

Spektrum

der Wissenschaft

Das 3-Körper-Problem

Wie ein jahrhundertealtes
Rätsel neue Mathematik ermöglicht



NEUROWISSENSCHAFT Ein Schaltplan fürs Gehirn
KLIMAFORSCHUNG Der Thermostat der Erde
QUANTENMECHANIK So entkommt Information einem Schwarzen Loch

Spektrum

01.20

GESCHICHTE

Spektrum SPEZIAL »Archäologie
Geschichte Kultur« wird jetzt zu
Spektrum GESCHICHTE

Von der Menschwerdung bis in die
Neuzeit – **Spektrum GESCHICHTE**
berichtet über die großen und kleinen
Episoden der Vergangenheit und zeigt,
wie Archäologen und Historiker die
ungelösten Rätsel unserer Mensch-
heitsgeschichte entschlüsseln.



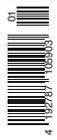
**AUSGABE 1/2020
AB 29. FEBRUAR
IM HANDEL!**

ARCHÄOLOGIE IN DEUTSCHLAND

Unsere geheimnis- vollsten Stätten

HABSBURGER | Ihre Macht beruhte auf einer Fälschung
HERCULANEUM | Neue Technik enthüllt verkohlte Papyrustexte
KONQUISTA | Dank einer Frau eroberte Cortés das Aztekenreich

5,90 € (D/A/1) | 8,50 SFR. | 65547
WWW.SPEKTRUM.DE



Lesen Sie 6 Ausgaben im Jahresabonnement mit einem Preisvorteil
von fast 12 % gegenüber dem Einzelkauf! Print € 31,20; Digital € 24,60,
Kombiabo Print + Digital € 37,20 (Printpreise inkl. Versandkosten Inland;
Digitalabo nur für Privatkunden)

Informationen und Bestellmöglichkeit:
service@spektrum.de Tel. 06221 9126-743

Spektrum.de/aktion/geschichte





EDITORIAL IM BANN DREIER KÖRPER

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Kennen Sie Liu Cixin? Mir hat der Name bis jetzt nichts gesagt, obwohl ich mich durchaus für Sciencefiction interessiere. Von dem chinesischen Autor stammt der Roman »Die drei Sonnen«, der 2017 auch auf Deutsch erschien. Darin geht es um den ersten Kontakt der Menschen mit einer außerirdischen Zivilisation, den Trisolariern. Ihr Heimatplanet wird von drei Sonnen beeinflusst, deren Bahnen nicht präzise vorhersagbar sind. Immer wieder kommt es daher auf Trisolaris zu globalen Katastrophen, welche die gerade herrschende Zivilisation vernichten – bis auf eine Ausnahme: Dieser gelingt es sogar, Raumschiffe zu bauen, mit denen sie schließlich ins All aufbricht, um die Erde zu erobern.

Liu Cixin popularisiert mit seinem Buch ein Rätsel, das Mathematiker und Astronomen seit Jahrhunderten beschäftigt, ja manchmal sogar quält: den Bahnverlauf dreier Himmelskörper – wie der drei Sonnen der Trisolariern. Durch ihre gegenseitige Anziehungskraft verläuft diese Bewegung chaotisch, was eine Berechnung unmöglich macht. Unser Autor Richard Montgomery beschreibt ab S. 12, wie sich Mathematiker mittlerweile zunehmend auf einzelne Aspekte des Problems konzentrieren und dabei erstaunliche Entdeckungen machen. Welche diese sind, verrate ich hier natürlich ebenso wenig wie das Schicksal der Menschheit in Cixins internationalem Bestseller.

Ebenfalls nach Sciencefiction hört sich unser »Ausweg aus dem Schwarzen Loch« an, aus dem doch eigentlich nichts entweichen dürfte. Aber wie Steven Giddings (S. 58) schreibt, widerspräche dies quantenmechanischen Grundsätzen. Auch darüber zerbrechen sich Wissenschaftler weiterhin den Kopf. Sie hoffen nun auf neue Beobachtungsmöglichkeiten, um endlich Lösungen zu finden. Am Ende könnten neue Gesetze von Raum und Zeit stehen – und damit vielleicht weitere futuristische Szenarien für literarische Abenteuer im Weltraum.

Bleiben Sie gespannt ...



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 1.20 beleuchtet aktuelle Fragen und Ansätze rund um die brisanten Themen KI und maschinelles Lernen.

IN DIESER AUSGABE



MAX BERTOLERO, DANIELLE S. BASSETT

Das menschliche Denkgorgan betrachten der Neurowissenschaftler und die Physikerin als gigantisches Netzwerk (S. 30).



SONIA FERNANDEZ

STEVEN GIDDINGS

Der theoretische Physiker untersucht, wie Schwarze Löcher dabei helfen könnten, Quanten- und Relativitätstheorie zu vereinen. Ab S. 58 stellt er ein Paradoxon vor, das seine Kollegen seit Jahrzehnten beschäftigt.



OLIVIER BLEU, DMITRY SOLNYSHKOV, GUILLAUME MALPUECH

Wie kann man elektronische Schaltungen effizienter machen? Bei der Untersuchung dieser Frage stoßen die drei Physiker in den abstrakten mathematischen Bereich der Topologie vor (S. 68).

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

20 FORSCHUNG AKTUELL

Fortpflanzung als Knochenarbeit

Osteoporose bei laichenden Aalen.

Irreführende Muster

Aus Wiederholungen folgt nicht immer eine Regel.

Die Masse der Neutrinos

Ein Karlsruher Experiment wiegt Geisterteilchen.

Eroberung des Lands

Neue Erkenntnisse über die Herkunft der Landwirbeltiere.

29 SPRINGERS EINWÜRFE

Ewiges Wachstum

Gewohnte Maße wirtschaftlicher Erfolge haben ausgedient.

66 SCHLICHTING!

Blau wie das Meer

Die Farbe des Wassers ist eine Frage der Umstände.

77 FREISTETTERS FORMELWELT

Desorientierte Bänder

Kann es eine Fläche ohne Rückseite geben?

88 REZENSIONEN

94 ZEITREISE

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 MATHEMATIK **DAS DREIKÖRPERPROBLEM**

Obwohl es unmöglich ist, die Flugbahnen dreier sich anziehender Objekte exakt zu bestimmen, fasziniert das Problem die Forscher noch immer – und sorgt für Überraschungen.

Von Richard Montgomery

Serie: Das menschliche Gehirn (Teil 2)

30 HIRNFORSCHUNG **DAS NETZWERK DES GEISTES**

Unsere mentale Aktivität entsteht aus dem sorgfältig abgestimmten Zusammenspiel verschiedener Hirnareale.

Von Max Bertolero und Danielle S. Bassett

38 KONNEKTOMIK **EIN SCHALTPLAN FÜRS GEHIRN**

Dank neuer Mikroskopier- und Computertechniken schreitet die Hirnkartierung voran. Doch die dabei entstehenden riesigen Datenmengen müssen erst noch erschlossen werden.

Von Sarah DeWeerd

44 ZYTOLOGIE **AUF TUCHFÜHLUNG**

Die verschiedenen Organellen haben in den Zellen unerwartet engen Kontakt zueinander. Das dient dem Austausch von Substanzen und Signalen.

Von Elie Dolgin

48 GEOLOGIE **DER THERMOSTAT DER ERDE**

Ein globaler Regelkreislauf balanciert den CO₂-Gehalt der Atmosphäre aus. Neue Isotopenmessungen geben detaillierte Einblicke in den Mechanismus.

Von Friedhelm von Blanckenburg

58 PHYSIK **AUSWEG AUS DEM SCHWARZEN LOCH**

Theoretiker hoffen, mit neuen Beobachtungsdaten ein altes Paradoxon im Spannungsfeld zwischen Relativitäts- und Quantentheorie zu lösen.

Von Steven B. Giddings

68 PHOTONIK **SCHALTEN MIT LICHT**

Aktuelle Technologien kommen unserem Bedürfnis, Information immer schneller zu verarbeiten, kaum noch nach. Die Topologie könnte eine Lösung dafür liefern.

Von Olivier Bleu, Dmitry Solnyshkov und Guillaume Malpuech

78 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
HARMONISCHE REIHEN UND DER SALZKRISTALL

Vorsicht beim Umordnen unendlich langer Summen!

Von Christoph Pöppe

84 WISSENSCHAFTSPHILOSOPHIE
GUTE THEORIEN, SCHLECHTE THEORIEN

Serie: Grundbegriffe der Wissenschaft (Teil 2) Nach welchen Kriterien sollten Forscher Modelle verwerfen oder akzeptieren?

Von Alexander Mäder

TITELBILD:
MATDESIGN24 / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

12

MATHEMATIK
DAS DREIKÖRPERPROBLEM



3DCHARACTER / STOCK.ADOBE.COM, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



30

HIRNFORSCHUNG
NETZWERK
DES GEISTES

MARK ROSS STUDIOS / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2019



48

GEOLOGIE
DER THERMOSTAT
DER ERDE

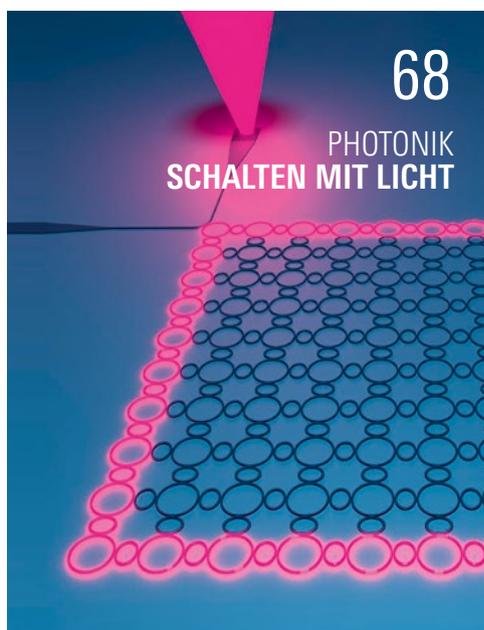
DANIEL PRUDEK / BETTY IMAGES / ISTOCK



58

PHYSIK
AUSWEG AUS DEM
SCHWARZEN LOCH

MONDOPTIC STUDIOS / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2019



68

PHOTONIK
SCHALTEN MIT LICHT

STEFFEN WITTEK (RECHNUNG) UND MIGUEL A. BANDRES (TECHNIK), BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



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

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

SPEKTROGRAMM

RUBINS GALAXIE

▶ UGC 2885 gehört zu den Giganten des Kosmos: 232 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt, ist die Galaxie 2,5-mal so groß wie unsere Milchstraße. Außerdem umfasst sie mit rund einer Billion etwa zehnmal so viele Sterne. Die hier gezeigte Aufnahme stammt vom Hubble-Weltraumteleskop; mit ihm wollen Astronomen die Geschichte von UGC 2885 rekonstruieren.

In der jüngeren Vergangenheit scheint sie keinen anderen Galaxien begegnet zu sein, doch vor einigen Milliarden Jahren könnte sie sich durchaus kleinere Exemplare einver-

leibt haben. Astronomen versuchen daher, sämtliche Kugelsternhaufen im Umfeld des spiralförmigen Gebildes aufzuspüren. Finden sich mehr von ihnen als erwartet, ist das ein Hinweis auf vergangene Begegnungen.

Um Aufnahmen der Galaxie richtig zu interpretieren, müssen die Forscher jedoch zunächst Sterne im Vordergrund identifizieren, die zu unserer Milchstraße gehören. Unter anderem der helle Punkt im linken Teil der Scheibe fällt in diese Kategorie.

UGC 2885 fasziniert Astrophysiker schon seit mehr als 40 Jahren. Sie gehörte zu jenen Galaxien, auf deren Basis Vera Rubin (1928–2016) und andere Forscher Ende der 1970er Jahre die Existenz der Dunklen Materie vorhergesagt haben. US-Astronomen haben UGC 2885 daher in den letzten Jahren den Spitznamen »Rubins Galaxy« gegeben.

NASA-Pressemitteilung, Januar 2020



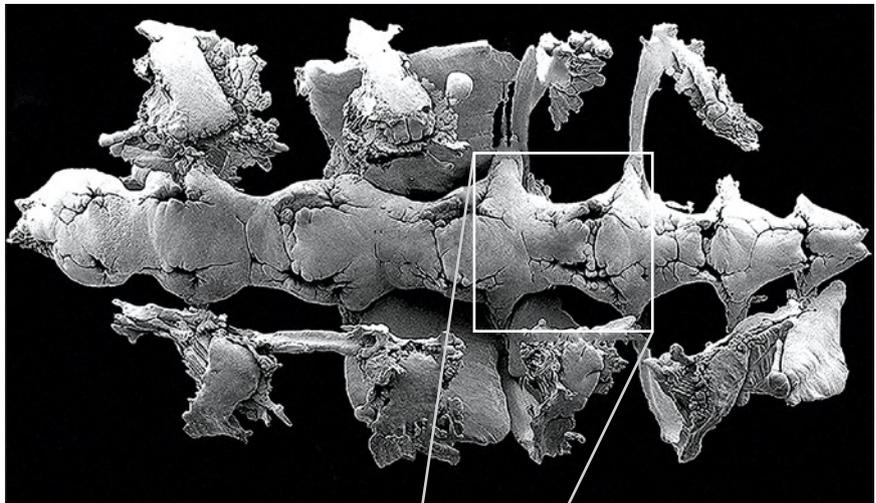
BIOLOGIE SPUREN ZWEIER URZEIT-SKORPIONE

► Ein 1985 im US-Bundesstaat Wisconsin gemachter Fund entpuppt sich 35 Jahre später als kleine Sensation: Es handelt sich um die versteinerten Überreste zweier Skorpione, die vor 437 Millionen Jahren lebten, wie eine erst jetzt erfolgte Detailanalyse durch eine Gruppe um Andrew Wendruff von der Otterbein University in Westerville zeigt. Die bislang unbekannte Spezies trägt von nun an den Namen *Parioscorpio venator*. Sie ist offenbar ein bis drei Millionen Jahre älter als ein Skorpion aus Schottland, der bisher als ältester Vertreter seiner Klasse galt.

Die untersuchten Exemplare von *Parioscorpio venator* waren nur 2,5 Zentimeter groß. Ihre Fossilien sind jedoch so gut erhalten, dass die Forscher einige anatomische Details beschreiben können. Wie heutige Skorpione besaßen die Tiere bereits charakteristische Klauen an den Vorderbeinen und wahrscheinlich einen Stachel am Schwanzende, so dass sie mit Gift jagen oder sich verteidigen konnten.

Mehr noch als die äußeren Merkmale fasziniert die Wissenschaftler die innere Anatomie der Skorpione. Denn neben einigen primitiven Kennzeichen damaliger Meeresbewohner und früher Spinnentieren wie Komplexaugen blieben auch Teile des Verdauungs-, Kreislauf- und Atmungssystems erhalten, deren Aufbau dem heutiger Skorpione verblüffend ähnelt. Gleichzeitig besaßen die Urskorpione Strukturen wie heutige Pfeilschwanzkrebse. Diese »lebenden Fossilien« halten sich vornehmlich in küstennahen Gewässern auf, können jedoch ebenso kurzzeitig an Land gehen.

Die Versteinerungen entstanden wahrscheinlich in einem Gezeitentümpel. Wendruff und Co schließen daraus, dass *Parioscorpio venator* ebenfalls in beiden Elementen zu Hause war. Unklar bleibt allerdings, ob er statt Kiemen bereits Lungen besaß.



ANDREW WENDRUFF, OHIO STATE UNIVERSITY



Dennoch könnte er nach Ansicht der Wissenschaftler der früheste bekannte Beleg für eine Tierart sein, die sich an Land vorwagte.

Scientific Reports 10.1038/s41598-019-56010-z, 2020

Der Panzer heutiger Skorpione (unten und Mitte) weist große Parallelen mit 437 Millionen Jahren alten Fossilien einer neu beschriebenen Skorpionart auf (oben).

