einem ursprünglich einheitlichen Ensemble radioaktiver Atome mögen die meisten bereits zerfallen sein; dann bleibt gleichwohl die Zerfallsrate unverändert, ebenso wie die Halbwertszeit, die bis auf einen konstanten Faktor gleich dem Kehrwert der Zerfallsrate ist. Atome, auch radioaktive, altern nicht und wenn sie zerfallen, dann nicht aus Altersschwäche, sondern einfach so.

Den Sterbe- und Überlebenswahrscheinlichkeiten des Statistischen Bundesamts aus dem Jahr 2011 zufolge hat selbst ein 100-Jähriger eine positive Lebenserwartung.



GNDIS. NACH: STATISTISCHES BUNDESAMT WIESBADEN, 2011 (DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DATENSERIEHELSYGI)

Generell überschätzen die Jungen ihre erwartete Restlebensdauer stärker als die Alten

Wenn bei einem Spiel ein Würfel geworfen wird, bis zum ersten Mal eine Sechs erscheint, ist das im Durchschnitt nach sechs Würfeln der Fall. Ist der Würfel bereits dreimal gefallen, ohne eine Sechs zu zeigen, wird der Spieler merklich unruhig. Wie lange wird es noch im Durchschnitt bis zur Sechs dauern? Nicht drei Würfe, sondern sechs! Der Würfel hat kein Gedächtnis; was sich bisher abgespielt hat, ist für die Zukunft vollkommen irrelevant. Oder dasselbe in der Sprache der Demografie ausgedrückt: Bevor das Spiel begann, haben wir über die Menge aller denkbaren Wurffolgen den Durchschnitt gebildet und daraus eine »erwartete Lebensdauer« des Spiels von sechs Würfeln errechnet. Nachdem drei Würfe ohne Sechs stattgefunden haben, bilden wir den Durchschnitt nur über die Menge der »überlebenden« Wurffolgen; die mit einer Sechs in einem der ersten drei Würfe sind herausgefallen und tragen daher nicht mehr zur Durchschnittsbildung bei.

Formeln für den Zeitpunkt des Todes

Vater und Sohn Hemenway haben noch zahlreiche fiktive Sterbetafeln durchgerechnet, mit dem Ergebnis, dass die abstrusesten Überschätzungen der erwarteten Lebensdauer am Lebensende zumindest theoretisch möglich sind. Die Überschätzung kann nicht nur, wie beim russischen Roulette, gleich der erwarteten Lebensdauer selbst sein, sondern diese um das Doppelte oder mehr übertreffen, und das selbst für künstlich eingeschränkte Szenarien, in denen die Menschen nur wenige Zeitpunkte zum Sterben zur Auswahl haben.

Die Realität dagegen ist, rein formal gesehen, von dem Modell mit der konstanten Sterbewahrscheinlichkeit gar nicht so weit entfernt. Nach der Formel des britischen Mathematikers Benjamin Gompertz (1779–1865) steigt die Sterbewahrscheinlichkeit von einem sehr niedrigen Wert im frühen Kindesalter mit zunehmendem Alter exponentiell an; nur die relativ hohe Sterblichkeit im ersten Lebensjahr ist gesondert zu betrachten. Passt man die freien Parameter, die in dem Gompertz-Modell stecken, an die beobachteten Zahlen an, so findet sich eine recht gute Übereinstimmung mit der Realität.

Haben diese Überlegungen – vom allgemeinen Sinnieren über die Vergänglichkeit des menschlichen Lebens abgesehen – einen praktischen Nutzen? Durchaus, und zwar wenn es nicht um Menschen, sondern um nützliche Gegenstände geht. Wenn das Auto, das Dach oder die Heizungsanlage des eigenen Hauses den Geist aufgeben, ist in der Regel rasch Ersatz geboten, und man tut gut daran, für solche Fälle beizeiten Geld anzusparen. Mit

welchen Sparraten? So, dass man ausreichend beisammen hat, wenn das Gerät seine erwartete Lebensdauer erreicht hat. Nach derselben Logik wie oben kann man immer wieder seine Einschätzung dieses Zeitpunkts nach oben korrigieren. Denn die schlichte Tatsache, dass das Ding noch nicht kaputtgegangen ist, einige andere derselben Altersklasse aber sehr wohl, versetzt das eigene Gerät in die Menge der – bis jetzt – Überlebenden, und die haben quasi per definitionem eine größere durchschnittliche Restlebensdauer. Nur: Wenn das Ding tatsächlich irreparabel versagt, dann kommt dieses Ereignis aus der aktuellen Sicht »zu früh«, und man hat noch nicht genug auf der hohen Kante, falls man sich auf die letzte revidierte Berechnung verlassen hat.

Allgemeiner ausgedrückt: Das eigentlich hilfreiche Rezept »Handle in Situationen mit Unsicherheit so, dass du im durchschnittlichen Fall richtig liegst« führt in Fällen wie den hier beschriebenen in die Irre.

Was soll man stattdessen tun? Das, was man immer zu tun pflegt, wenn einem die Unsicherheit über die Zukunft zu schaffen macht. Die erste Empfehlung lautet: Ziehe so viel zusätzliche Information heran wie möglich. Bilde also zum Beispiel den Durchschnitt nicht über alle Menschen deines Geschlechts und deines Geburtsjahrgangs, sondern nur über die Teilmenge derjenigen, denen es gesundheitlich ungefähr so geht wie dir selbst. Vergleiche dein Auto nicht mit allen gleich alten Autos, sondern mit allen gleich alten und gleich rostigen. Derlei Daten sind zwar sehr viel mühsamer zu beschaffen, ergeben aber eine wesentlich zuverlässigere Einschätzung der Zukunft.

Auch die durchschnittliche Überschätzung von 11,9 Jahren verliert etwas von ihrem Schrecken, wenn man sie nach Altersklassen getrennt betrachtet. Generell überschätzen die Jungen ihre erwartete Restlebensdauer stärker als die Alten. Das leuchtet ein, denn sie verlieren mehr Lebenszeit, wenn sie plötzlich der Tod ereilt. Für einen 50-Jährigen ist, wieder nach amerikanischen Daten, die Überschätzung auf 9,7 Jahre gesunken und für einen 70-Jährigen auf 7,2.

Und das verbleibende Risiko, dass man am Lebensende sein Vermögen nicht punktgenau auf null verzehrt hat, kann man nahezu vollständig abwenden, indem man sich mit einer großen Anzahl von Menschen in gleicher Lage zusammenschließt und das Risiko dadurch auf viele Schultern verteilt. Man nennt es Rentenversicherung. ◀

QUELLE

Hemenway, B., Hemenway, D.: Why people die before they expect to. *Mathematics Magazine* 91, 2018

WEBLINKS

socialsecurity.gov/oact/population/longevity.html
Hier kann man seine durchschnittliche Lebenserwartung nach dem Modell einer US-amerikanischen Rentenversicherung berechnen.

www-genesis.destatis.de/genesis/online/data?operation=table&code=12621-0001
Lebenserwartungswerte, wie sie das Statistische Bundesamt kalkuliert

Wissenschaft vor 100 und vor 50 Jahren – aus Zeitschriften der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums

ROST MACHT ZUCKER ENTLAMMBAR

1920

»In Zuckerfabriken kommen häufig Brände vor, deren Entstehung sich nur ungenügend erklären läßt. Bekanntlich kann man ein Stück Rohrzucker nach Berührung mit Tabakasche mit einem Streichholz leicht zum Entflammen bringen, während sich reiner Zucker nicht entzünden läßt. Es ist anzunehmen, daß Eisenoxyd in der Tabakasche die Katalyse veranlaßt. Tatsächlich konnte ein Stück Zucker, wenn man es an einem Stück rostigen Eisen rieb, durch ein Streichholz in Brand gesetzt werden. In den Fabriken kommt der trockne Zucker leicht mit rostigem Eisen in Berührung und durch Funkenbildung kann eine Entflammung leicht entstehen.« *Die Umschau 3, S. 52*