CHEMIE GREIFZANGEN- MOLEKÜL SCHNAPPT SICH SCHADSTOFFE

► Wenn ein Insekt in einer Venusfliegenfalle landet, registriert die Pflanze dies mit feinen Härchen in ihrem Inneren und schnappt zu. Forscher des Trinity College Dublin haben nun ein Molekül hergestellt, das auf ähnliche Weise Schadstoffmoleküle einfängt. Die Wissenschaftler nutzten dafür Porphyrine, die im menschlichen Körper Sauerstoff transportieren; im Pflanzenfarbstoff Chlorophyll sind sie an der Fotosynthese beteiligt.

Das ringförmige Molekül besteht aus einem ebenen Gerüst von Kohlenstoffatomen, in dessen Mitte sich vier Stickstoffatome befinden. In biologischen Verbindungen fixieren diese

gemeinsam ein Zentralatom wie beispielsweise Eisen.

Ohne das Metall in der Mitte könnte man dieses reaktive Zentrum für andere Zwecke nutzen, vermuteten die Forscher um Mathias O. Senge. Doch da es mitten in dem flachen Gerüst liegt, ist mit dem Molekül erst einmal nicht viel anzufangen. Daher krempelten die Forscher seine metallfreie Version um: Sie versahen sie mit chemischen Anbauten und zwangen die flache Struktur so in eine gewellte Form, in der die zentralen Stickstoffatome abwechselnd nach unten und oben zeigten. So schafften sie es, das bis dahin abgeschirmte reaktive Zentrum zugänglich zu machen.

Außerdem brachten die Chemiker vier zusätzlich Aminogruppen an, die wie Greifarme vom Porphyrinring emporragen. In einer sauren Lösung werden die Gruppen sowie zwei der

zentralen Stickstoffatome mit einem Wasserstoffion versehen und sind dann positiv geladen. Dadurch binden sie kleine, negativ geladene Moleküle an das Sensormolekül und halten sie dank vieler Wasserstoffbrückenbindungen im Molekülkäfig gefangen – ganz wie das Vorbild aus der Biologie.

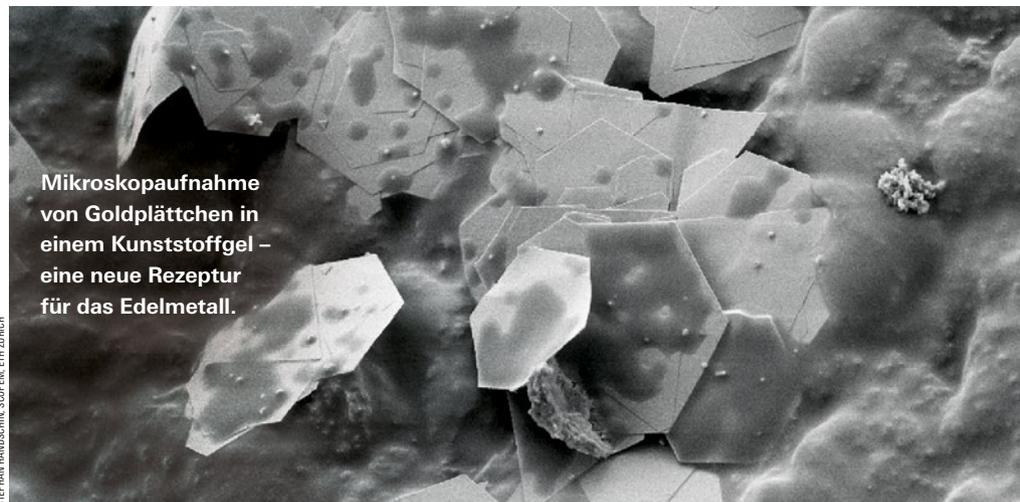
Die chemische Variante der Venusfliegenfalle ändert ihre Farbe von gelblich Braun zu Grün, wie die Forscher berichten. Auf diese Weise wird direkt sichtbar, ob die Porphyrinverbindung einen Fang gemacht hat. Das Molekül könnte daher künftig als chemischer Sensor zum Einsatz kommen, um zum Beispiel organische Phosphate aufzuspüren. Diese sind als Wirkstoffe in vielen Pflanzenschutzmitteln enthalten und auch für Menschen giftig.

Angewandte Chemie 10.1002/ange.201907929, 2019

MATERIALWISSENSCHAFT SUPERLEICHTES GOLD

► Es sieht aus wie massives Gold, man kann es schmelzen und polieren – aber es wiegt nur einen Bruchteil dessen, was das Edelmetall normalerweise auf die Waage bringt. Trotzdem ist das neue, von einer Arbeitsgruppe der ETH Zürich um Leonie van 't Hag hergestellte Material keine Fälschung: Es handelt sich um echtes, 18-karätiges Gold, in dem das Edelmetall immerhin drei Viertel der Masse ausmacht. Dank eines technischen Tricks nehmen allerdings luftgefüllte Poren etwa drei Viertel des Volumens ein, weshalb die Dichte – und damit das Gewicht – deutlich geringer ausfällt.

Metallschäume nach diesem Muster gibt es schon lange. Gold und seine Legierungen galten bisher als zu weich dafür; sie würden normalerweise in sich zusammenfallen. Die Forscher lösten dieses Problem mit einem Gel, das sich aus Gold-Nanoplättchen und dem Kunststoff Polystyrol zusammensetzt. Dabei sorgen die Nanoplättchen nicht nur für die goldene Farbe, sondern auch dafür, dass sich die Oberfläche glänzend polieren lässt. Der Kunst-



Mikroskopaufnahme von Goldplättchen in einem Kunststoffgel – eine neue Rezeptur für das Edelmetall.

STEPHAN HANUSCHNIK, SOPHIA EITZ ZÜRICH

stoff dagegen stabilisiert die poröse Struktur.

Zur Herstellung nutzten die Forscher zunächst ein Kolloid nanometergroßer Kunststoffkügelchen in Wasser, ein so genanntes Polystyrol-Latex. Dieses mischten sie mit einer Lösung aus Fasern eines Milcheiweißes und einem Goldsalz. Aus dem gelösten Gold und dem Milcheiweiß bildeten sich dabei die Gold-Nanoplättchen, aus dem Polystyrol das Kunststoffgel.

Diesem entzog die Arbeitsgruppe anschließend das Wasser und erhitzte das Ergebnis auf 190 Grad Celsius,

so dass sich ein stabiler Goldblock bildete. Ein Vorteil sei der recht umweltfreundliche Herstellungsprozess, der ohne giftige Lösungsmittel auskommt, so die Wissenschaftler. Ob das superleichte Material wie erhofft als Schmuck Karriere macht, ist jedoch noch offen. Es gibt aber auch eine ganze Reihe technischer Anwendungen, unter anderem als Katalysator und als Abschirmung, die von der neuen Methode profitieren könnten.

Advanced Functional Material 10.1002/adfm.201908458, 2020



INGANIESEN / GETTY IMAGES / ISTOCK

ASTRONOMIE NEUE NAMEN FÜR EXOPLANETEN

Die Internationale Astronomische Union (IAU) hat mehr als 100 Planeten, die um andere Sterne kreisen, eingängigere Namen gegeben. Sie stammen von Internetnutzern aus aller Welt, die zunächst Vorschläge einreichen und anschließend darüber abstimmen konnten. Laut IAU gaben etwa 420 000 Personen aus 112 Nationen eine Stimme ab.

In dem Wettbewerb, den die IAU anlässlich ihres 100-jährigen Bestehens durchführte, durfte jedes Land je einen der gut 4000 bekannten Exo-

planeten sowie dessen Mutterstern benennen. Deutschland suchte eine neue Bezeichnung für den Gasplaneten im 400 Lichtjahre entfernten System HD 32518 im Sternbild Giraffe. Der Stern heißt künftig »Mago« – nach dem äthiopischen Mago-Nationalpark, der unter anderem dem Schutz von Giraffen dient. Der Planet läuft künftig unter »Neri«, nach einem Fluss, der durch den Nationalpark fließt. Das Namenspaar setzte sich mit 3414 von 8720 Stimmen gegen andere Vorschläge durch.

Oft haben Planeten im Orbit anderer Sterne – hier eine Illustration – komplizierte Namen. Bei einigen ändert sich das nun.

In anderen Nationen machten landestypische Namen das Rennen: In der Schweiz entschieden sich gut 7000 Umfrageteilnehmer dafür, den Planeten des Systems HD 130322 künftig »Eiger« zu nennen, sein Mutterstern heißt von jetzt an »Mönch«. Und dank einer Mehrheit unter 242 Österreichern tragen der Stern HAT-P-14 und sein Planet künftig die Namen »Franz« und »Sissi«.

In den Niederlanden fiel die Wahl für das System HAT-P-6 auf Gemälde von Rembrandt und van Gogh, »Nachtwacht« und »Sterrennacht«. Australien wählte die Wörter »Bubup« und »YanYan« – sie stammen aus der Sprache der Bunurong-Aborigines und bedeuten dort Kind beziehungsweise Junge. Die gewählten Namen sind von nun an die offizielle Bezeichnungen der Exoplaneten, ersetzen jedoch nicht die Bezeichnungen in wissenschaftlichen Katalogen und Fachaufsätzen.

IAU-Pressemitteilung, Dezember 2019

PHYSIK KOLLEKTIVE VERSCHRÄNKUNG IN SELTSAMEM METALL

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts wissen Forscher, dass man Elementarteilchen auf eine spezielle Weise aneinanderkoppeln kann. Wenn man den Zustand eines dieser »verschränkten« Teilchen misst (etwa die Ausrichtung seines Spins), muss das andere Teilchen ebenfalls Farbe bekennen – selbst wenn es sehr weit von seinem Partner entfernt ist.

Die Verschränkung kann jedoch nicht nur isolierte Teilchen erfassen, sondern auch ganze Ensembles von Quantenobjekten in Festkörpern. Ein Beispiel dafür hat nun ein Team um Silke Bühler-Paschen von der TU Wien präsentiert: Den Forschern zufolge lassen sich die sonderbaren Eigenschaften eines speziellen Kristalls bei tiefen Temperaturen am besten

durch eine Kollektivverschränkung von unzähligen Ladungsträgern erklären.

Bei dem untersuchten Material handelt es sich um die chemische Verbindung YbRh_2Si_2 . Sie zählt zur Klasse der »seltsamen« Metalle, deren elektrischer Widerstand bei extremen Minusgraden langsamer abnimmt als erwartet (siehe Spektrum Juni 2019, S. 24). Physiker erklären sich das mit Quantenfluktuationen, die den Stromfluss durch das Material behindern können, ganz ähnlich, wie es die Bewegungen der Atome bei höheren Temperaturen tun.

Die Forscher um Bühler-Paschen haben sich dem Phänomen mit Hilfe von Terahertzstrahlung genähert, mit der sie eine hauchdünne Probe aus

YbRh_2Si_2 durchleuchteten. Auf diese Weise konnten sie Rückschlüsse auf das Verhalten der Elektronen im Inneren des Materials ziehen.

Am besten ließen sich die Messdaten erklären, wenn magnetische Fehlstellen und Elektronen in hohem Maß miteinander verschränkt sind. Diese Form der Wechselwirkung scheint in der Nähe des absoluten Temperaturnullpunkts schlagartig die Oberhand zu gewinnen: Erst ließen sich die Ladungsträger noch getrennt voneinander beschreiben. Bei geringfügig niedrigerer Temperatur vollzog sich eine Art Phasenübergang: Die Zustände der Teilchen waren plötzlich miteinander verschränkt, quer durch den ganzen Festkörper.

Science 10.1126/science.aag1595, 2020

KLIMASCHUTZ DIE TÜCKEN DER AUFFORSTUNG

Seit der Jahrtausendwende haben Menschen weltweit nicht nur riesige Flächen in den Tropen gerodet, sondern auch mindestens 80 Millionen Hektar Wald wieder aufgeforstet oder sich regenerieren lassen. Unter Umständen können solche Vorhaben jedoch schwer wiegende Konsequenzen für den Wasserhaushalt einer Region haben, wie eine aktuelle Metaanalyse von Laura Bentley und David A. Coomes von der University of Cambridge zeigt.

Die Wissenschaftler haben 43 Studien ausgewertet, welche die Folgen der Aufforstung in rund um den Globus verteilten Gebieten untersucht hatten. Demnach hat sich das Wasservolumen in den betrof-

fenen Flüssen binnen den ersten fünf Jahren durchschnittlich um ein Viertel verringert; nach 25 Jahren betrug der Rückgang im Mittel sogar knapp 40 Prozent. Manche Fließgewässer sind durch die Maßnahmen völlig versiegt. Die stärksten Veränderungen beobachteten die Forscher in Australien und im südlichen Afrika.

Gründe für das Phänomen gibt es mehrere: Wegen der großen Oberfläche ihrer Blätter verdunsten Bäume zum einen vermehrt Wasser. Zudem verringern sie den oberflächlichen Abfluss von Regen in die Gewässer, unter anderem da Wasser wegen der Wurzeln leichter ins Erdreich eindringen kann. Die Analyse liefert darüber hinaus Hinweise darauf, dass Bäume die Hydrologie in feuchten Zeiten stärker beeinflussen als in trockenere: Fällt zu wenig Regen, verdunsten Gewächse weniger Wasser, weswegen mehr davon im

Boden bleibt und in Fließgewässer sickern kann.

Oft scheinen sich Flüsse nicht wirklich von der Aufforstung zu erholen. Zwar sei diese ein wichtiges Mittel gegen den Klimawandel, argumentieren die beiden Cambridge-Forscher. Jedoch müsse man mit Bedacht vorgehen. So komme es stark darauf an, wo Wälder gepflanzt werden und welche Baumarten sie enthalten. Ersetzen sie beispielsweise natürliches Grasland mit gutem Bodengefüge, schadet das dem Wasserfluss sehr deutlich. Auf degradiertem Ackerland sieht die Situation dagegen anders aus: Hier verringern Bäume ebenfalls den Abfluss in Gewässer, aber gleichzeitig verhindern sie, dass zu viel Land weggeschwemmt wird, weshalb sich die Aufforstung lohnen könnte.

Global Change Biology 10.1111/gcb.14954, 2020

ARCHÄOLOGIE GEHIRN AUS VULKANGLAS

Als 79 n. Chr. der Vesuv ausbrach, regnete es erst Asche, dann fielen Bimsbrocken vom Himmel, und schließlich fegten Ströme und Wolken aus Magma, Asche und glühend heißem Gas über die Römerstädte – und löschten alles Leben aus. Italienische Forscher haben nun Hinweise darauf gefunden, dass die vulkanischen Ströme so heiß waren, dass sie in Herculaneum, der Nachbarstadt von Pompeji, das Gehirn eines Mannes zu Glas gebacken haben.

Archäologen haben den Toten bereits in den 1960er Jahren im Haus einer Kultgemeinschaft gefunden, seine verkohlten Reste lagen auf den Überbleibseln eines Holzbettes. Experten vermuten, dass es sich um den Hauswart des Gebäudes gehandelt hat.

Bei einer erneuten Untersuchung der Skelettteile entdeckte nun der Anthropologe Pier Paolo Petrone von der Università di Napoli Federico II schwarze, wenige Zentimeter große Glasstücke in dessen Schädel. Eine Analyse der Fragmente ergab, dass sie Spuren von Proteinen enthalten, die ty-

Bei diesem wenige Zentimeter großen Glasstück könnte es sich um geschmolzene Gehirnmasse handeln.

pisch für das menschliche Gehirn sind. Außerdem wollen die Forscher gesättigte Fettsäuren wie Adipin- und Margarinsäure nachgewiesen haben, die sie für Reste von Haartalg halten.