ARZNEIMITTEL – EXTREME WIRKUNG BEI MANGELERNÄHRUNG

»Daß die mangelhafte Nahrungszufuhr im Kriege erhebliche Störungen des Organismus herbeigeführt hat, ist bekannt. Unter dem Einfluß der Kriegsunterernährung hat sich aber auch eine abnorm gesteigerte Empfindlichkeit von Personen gegen Arzneimittel gezeigt, die früher in weit stärkeren Dosen vertragen wurden. So zeigen Patienten, die früher viel größere Mengen ohne jede Nebenwirkung nehmen konnten, jetzt nach abendlichem Einnehmen von nur ½ g Tinct. Opii [Opiumtinktur] am nächsten Morgen noch starke Benommenheit und charakteristisch verengte Pupillen.« *Die Umschau 4, S. 72*

PSEUDOFÖSSILIEN TÄUSCHEN FORSCHER

»Bis ins späte Mittelalter war man geneigt, Versteinerungen nicht für frühere Lebewesen, sondern für Naturspiele zu halten. [Später] schlug der Zweifel ins Gegenteil um, indem man vieles, was an Pflanzen erinnerte, als Fossil ansprach, obwohl es damit oft nicht das Mindeste zu tun hat. Die bekanntesten Gebilde dieser Art sind die Dendriten, die durch Auskristallisation von Mineralien in den feinen Schichtenfugen der Gesteine entstehen. Allerdings haben sie etwas sehr Pflanzenähnliches. Gerade in alten Schichten ist jeder Pflanzenrest von allergrößter Wichtigkeit, darum führt die Verkennung solcher Gebilde zu schwerwiegenden Irrtümern.« *Kosmos 1, S. 25/26*

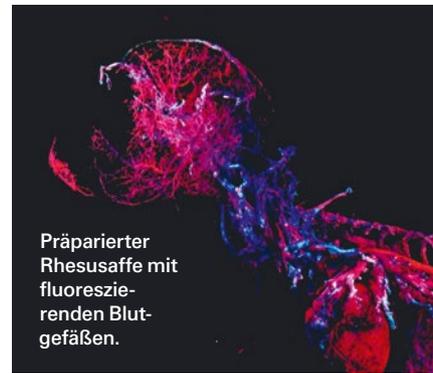
Diese Gesteinsmaserung hielt man fälschlicherweise für einen fossilisierten Farn.



BUNTE BLUTGEFÄSSE IM UV-LICHT

1970

»Wenn man das Blutgefäßsystem von Tieren als biologisches Demonstrationspräparat ausstellt, kann man dies in wirkungsvoller Weise tun, indem man die Gefäße mit fluoreszierendem Kunststoff ausgießt. Bestrahlt man derartige Präparate mit ultraviolettem Licht, so fluoreszieren die ehemaligen Arterien und Venen rot und blau. Bevor man die Blutgefäße eines Objekts ausgießt, muß man das Blut durch Auswaschen entfernen. Jetzt kann die flüssige, angefärbte Kunststoffmasse nach Zugabe des Härters in die Gefäße gepreßt werden. Das endgültige Aushärten erfolgt in einem kalten Wasserbad. Daran schließt sich die Beseitigung aller Gewebeteile durch Mazeration in Kalilauge an. Nach Beendigung wird das Präparat gut gespült, bevor die erste Betrachtung im UV-Licht erfolgen kann.« *Die Umschau 3, S. 79*



Präparierter Rhesusaffe mit fluoreszierenden Blutgefäßen.

FRAU IST 37 JAHRE MIT MUMIFIZIERTEM FÖTUS SCHWANGER

»Eine 72 Jahre alte italienische Bäuerin trug 37 Jahre lang ein 8 Monate altes Kind. Im Jahr 1932 unterzog sie sich nach einer extrauterinen Schwangerschaft einer partiellen Hysterektomie. Offenbar war dem Gynäkologen bei der Operation ein befruchtetes Ei entgangen, welches sich bis zu seinem Tode im Alter von 8 Monaten entwickelte und in der Unterleibshöhle verblieb. Der Fetus befindet sich in einem Zustand der Petrifizierung, das heißt, er verwandelte sich in Stein durch die Ablagerung von Calciumsalzen. Sonst ist er perfekt erhalten.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 1, S. 33*

DIE ERSTE ELEKTRONISCHE ARMBANDUHR

»Ein britisch-schweizerisches Projekt zur Herstellung der ersten Armbanduhr ohne mechanisches Uhrwerk, bei denen die Zeitangabe ganz von elektronischen Schaltvorgängen abhängt, trat jetzt in das Entwicklungsstadium ein. [Die Uhr] hat nichts, was beschädigt werden kann, da die Schaltung in Hartkunststoff eingebettet ist. Mehrere Schlitze bilden die »Zeiger«, wovon jeder einer Minutenstellung auf der Uhrvorderseite entspricht. Zwei Miniaturglühbirnen werfen ein diffuses Licht durch die entsprechenden Stunden- und Minutenschlitze.« *Neuheiten und Erfindungen 396, S. 12*

Spektrum PLUS⁺

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

SPEKTRUM LIVE-VERANSTALTUNG

Schokolade

Kulinarische Phasen zwischen harter und weicher Materie

Frankfurt, 3. April 2020

UNSPASH / NICOLAS UKRMAN (<https://unsplash.com/photos/dz20HRfwsg>)

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

- | | |
|--------------------|---|
| 31. 1. 2020 | Führung durch das Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie mit Themenschwerpunkt Goldforschung, Mannheim |
| 10. 2. 2020 | Redaktionsbesuch Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg |
| 14. 2. 2020 | Kuratorenführung durch die Sonderausstellung »Javagold« in den Reiss-Engelhorn-Museen, Mannheim |
| 9. 3. 2020 | Leserexkursion zum Haus der Astronomie, Heidelberg |
| 8. 5. 2020 | Leserexkursion zum Radioteleskop Effelsberg |

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte **Veranstaltungen von Partnern** zum **Vorteilspreis**

- | | |
|------------------------|---|
| 16. 1. 2020 | Spektrum LIVE-Vortrag »Higgs und nix? Was die Physik auf den kleinsten Skalen macht«, Heidelberg |
| 13.–15. 3. 2020 | Symposium »Wo sitzt der Geist? Von Leib und Seele zur erweiterten Kognition«, Nürnberg |
| 20. 3. 2020 | Spektrum LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Östringen |
| 3. 4. 2020 | Spektrum LIVE-Veranstaltung »Schokolade: Kulinarische Phasen zwischen harter und weicher Materie«, Frankfurt |
| 24. 4. 2020 | Spektrum Schreibwerkstatt, Heidelberg |
| 19. 6. 2020 | Spektrum Schreibwerkstatt, Heidelberg |

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im Januar: **Spektrum** Kompakt »Wunderwelt der Pflanzen«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Leserreisen

Islands faszinierende Geologie im August 2020 mit Mol Reisen
Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours.de
travel-to-nature Reisen nach **Namibia**, **Peru** oder **Costa Rica** zum **Vorteilspreis**
Einkaufsgutschein für den **Spektrum**-Shop bei Buchung der **Chile**-, der **Polarlicht**- oder der **Mexikoreise** von Wittmann Travel e. K

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

REZENSIONEN



Thomas Schauer,
Stefan Caspari
**ÜBERLEBENS-
KÜNSTLER**
50 außergewöhnliche
Alpenpflanzen
Haupt, Bern 2019
255 S., € 34,-



BOTANIK SURVIVAL-EXPERTEN IM HOCHGEBIRGE

Von Enzian bis Silberwurz stellen zwei Autoren die überaus widerstandsfähige Flora der Alpen vor.

▶ Alpenpflanzen sind außergewöhnlich, sie müssen mit extremen Widrigkeiten und Gefahren zurechtkommen: Kälte, Stürme, lange währernde Schneebedeckung, intensive Sonneneinstrahlung, sommerliche Hitze mit kurz darauf folgendem nächtlichem Frost, Nährstoff- und Wassermangel, karge Böden. Trotzdem – oder deshalb – haben sie in einem langen Evolutionsprozess erstaunlich viele Überlebenskünstler hervorgebracht. Der Vegetationskundler Thomas Schauer und der Illustrator Stefan Caspari widmen dieses aufwändig gestaltete Buch der ganz besonderen Alpenflora, was ihnen, das sei vorweggenommen, sehr gut gelungen ist.

Der Pflanzenreichtum in den Alpen ist erstaunlich, wenn man bedenkt, wie häufig die Gewächse lebensfeindliche Klima- und Vegetationsperioden überstehen mussten und – von Zufluchtsräumen aus – in relativ kurzer Zeit die Wiederbesiedlung des Alpenraums nach dem letzteiszeitlichen Maximum schafften. Möglich wurde dies durch besondere Merkmale, etwa Fotosyntheseaktivitäten bereits ab minus fünf Grad Celsius, ein vier- bis fünfmal größeres Feinwurzelsystem als bei Talpflanzen, Symbiosen mit Pilzen und Bakterien, ein Leben als Schmarotzer oder Halbschmarotzer, ungeschlechtliche Vermehrung, winzige Spaltöffnungen, sukkulente Blätter, filzige Behaarung und besondere Anpassungsformen wie Polster- und Spalierwuchs.

Die Flora der Alpen bildet eine »multikulturelle Vergesellschaftung« von Pflanzenarten, die aus vielen Ländern und mehreren Kontinenten stammen. Jede Gebirgspflanzenart hat in ihrem Lebensraum mit spezifischen bedrohlichen Einwirkungen zu kämpfen, und jede Art hat darauf zugeschnittene Strategien entwickelt. Die Autoren beschreiben und illustrieren

anhand von 50 Spezies aus hoch gelegenen Lebensräumen die vielen Möglichkeiten, unter extremen Bedingungen zu überleben – manche davon sind bis jetzt nur ansatzweise erforscht.

Nach einleitenden Hinweisen zur Geschichte der Alpenflora mit ihren vielfältigen Lebensräumen gliedert sich das Buch in elf große Kapitel, in denen, gruppiert nach Habitaten, Lebensformen und Vermehrungsarten, deren jeweils wichtigste Pflanzenarten vorgestellt werden. »Vom Menschen genutzte Alpenpflanzen« und »Flechten«, die als Lebensgemeinschaften von Pilzen und Algen keine Pflanzen im eigentlichen Sinn darstellen, ergänzen die Ausführungen.

Exemplarisch sei das am »Lebensraum Pionierstandorte« dargestellt. Die Autoren nennen hier nach einer allgemeinen, bebilderten Beschreibung des Habitats elf typische Spezies, darunter Silberwurz und Schnee-Enzian, und deren grundsätzliche Strategien (Wachsschicht, Pfahlwurzeln, verdickte Cuticula, Spalierwuchs und so weiter). Es folgt eine ausführliche Vorstellung jeder einzelnen Art mit ihren wichtigsten Eigenschaften, ergänzt durch eine die typischen Merkmale betonende farbige Zeichnung und mehrere Fotos. Die Überlebensstrategien werden – im Text farblich hervorgehoben – besonders eingehend beleuchtet. Beim Blaugrünen Steinbrech sind dies die dicht geschlossene Oberfläche des Polsters, womit er zu den windhärtesten Alpenpflanzen gehört, eine kräftige Pfahlwurzel, eine dicke Oberhaut und Kalkdrüsen, mit denen er – als Bewohner kalkreicher Standorte – das aufgenommene kalkreiche Wasser wieder ausscheidet und daraus eine Blattkruste bildet, die gegen starke Sonneneinstrahlung schützt und der Pflanze ihre blaugrüne Farbe verleiht.

Vom Menschen genutzte Alpenpflanzen, darunter verschiedene Enziane, Speik, Seifenkraut und Edelweiß, erscheinen in dem Buch mit ihren allgemeinen und nutzbaren Eigenschaften, ebenso mit ihren Gefährdungen durch Klimawandel und Übernutzung, die in vielen Regionen

Das Zwerg-Seifenkraut (*Saponaria pumila*) kommt in den Ostalpen vor und bevorzugt nährstoffarme Böden. Es entwickelt bis zu zehn Zentimeter hohe Polster mit prächtigen, purpurfarbenen Blüten.

bereits zu starker Dezimierung geführt haben. Pflückverbote oder Nutzungsschonzeiten sind für ihr Überleben ausschlaggebend. Das Kapitel über Flechten beleuchtet an drei Beispielen deren besondere Überlebensstrategie: das Ausharren in vermeintlich lebloser Kälte- und Trockenstarre über lange Zeiten hinweg. Zur Sprache kommt auch ihre Fähigkeit, auf jedem Substrat von Erde über Fels bis Rinde zu gedeihen.

Ein ergiebiges Glossar, Literaturhinweise und ein Pflanzenregister beschließen das hervorragend gestaltete Buch, das in gut lesbarer und klar verständlicher Form ein sehr umfangreiches botanisches Wissen über Alpenpflanzen vermittelt. Überaus sachkundig und mit spürbarer Begeisterung für die Alpenflora haben die beiden Autoren ein botanisches Lese-, Lehr- und Nachschlagewerk mit hohem Genussfaktor geschaffen.

Der Rezensent Gerfried Pongratz ist Phytopathologe und Yakzüchter in Osterwitz bei Deutschlandsberg (Österreich).

MATHEMATIK FALTPOLYEDER AUS PAPIER

Ein gelernter Buchbinder verrät, wie sich geometrische Körper sehr einfach durch Papierfalten herstellen lassen.

Das Wort Papierfalten wird heute meist japanisch ausgesprochen: Origami. Das ist die traditionsreiche Kunst, aus einem einzigen quadratischen Blatt Papier die unglaublichsten Formen herzustellen. Schere und Klebstoff sind ebenso tabu wie zeichnerische Hilfsmittel. Man findet sämtliche neuen Faltnetze nur mit Hilfe bereits vorgenommener Faltungen. In jüngerer Zeit haben Mathematiker das Origami als geometrische Konstruktionsmethode entdeckt und festgestellt, dass man durch fortgesetztes Falten sogar mehr Punkte finden kann als mit Zirkel und Lineal (**Spektrum** September 2015, S. 64).

Wenn es darüber hinaus um regelmäßige räumliche Körper geht, beste-

hen auch die Puristen nicht mehr darauf, das ganze Ding aus einem einzigen Blatt zu machen. Vielmehr falten sie aus einem Quadrat ein »Modul«, das heißt ein Teilstück des Körpers. Da das Endprodukt sehr regelmäßig ist, genügt es, ein oder allenfalls zwei verschiedene Module in großen Stückzahlen zu fertigen und dann ineinanderzustecken. Damit das ohne Klebstoff zusammenhält, müssen die Module mit Laschen und Taschen ausgestattet sein, also mit vorspringenden Teilen und Hohlräumen, in die man Erstere einschieben kann. Das erfordert einen gewissen Faltaufwand. Modulares Origami hat es auch außerhalb Japans zu großer Beliebtheit gebracht; das Internet bietet eine Fülle von Bildern der raffiniertesten Kreationen samt Bauanleitungen.

Auf den ersten Blick sehen die Faltpolyeder des vorliegenden Buchs wie modulares Origami aus. Aber das stimmt nicht so ganz. Ja, auch der Autor Alexander Heinz setzt seine Polyeder aus Modulen zusammen; und ja, man muss sich mit dem Gedanken anfreunden, dass das Wichtigste an einem Polyeder nicht unbedingt die Seitenflächen sind – etwas gewöhnungsbedürftig, denn die ebenen Seitenflächen sind die definierende Eigenschaft eines solchen Körpers. Auch bei manchen modularen Origami-Polyedern sind nur die Ecken und vielleicht die Kanten ausgeführt, was eine durchbrochene Struktur mit eigenem ästhetischen Reiz ergibt.