Den Forschern zufolge sprechen auch die Fundumstände für ihre Interpretation. So hätten Archäologen im Umfeld der Fundstelle und an den Skelettresten keine weiteren Glasteilen dokumentiert – die man erwarten würde, wenn das Glas auf das Schmelzen anderer Materialien zurückginge. Beim Ausbruch des Vesuvs seien außerdem genügend heiße Temperaturen erreicht worden: Wie die For-

scher aus dem Zustand verkohlter Holzstücke aus dem Gebäude schließen, rollte die heiße Gas- und Ascheschleife mit Temperaturen von ungefähr 520 Grad Celsius über das Haus in Herculaneum. Unter der extremen Hitze dürfte sich der Körper des Mannes entzündet haben. Sein weiches Gewebe sei quasi verdampft und die Hirnmasse zu Glas geschmolzen, so die Forscher.

New England Journal of Medicine, 10.1056/NEJMc1909867, 2020



PIER PAOLO PETRONE / UNIVERSITÀ DI NAPOLI FEDERICO II

MATHEMATIK DAS DREIKÖRPER- PROBLEM

Obwohl Forscher seit Jahrhunderten wissen, dass es unmöglich ist, die Flugbahnen dreier sich gegenseitig anziehender Objekte zu berechnen, birgt das Dreikörperproblem dennoch einige Überraschungen. Indem sich Mathematiker auf einzelne Aspekte des Themas konzentrieren, machen sie faszinierende Entdeckungen.



Richard Montgomery ist Professor für Mathematik an der University of California in Santa Cruz.

» spektrum.de/artikel/1701286

Im Frühjahr 2014 hatte ich die Hoffnung weitestgehend aufgegeben, eine Antwort auf mein mathematisches Problem zu finden. Aus Mangel an Ideen begann ich, näherungsweise Lösungen am Computer zu berechnen. Natürlich würde ich so niemals meine Frage beantworten, aber ich hoffte, dass die Ergebnisse auf einen zielführenden Weg deuten würden.

Leider bin ich kein Programmierexperte. Mir dauerte alles zu lange und ich wurde immer ungeduldiger – wodurch ich alles verschlimmerte. Für einen Mathematiker wie mich, der sonst nur mit Stift und Papier arbeitet, entwickelte sich das Ganze zu einer sehr unangenehmen Erfahrung. Deshalb beschloss ich, in diesem Herbst zu meinem Freund Carles Simó an die Universität Barcelona zu reisen, um ihn zu bitten, mich bei meiner unbeholfenen Suche zu unterstützen.

Simó gilt als einer der erfinderischsten Experten für numerische Analysis. Zudem verschwendet er keine Zeit damit, um den heißen Brei herumzureden. An meinem ersten Nachmittag in seinem Büro schilderte ich ihm mein Problem. Daraufhin sah er mich mit seinen durchdringenden Augen an und fragte: »Warum interessierst du dich überhaupt dafür?« Das war wie ein harter Schlag ins Gesicht – schließlich hatte ich dieser Aufgabe bereits 17 Jahre lang den Großteil meiner Zeit geopfert.

Meine Forschung geht auf die Dynamik von Objekten zurück, die schon Isaac Newton 1687 in seiner »Principia« beschäftigten. Damals untersuchte er, wie sich zwei Körper im Raum bewegen, die sich gegenseitig über die Schwerkraft anziehen. In der gleichen Arbeit leitete er ein System von Differenzialgleichungen her, aus denen man die Flugbahn zweier Massen berechnen kann, wenn man ihre aktuelle Position und Geschwindigkeit kennt.

Beispiele für Flugbahnen zweier Körper

Masse der Sonne ist viel größer als die der Planeten, daher ist ihre Ellipsenbahn winzig.



zwei gleiche Massen mit elliptischen Bahnen



NIGEL HAWTHIN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

Wie Newton herausfand, entsprechen die Lösungen des Zweikörperproblems immer Kegelschnitten. Die Umlaufbahnen haben also entweder die Form eines Kreises, einer Ellipse, einer Parabel oder einer Hyperbel. Dadurch konnte Newton die Gesetze der Planetenbewegung mathematisch herleiten, die Johannes Kepler bereits 1609 durch empirische Beobachtungen postuliert hatte. Das erste keplersche Gesetz erwies sich durch Newtons Arbeit bei genauerem Hinsehen als falsch. Denn in unserem Sonnensystem bewegen sich nicht bloß Planeten auf einem Kegelschnitt, sondern auch die Sonne. Weil diese aber so schwer ist, folgt sie kaum merkbar einer winzigen elliptischen Bahn.

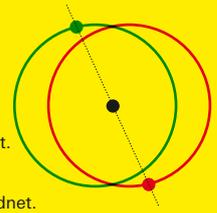
Das Zweikörperproblem ist extrem gut verstanden und begegnet vielen Menschen bereits in der Schule. Doch sobald man statt zwei Objekten drei betrachtet, landet man in einer Sackgasse. Zwar kann man in diesem Fall ebenfalls Differenzialgleichungen aufstellen, diese lassen sich aber nicht allgemein lösen. Man kann nur für wenige Spezialfälle genaue Umlaufbahnen berechnen. Trotz leistungsfähiger Computer und jahrhundertelanger Bemühungen, fanden Wissenschaftler bis heute nur für fünf Typen von Bahnen exakte Gleichungen: Drei entdeckte Leonhard Euler 1767 und zwei weitere berechnete Joseph-Louis Lagrange fünf Jahre später.

Ende des 19. Jahrhunderts erkannte Henri Poincaré schließlich die Ursache für all die Komplikationen: Die Bewegungen dreier Körper sind meist chaotisch. Sobald man die Anfangsbedingungen, also die Geschwindigkeit und die Position der Objekte, auch nur leicht verändert, kann deren Umlaufbahn völlig anders aussehen. Tatsächlich sind viele Lösungen nicht einmal periodisch, das heißt die Bewegungen der Körper wiederholen sich niemals. Glücklicherweise können moderne Algorithmen einige Ab-

Beispiele für Flugbahnen dreier Körper

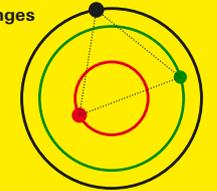
Eine von Eulers Lösungen:

Drei gleiche Massen, von denen sich eine immer im Zentrum befindet. Die Körper sind stets auf einer Geraden angeordnet.



Eine von Lagranges Lösungen:

Die drei Massen bilden zu jeder Zeit ein gleichseitiges Dreieck.



NIGEL HAWTHIN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

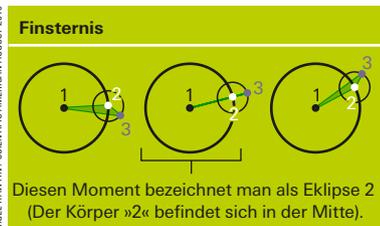
Wie bewegen sich drei Körper, die sich gegenseitig anziehen? Diese Frage beschäftigt viele Wissenschaftler seit Jahrhunderten. Eine endgültige Antwort wird es darauf nie geben.

AUF EINEN BLICK EIN UNLÖSBARES RÄTSEL

- 1 Eine der ältesten mathematischen Sackgassen ist das Dreikörperproblem. Die Frage, wie sich drei gegenseitig anziehende Körper bewegen, stellt sich als unlösbar heraus.
- 2 Dennoch gibt es für einige Spezialfälle explizite Lösungen – und Wissenschaftler sagen immer wieder neue Arten von Flugbahnen dreier Körper voraus.
- 3 Für viele Forscher ist das jahrhundertealte Problem spannend, weil es unterschiedliche mathematische Konzepte vereint und somit zu interessanten neuen Erkenntnissen führen kann.

schnitte von Umlaufbahnen zumindest näherungsweise bestimmen, was beispielsweise für die Planung von Raumfahrtmissionen unerlässlich ist. Je länger man einen Computer rechnen lässt, desto genauer werden die Ergebnisse.

Darüber hinaus gibt es viele weitere spannende Aspekte des Dreikörperproblems, die noch nicht gelöst sind. Deswegen konnte ich Simós Worte nicht wirklich nachvollziehen. »Natürlich interessiert es mich«, dachte ich. »Ich arbeite seit fast zwei Jahrzehnten an diesem Problem!« Ich hatte es auf ein ganz bestimmtes Phänomen in Dreikörpersystemen



abgesehen: So genannte Eklipsen, die entstehen, wenn sich alle Objekte entlang einer Geraden anordnen. Ein bekanntes Beispiel dafür ist eine Sonnenfinsternis, bei

der sich der Mond zwischen die Sonne und die Erde schiebt, so dass unser Planet abgedunkelt wird.

Je nach Umlaufbahn befindet sich mal der eine und mal der andere Körper in der Mitte. Verfolgt man die Eklipsen eines Systems über einen längeren Zeitraum, erhält man eine Ziffernfolge aus Einsen, Zweien und Dreien, je nachdem, welcher Körper in der Mitte ist.

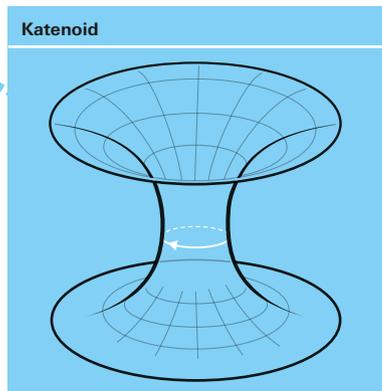
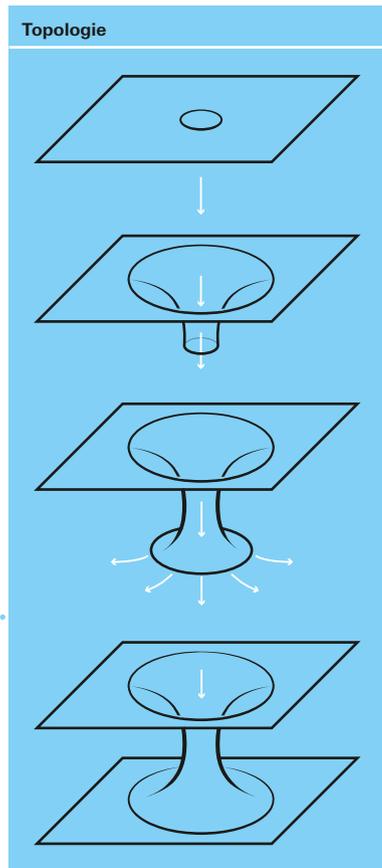
Eine Folge von Finsternissen

In einer vereinfachten Version des Sonne-Erde-Mond-Systems, in dem alle Objekte kreisförmigen Bahnen folgen, umkreist der Mond (3) jeden Monat die Erde (2), während diese um die Sonne (1) rotiert. Die Bewegung wiederholt sich immer wieder, wodurch eine periodische Eklipsenfolge entsteht: 2, 3, 2, 3, 2, 3 und so weiter. Weil die Sonne niemals zwischen Mond und Erde landet, taucht keine 1 auf. Da die Lösungen des Dreikörperproblems nicht immer periodisch sind, muss sich die dazugehörige Eklipsenfolge nicht zwingend wiederholen, sondern kann ewig ohne erkennbares Muster weitergehen.

Als ich darüber nachdachte, stieß ich auf eine Frage, die mich nicht mehr losließ: Wenn man eine beliebige periodische Folge aus Einsen, Zweien und Dreien niederschreibt, entspricht sie dann immer der Eklipsenfolge einer periodischen Lösung des Dreikörperproblems? Oder kann man die drei Ziffern auch so aneinanderreihen, dass es keine Konfiguration dreier Körper gibt, die sich so umkreisen, dass ihre Eklipsen gleich der Folge sind? Meiner Meinung nach musste es immer eine passende Lösung des Dreikörperproblems geben, konnte es aber nicht beweisen.

Um mein ungewöhnliches Interesse vor Simó zu rechtfertigen, erinnerte ich ihn daran, dass die Frage drei verschiedene Zweige der Mathematik verbindet: Die Topologie, die geometrische Objekte gemäß ihrer globalen Eigenschaften – etwa Löcher – klassifiziert; die riemannsche Geometrie, bei der es um das Vermessen gekrümmter Oberflächen geht; und zuletzt die Dynamik, die sich mit Bewegungsabläufen beschäftigt.

In der Topologie gelten zwei geometrische Objekte als gleich, wenn man sie ineinander verformen kann, ohne Löcher in sie zu reißen. Dadurch lassen sich viele Berechnungen vereinfachen. Wenn eine Oberfläche etwa sehr kompliziert ist, hilft es manchmal eine topologisch gleiche, aber einfachere Figur zu betrachten. Beispielsweise ist eine Ebene, die ein Punkt fehlt, topologisch gesehen gleich der Oberfläche eines Wurmlochs, ein so genanntes Katenoid. Man kann das Loch in der Ebene vergrößern, nach unten ziehen und dann umstülpen, wodurch das Katenoid entsteht. Auf dieser Fläche lassen sich neue Arten von Aufgaben definieren, die in der durchstochenen Ebene zu Problemen führen. Zum Beispiel kann man den kürzesten Weg um das Loch berechnen, indem



man eine Differenzialgleichung löst, ganz ähnlich wie beim Dreikörperproblem.

Das verdeutlicht, wie die drei Gebiete zusammenpassen: Dank der Topologie kann man eine Oberfläche so lange verformen, bis man mit den Mitteln der riemannschen Geometrie ein bestimmtes Problem lösen kann, das aus der Dynamik stammt.

Im Dreikörperproblem übernimmt der so genannte Konfigurationsraum die Rolle der Oberfläche. Dieser Raum besteht aus Punkten, die den Positionen aller drei Körper entsprechen. Da man sich nur für Systeme interessiert, in denen die Körper nicht zusammenstoßen, muss man die Kollisionspunkte entfernen: Den Ort 12, an dem die Koordinaten des ersten und des zweiten Objekts gleich sind, und analog 23 und 13. Für den Fall, dass alle drei Massen gleichzeitig zusammenstoßen (123), versagen die newtonschen Bewegungsgleichungen, so dass ein solcher Punkt gar nicht erst auftaucht.

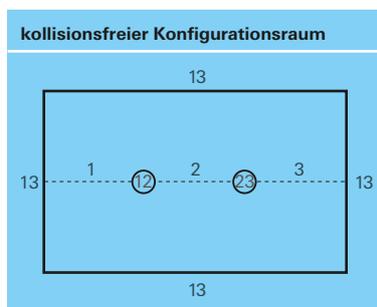
Eigentlich würde man erwarten, dass der kollisionsfreie Konfigurationsraum neundimensional ist, da er die Positionen aller drei Massen enthält. Wie sich aber herausstellen wird, ist er topologisch

gesehen gleich einer zweidimensionalen Ebene mit zwei Löchern – bei 12 und 23. 13 ist in diesem Modell ein Punkt bei unendlich, den man ebenfalls ausschließt. Die Gerade, die durch 12 und 23 verläuft, ist daher in drei Abschnitte (1, 2, 3) geteilt, welche die verschiedenen Typen von Eklipsen symbolisieren.

Eine Kurve im kollisionsfreien Raum beschreibt eine Bewegung dreier Massen und könnte also eine Lösung des Dreikörperproblems sein. Kreuzt die Kurve den ersten Abschnitt der Geraden, dann findet eine Eklipse vom Typ 1 statt. Analog dazu ergeben sich andere Eklipsen, wenn die Kurve die Gerade an anderen Stellen durchläuft. Eine Eklipsenfolge charakterisiert also, wie sich eine Kurve um die Löcher des Konfigurationsraums windet. Ist die Kurve geschlossen, ist sowohl die Bewegung als auch die Folge periodisch.

Um zu prüfen, ob eine Kurve das Dreikörperproblem löst, muss man auf einen jahrhundertealten Satz der klassischen Mechanik zurückgreifen. Er besagt, dass jede Kurve im Konfigurationsraum eine Lösung ist, wenn sie die so genannte Wirkung minimiert. Diese ist eine Art Mittelwert aus der kinetischen minus der potenziellen Energie des Systems. Um meine ursprüngliche Frage zu beantworten, musste ich also beweisen, dass sich jede periodische Eklipsenfolge durch eine Kurve erzeugen lässt, welche die Wirkung minimiert – und damit ein Dreikörperproblem löst.