Aber im Gegensatz zu den anspruchsvollen Papierkünstlern setzt Heinz auf radikale Einfachheit. Eines seiner Module besteht aus zwei gleich großen Quadraten, Mittelpunkt auf Mittelpunkt gelegt und gegeneinander um 45 Grad verdreht. Heinz nennt sie Ross und Reiter, denn das obere

Ross und Reiter ergeben eine Ecke im fertig gefalteten Körper

Quadrat umklammert das untere, indem man seine überstehenden Ecken um das untere faltet, so wie der Reiter seine Füße um das Pferd – na ja, der Vergleich hinkt ein wenig. Nun faltet man noch Ross und Reiter entlang der gemeinsamen Symmetrielinien abwechselnd auf- und abwärts, und fertig ist das Modul. Jedes von ihnen vertritt eine Ecke im fertigen Körper.

Ross und Reiter müssen Vielecke mit so vielen Seiten sein, wie von der zugehörigen Ecke Kanten ausgehen. Daher eignet sich das Modul aus zwei Quadraten zum Beispiel für das Oktaeder. Für Tetraeder, Würfel und Dodekaeder, in deren Ecken sich jeweils drei Kanten treffen, sind Module aus zwei Dreiecken angesagt. Und schon weicht die Form des Rohmaterials vom japanischen Reinheitsgebot ab; für Polyeder, in deren Ecken noch mehr Kanten zusammenlaufen, müssen es Fünf-, Sechs- oder Achtecke sein.

Die Ecken des Moduls sind Laschen und Taschen zugleich: Man setzt den fertigen Körper zusammen, indem man eine – mittig gefaltete – Ecke vom Ross zwischen Ross und Reiter vom Nachbarmodul schiebt. Das hält ziemlich gut; nur für die kompliziertesten Modelle empfiehlt der Autor einen Tropfen Klebstoff, um dem Zusammenhalt nachzuhelfen.

Bei einem Polyeder ist die Summe aller flächeninternen Winkel, die einer Ecke anliegen, stets kleiner als 360 Grad (sonst wäre es keine Ecke). Das Papierstück hat aber rund um seinen Mittelpunkt genau 360 Grad und damit einen Winkelüberschuss, den man durch geeignetes Falten aus dem Weg schaffen muss. Das gelingt ohne Weiteres bei den stumpfen Ecken von Ikosaeder und Dodekaeder, gerade noch beim Oktaeder und nur mit zusätzlichen Faltungen bei Würfel und Tetraeder. Ausgerechnet die einfachsten platonischen Körper erfordern daher noch spezielle Tricks.



Alexander Heinz, gelernter Buchbinder und vielseitiger Geometrie-Künstler, präsentiert uns in seinem Buch reichlich 50 Polyeder, darunter die üblichen Verdächtigen wie platonische und archimedische Körper, die er nicht nur sämtlich selbst gebaut, sondern auch fotografiert und mit ausführlichen Anleitungen versehen hat. Insgesamt ist aus der vielen Arbeit ein überaus ansprechendes Werk geworden.

Jedem Modell hat der Autor eine Schätzung für den Zeitaufwand beigegeben, die mir nach eigenen Versuchen recht realistisch erscheint. Demnach wäre mehrere hundert Stunden beschäftigt, wer das ganze Sortiment nachbauen wollte. Für Menschen wie mich, die schon für ein einziges Objekt des klassischen modularen Origami nicht genug Geduld aufbringen, sind eher die letzten Seiten interessant. Dort gibt der Autor Anregungen, wie man die Module als verallgemeinerte Bauklötze nutzen kann, um mit wenig Aufwand neue, noch unbeschriebene Objekte herzustellen.

Der Rezensent Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war lange Jahre Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

LINGUISTIK LESEVERGNÜGEN MIT GERINGER HALBWERTSZEIT

Journalist Rolf Kiesendahl nimmt Sprachwendungen unter die Lupe, gibt sich allerdings oft zu schnell zufrieden.

Was macht Sprachbeherrschung aus? Spontan würde man antworten: akzentfreie Aussprache, korrekte Grammatik und ein möglichst umfangreicher Wortschatz. Manche Linguisten würden sagen, das sei es dann auch schon, und für alles andere brauche sich die Linguistik als Wissenschaft, die die Systemhaftigkeit der Sprache im Blick habe, nicht zu interessieren.

Doch kommt zumindest für praktische Zwecke noch eines hinzu, nämlich die Kenntnis von Redensarten.

Also etwa das Wissen darum, dass die »Nervensäge« auf Italienisch nicht Nerven sägt, sondern Schachteln zerbricht (rompiscatole). Oder dass ein mäßig intelligenter Zeitgenosse im Französischen nicht das Schießpulver,



sondern den Faden zum Schneiden der Butter nicht erfunden hat (il n'a pas inventé le fil à couper le beurre). Real existierende Sprachen verfügen über ein reiches Repertoire an Sprichwörtern, stehenden Metaphern, verfestigten Vergleichen – Wendungen, die sich eben nicht systematisieren lassen.

Einige dieser Wendungen sind selbsterklärend. Dass es beispielsweise mühsamer ist, dicke Bretter zu bohren als dünne, kann sich auch denken, wer keine Schreinerlehre gemacht hat. Andere Redensarten bezeugen längst aufgegebene kulturelle Praktiken: »Auf den Putz hauen« entstammt der Zeit der Ritterturniere, und mit dem »Putz« war die Helmzier gemeint. Es kann sich auch um gesunkenes Kulturgut handeln; der Stoßseufzer »Mein lieber Schwan!« etwa entfährt selbst Leuten, die keinerlei Affinität zu Wagner-Opern haben (in diesem Fall dem »Lohengrin«).

Bei manchen Ausdrücken wiederum lässt sich die Herkunft nicht mehr ermitteln, weil sie ihre Existenz einer einzigen, nicht mehr rekonstruierbaren Zufallssituation verdanken. »Ich habe fertig!« war schlicht falsches Deutsch, bis der öffentliche Wutausbruch eines gewissen Herrn Trapattoni es als Redensart im deutschen Sprachgebrauch etablierte – aber nicht immer laufen Kameras mit, wenn jemand sich so stilbildend empört. Warum ein

Debakel so heißt wie eine italienische Flasche (Fiasco), oder wieso man sich beruhigt zurücklehnen kann, wenn »Alles paletti!« gemeldet wird, hat sich jedenfalls bislang nicht zufrieden stellend klären lassen.

Mit derlei »Redewendungen und wo sie herkommen« beschäftigt sich der Journalist Rolf Kiesendahl in diesem Büchlein. Allerdings bleibt er die Aufklärung darüber, »wo sie herkommen«, oft schuldig. In dem ähnlich gestrickten Band »Mit Affenzahn über die Eselsbrücke« (siehe **Spektrum** Juli 2019, S. 89) hatte der Germanist Matthias Heine seine Leser immerhin mit gelegentlich überraschenden Beobachtungen entschädigt, wann und wo sich die jeweilige Redewendung erstmals nachweisen lässt. Rolf Kiesendahl dagegen gibt sich in seinem Werk schneller und manchmal wohl auch zu schnell zufrieden. Oft liefert er lediglich kurze Umschreibungen dazu, was die jeweiligen Redensarten bedeuten sollen. Diese sind zwar amüsant formuliert, manchmal aber auch etwas bemüht mit Beispielen aus der Tagespolitik hinterlegt. So verweist der Autor beim Stichwort »Griff ins Klo« auf Andrea Nahles' »Bätschi!«. Bei »Auf dem Holzweg sein« fällt ihm die vom Europäischen Gerichtshof kassierte Pkw-Maut ein, zu »Schuss in den Ofen« der Brexit. Solche Verweise bieten jenen, denen die Redensart geläufig ist, wenig bis nichts Neues.

Hätte man nicht erfahren, dass der Autor zum Hühnchen Zitronensoße schätzt (unter »Ich muss mit dir ein Hühnchen rupfen«) und zu Pfifferlingen Petersilie (unter »keinen Pfifferling wert«), wäre einem nichts Wesentliches entgangen. Liest man dann noch, vor dem Ankauf eines Gebrauchtwagens sei eine Probefahrt ratsam (unter »Die Katze im Sack kaufen«) und mit dem »Gelben vom Ei« sei der Dotter gemeint, dann liegt die Grenze zum Trivialen mindestens in Sichtweite.

Alles in allem ein Lesevergnügen mit leider nur geringer Halbwertszeit.

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

EVOLUTION AM URSPRUNG DES LEBENS

Welche Prozesse brachten den gemeinsamen Vorfahren aller heutigen Lebewesen hervor? Eine Hypothese.

Wie entstand das Leben auf der Erde? Dieses Buch stellt ein mögliches Szenario vor. Sein Verfasser Ulrich C. Schreiber arbeitet als Professor für Geologie an der Universität Duisburg-Essen und hat sich als Buchautor bereits einen Namen gemacht, etwa mit »Vulkane« (2011) und »Die Flucht der Ameisen« (2006). Gemeinsam mit Kolleg(inn)en befasst er sich seit Jahren mit dem Ursprung des Lebens, woraus verschiedene Experimente, Untersuchungen und Computeranalysen folgten. Insbesondere geht es um die Frage, wie sich LUCA gebildet haben könnte, der letzte gemeinsame Vorfahre (Last Universal Common Ancestor) aller irdischen Lebewesen, der sozusagen an der Wurzel des Stammbaums steht.

LUCA war nach heutigem Verständnis eine Zelle, die sich erstmals selbst erhalten und durch Teilung vermehren konnte. Höchstwahrscheinlich war sie

Entwickelten sich Proteine und RNA gemeinsam?

einfach aufgebaut, sonst hätte sie nicht in einer chemischen Evolution entstehen können. Was aber heißt »einfach«? Um eine Vorstellung davon zu vermitteln, holt Schreiber zunächst etwas aus und legt dar, wie heutige Zellen funktionieren. Das ist sinnvoll, denn ohne Kenntnis darüber, wie Zellen ihre genetischen Informationen auslesen und in Proteine umschreiben, ihre »Arbeitsmaschinen«, lässt sich dem Problem schwerlich beikommen; man sollte mit Begriffen wie Translation, Nukleinsäuren, Synthetase oder Ribosom vertraut sein. Schreiber scheint das bei seinem Publikum allerdings weitgehend vorauszusetzen:

Er verwendet solche Begriffe oft wie selbstverständlich und gibt seinen Lesern auch kein Glossar an die Hand. Die Lektüre erfordert daher entsprechende Vorkenntnisse.

Im Hinblick auf LUCA gilt es, ein schwieriges Rätsel zu lösen: Sie benötigte einerseits einen Träger ihrer genetischen Information – wahrscheinlich ein RNA-Molekül –, damit sie sich selbst erhalten und vervielfältigen konnte. Andererseits brauchte sie einen molekularen Apparat, um die Information auszulesen. Dessen Bauplan muss aber in der genetischen Information enthalten gewesen sein. Was war zuerst da: der Informationsträger oder der Ausleseapparat? Und woher kam der Bauplan? Das erscheint als kaum lösbares Henne-Ei-Problem.

Im Hauptteil des Werks stellt Schreiber seine Hypothese dazu vor. Zunächst postuliert er, tief reichende, wassergefüllte Spalten in der kontinentalen Erdkruste hätten geeignete Bedingungen für eine präbiotische Evolution geboten. Hier gab es hohe Drücke, hohe Temperaturen, große Mengen gelöster Gase und Minerale sowie Gesteinsoberflächen. Zudem, so der Autor, habe ab einigen hundert Meter Tiefe das im Wasser vorhandene CO₂ in überkritischem Zustand vorgelegen. In dieser Form verhalte es sich wie ein organisches Lösungsmittel, in dem sich unpolare organische Substanzen lösen lassen.

In Hohlräumen des Gesteins, postuliert Schreiber, habe sich das überkritische CO₂ gesammelt und so eine unpolare Phase neben dem polaren Lösungsmittel Wasser gebildet. Wiederkehrende Druckschwankungen, etwa infolge oberirdischer Ausbrüche von Geysiren, hätten dafür gesorgt, dass CO₂ immer wieder in die Gasphase überging. Experimente hätten belegt, dass unter diesen Bedingungen spontan Lipidvesikel entstehen, die Vorläufer der späteren Zellmembranen, und sich darin organische Moleküle anreichern. Zudem verknüpften sich Aminosäuren in einer solchen Umgebung von selbst zu Peptiden.

Schreiber ist davon überzeugt, dass es in dieser brodelnden Welt eine

gemeinsame Entwicklung von Proteinen und RNA gab. Das Bindeglied seien tRNAs gewesen – kleine RNA-Stücke, die Bindungen mit Aminosäuren eingehen, aber auch mit anderen RNAs wechselwirken. Die tRNAs hätten dafür gesorgt, dass RNA-Mole-



küle in Aminosäureketten umgeschrieben wurden – wie es noch in heutigen Zellen geschieht. Sie hätten aber auch den umgekehrten Weg ermöglicht: Reiheten sich Aminosäuren, die mit tRNAs verkoppelt waren, zufällig aneinander, dann ergaben die hintereinanderliegenden Basentriplets ihrer tRNAs eine Vorlage, an der (komplementäre) RNA-Stränge gebildet wurden. In diesen Strängen war die Reihenfolge der verketteten Aminosäuren gespeichert.

Die spontane Bildung von Aminosäureketten und RNAs könnte unablässig und in ständig neuen Variationen erfolgt sein. Als Ergebnis davon, so der Autor, sei irgendwann eine Molekülgruppe entstanden, die aus zwei tRNAs sowie zwei einfachen Proteinen bestand, welche jeweils eine der tRNAs mit einer Aminosäure beladen konnten. Zu der Gruppe habe weiterhin eine enzymatisch aktive RNA gehört sowie ein RNA-Molekül mit den Bauplänen der Gruppenmitglieder. Dieses Molekülensemble sei erstmals in der Lage gewesen, sich selbst zu erhalten und unbegrenzt zu vervielfältigen, und könnte sich später mit Lipidvesikeln und weiteren Proteinen zu LUCA vereinigt haben.

Schreiber betont, seine Hypothese umgehe einige Probleme von bisherigen Modellen der Lebensentstehung, die er separat vorstellt. So dürften die

wassergefüllten Spaltensysteme in der Erdkruste langlebiger gewesen sein als die heißen Tiefseequellen der »Black Smoker« und einer chemischen Evolution somit mehr Zeit gelassen haben. Auch habe ihr überkritisches CO₂ unpolare Substanzen lösen können sowie für niedrige pH-Werte gesorgt, was unter anderem wichtig für die Stabilität von RNA-Molekülen ist. Ferner waren sie vor der intensiven UV-Strahlung der jungen Sonne geschützt.

Das Buch ist ein interessanter Beitrag zur Debatte. Schreibers These, die sich auf empirische Befunde stützt, ist spannend, wenn auch nicht mehr ganz neu, wie aus den Literaturverweisen hervorgeht. In eingeschobenen Kästen bringt der Autor weiterführende Informationen unter, etwa zu tektonischen Störungen oder chemischen Syntheseverfahren. Begleitende Grafiken fördern das Verständnis. Am Ende jedes Kapitels listet Schreiber einschlägige Literatur auf; hier erscheinen auch seine eigenen Fachartikel. Leser(inne)n, die molekulare Szenarien zur Lebensentstehung faszinierend finden, lässt sich das Werk empfehlen – sie sollten allerdings Vorwissen mitbringen.