Mehr als 17 Jahre lang tüftelte ich an dieser Aufgabe. Und tatsächlich lohnte sich die Mühe: Ich stieß auf viele spannende neue Zusammenhänge. Zum Beispiel fand ich 2000 zusammen mit Alain Chenciner von der Universität



NIGEL HAWTHIN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

Paris Diderot die erste periodische Lösung des Dreikörperproblems ohne Gesamtdrehimpuls wieder, die Cris Moore vom Santa Fe Institute bereits

1993 mit Computerunterstützung vorausgesagt hatte. Die Bahnkurve beschreibt dabei einen geschlossenen Pfad, der die Form einer Acht hat.

Die drei Massen jagen sich entlang dieser Kurve ewig hinterher. Die dazugehörige periodische Eklipsenfolge lautet 123123...

Unsere Ergebnisse führten dazu, dass der Forschungsbereich regelrecht explodierte. Mit Hilfe des Prinzips der kleinsten Wirkung fanden Mathematiker etliche neue Kurven, die beispielsweise das N-Körper-Problem mit gleichen Massen

lösen. Die Achterform schaffte es mit dem chinesischen Science-Fiction-Roman von Liu Cixin, dessen deutsche Übersetzung den Titel »Die drei Sonnen« trägt, sogar in die Bestsellerlisten.

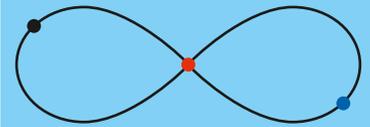
Trotz all dieser Fortschritte blieb mein Verdacht jedoch unbewiesen. Deswegen hatte ich mich im Herbst 2014 verzweifelt an Simó gewandt. Nachdem wir eine Nacht über mein Problem geschlafen hatten, sagte Simó am nächsten Morgen etwas, was mich nachhaltig prägte. »Wenn du mit deiner Vermutung richtigliegst, dass sich alle Eklipsenfolgen aus Lösungen des Dreikörperproblems ergeben, dann muss es irgendeinen dynamischen Mechanismus geben, der dahintersteckt.«

Auf der Suche nach versteckten Mechanismen

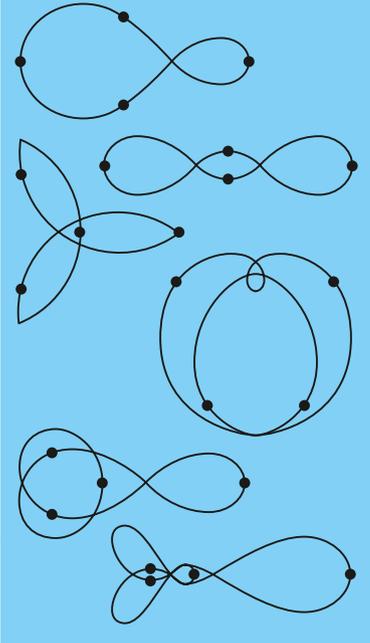
Diese Worte führten dazu, dass ich plötzlich anfang, meine langjährigen Überzeugungen zu überdenken. Ich gab meinen Versuch auf, eine Antwort über die minimale Wirkung zu suchen, und wandte mich stattdessen den dynamischen Modellen zu. Doch welche davon hatte ich im Dreikörperproblem überhaupt verstanden?

Tatsächlich kam mir eines in den Sinn, das meine Hoffnung aufrechterhielt. Als ich es genauer betrachtete, fiel mir eine etwa 20 Jahre alte Veröffentlichung des Mathematikers Rick Moeckel von der University of Minnesota ein. In den 1980er Jahren hatte er sich mit Flugbahnen von Körpern beschäftigt, die zusammenstoßen. Als ich seine

Lösung in Form einer 8



neue Bahnkurven



NIGEL HAWTHIN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

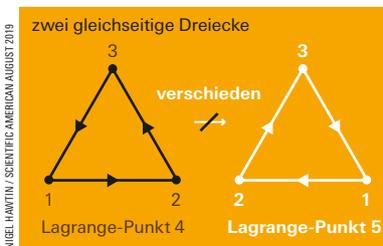
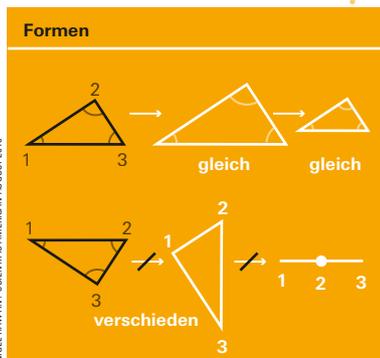
Aufsätze erneut durchsah, glaubte ich, den Schlüssel zu meinem Problem gefunden zu haben. Ich zögerte nicht lange, setzte mich mit Moeckel in Verbindung, und innerhalb weniger Tage gelang es uns, meine Frage zu beantworten – zumindest fast.

Anders als ich verfolgte Moeckel in seiner Arbeit nicht die genaue Position aller drei Massen, sondern konzentrierte sich auf ihre allgemeine Anordnung. Die drei Objekte formen stets ein Dreieck – wenn man auch »entartete« Versionen zulässt, deren Eckpunkte auf einer Geraden liegen und daher Eklipsen bilden. Anstatt Flugbahnen zu untersuchen, verzeichnet Moeckel, wie sich ein Dreieck mit der Zeit ändert. Dabei gelten zwei Anordnungen als gleich, wenn sie sich durch einfaches Verschieben, Drehen oder

Skalieren ineinander umwandeln lassen, also die gleiche Form haben. In diesem Fall spielen die Position des Massenschwerpunkts, die Größe und die Ausrichtung des Dreiecks keine Rolle mehr.

Die Bewegung dreier Körper führt in dem Modell von Moeckel zu einer

Kurve in einem komplizierten Raum, der aus Punkten besteht, die den möglichen Formen von Dreiecken entsprechen. Wie Mathematiker herausfanden, bildet dieser abstrakte Raum die Oberfläche einer Kugel, eine so genannte Formkugel. Sie ist zweidimensional, weil zwei Winkel bereits genügen, um die Form eines Dreiecks festzulegen. Nord- und Südpol stellen Anordnungen mit größtmöglicher Fläche dar, also gleichseitige Dreiecke. Diese beiden diametral angeordneten Dreiecke unterscheiden sich dadurch,

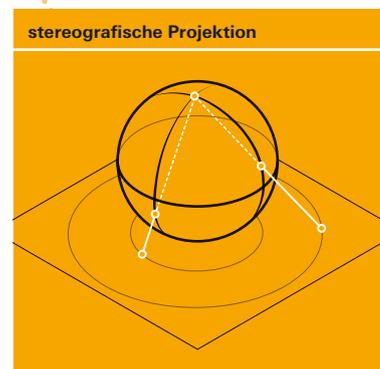


dass das eine die gespiegelte Version des anderen ist. Weil es keine Möglichkeit gibt, sie durch Drehen, Verschieben oder Skalieren ineinander umzuwandeln, sind die zwei gleichseitigen Dreiecke verschieden.

Ebenso besitzt jedes Dreieck auf der oberen Halbkugel ein gespiegeltes Gegenstück, das sich auf der unteren Halbkugel befindet, während der Äquator aus entarteten Dreiecken besteht.

Der Äquator enthält daher drei Punkte, an denen je zwei Körper zusammenstoßen, 12, 23 und 13. Bei diesen »Dreiecken« liegen zwei der drei Eckpunkte aufeinander. Um Kollisionen auszuschließen, muss man die Punkte von der Formkugel entfernen. Dadurch lässt sich erklären, warum der kollisionsfreie Konfigurationsraum gleich einer zweifach durchstochenen Ebene ist: Es gibt nämlich einen Mechanismus, die so genannte stereografische Projektion, die eine Kugeloberfläche mit einer zweidimensionalen Ebene verbindet.

Entfernt man einen Punkt auf einer Kugeloberfläche, etwa den Nordpol, und platziert eine Lichtquelle hinein, kann man die Sphäre auf eine darunter befindliche Ebene projizieren. Je näher ein Punkt der Lichtquelle ist, desto weiter tendiert seine Projektion in Richtung



Das Chaos zähmen

Die Bahnkurven von drei Körpern, die sich gegenseitig durch die Schwerkraft anziehen, lässt sich meist nicht exakt berechnen. Das liegt daran, dass die Bewegungen der Objekte – bis auf wenige Ausnahmen – chaotisch sind. Das heißt, kleinste Veränderungen können enorme Folgen haben: Kennt man die Bahnkurven eines Systems aus drei Sternen und variiert die Position des einen nur um wenige Millimeter, können die Flugbahnen plötzlich völlig verschieden verlaufen.

Erde, Mond und Sonne bilden ein eher problemloses Dreikörpersystem. Weil die Masse des Mondes und der Erde verhältnismäßig klein ausfallen, beeinflussen sie die Sonne kaum. Daher bewegen sich unser Planet und sein Trabant auf nahezu perfekten Ellipsen. Wenn drei Körper allerdings vergleichbare Massen haben, stoßen Forscher oft an ihre Grenzen, wenn sie deren Verhalten vorhersagen wollen. Sie müssen dann auf leistungsfähige Computer zurückgreifen, die oftmals tagelang rechnen.

Doch Ende 2019 haben zwei Forschergruppen neuartige Verfahren

entwickelt, um das jahrhundertealte Problem besser zu bewältigen.

Philip G. Breen von der University of Edinburgh nutzte gemeinsam mit seinen Kollegen künstliche Intelligenz (KI), um komplizierte Bahnen dreier Körper extrem schnell zu bestimmen. Dazu speiste das Team ein neuronales Netzwerk mit knapp 10000 Positionen dreier gleicher Massen, die anfangs ruhen, und den dazugehörigen durch konventionelle Computerprogramme berechneten Flugbahnen. Anschließend übergaben die Forscher der KI 5000 neue Startpositionen und ließen sie die Bewegun-

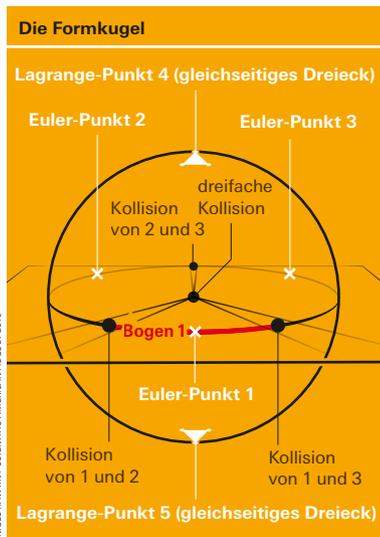
unendlich. Eine Ebene mit einem Punkt bei unendlich ist deshalb topologisch gesehen gleich einer Kugeloberfläche.

Platziert man die Lichtquelle der stereografischen Projektion in den Kollisionspunkt 13, kann man die Formkugel so ausrichten, dass die Bildpunkte des Äquators auf einer Geraden liegen. Eine Eklipsenfolge entsteht, wenn sich eine projizierte Kurve um die Kollisionspunkte windet und die Äquatorgerade kreuzt.

Es blieb herauszufinden, welche Kurven das Dreikörperproblem lösen. Dazu sah ich mir die fünf Typen von Umlaufbahnen dreier Körper an, für die es exakte Gleichungen gibt: Die von Euler und Lagrange entdeckten »zentralen Konfigurationen«. Sie entsprechen den einzigen Fällen, für welche die Form der Dreiecke zeitlich immer gleich bleibt.

Daher beschreiben diese Lösungen keine Kurven auf der Formkugel, sondern entsprechen einfachen Punkten.

Bei den »Lagrange-Lösungen« (genannt L4 und L5) bilden die drei Körper jederzeit ein gleichseitiges Dreieck. Daher befinden sie sich auf dem Nord- und Südpol der Formkugel. Die drei übrigen zentralen Konfigurationen sind die berühmten »Euler-Lösungen« (genannt E1, E2 und E3), die auf dem Äquator jeweils zwischen zwei Kollisionspunkten liegen. Bei diesen exakt berechenbaren Umlaufbahnen sind die drei Massen immer in einer geraden Linie angeordnet.

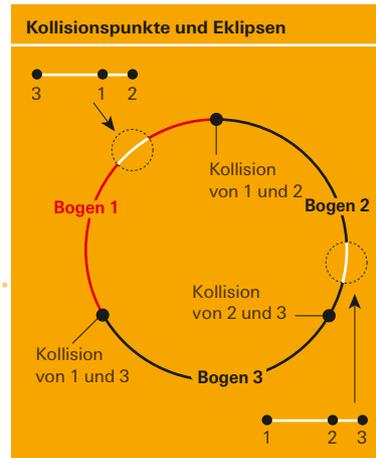


Eine weitere Besonderheit der zentralen Konfigurationen ist, dass die drei Massen keine Anfangsgeschwindigkeit haben. Man kann sich vorstellen, wie jemand plötzlich drei Körper im luftleeren Raum loslässt. Im Allgemeinen können in einem solchen Fall allerlei verrückte Dinge geschehen, bei denen die Massen etwa die wildesten Tänze vollführen oder sogar in die Unendlichkeit verschwinden.

Wenn man die Objekte allerdings in eine der fünf zentralen Konfigurationen anordnet und in Ruhe loslässt, führt die Schwerkraft dazu, dass sie sich geradlinig aufeinander zubewegen. Das von ihnen gebildete Dreieck schrumpft mit der Zeit immer weiter zusammen, ohne seine Form zu ändern, bis alle drei Körper gleichzeitig zusammenstoßen.

Eine solche dreifache Kollision ist aus mathematischer Sicht problematisch, weil sie chaotisches Verhalten verursacht. Wie der finnische Mathematiker Karl Sundman in den frühen 1900er Jahren bewies, führen ausschließlich die fünf zentralen Konfigurationen mit anfangs ruhenden Massen zu einer dreifachen Kollision.

Wenn sich drei Körper sehr nahekommen, ähnelt ihre Umlaufbahn der Lösung von einer der fünf zentralen Konfigurationen.



Da man diese exakt berechnen kann, wollte ich diese Eigenschaft nutzen, um meinen Verdacht zu beweisen. Sundmans Arbeit allein half mir jedoch nicht, denn sie steckt voll komplizierter Algebra und Analysis, wodurch seine Ergebnisse intuitiv kaum zu verstehen sind. Glücklicherweise entwickelte der US-amerikani-

gen der Objekte vorhersagen. Die Ergebnisse der KI stimmten extrem gut mit den tatsächlichen Lösungen überein. Dabei arbeitet das neuronale Netz viel schneller als gewöhnliche Computerprogramme. Breen und seine Kollegen hoffen in Zukunft mit ihrer Methode Dreikörperprobleme zu lösen, die für herkömmliche Algorithmen nicht bewältigbar sind.

Nicolas Stone von der Hebrew University in Jerusalem und Nathan Leigh von der Universidad de Concepción in Chile wählten einen anderen Ansatz, um die anspruchsvolle Aufgabe ganz ohne Computer

anzugehen. Sie konzentrierten sich dabei auf Objekte mit vergleichbaren Massen. Solche Systeme enden meist damit, dass sich einer der drei Körper irgendwann herauslöst und ins Unendliche verschwindet, während die zwei übrigen ein gebundenes Zweikörpersystem bilden. Stone und Leigh haben eine statistische Methode entwickelt, um den Endzustand solcher Systeme vorherzusagen. Kennt man die Positionen und Geschwindigkeiten der drei Massen, liefert ihr Ansatz die Wahrscheinlichkeit dafür, welcher Körper wie schnell wohin verschwindet und wie

die Flugbahnen der zwei übrigen gebundenen Objekte aussieht. Die zwei Forscher können dadurch ganz ohne aufwändige Computerprogramme den Endzustand eines Dreikörpersystems bestimmen.