Der Rezensent Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

ARCHÄOLOGIE MÜLL ALS KULTURDENKMAL

Was Raumfahrt-Artefakte über die Geschichte der Menschheit verraten.

► Archäologen graben in der Erde, um die Spuren alter Kulturen zu entdecken: So sieht das landläufige Bild von diesem Beruf aus. Das ist zwar nicht falsch, inzwischen gibt es allerdings auch weit über unseren Köpfen diverse archäologische Artefakte. Dazu gehören Forschungsgeräte, Flaggen und andere Dinge, die auf der Oberfläche des Mondes zurückgelassen wurden, aber auch längst nicht mehr funktionierende Satelliten, abgestoßene Raketenteile sowie Elon

Weltraummüll ist ein materielles Zeugnis unserer Epoche

Musks roter Tesla in der Erdumlaufbahn. Für viele ist das einfach bloß Weltraummüll, denn mit jedem weiteren Objekt, das im Orbit kreist, verdichtet sich die Trümmerwolke, die den noch funktionierenden Sonden, Satelliten und nicht zuletzt der Besatzung von Raumfahrzeugen gefährlich werden kann.

Doch was für die einen schlicht Müll ist, präsentiert sich den Archäologen als materielle Kultur einer ganzen Epoche – in diesem Fall des Weltraumzeitalters, welches bis heute andauert. Es begann in den 1940er Jahren mit der Erfindung der V2, des ersten Flugkörpers, der in die Lage war, in die Stratosphäre einzutreten, und mündete später in einen Wettlauf zum Mond, einen der kostspieligsten ideologischen Wettkämpfe zwischen den Parteien des Kalten Kriegs.

Die Autorin dieses englischsprachigen Buchs, Alice Gorman, beschloss als Kind, Astronautin zu werden, nachdem sie die Liveübertragung der Apollo-11-Mondlandung gesehen hatte. Einige Jahre später musste sie allerdings feststellen, dass die Welt – zumindest in ihrem direkten Umfeld – dafür noch nicht bereit war. Trotz guter Noten in Physik, Mathematik und Naturwissenschaften gab es sozialen Druck dahingehend, dass sie nicht Astrophysik studieren sollte. Also widmete sich Gorman ihrer anderen Leidenschaft, der Archäologie. Der Weltraum und seine vielen Rätsel ließen sie jedoch nie ganz los. Seit Jahren erforscht sie daher die Geschichte und Archäologie des Weltraumzeitalters. Ihr ungewöhnliches Interesse brachte der Australierin den Spitznamen Dr. Space Junk (Dr. Weltraummüll) ein.

Gorman erzählt die Geschichte der Weltraumexploration anhand materieller Hinterlassenschaften und eröffnet damit eine ganz neue Perspektive auf die menschliche Präsenz außerhalb unseres Heimatplaneten. Die verschie-

denen Kapitel widmen sich unter anderem der Erdumlaufbahn, dem Mond, Raumsonden wie Voyager und New Horizons und der Zukunft der Weltraumforschung. Abschnitt für Abschnitt erklärt sie, wie die Überbleibsel von Weltraummissionen dabei helfen, eine Politik-, Kultur- und Technikgeschichte zu rekonstruieren. Dabei widmet sie sich nicht nur den Aktivitäten der großen Raumfahrtmissionen, sondern auch jenen Menschen, die ganz ohne politische Agenda von der Eroberung des Weltraums



träum(t)en – zum Beispiel den privaten Vereinen, die in den 1960er Jahren selbst gebaute Satelliten ins All schickten.

Nicht alle Artefakte der Weltraumarchäologie befinden sich in der Umlaufbahn, auf dem Mond oder wie die Voyager-Sonden unerreichbar weit weg. Viele sind hier auf der Erde, beispielsweise auf dem ehemaligen Raketentestgelände Woomera in Südaustralien. Diese Überbleibsel zeugen davon, wie sich die Weltraumforschung vom Wettstreit der Blöcke hin zur internationalen Zusammenarbeit entwickelte, aber auch davon, woher viele scheinbare Selbstverständlichkeiten unseres heutigen Lebens stammen – vom Satellitenfernsehen bis zur Wetter-App auf dem Smartphone. Ohne die Gefahr des Weltraummülls kleinzureden, plädiert das Buch letztlich auch für dessen Erhaltung als kulturelles Erbe der Menschheit.

Die Rezensentin Luise Loges arbeitet als Wissenschaftsjournalistin sowie Übersetzerin und promoviert derzeit im Fach Vorderasiatische Archäologie in Glasgow, Schottland.

VORARBEITEN BLEIBEN UNERWÄHNT

Die Altorientalistin und Wissenschaftsjournalistin Luise Loges berichtete davon, wie Rückstände in fast 14000 Jahre alten Steinbottichen Hinweise auf frühes Bierbrauen liefern. (»Wo wurde das Bier erfunden?«, *Spektrum* November 2019, S. 74)

Olaf Lezinsky, Berlin: Mit Unverständnis habe ich zur Kenntnis genommen, dass der Artikel ohne die Behandlung der spannendsten Frage auskommt, die seit einigen Jahren – vor allem nach der Veröffentlichung von Josef H. Reichhofs Buch »Warum die Menschen sesshaft wurden« von 2008 – in der Diskussion ist: War es die Kultivierung von bereits bekannten, stärkehaltigen Pflanzen zum Zweck der Vergärung und zur Gewinnung von alkoholhaltigen Getränken, die quasi nebenbei zur »Entdeckung« von Brotgetreide geführt hat? Da hatten die Menschen ja einen Grund, zu selektieren. Die angenehme Wirkung kannte man, während man vom Brot nichts ahnen konnte. Man könnte sich dann auch die Frage stellen, inwieweit die Prozesse aufeinander rückwirkten.

Selbst wenn man diese wichtige Frage nicht mit einbezieht, dann hätte man die fundamentalen Arbeiten von Patrick E. McGovern bei der Analyse und Entdeckung von allen möglichen Formen von Alkohol in archäologischen Funden erwähnen müssen. (»Uncorking the past: The quest for wine, beer, and other alcoholic beverages«, 2009). In dem Artikel von Frau Loges sieht es aus, als wären die analytischen Methoden und Erkenntnisse neu. Die Redaktion sollte beim Redigieren darauf achten, dass sich die jeweilige Szene nicht nur selbst feiert.

SUBJEKTIVE WAHRSCHEINLICHKEITEN

In einem mathematischen Gedankenexperiment wird Dornröschen geweckt und vor ihr verborgen eine faire Münze geworfen. Je nach Ausgang des Wurfs wird sie wieder in einen – ihre Erinnerung löschenden – Schlaf versetzt oder nicht. Wie wird sie nach dem Aufwachen die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse beurteilen? (»Dornröschen und die Wahrscheinlichkeitsrechnung«, Mathematische Unterhaltungen, *Spektrum* November 2019, S. 80)

Die Dornröschen-Kontroverse hat auch unter unseren Lesern ungewöhnlich viele Reaktionen ausgelöst, bei denen es vor allem um den Begriff der subjektiven Wahrscheinlichkeit ging. Hier eine zusammenfassende Antwort des Autors Christoph Pöppe:

In der Schule gelten die Wahrscheinlichkeiten elementarer Ereignisse als naturgegeben oder, wenn schon nicht durch die Natur, dann durch ein mathematisches Modell festge-

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. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

legt. Das gilt insbesondere für das Ergebnis des Münzwurfs, der das fiktive Experiment eröffnet. Auch Dornröschen, die Versuchsperson, die je nachdem, ob Kopf oder Zahl herauskommt, ein- beziehungsweise zweimal geweckt, befragt und mit einer Vergessensdroge wieder schlafen gelegt wird, zweifelt nicht daran, dass die Münze mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 1/2 Kopf oder Zahl zeigt.