QUELLEN

Breen, P.G. et al.: Newton vs the machine: solving the chaotic three-body problem using deep neural networks. arXiv 1910.07291, 2019

Stone, N.C., Leigh, N.W.C.: A statistical solution to the chaotic, non-hierarchical three-body problem. Nature 576, 2019

sche Mathematiker Richard McGehee in den 1970er Jahren die so genannte Blow-up-Methode, wodurch man die Bewegungen fast kollidierender Körper besser nachvollziehen kann.

Die größte Schwierigkeit einer dreifachen Kollision ist, dass die newtonschen Bewegungsgleichungen in diesem Fall versagen. Sobald sich der Abstand r der Massen der Null nähert, wachsen einige Größen in den Gleichungen ins Unendliche. McGehee fand einen Ausweg, indem er die Variablen des Konfigurationsraums und der Zeit änderte, wodurch er die Kollision verzögerte und den problematischen Punkt $r = 0$ zu einer Sammlung von Punkten »aufblies«. Aus dem einzelnen Kollisionspunkt wird ein Kollisionsraum, der überraschenderweise der Formkugel entspricht. Dadurch verschwinden die Unendlichkeiten und es entsteht ein neuer Satz von Bewegungsgleichungen, die sogar im Punkt $r = 0$ funktionieren.

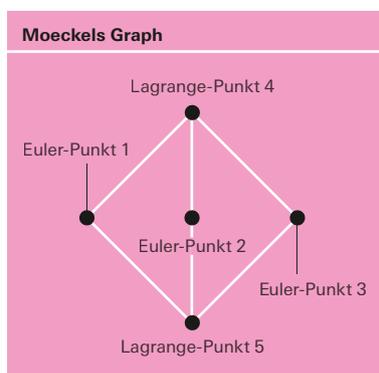
Zum Gleichgewicht hin und wieder weg

Während es für die newtonschen Gleichungen keine Anordnung gibt, in der die drei Körper für alle Zeiten ruhen, existieren solche Gleichgewichtspunkte im abgeänderten System: Sie entstehen, wenn die Massen zusammenstoßen. Insgesamt gibt es zehn Gleichgewichtspunkte, je zwei für jeden der fünf zentralen Konfigurationen. Das liegt daran, dass die Bewegungsgleichungen unverändert bleiben, wenn man die Zeit umkehrt. Daher können alle Prozesse genauso rückwärts ablaufen: Man kann einerseits drei ruhende Massen in einer zentralen Konfiguration loslassen, wodurch sie kollidieren und ihren Gleichgewichtspunkt erreichen, andererseits können drei Massen aus einem Punkt heraus »explodieren« und in einer zentralen Konfiguration enden.

Diese zwei Lösungen – Kollision und Explosion – passen reibungslos zusammen und lassen sich aneinanderreihen. Eine solche »Explosionskollisionslösung« beginnt bei $r = 0$, wo sich die drei Massen am selben Punkt befinden. Danach wächst r und die Massen gewinnen an Abstand, bis r maximal wird. Dann kehrt sich der Vorgang um, die Körper nähern sich wieder, und r schrumpft, bis es im Kollisionsraum endet, wo alle drei Massen zusammenstoßen und einen Gleichgewichtspunkt erreichen.

Wie Moeckel herausfand, lösen einige der zusammengeführten Lösungen das Dreikörperproblem. Um das zu erkennen, brauchte er allerdings aktuelle Ergebnisse aus der Erforschung dynamischer Systeme, die Newton, Lagrange oder Sundman noch nicht zur Verfügung standen.

Durch einen Graphen veranschaulichte Moeckel, welche Arten von Explosionen und Kollisionen zusammenpassen. Dazu brauchte er fünf Knoten, die jeweils eine



NIEL HAWTHIN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

zentrale Konfiguration repräsentieren, und verband diese über sechs Kanten miteinander. Jeder Weg auf diesem Diagramm ist eine Lösung des Dreikörperproblems, wobei die Umlaufbahnen dabei zeitweise denen einer zentralen Konfiguration ähneln.

Ein Beispiel dafür ist der Weg E1–L4–E2–L5: Zuerst explodieren die Körper aus einem Gleichgewichtspunkt in eine E1-Konfiguration. Irgendwann kehrt sich die Bewegung um, die Massen nähern sich und haben die Form einer L4-Anordnung, bis sie fast zusammenstoßen. Im letzten Moment entfernen sie sich jedoch wieder voneinander und bilden dabei eine E2-Konstellation, wonach sie in einer L5-Konfiguration aufeinander zurasen.

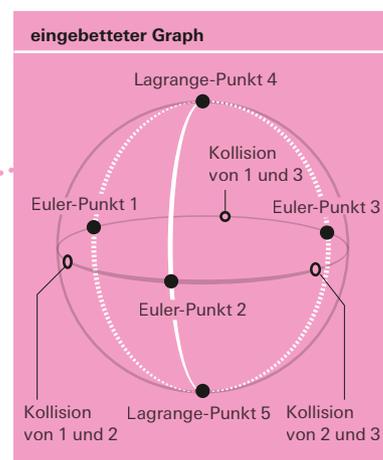
Kurz nachdem Simó bei meinem Besuch einen dynamischen Mechanismus erwähnt hatte, wurde mir klar, dass sich Moeckels Graph auf die Formkugel auftragen lässt.

Überraschenderweise enthält dieser eingebettete Graph die gleichen topologischen Informationen wie die Formkugel: Die dreifach durchstochene Sphäre

lässt sich zu dem eingebetteten Diagramm verformen, wenn man die Kollisionslöcher so stark vergrößert, dass sie sich fast berühren und nur noch ihre Umrandungen übrig bleiben. Man kann daher jede Kurve auf der Formkugel auf einen Weg entlang des eingebetteten Graphen abbilden. Wie Moeckel gezeigt hatte, lösen diese Wege immer ein Dreikörperproblem – damit war ich fast fertig! Denn daraus würde folgen, dass es zu jeder Eklipsenfolge eine Lösung des Dreikörperproblems gibt.

In meiner Vorstellung machte das alles Sinn. Doch um diese Gedanken zu beweisen, fehlte noch ein entscheidender Schritt. Ich musste erst sicherstellen, dass nichts schief läuft, wenn man den Graphen auf die Formkugel aufträgt. Projiziert man die von Moeckel berechneten Lösungen auf die Sphäre, dürfen sie nicht zu stark von ihrer ursprünglichen Form abweichen. Wenn sich eine Kurve beispielsweise einmal mehr um einen Kollisionspunkt auf der Formkugel windet, dann entspräche sie topologisch gesehen einem anderen Weg auf dem Graphen, womit sich auch die Reihenfolge der Eklipsen unterscheiden würde.

An diesem Punkt steckte ich wirklich fest. Deshalb bat ich Moeckel in einer E-Mail um Hilfe. Seine Antwort kam postwendend: »Du willst mich ernsthaft zwingen, meine Veröffentlichungen von vor über 20 Jahren zu lesen?« Trotzdem tauchte er wieder in seine alte Forschung ein. Und tatsächlich gelang es ihm zu beweisen, dass die projizierten Lösungen immer in der Nähe des eingebetteten Graphen landen. Meine Frage war also endlich bejaht – aber nur fast.



NIEL HAWTHIN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019

Die Lösungen des Dreikörperproblems, welche die Wirkung aller Kurven mit einer bestimmten Eklipsenfolge minimieren, müssen einen Drehimpuls von null haben. Moeckel braucht allerdings ein klein wenig Drehimpuls, um die Lösungen zu erhalten, die sich entlang der Kanten seines Graphen bewegen.

Und es gibt noch einen weiteren Haken. Sobald die Lösungen von Moeckel den Äquator der Formkugel in der Nähe eines Euler-Punkts kreuzen, schwingen sie um den Äquator herum hin und her, bevor sie weiterwandern. Das führt dazu, dass sich die Ziffern der entsprechenden Eklipsenfolge häufig wiederholen. Man nennt eine Folge N -lang, wenn alle Ziffern der Folge mindestens N -mal hintereinander auftreten. Beispielsweise ist 111222333332222 drei-lang, weil die 1 nur dreimal hintereinander erscheint. Wegen der auftretenden Schwingungen konnten Moeckel und ich meine Vermutung nur für sehr lange Folgen beweisen.

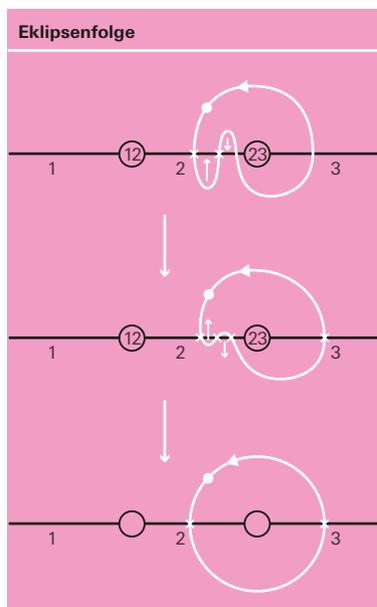
Das zwei Jahrzehnte alte Problem scheint gelöst – aber nur fast

Formal lautet unser Ergebnis: Für ein Dreikörperproblem mit kleinem Drehimpuls existiert eine große positive ganze Zahl N , so dass es zu jeder beliebigen N -langen Eklipsenfolge eine Lösung des Dreikörperproblems gibt. Wenn die Folge periodisch ist, dann ist es die Lösung ebenfalls.

In meiner ursprünglichen Frage tauchte allerdings kein großes N auf – ich wollte eine Aussage für jede Eklipsenfolge und nicht nur für extrem lange. Doch ich muss gestehen, dass ich mich in Wirklichkeit nicht für Eklipsen interessierte, sondern für Kurven. Eigentlich wollte ich herausfinden, ob es zu jedem topologischen Typ einer Kurve eine Lösung des Dreikörperproblems gibt.

Ein topologischer Typ besteht aus allen Objekten, die topologisch gleich sind. Für Kurven heißt das, dass sie sich problemlos ineinander verformen lassen. Beispielsweise ist ein Kreis in der Ebene gleich einer Ellipse. Wenn man geschlossene Kurven auf durchlöchernten Körpern betrachtet, wird es hingegen komplizierter, denn in diesen Fällen können sie sich um die Löcher winden. Solche Kurven unterscheiden sich beispielsweise von jenen, die kein Loch umschließen.

Der topologische Typ einer Kurve auf der Formkugel lässt sich durch eine Eklipsenfolge charakterisieren, die bestimmt, wie sich die Kurve um die Kollisionslöcher windet. Allerdings können verschiedene Folgen den gleichen



topologischen Typ repräsentieren. Zum Beispiel beschreiben 23, 2223, 222223 und 2333 allesamt Kurven, die einmal um das Loch 23 herumgehen. Wann immer eine Kurve zweimal hintereinander den gleichen Bogen kreuzt, kann man diese Schwingungen glätten, wodurch sich die doppelten Durchgänge aufheben. Zwei aufeinander folgende Eklipsenzahlen lassen sich daher löschen, ohne dass sich dabei der topologische Typ einer Kurve ändert. Entfernt man alle doppelten Ziffern, entsteht eine so genannte zulässige Eklipsenfolge.

Wenn man doppelte Ziffern streichen kann, dann lassen sich auch Paare hinzufügen. Das kommt unserem Problem zugute. Hat man eine kurze Eklipsenfolge, etwa 123232, auf die das Theorem nicht zutrifft, kann man sie verlängern. Dazu wählt man eine ungerade Zahl n , die mindestens so groß ist wie N . Danach potenziert man jede Ziffer mit n , wobei die Potenz für die Anzahl aufeinander folgender Ziffern steht, etwa $1^3 = 111$. Aus 123232 wird $1^n 2^n 3^n 2^n 3^n 2^n$. Die längere Folge ist vom gleichen topologischen Typ wie die vorige, da n ungerade ist. Auf diese Weise kann man unser Theorem anwenden: Zur langen Eklipsenfolge gibt es eine periodische Lösung des Dreikörperproblems, die den gleichen topologischen Typ hat wie die zu 123232 gehörige Kurve.

Das klingt, als hätten wir es geschafft. Doch wir haben noch viel harte Arbeit vor uns. Als ich meine Frage vor fast 20 Jahren stellte, wollte ich nur Lösungen mit einem Drehimpuls von null. Inzwischen mehren sich aber die Hinweise, dass die Antwort für einen solchen Fall nein lautet. Es deutet sogar einiges darauf hin, dass es selbst zur einfachsten periodischen Folge 23 keine periodische Lösung des drehmomentfreien Dreikörperproblems gibt. Außerdem suchen wir noch nach einem Theorem, das sich auf zulässige Folgen anwenden lässt, und nicht nur auf ihre verlängerten Versionen.

Zwar habe ich mein Problem nach zwei Jahrzehnten intensiver Forschung noch nicht ganz gelöst, doch auf dem Weg dahin habe ich viel Neues gelernt. Ich werde auf jeden Fall weiter dranbleiben. Meiner Meinung nach kann es sich für jeden lohnen, an solchen »hoffnungslosen« Problemen zu arbeiten. Denn die Geschichte der Mathematik lehrt uns, dass man selbst in einer Sackgasse spannende Erkenntnisse gewinnen kann. ◀

QUELLEN

- Chenciner, A. et al.:** Simple choreographic motions of N bodies: Preliminary study. In: Newton, P. et al. (Hg.): Geometry, mechanics, and dynamics. Springer, 2002
- Chenciner, A., Montgomery, R.:** A remarkable periodic solution of the three-body problem in the case of equal masses. *Annals of Mathematics* 152, 2000
- Moeckel, R., Montgomery, R.:** Realizing all reduced syzygy sequences in the planar three-body problem. *Nonlinearity* 28, 2015
- McGehee, R.:** Triple collision in the collinear three-body problem. *Inventiones mathematicae* 27, 1974
- Sundman, K.:** Mémoire sur le problème des trois corps. *Acta Mathematica* 36, 1912

ÖKOLOGIE FORTPFLANZUNG ALS KNOCHENARBEIT

Einmal im Leben setzen Aale alles auf die Fortpflanzung – was ihnen im wahrsten Sinne an die Knochen geht. Mit dieser Strategie waren sie jahrmillionenlang bestens an ihre Wanderung zu den Laichgründen im Ozean angepasst. Doch inzwischen gefährdet der Mensch das evolutionäre Erfolgsrezept.

Am Aal als Speisefisch scheiden sich die Geister: Geräuchert und in dekorative Häppchen geschnitten ist er für die einen eine saftige Delikatesse, die anderen machen um die vor Fett triefende Kalorienbombe lieber einen großen Bogen. Freilich ist der hohe Fettgehalt des Aals keine bloße Laune der Natur, sondern die perfekte Anpassung an seinen einzigartigen Lebenswandel als Globetrotter. Wie bereits vor etwa 100 Jahren der dänische Biologe Johannes Schmidt (1877–1933) erkannte, laicht der Europäische Aal (*Anguilla anguilla*) in einer als Sargassosee bekannten tropischen Region des Atlantischen Ozeans. Hier schlüpfen die Larven, glasartig durchsichtige, weidenblattförmige Winzlinge,

die sich auf den über 5000 Kilometer langen Weg zu den europäischen Heimatflüssen ihrer Eltern machen. Jahre später kehren die geschlechtsreifen Tiere – streckenweise gegen die Strömung – für die Laichablage in die Sargassosee zurück (siehe »Der Lebenszyklus der Aale«, rechts).

Hungernd auf Wanderschaft

Wahrscheinlich meistert jeder Aal diese Strapaze nur ein einziges Mal und stirbt nach dem Abbläuen den Erschöpfungstod. Denn beim Aufbruch gen Süden hat sich sein Darm völlig zurückgebildet, so dass er auf der Wanderung keinerlei Nahrung mehr zu sich nehmen kann. Und während dieser ganzen Zeit, in der er

ausschließlich von seinen Fettreserven zehrt, muss er nicht nur den Energiebedarf seiner Schwimmmuskulatur decken, sondern auch noch die unterwegs heranwachsenden Geschlechtsorgane versorgen. Somit stellt der Aal am Ende seines Lebens seinen Körper völlig in den Dienst der Fortpflanzung.

Frei im Ozean schwimmende Aale lassen sich bislang nicht physiologisch untersuchen. Um herausfinden, wie sich ihr Stoffwechsel an die Herausforderung des monatelangen Fastens anpasst, wandten Wissenschaftler um Marko Freese vom Thünen-Institut für Fischereiökologie in Bremerhaven einen Trick an: Sie behandelten aufbruchbereite Aale mit Hormonen und konnten dadurch die während der Wanderung einsetzende Reifung der Geschlechtsorgane experimentell auslösen.

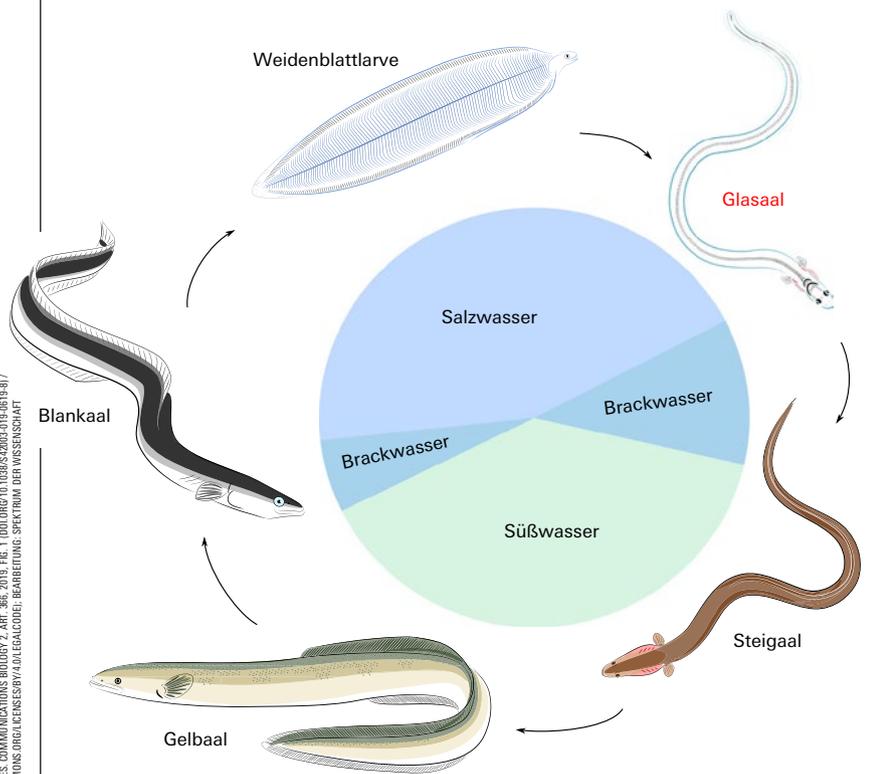
Wie erwartet, mobilisieren die Fische ihre Fettdepots, nutzen aber nur einen Teil davon für die Energiegewinnung. Der Rest wird in die Geschlechtsorgane investiert – vor allem bei den weiblichen Tieren, die ihre Eizellen mit einem Vorrat an fettreichem Dotter ausstatten müssen. Weitere dramatische Veränderungen zeigen sich an Muskeln und Knochen, deren Masse bedenklich schwindet. Auch die Mineralstoffe Kalzium und Phosphor, die aus dem Skelett mobilisiert werden, finden sich zu einem großen Teil in den Geschlechtsorganen wieder. Letztlich nimmt insbesondere bei den Weibchen die Knochendichte kontinuierlich so stark ab, dass die Wirbelknochen löchrig wirken. Durch diesen osteoporoseähnlichen Zustand wird der ganze Körper einschließlich der Stabilität des Skeletts gefährlich geschwächt. Somit sehen die Forscher die Hypothese bestätigt, dass mit der Rückkehr

In manch sauberem Fluss Europas kann man noch auf einen ausgewachsenen Aal stoßen. Doch die Art gilt mittlerweile als vom Aussterben bedroht.



ROSTISLAW / STOCK.ANDRE.COM

Der Lebenszyklus der Aale



Die weidenblattförmigen Larven des Europäischen Aals (*Anguilla anguilla*) – lange Zeit fälschlicherweise für eine eigene Art gehalten – schlüpfen in der atlantischen Sargassosee und werden vom Golfstrom nach Nordosten verfrachtet (ozeanische Lebensphase). Während dieser Zeit wandelt sich ihre Gestalt zur Schlangenform der immer noch durchsichtigen Glasaale. Diese wandern in die Flüsse ein (kontinentale Lebensphase) und entwickeln eine gelbliche Bauchfärbung. Nach 5 bis 20 Jahren sind sie geschlechtsreif, haben jetzt einen silbrigen Bauch und kehren als Blankaaale zur Laichablage in die Sargassosee zurück.

in die Sargassosee und der Laichablage das Leben der Aale zwangsläufig endet.

Dass die Fische während ihrer langen Wanderstrecke durch den Ozean zu Gunsten der Entwicklung der Geschlechtsorgane am ganzen Körper Raubbau betreiben, hat sich offenbar über Jahrtausende der Evolution bewährt. Denn nicht nur der Europäische Aal ist ein Wanderfisch, auch der nächstverwandte Amerikanische Aal (*Anguilla rostrata*) laicht im westlichen Teil der Sargassosee. Und eine dritte Art, *Anguilla japonica*, begibt sich von

ihren Heimatgewässern aus auf eine entsprechende Wanderung im Pazifik.

Doch seit den 1970er Jahren nehmen die Populationen aller drei Arten dramatisch ab. Als Räuber, die am oberen Ende der Nahrungskette stehen, sind Aale in besonderer Weise von der industriellen Gewässerverschmutzung betroffen. Vor allem beim Aufenthalt in den Flussmündungen ist ihre Beute reichlich mit anthropogenen organischen Verbindungen wie Dioxin, Pestiziden und polychlorierten Biphenylen (PCB) belastet sowie mit Schwermetallen, darunter Kadmium,

Kupfer und Quecksilber. Während sich die organischen Verbindungen hauptsächlich in den Fettdepots der Aale einlagern, gelangen die Schwermetalle den Analysen der Bremerhavener Forscher zufolge in die Knochen. Ein großer Teil dieser Umweltgifte wird bei den geschlechtsreifen Aalen zusammen mit Mineralstoffen und Fettreserven mobilisiert und wandert ebenfalls in die Geschlechtsorgane. So werden schon die Eizellen und Spermien mit der ganzen Schmutzfracht der Elterntiere beladen, und die Larven treten ihr Leben unter erschwerten Bedingungen an.

Botschafter für gefährdete Arten

Die von Fettgewebe und Knochen ausgehende Belastung ist nicht zu unterschätzen, auch wenn andere Ursachen wie Überfischung und Gewässerverbauung dem Aal zweifelsohne ebenfalls zusetzen. Dazu kommt ein durch Fischhandel verbreiteter Parasit, der aus Asien stammende Schwimmblasenwurm *Anguillicoloides crassus*, sowie eventuell der Klimawandel. Da sich von den genannten Faktoren bislang keine Hauptursache für den Rückgang der Aalbestände dingfest machen ließ, vermutet man ein komplexes Zusammenspiel mehrerer oder aller genannten Faktoren. Der Europäische Aal wird in der Roten Liste der Weltnaturschutzunion IUCN mittlerweile als vom Aussterben bedrohte Spezies geführt und war 2009 und 2018 als Fisch des Jahres Botschafter für gefährdete Arten. Ob er sich durch die inzwischen eingeleiteten internationalen Schutzmaßnahmen, insbesondere die Reglementierung von Befischung und Handel, erholen kann, bleibt abzuwarten. ◀

Annette Hille-Rehfeld ist promovierte Biologin, Wissenschaftsjournalistin und Autorin in Stuttgart.

QUELLEN

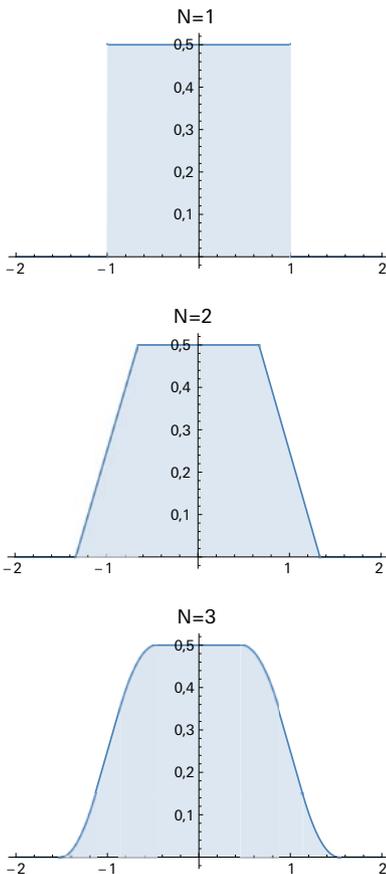
Drouineau, H. et al.: Freshwater eels: A symbol of the effects of global change. *Fish and Fisheries* 19, 2018

Freese, M. et al.: Bone resorption and body reorganization during maturation induce maternal transfer of toxic metals in anguillid eels. *PNAS* 116, 2019

STATISTIK IRREFÜHRENDE MUSTER

Lange wunderten sich Mathematiker über eine Folge von Integralen, die bis zum 56. Glied den gleichen Wert liefern und dann plötzlich davon abweichen. Nun haben Physiker eine Methode entwickelt, um dieses verblüffende Phänomen intuitiv nachzuvollziehen.

► Menschen nutzen Muster, um daraus Regeln zu konstruieren. Weil die Sonne in der Vergangenheit beispielsweise immer im Osten aufging, gehen wir davon aus, dass sie das auch morgen tun wird. Inzwischen können wir dieses Phänomen natürlich physikalisch erklären, so dass es keinerlei Zweifel daran gibt. In der



Im ersten Schritt sind die Random Walker noch gleichverteilt (oben), ab dem zweiten Schritt können die am Rand befindlichen Walker über die zuvor festgelegten Grenzen hinauswachsen (Mitte). Nach und nach verschmiert die Verteilung immer weiter nach außen (unten).

Mathematik sollte man sich allerdings vor voreiligen Schlüssen hüten.

2001 entwickelte der kanadische Mathematiker David Borwein (* 1924) zusammen mit seinem Sohn Jonathan (1951–2016) mehrere Folgen von Integralen, die viele ihrer Kollegen erstaunten. Eine der Folgen ergibt für die ersten 56 Glieder beispielsweise den Wert $\pi/2$, doch ab dem 57. Glied werden die Ergebnisse plötzlich kaum merklich kleiner – dieses Folgenglied weicht um bloß 10^{-110} vom vorhergehenden ab. Als Forscher die Integrale erstmals am Computer auswerteten, glaubten sie an einen Fehler im Programmcode.

Die Borweins veröffentlichten ein Theorem, das beschreibt, wie lange ihre Integralfolgen das gleiche Ergebnis liefern, bis sie davon abweichen (tatsächlich gibt es einen Extremfall, bei dem das Muster erst nach 10^{176} Gliedern zusammenbricht). Dazu lieferten sie einen mathematischen Beweis, der zwar korrekt ist, aber nicht erklärt, warum sich die Integrale so seltsam verhalten. Was ist der Grund dafür, dass die Folgen irgendwann plötzlich ihren Wert ändern?

Im Sommer 2019 lieferten die zwei Physiker Satya Majumdar und Emmanuel Trizac von der Université Paris Sud eine neue Sichtweise auf das Problem, wodurch es sich nun auch intuitiv nachvollziehen lässt. Inspiriert wurden sie von einer 2014 veröffentlichten Arbeit von Hanspeter Schmid, Professor für Mikroelektronik an der Fachhochschule Nordwestschweiz. Die neue Methode beschränkt sich dabei nicht bloß auf die gewöhnlichen Borwein-Integrale, sondern lässt sich auch auf andere Folgen und höhere Dimensionen anwenden.

Um die Überlegungen der Physiker nachzuvollziehen, hilft es, die einfachste Folge von Borwein-Integralen zu betrachten:

$$I_k = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{n=1}^k \frac{\sin\left(\frac{x}{2n-1}\right)}{\frac{x}{2n-1}} dx$$

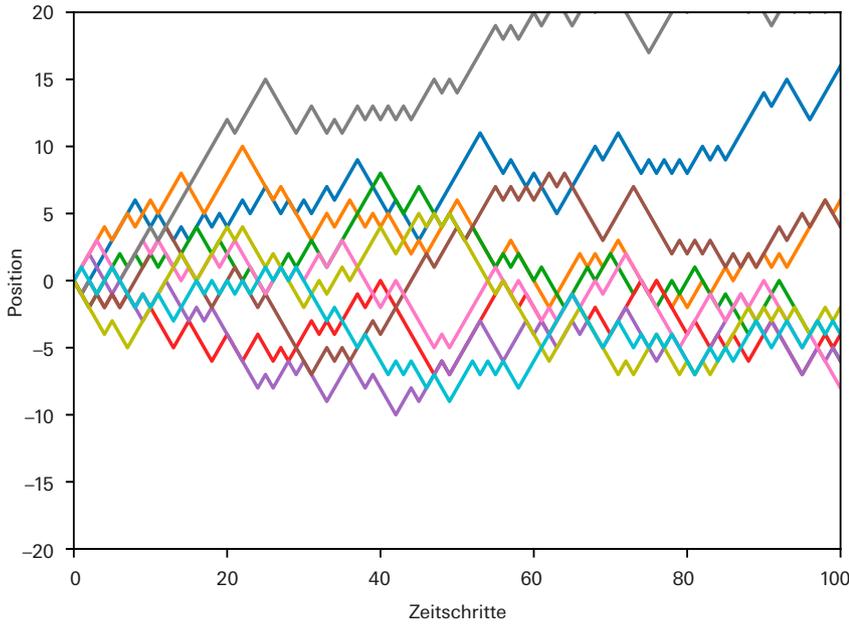
Dabei handelt es sich um Integrale aus Produkten von Sinusfunktionen, die man durch ihr jeweiliges Argument teilt. Die ersten sechs führen zum Ergebnis π , doch das siebte weicht in der zehnten Nachkommastelle davon ab. Was genau passiert beim Übergang von sechs nach sieben?

Majumdar und Trizac fiel auf, dass die seltsame Integralfolge mit der Gleichverteilung aus der Stochastik zusammenhängt. Man kann also gleichverteilte Ereignisse nutzen, um Borwein-Integrale zu modellieren.

Random Walk

Und genau das taten die zwei Physiker. Sie verwendeten ein weit verbreitetes Werkzeug aus der Statistik, den »Random Walk«, der eine zufällige Bewegung modelliert: Jeder Schritt erfolgt zufällig in eine Richtung, und auch die zurückgelegte Distanz wird zufällig aus einem gleichverteilten Intervall gewählt. Dieser stochastische Prozess findet in den verschiedensten Bereichen Anwendung, etwa um Börsenkurse, Jagdrouten von Wildtieren oder die Molekülbewegungen in einem Gas zu simulieren.

Die Forscher modellierten die Borwein-Integrale durch einen eindimensionalen Random Walk. Das heißt, bei jedem Schritt springt man nach links oder nach rechts auf einen Punkt des Zahlenstrahls, der um eine zufällig gewählte Distanz entfernt liegt. Das Modell von Majumdar und Trizac besteht nicht bloß aus einem, sondern aus unendlich vielen Random Walkern, die alle am Nullpunkt starten. Im ersten Schritt können sie auf eine Zahl zwischen -1 und 1 springen. Das



Wissenschaftler nutzen Random Walks, um die verschiedensten Phänomene zu modellieren, von Molekülbewegungen über Börsenkurse hin zum Jagdverhalten von Wildtieren.