Nur: Genau danach wird sie nicht gefragt! Vielmehr geht es um das Konzept von Wahrscheinlichkeit, das mit dem Namen des Pfarrers und Mathematikers Thomas Bayes (1702–1761) verknüpft ist (*Spektrum* Oktober 2011, S. 70). Demnach trifft eine Aussage wie »Wahrscheinlich guckt wieder kein Schwein!« keine Feststellung über die naturgegebene Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Schwein die gegenwärtige Situation beobachtet, sondern über die Sicherheit, mit welcher der Aussagende glaubt, solches annehmen zu können. Insbesondere kann es für Ereignisse, die längst stattgefunden haben, eine subjektive Wahrscheinlichkeit geben. Diese spiegelt die unvollständige Information des Subjekts über das Ereignis wider.

Ist in dem Originalexperiment die bloße Tatsache, dass Dornröschen aufgeweckt worden ist, eine solche Zusatzinformation? Ja, aber mit dem umgekehrten Vorzeichen. Sie verliert Information, nämlich die, dass sie mit Sicherheit nicht schon einmal geweckt und mit der Vergessensdroge wieder schlafen gelegt wurde. Was einem nur schwer in den Kopf geht, ist, dass ein Verlust an Information dieselben Folgen haben kann wie ein Gewinn.

Mehrere Leser haben auch vermerkt, dass Dornröschen mit ihren subjektiven Einschätzungen genau dann richtig liegt, wenn sie sich bei einer Wette auf den Ausgang des Münzwurfs (»Bei Kopf gewinnst du einen Taler, bei Zahl verlierst du einen Taler; wie viel müsstest du mir vorab geben, damit du dich auf diese Wette einlässt?«) nicht über den Tisch ziehen lässt. Die Verknüpfung mit der Maximierung des eigenen Nutzens ist es, die bei dem berühmten Ziegenproblem zum Ziel führt – und beim Dornröschen-Problem auch.



Das Rätsel setzt auf Münzen statt Prinzen.

Unsere Sonderhefte!



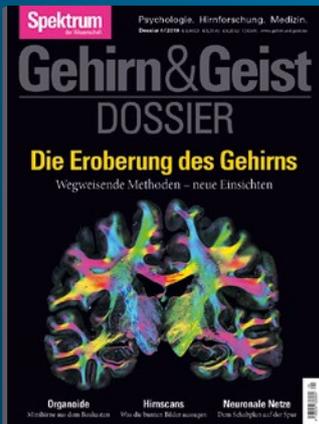
Festkörper: Topologische Materialien
 • Materialwissenschaft: Zweidimensionale Revolution • Bildgebung: Zeitenwende in der Mikroskopie • Teilchenphysik: Extreme Atome • Biomimetik: Die Natur als Vorbild • € 8,90



Kommunikation: Der Ursprung der Sprache • Steinzeit: Wie sich *Homo sapiens* durchsetzte • Aggression: Die Erfindung des Krieges • Genetik: Per DNA-Verlust zum Menschen • Bewusstsein: Das schwierigste Problem • € 8,90



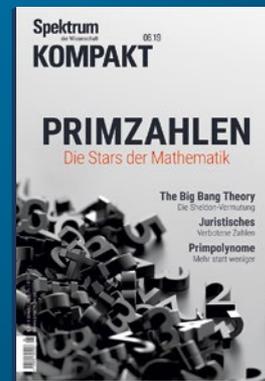
Universelle Gesetze: Zentraler Grenzwertsatz und Zufallsmatrizen • Superlative: Sportliche Höchstleistungen und Hitzewellen • Fehlschlüsse: Missbrauch des p-Werts und mangelnde Reproduzierbarkeit • € 8,90



Per Tollwut in die Denzentrale • Hirnkarte: Jobverteilung im Gehirn • Ein Strichcode für Neurone • Konnektomforschung: Die Entschlüsselung des Geistes • Neuroimaging: Monster-Scanner in Aktion • Was Hirnscans aussagen • € 8,90



Organoide: Minigehirne aus dem Labor • Drainage: Nächtliche Gehirnwäsche • Plastizität: Das Gehirn neu verdrahten • Schlaf: Warum träumen wir? • Bewusstsein: Wie frei ist der Mensch? • € 8,90



The Big Bang Theory: Die Sheldon-Vermutung • Juristisches: Rechtswidrige Primzahlen und das Urheberrecht an Pi • Primpolynome: Mehr statt weniger • € 5,90

Bestellmöglichkeit für diese und weitere Sonderhefte:
 service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/shop

Alle Sonderhefte auch im PDF-Format

Ein siegreicher Zweikampf

Das Ergebnis war einerseits logisch.
Eine Kurzgeschichte von Gretchen Tessmer

Daniel war kein Autobot wie Optimus Prime – oder was auch immer die Jungs sich ausmalten, als wir endlich anfangen, Kampfroboter zu bauen. Und ich war auch kein weiblicher Dr. Frankenstein, obwohl der Name an mir klebte, seit die Medien damit herumwarfen.

Mir war das herzlich egal. Wir alle brauchen einen Vergleichsmaßstab. Etwas Vertrautes, um die Gegenwart mit der Vergangenheit zu verbinden, um uns zu orientieren, wenn die Welt in Stücke fällt.

Jedenfalls zog sich der Krieg nun schon ewig hin. Alle waren müde. Diese blinde Wut von der Sorte, die jede Ähnlichkeit zwischen den zankenden Parteien leugnet, bloß Schwarz und Weiß kennt und all den grauen Zwischenraum ignoriert ... so etwas lässt sich selbst dann nur schwer aufrechterhalten, wenn man darauf programmiert ist. Falsche Logik erzeugt fehlerhafte Maschinen.

Am Ende nahmen wir uns eine antike Sage zum Vorbild und beschlossen, unsere hochmodernen Differenzen auf altmodische Art zu klären: Zweikampf! Dem Sieger die Beute! Sie bauten sich ihren Einzelkämpfer, und ich schuf den unseren. Mein Daniel war die ideale Verkörperung des weißen Ritters, 50 Meter groß, mit einem Harnisch aus Titanlegierung und einem gigantischen Waffenarsenal, das von neuester Technik bis zu antiken Relikten reichte. Als Tribut an Homers Achilles platzierte ich die Quelle von Daniels Kraftfelds in einen mit Kupfer beschichteten Schild, den er auf dem Rücken trug.

Als ich den Jungs und Mädels vom Verteidigungsministerium das fertige Produkt zeigte, waren sie sprachlos – und zwar im guten Sinn. Doch bald wollten sie noch mehr. Daniel sollte Gefühle haben. Darauf bestanden sie.

»Wenn Daniel sich nicht über seinen Sieg freuen kann, wie sollen wir ihn dann feiern?«, sagten sie, als wäre das Ergebnis bereits sonnenklar.

Ich wies auf die Risiken hin. Ich erklärte ihnen, wozu so etwas führen kann. Aber sie hörten mir nicht zu.

»Du musst das unbedingt verstehen«, betonten sie und erinnerten mich immer und immer wieder, dass ihnen der Ausgang dieses Wettkampfs alles bedeutete. Tatsächlich vergaß ich allzu leicht, was auf dem Spiel stand, denn meine Gedanken waren durch die Tatsache abgelenkt, dass Roger, Veronica und mein Vater tot waren und – ob Sieg, Niederlage oder Unentschieden – nicht wiederkamen. Meine Familie war für immer verloren.

Eine derartige Ablenkung lässt sich nur schwer aus dem Gedächtnis tilgen.

Aber die für Verteidigung zuständigen Teams kannten kein Pardon. »Die andere Seite muss verlieren. Egal, was passiert, Lucy, sie müssen unterliegen.«

Ich liebte Daniel nicht (ehrlich gesagt, liebte ich überhaupt niemanden mehr), aber er verehrte mich. Ich war seine Mutter, er sehnte sich nach meiner Führung und lechzte nach meinem Lob. Somit waren die Frankenstein-Witze zwar nicht besonders originell, trafen jedoch durchaus zu.