Intervall ist so gewählt, dass es dem ersten Vorfaktor ($\frac{1}{2^{2n-1}}$) in der Sinusfunktion des Integrals entspricht. Im zweiten Schritt beträgt die Reichweite der Random Walker bloß noch $\frac{1}{3}$, was den zweiten Vorfaktor darstellt, und so weiter. Nach n Schritten können sie höchstens noch einen um $\frac{1}{2^{2n-1}}$ entfernten Punkt erreichen.

Den zwei Physikern fiel auf, dass der Anteil aller Random Walker, die sich nach dem n -ten Schritt auf dem Nullpunkt befinden, bis auf eine Konstante dem n -ten Borwein-Integral entsprechen. Um also das irreführende Muster nachzuvollziehen, das so viele Mathematiker in der Vergangenheit erstaunte, muss man verstehen, wie sich die Random Walker auf dem Zahlenstrahl verteilen.

Im Ausgangszustand befinden sich alle auf dem Nullpunkt. Dann werden sie frei gelassen. Da die Walker jeden Punkt zwischen -1 und 1 mit der



JAHRGANGS CD-ROM 2019

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland). Ab März 2020

Tel. 06221 9126-743
service@spektrum.de
Spektrum.de/sammeln

12 Hefte 1–12/2019
 Register: 1978–2019
 Onlineartikel
 1997–2019
 © 2020 Spektrum der Wissenschaft
 Verlagsgesellschaft mH
 ISBN 978-3-95992-383-6

gleichen Wahrscheinlichkeit erreichen können, breiten sie sich gleichmäßig in diesem Intervall aus. Es befinden sich daher gleich viele Walker am Nullpunkt wie am Rand (siehe Bild S. 22).

Im zweiten Schritt wandern sie gleichverteilt weiter, allerdings können sie sich dieses Mal nur maximal um $\frac{1}{3}$ von ihrem aktuellen Standort entfernen. Dadurch verändert sich ihre Verteilung entlang des Zahlenstrahls. Diejenigen, die sich nach dem ersten Schritt am Rand der Verteilung befanden, also beispielsweise in der Nähe von 1, können diese Grenze nun überwinden. Da der Bereich der Zahlen, die größer sind als eins, nach dem ersten Schritt leer ist, findet eine gerichtete Fließbewegung statt: Einige der am Rand befindlichen Walker betreten den unbevölkerten Bereich, andersherum kommen aus der leeren Zone aber keine Walker zurück. Daher vermindert sich ihr Anteil in den Intervallen $[\frac{2}{3}, \frac{4}{3}]$ und $[-\frac{4}{3}, -\frac{2}{3}]$, die Verteilung flacht an den Rändern also ab. Zwischen den Punkten $-\frac{2}{3}$ und $\frac{2}{3}$ sind die Walker dagegen immer noch gleichverteilt, da genauso viele das Gebiet verlassen wie neu betreten. Weil das zweite Borwein-Integral nur vom Anteil der Walker abhängt, die sich am Nullpunkt befinden, bleibt das Ergebnis dadurch unverändert.

Begrenzte Reichweite

Im nachfolgenden Schritt dürfen sich die Walker um maximal $\frac{1}{5}$ nach rechts oder links weiterbewegen. Deshalb herrscht bloß noch zwischen den Punkten $-(1 - \frac{1}{3} - \frac{1}{5})$ und $1 - \frac{1}{3} - \frac{1}{5}$ eine Gleichverteilung.

Nach jedem weiteren Schritt verkleinert sich der gleichverteilte Bereich, bis er irgendwann ganz verschwindet. Dieser Fall tritt nach dem sechsten Schritt ein, da: $1 - \frac{1}{3} - \frac{1}{5} - \frac{1}{7} - \frac{1}{9} - \frac{1}{11} - \frac{1}{13} - \frac{1}{15} < 0$. Die Verteilung der Walker über den Zahlenstrahl verschmiert daraufhin mit zunehmender Zeit und wird dabei immer breiter. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Walker, die sich am Nullpunkt befinden, stetig ab.

Die zwei Physiker erklären in ihrer Arbeit, wie man sich den Umbruch intuitiv vorstellen kann: Wenn man

unendlich viele Random Walker von -1 bis 1 verteilt, wissen die am Nullpunkt nichts von den Grenzen bei -1 und 1 – aus ihrer Sicht wirkt es, als seien die Walker über den gesamten Zahlenstrahl verteilt. Erst wenn die Walker, die im ersten Schritt eine dieser Grenzen erreicht hatten, wieder an den Nullpunkt zurückkehren, erfahren die stehen gebliebenen davon. Das ist frühestens nach sieben Schritten möglich. Demnach bricht das wiederkehrende Muster einer Integralfolge immer dann zusammen, wenn alle Walker erfahren, dass die für sie erreichbare Welt beschränkt ist.

Damit haben Majumdar und Trizac das ehemals rein mathematische Problem in den Bereich der statistischen Physik verfrachtet und es dadurch anschaulich erklärt. Mit ihrem Ansatz lassen sich auch kompliziertere

Integrale in höheren Dimensionen verstehen. »Weil die Konzepte des Random Walks in so vielen verschiedenen Bereichen auftauchen, bin ich überzeugt, dass sich durch unsere Idee künftig weitere anwendungsbezogene Identitäten und Integrale ergeben werden«, sagt Trizac. ◀

Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum«.

QUELLEN

Borwein, D., Borwein, J.M.: Some remarkable properties of sinc and related integrals. The Ramanujan Journal 5, 2001

Majumdar, S.N., Trizac, E.: When random walkers help solving intriguing integrals. Physical Review Letters 123, 2019

Schmid, H.: Two curious integrals and a graphic proof. Elemente der Mathematik 69, 2014

PHYSIK DIE VERMESSUNG DER LEICHTIGKEIT

Neutrinos sind die leichtesten bekannten Elementarteilchen. Nun gibt ein Karlsruher Experiment Aufschluss über ihre Masse.

► In manchen Situationen wirken selbst Quarks ziemlich schwer. Die Grundbausteine von Atomkernen bringen höchstens 10^{-30} Kilogramm auf die Waage, das Billiardstel eines billiardstel Kilogramms. Doch vergleicht man sie mit Neutrinos, den mysteriösesten unter den bekannten Elementarteilchen, wirken Quarks so, als hätten sie ein Gewichtsproblem. Denn nach allem, was Physiker bisher wissen, sind Neutrinos nochmals millionenfach leichter.

Doch wie schwer sind sie genau? Die Sonne und andere Strahlungsquellen im Weltall stoßen die Teilchen zwar in gigantischer Anzahl aus; durch jeden Quadratzentimeter auf der Erde flitzen zu jeder Sekunde zig Milliarden Neutrinos. Die beinahe lichtschnellen Teilchen interagieren aber fast nicht mit gewöhnlicher Materie und fliegen einfach so hindurch – man kann sie

also nicht einfach einfangen und auf eine Waage legen.

Forscher können die Masse der Neutrinos daher nur auf Umwegen eingrenzen. Eine Möglichkeit ist, die kosmische Hintergrundstrahlung eingehend zu analysieren – sie ist eine Art Nachglimmen des Urknalls, aus dem sich rekonstruieren lässt, wie die Materie verteilt war, als der Kosmos erst 380000 Jahre alt war. Damals sollte es Neutrinos bereits in großer Menge gegeben haben. Und mit ihrer Masse müssten sie die Entwicklung des Alls auf nachvollziehbare Art und Weise beeinflusst haben. Derartige Abschätzungen basieren jedoch auf vielen Annahmen – und haben bisher kein eindeutiges Ergebnis erbracht.

Physiker arbeiten deshalb seit Langem an direkteren Wegen zur Ermittlung der Neutrinomasse. Das wohl ambitionierteste dieser Projekte,



MARKUS BREIG, KIT

das Karlsruher Tritium-Neutrino-Experiment (KATRIN), hat nun nach langer Anlaufzeit seine ersten Ergebnisse vorgelegt. Demnach haben die geisterhaften Partikel höchstens eine Masse von rund 10^{-36} Kilogramm. In der Maßeinheit, die Physiker für den Mikrokosmos verwenden, entspricht dies einer Obergrenze von 1,1 »Elektronvolt«.

Genauer lässt sich mit den bisherigen Messdaten von KATRIN nicht sagen. Dennoch feierten Experten das Ergebnis als großen Erfolg, als beteiligte Forscher es im Herbst 2019 auf einer großen Fachkonferenz im japanischen Toyama vorstellten. »So langen Applaus nach einem Vortrag habe ich schon lange nicht mehr gehört«, sagt Werner Rodejohann vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik, der in Toyama im Publikum saß.

Die eigenartigsten aller Elementarteilchen

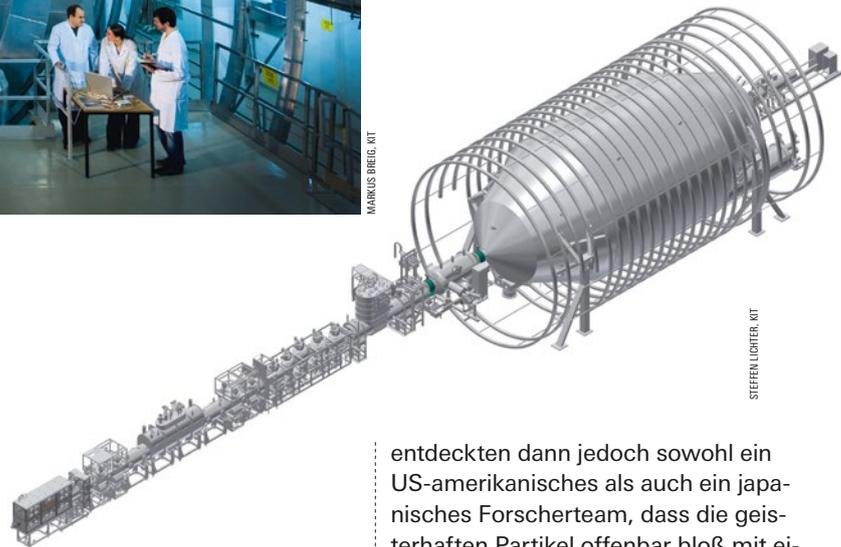
Der Beifall für KATRIN dürfte zum einen der Ausdauer gegolten haben, mit der die Forscher das Projekt umgesetzt haben. Die Gruppe um Guido Drexlin vom Karlsruher Institut für Technologie, an der Forscher von insgesamt 20 Instituten aus sieben Ländern beteiligt sind, hat zwei Jahrzehnte auf die Messung hingearbeitet. »KATRIN ist ein unglaublich schwieriges und komplexes Experiment«, betont Rodejohann. Die Forscher könnten daher stolz auf das Ergebnis sein.

Daneben gilt das Resultat als ermutigender Fortschritt bei der Entschlüsselung der Neutrinos. Diese sind nicht nur die leichtesten, sondern auch mit Abstand die eigenartigsten der bisher bekannten Elementarteilchen. Es gibt sie in drei Varianten (Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos), zwischen denen sie in Chamäleonmanier ständig hin und her wechseln.

Mit aufwändigen Messprogrammen haben Wissenschaftler in den vergangenen Jahrzehnten zwar ermittelt, mit welcher Wahrscheinlichkeit Neutrinos das jeweils tun. Außerdem können Forscher sagen, wie groß die Massenunterschiede zwischen den einzelnen Neutrinoarten sind. Die Massen selbst sind aber noch völlig unbekannt. Unklar ist auch, welche der drei Neutrinoarten am schwersten ist.

Lange hielten Physiker die Partikel sogar für masselos, ähnlich wie Photonen, die Teilchen des Lichts. So sieht es zumindest das Standardmodell der Teilchenphysik vor, mit dem Wissenschaftler an und für sich sehr erfolgreich den Mikrokosmos modellieren. Um die Jahrtausendwende herum

KATRIN nutzt radioaktives Tritium, das neben Neutrinos auch Elektronen freisetzt. Letztere gelangen in eine große, walnussförmige Vakuumkammer, in der Magnetfelder jene Ladungsträger auswählen, die Rückschlüsse auf die Neutrinomasse erlauben.



STEFFEN LICHTER, KIT

entdeckten dann jedoch sowohl ein US-amerikanisches als auch ein japanisches Forscherteam, dass die geisterhaften Partikel offenbar bloß mit einem Bein im Standardmodell stehen – und darüber hinaus noch anderen, bisher unbekanntem Naturgesetzen gehorchen. Nur so lässt sich erklären, dass sie im Flug laufend ihre Identität wechseln, also sich von einer Neutrino-Art in die andere umwandeln. Laut den Regeln der Neutrinophysik ist das nur möglich, wenn sie eine Masse haben – eine Erkenntnis, für die Takahaki Kajita und Arthur B. McDonald 2015 den Physik-Nobelpreis erhielten.

Elektronen fangen, um Neutrinos zu verstehen

KATRIN wurde geplant, um endlich eine Antwort auf die Frage nach der Neutrinomasse zu finden. Das Herzstück des Experiments ist eine Vakuumkammer von der Größe eines Blauwals. Hergestellt hat man sie im bayerischen Deggendorf, aber der Weg nach Karlsruhe war beschwerlicher, als man vermuten würde: Da der 23 Meter lange und 10 Meter hohe Stahlkoloss zu groß für die Reise auf deutschen Straßen war, mussten die Forscher ihn die Donau hinabschiffen und anschließend über das Schwarze Meer, das Mittelmeer, den

Atlantik und den Rhein transportieren, 9000 Kilometer weit.

2006 war das. Seitdem haben die Wissenschaftler das riesige Gerät angeschlossen und getestet, 2018 fiel der Startschuss für die Messungen. Sie basieren auf dem Zerfall des radioaktiven Elements Tritium – eine schwere Variante von Wasserstoff, deren Atomkerne sich nach einiger Zeit in Helium umwandeln. Dabei stoßen sie ein Elektron und ein Elektron-Neutrino aus.

Von beiden lässt sich nur das Elektron untersuchen, da das Neutrino den Detektor verlässt, ohne dabei eine Spur zu hinterlassen. Aus den Elektronen lässt sich jedoch rekonstruieren, wie viel Energie die Neutrinos weggetragen haben – und das erlaubt in manchen Fällen eine Abschätzung der Neutrinomasse, dank Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$.

Der Trick funktioniert allerdings nur mit einem kleinen Teil der aus der Tritiumquelle freigesetzten Ladungsträger. Diese Elektronen weisen die nach einem Betazerfall maximal mögliche Energie auf. Der Rest entfällt bei solchen Zerfällen komplett auf die (Ruhe-)Masse der Neutrinos, denn eine allzu große Bewegungsenergie haben sie nicht mehr.

Um Elektronen mit Maximalenergie aufzuspüren, muss man jedoch alle andere Ladungsträger heraussieben. Hier kommt die riesige Vakuumkammer von KATRIN ins Spiel, durch die Elektronen aus dem Zerfall von Tritium gefeuert werden. Mit geschickt arrangierten Magnetfeldern filtert das Gerät alle Teilchen mit geringer Energie heraus. Am Ende des walnussförmigen Tanks gelangen nur jene Exemplare, denen Mutter Natur besonders viel Schwung mitgegeben hat.

Letztlich ist es eine Suche in einem gigantischen Heuhaufen: Pro Sekunde gelangen 25 Milliarden Elektronen in die Vakuumkammer von KATRIN, von denen nur eins die gesuchte Maximalenergie hat. Dennoch gelang es den Forschern bereits innerhalb von 30 Tagen nach Inbetriebnahme des Detektors, genügend Daten für eine Schätzung zu sammeln. Die so ermittelte Obergrenze von 1,1 Elektronvolt

ist zwar immer noch keine definitive Antwort. Aber sie gilt als klarer Fortschritt gegenüber bisherigen Labormessungen, laut denen Neutrinos auch eine Masse von bis zu 2 Elektronvolt hätten haben können.