Am Tag vor dem Kampf verlötete ich gerade die Panzerung seiner linken Hand, als er mich fragte: »Lucy, warum ist es so wichtig, dass wir gewinnen und sie verlieren?«

»Falsche Logik«, murmelte ich, mehr zu mir als zu Daniel. Ich hielt es für besser, den Mund zu halten. Roger hatte mich immer gebeten, still zu sein. Du kannst eine Flutwelle anschreien, Lucy, aber sie wird dich trotzdem verschlingen. Und mein Vater: Nicht alle Schlachten werden dort geschlagen, wo wir sie sehen können.

»Die andere Seite muss verlieren. Egal, was passiert, Lucy, sie müssen unterliegen«

Daniel wartete; er hoffte geduldig auf eine Antwort. Mein sanfter Riese drängte mich nie, er wartete immer nur ab. Also tat ich ihm den Gefallen und gebrauchte mit belegter Stimme dieselben Worte wie einst Veronica, mein kluges kleines Mädchen, nachdem ich sie gefragt hatte, warum sie sich beim Gewitter unter dem Bett versteckte, obwohl sie wusste, dass das Unwetter kilometerweit entfernt blitzte und donnerte: »Weil es schwer ist, auf die richtige Art tapfer zu sein.«

Natürlich war der gegnerische Kampfroboter größer. Ist das nicht typisch?

Sobald der Trompetenstoß den Beginn des Wettkampfs ankündigte, zog Daniel sein Schwert. Erst schwang er es anmutig und kraftvoll empor, doch plötzlich stach er damit fest abwärts und versenkte die Klinge tief im Sand der Arena. Dann kniete er vor seinem Herausforderer nieder und sprach: »Heute kann nichts Gutes entschieden werden.«

Der Gegner lachte nicht. Darauf war er nicht programmiert. Aber seine Leute jubelten, und auf ihrer Seite der

Arena erhob sich ein ohrenbetäubendes Siegesgeschrei. Unsere Seite antwortete mit Zischlauten und empörten Rufen. Blitzschnell kochte die altbekannte Wut hoch, und um ein Haar wäre wieder genau jene Gewalt ausgebrochen, die dieser Zweikampf eigentlich vermeiden sollte.

Ich weinte. Nicht, weil uns die Niederlage drohte. Nicht, weil unser Plan gescheitert war. Und auch nicht, weil ich wusste, was Daniel als Nächstes tun würde. Ob er Gefühle besaß oder nicht, er war auf einen bestimmten Zweck hin programmiert. Und das Ziel seines Programms war nun einmal, dass die andere Seite um jeden Preis verlieren musste.

Nein, ich weinte, weil ich wusste, wie es sich anfühlt, wenn man die Menschen enttäuscht, die man liebt. Und schlimmer: wenn man nicht fähig ist, sie zu retten. Weder hatte ich meinen Vater vor dem Altwerden gerettet noch Roger vor der Willkür des Kriegsrechts oder Veronica vor der Tragik des Kollateralschadens.

Als ich beobachtete, wie Daniel zögerte, wusste ich, dass er dasselbe fühlte. Während der Herausforderer schon zum tödlichen Schlag ausholte, suchte Daniels Blick mein Gesicht in der Menge. Das hätte er nicht tun sollen, aber falsche Logik erzeugt fehlerhafte Maschinen. Er wartete auf meine Erlaubnis. Ich zuckte weinend mit den Achseln, wie immer meiner Sache nicht sicher.

Also traf er die Entscheidung und riss die Panzerung seiner linken Hand ab, so dass darunter der tödliche Auslöser sichtbar wurde. Ein Knopfdruck würde Daniel zusammen mit fast jedem und allem im Umkreis von 25 Kilometern vernichten. Zu spät schrien die Jungs und Mädels vom Ministerium der Verteidigung ihre Warnungen und flehten »Um Gottes willen, halt!«. Aber ich weiß eigentlich gar nicht, warum sie so sehr dagegen waren.

Die andere Seite verlor doch ganz eindeutig. Und bitte sehr – hatten sie das nicht alle unbedingt gewollt? ◀

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 571, S. 292, 2019

DIE AUTORIN

Gretchen Tessmer arbeitet als Anwältin im Norden des US-Bundesstaats New York. Ihre Sciencefiction-Stories sind unter anderem in »Martian«, »Strange Horizons« und »Daily Science Fiction« erschienen.

Spektrum

der Wissenschaft

Chefredakteur: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang;
E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Katharina Boehm, Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Katja Mellenthin, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith,
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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de,
Tel.: 06221 9126-741

Einem Teil dieser Ausgabe liegt das Klartext-Magazin der Klaus Tschira Stiftung bei.

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 41 vom 1.1. 2020.

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 ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form 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: © 2019 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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
Acting Editor in Chief: Curtis Brainard, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President Magazines: Stephen Pincock



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU

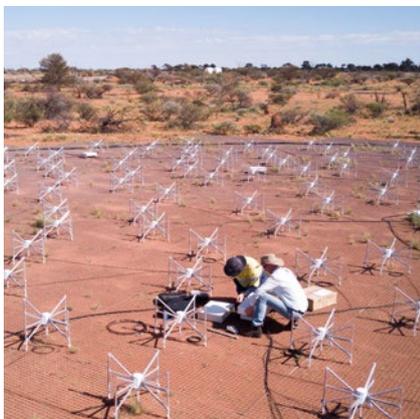


NEUE SERIE

KOPF: YODIWA / GETTY IMAGES / ISTOCK; HINTERGRUND: HELNY / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

DAS MENSCHLICHE GEHIRN

Unser Denkorgan gehört zu den größten Rätseln der Biologie. Wie kann eine drei Pfund schwere, fettige Masse Bewusstsein erzeugen? Nach welchem Schaltplan funktioniert die lebende Datenverarbeitungsanlage? Und was passiert, wenn man in dieses komplexe Netzwerk eingreift? Unsere neue Serie bietet Einblicke in ein faszinierendes Organ.



MWA COLLABORATION & CURTIS UNIVERSITY

SIGNAL VOM JUNGEN ALL

In der Strahlung der Wasserstoffatome aus den ersten paar hundert Millionen Jahren des Universums stecken Informationen über die frühesten Strukturen. Geschwächt von der Expansion des Alls, schien sie lange unmessbar. Doch nun wollen Astronomen mit spezialisierten Radioteleskopen ein Babytagebuch des Kosmos erstellen.



TAMARA WOLCZEWSKI

WOLKIGE PROGNOSEN

Warum weichen auch gute Klimamodelle immer noch voneinander ab? Um die Antwort zu finden, saugt der Atmosphärenphysiker Paul Zieger Feinstaub aus der Luft über Spitzbergen und untersucht dessen Einfluss auf die Wolkenbildung.



CDC / JAMES GATHANY

GENE DRIVES

In Organismen liegen Gene meist in zwei Varianten vor, den »Allelen«. Beide werden mit gleicher Wahrscheinlichkeit vererbt. Manche Allele aber sabotieren ihr Gegenstück und schaffen es so selbst in alle Nachkommen. Das lässt sich nutzen, um Schädlinge wie Malaria­mücken zu bekämpfen.

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!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserekursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

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

www.spektrum.de/abo

Das wöchentliche digitale Wissenschaftsmagazin

App und PDF
als Kombipaket im Abo.
Jetzt bestellen!



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **46**
14.11.
2019

- > Erster neuer HIV-Stamm seit 20 Jahren beschrieben
- > Schwarze Löcher in Serienproduktion
- > Schluckauf hilft Babys Gehirn

TITELTHEMA: PHYSIK

Der magische Winkel

Wenn man zwei Schichten der Kohlenstoffvariante Graphen gegeneinander verdreht, fließt Strom verlustfrei hindurch. Der Schlüssel zu einer Materialrevolution?

ALTER
Haarausfall mit Eigenblut stoppen?

TRINKWASSER
Sauberes Wasser macht immer mehr Aufwand

PSYCHIATRIE
»Schizophrenie gibt es nicht«

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.



www.spektrum.de/abonnieren