Fachleute gehen indes davon aus, dass Neutrinos vermutlich in Wahrheit allenfalls einige zehntel Elektronvolt schwer sind. Dafür sprechen jedenfalls die Obergrenzen, die Forscher aus Weltraumbeobachtungen ableiten. Ihnen zufolge darf die Summe der Massen aller Neutrinoarten bei höchstens 0,12 Elektronvolt liegen.

Damit bewegen sich die Geisterpartikel in einem Bereich, der KATRIN nicht mehr zugänglich ist: Nach 1000 Messtagen könne man vermutlich die Obergrenze auf 0,2 Elektronvolt eingengen, so die Prognose der Forscher. Wertlos ist das Karlsruher Experiment damit jedoch nicht: Fachleute betonen, wie wichtig es ist, der Neutrinomasse auch auf der Erde nachzuspüren, mit Verfahren, die unabhängig von denen der Kosmologie sind. »Neutrinos sind so widerspenstig, dass man ihnen nur durch Kombination komplementärer Untersuchungsmethoden auf die Schliche kommt«, findet etwa Heinrich Päs von der Technischen Universität Dortmund. Nicht zuletzt hängen die Abschätzungen aus dem Weltall stark

von den Annahmen des kosmologischen Standardmodells ab, mit dem Forscher die Entwicklung des Weltalls simulieren. Viele Experten halten die Theorie nicht für der Weisheit letzten Schluss, weshalb eine darauf basierende Abschätzung der Neutrinomasse fehlerhaft sein könnte. »In der Kosmologie lassen sich Annahmen und die Verlässlichkeit der Datensätze weniger gut testen als in einem Laborexperiment wie KATRIN«, findet Päs. Mit Glück könnte das Experiment also doch noch sein eigentliches Ziel erreichen: Wenn die aus dem Weltall gezogenen Schlüsse nicht stimmen sollten, könnte KATRIN nicht nur eine Obergrenze liefern, sondern sogar einen handfesten Messwert für das Gewicht der Geisterpartikel. ◀

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum«.

QUELLEN

Aker, M. et al. (KATRIN Collaboration): Improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN. *Physical Review Letters* 123, 221802, 2019

Loureiro, A. et al.: Upper bound of neutrino masses from combined cosmological observations and particle physics experiments. *Physical Review Letters* 123, 081301, 2019

EVOLUTION DIE EROBERUNG DES LANDES

Vor rund 400 Millionen Jahren gelang den Wirbeltieren der Übergang vom Wasser zum Land. Dabei nahmen sie Zwischenformen an, die heutigen Schlammpringern ähnelten.

► Wer untersucht, wie die Wirbeltiere den Übergang vom Wasser aufs Land schafften, hat oft das Gefühl, einen spannenden Krimi zu lesen. Es gibt eine Reihe von Verdächtigen, lückenhafte Beweise und jede Menge unbeantwortete Fragen. Zudem ist es rund 400 Millionen Jahre her, dass sich Fische mit Flossen zu Landwirbeltieren mit vier Gliedmaßen (Tetrapoden) entwickelten – ein ungeklärter Fall, der wahrlich lange zurück-

liegt. Kürzlich stellten Pavel Beznosov vom Komi Scientific Center in Syktyvkar, Russland, und seine Kollegen neue Erkenntnisse dazu vor.

Die ältesten Überreste von Tetrapoden, die wir derzeit kennen, sind 380 Millionen Jahre alte Knochenfragmente. Sie stammen zwar offenkundig von Landwirbeltieren, erlauben aber kaum Rückschlüsse darauf, wie diese Wesen aussahen oder lebten. Zudem liegen versteinerte Fußabdrücke von Tetrapo-

den vor, die noch einmal 14 Millionen Jahre älter sind. Anscheinend sind sie von vierfüßigen, allerdings immer noch im Wasser lebenden Tieren hinterlassen worden – doch die Abdrücke verraten nicht, wie diese oberhalb ihrer Fußsohlen aussahen.

In flachen Buchten zu Hause

Detailliertere Einblicke in die Körperform und Lebensweise unserer frühen Wirbeltier-Vorfahren bieten erst vollständigere Fossilienfunde, darunter die von berühmten Tetrapoden wie *Acanthostega* und *Ichthyostega*. Diese lebten jedoch vor 360 bis 370 Millionen Jahren, als die Landwirbeltiere geografisch schon weit verbreitet waren und eine große Vielfalt an Körperformen und Lebensweisen entwickelt hatten.

Die früheste Phase der Tetrapoden-Evolution liegt bislang weitgehend im Dunklen. Beznosov und seine Kolle-

gen haben nun Skelettfossilien einer Spezies analysiert, die sie *Parmastega aelidae* nennen. Von allen Arten, die wir kennen, steht sie dem Ursprung der Landwirbeltiere am nächsten.

Wie seine bereits bekannten jüngeren Verwandten war *P. aelidae* ein kiemenatmender Wasserbewohner. Die Forscher schätzen, dass er eine Körperlänge von mehr als einem Meter erreichte. Er lebte vor etwa 372 Millionen Jahren während des Devons (420 bis 360 Millionen Jahre vor heute) und bewohnte die flachen Buchten einer Landmasse, die heute zu Nordwestrussland gehört. Seine hervorragend erhaltenen Fossilien verraten enorm viel über die großen Veränderungen im Atmungsapparat, der Sinneswahrnehmung, der Fortbewegung und Nahrungsaufnahme, die mit dem Landgang einhergingen. Der Fund wirft natürlich auch neue Fragen auf.

An dem Schädel von *P. aelidae* fallen besonders die großen, ovalen Augenöffnungen auf, die hoch oben nahe dem Schädeldach liegen und nach vorn und zur Seite weisen (siehe Abbildung S. 28). Offenbar schauten die Tiere damit über die Wasseroberfläche – vermutlich ganz ähnlich, wie es die noch heute lebenden Schlammpringer (*Periophthalmus*) tun. Letztere sind amphibische Fische, die Mangrovenwälder und Brackwasserbereiche rund um Afrika, Australien und Asien besiedeln. Sie besitzen hochliegende, stark hervorstehende Augen, deren Form und Position sich mit denen von *P. aelidae* vergleichen lassen. Damit lugen sie über das Wasser, um nach Beute und potenziellen Gefahren Ausschau zu halten.

Doch wonach spähte *P. aelidae*? Feinde an Land oder in der Luft können es nicht gewesen sein, denn die gab es im späten Devon noch nicht.

Spektrum LIVE

Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft

20. März 2020
Östringen

17. April 2020
Offenbach

TASTING UND VORTRAG

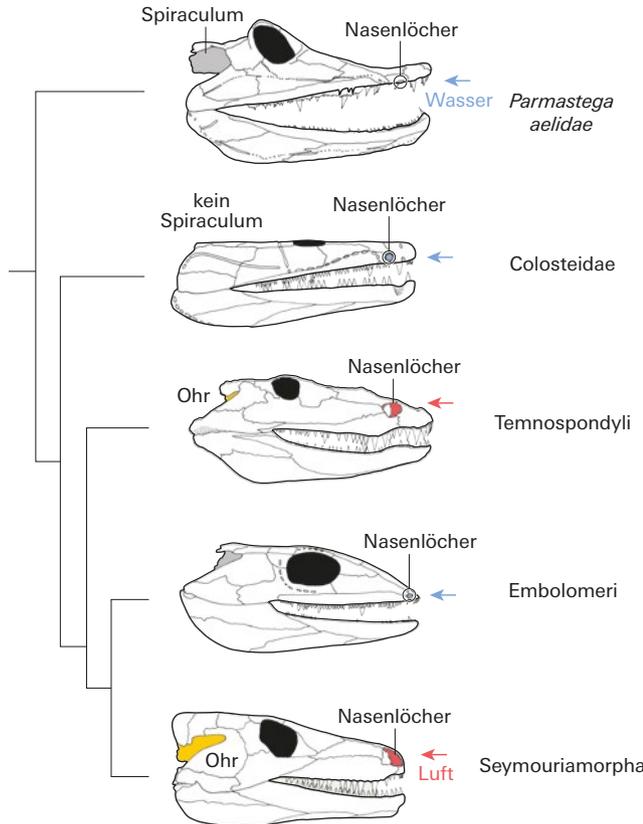
Die Wissenschaft vom Whisky

Whisky ist ein komplexes Getränk – er überspannt das gesamte Spektrum von fruchtigen Noten bis zu herben Raucharomen. Doch welche Stoffe erzeugen Geruch und Geschmack der verschiedenen Whiskys, und wie kommen sie ins Glas? Der Chemiker und Journalist Lars Fischer erklärt die molekularen Hintergründe des schottischen Nationalgetränks und beantwortet nebenbei auch die alte Streitfrage: mit Wasser – ja oder nein?

Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/live

Der Tetrapode *Parmastega aelidae* (oben) steht ganz nah am Ursprung der Landwirbeltiere. Das kiamenatmende Tier zog Wasser durch seine Nasenlöcher, wohl aber auch Luft durch eine Schädelöffnung, das Spiraculum. Bei späteren Arten (von oben nach unten) wanderten die Nasenlöcher nach oben und verschwand das Spiraculum.



NATURE. MICH FRÖBISCH UND WITZMANN; FRÖBISCH, N.B., WITZMANN, F.: EARLY TETRAPODS HAD AN EYE ON THE LAND. NATURE 574, 2019. FIG. 1: BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Niedrig gelegene Nasenöffnungen finden sich bei den meisten bisher bekannten frühen Tetrapoden des Devons ebenso wie bei denen des Karbons (360 bis 300 Millionen Jahre vor heute). Bei all diesen Spezies könnten die Verbindungswege zwischen Nasen- und Mundhöhle dem Transport von Wasser statt Luft gedient haben. Wie die Fossilien vertragen, hatten einige Spezies aus der Stammgruppe der Tetrapoden, etwa die Colosteidae, ihr Spiraculum verloren (siehe Abbildung links) – sie müssen daher ausschließlich Kiemenatmung praktiziert haben. Bei anderen frühen Landwirbeltieren, die erst nach *P. aelidae* entstanden und weiter evolviert waren, hatte das Spiraculum einem Ohr Platz gemacht, und die Nasenöffnungen waren größer geworden sowie auf der Schnauze nach oben gewandert. Diese Tiere nutzten ihre Nasen wahrscheinlich schon, um Luft einzulassen und in Richtung Lunge zu transportieren, während sie zwecks Beutesuche aus dem Wasser spähten.

Die Fossilien von *P. aelidae* liefern zahlreiche neue Erkenntnisse und könnten helfen, die komplexen evolutionären Veränderungen zu enträtseln, die im Zuge des Landgangs der Wirbeltiere erfolgten. Die Indizien-suche in diesem spannenden Krimi geht weiter. ◀

Nadia B. Fröbisch und **Florian Witzmann** forschen am Museum für Naturkunde – Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung in Berlin.

QUELLEN

Beznosov, P.A. et al.: Morphology of the earliest reconstructable tetrapod *Parmastega aelidae*. Nature 574, 2019

Maclver, M.A. et al.: Massive increase in visual range preceded the origin of terrestrial vertebrates. PNAS 114, 2017

Sanchez, S. et al.: Life history of the stem tetrapod *Acanthostega* revealed by synchrotron microtomography. Nature 537, 2016

nature

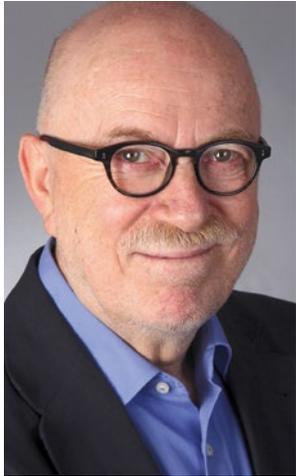
© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 574, S. 494–495, 2019

Möglicherweise suchten die Tetrapoden am Ufer nach Beute – aber nach welcher? Einige Forscher vermuten, die frühen wasserbewohnenden Tetrapoden und ihre nahen fischähnlichen Verwandten könnten Wirbellose gejagt haben, etwa Insekten oder andere Gliederfüßer. Allerdings waren große Gliederfüßer, die einem Tier von den Ausmaßen *P. aelidae*s genügend Nahrung hätten liefern können, im Devon generell selten. Zudem besaß der Tetrapode große Fangzähne, was darauf hindeutet, dass er hauptsächlich andere Wirbeltiere erbeutete. Vielleicht spähte er nach Kadavern von Fischen, die am Ufer gestrandet waren. Oder, das ist aber sehr spekulativ, er jagte frühe amphibische Tetrapoden, die sich in Wassernähe aufhielten. Unter den Fossilien der Sosnogorsk-Formation (der Gesteinsschichten mit den Überresten von *P. aelidae*) finden sich bislang jedoch keine Hinweise auf solche Organismen.

Ein weiteres erstaunliches Merkmal des Tiers ist die extrem niedrige Position der äußeren Nasenöffnungen.

Diese befinden sich dicht am Kiefer und müssen somit meist unter dem Wasserspiegel gelegen haben. Das kontrastiert auffällig mit der hohen Lage der Augen und unterscheidet sich stark von den Gegebenheiten bei heutigen Landwirbeltieren, die sich häufig im Wasser aufhalten – etwa Krokodilen, Flusspferden oder Fröschen. Deren Augen sitzen stark erhoben auf dem Kopf, doch auch ihre Nasenöffnungen sind hoch oben auf der Schnauze positioniert, was es ihnen ermöglicht, beim Blick übers Wasser Luft zu atmen.

Sauerstoffzufuhr durchs Saugloch
 Angesichts ihrer tiefen Lage dienten die Nasenlöcher von *P. aelidae* höchstwahrscheinlich als Öffnungen, durch die Wasser einströmte, um zu den Kiemen zu gelangen. Die Tiere konnten aber offenbar auch Luft durch eine große Schädelöffnung ziehen, die als Spiraculum oder Saugloch bezeichnet wird – ein Vorgang, der wahrscheinlich ähnlich ablief wie bei heutigen luftatmenden Fischen.



SPRINGER'S EINWÜRFE EWIGES WACHSTUM

Nicht nur Klimaforscher, auch Ökonomen fordern angesichts der Erderwärmung ein Umdenken. Vor allem der Begriff des Wirtschaftswachstums steht in Frage.

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/1701304

Unser Planet ist materiell betrachtet ein endliches System. Seine Bodenschätze sind nicht grenzenlos, seine Lufthülle ist nicht beliebig mit Schadstoffen belastbar. Seit der »Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit« zu Beginn der 1970er Jahre unter dem Titel »Die Grenzen des Wachstums« an solche Tatsachen erinnerte, streiten Ökonomen über die gebotenen Konsequenzen. Während einige für Kreislaufwirtschaft und Nullwachstum plädieren, finden die meisten die Prognosen des Club of Rome heillos überzogen und führen vor allem den wissenschaftlich-technischen Wandel ins Feld: Er habe in der Vergangenheit alle düsteren Vorhersagen obsolet gemacht, etwa die einer globalen Hungersnot infolge explodierender Bevölkerungszahlen. Ebenso würden sich für den Klimawandel schon technische Lösungen finden.

Gern wird daran erinnert, dass die Erde energetisch ein offenes System bildet, dem pausenlos gewaltige Mengen von Sonnenenergie zufließen. Selbst die derzeit genutzten fossilen Brennstoffe sind ja nichts als über Jahrtausende hochkonzentrierte Solarenergie, deren Einsatz in Motoren und thermischen Kraftwerken nun allerdings klimaverändernde Gase freisetzt.

Demnach könnte die Weltwirtschaft im Prinzip ewig wachsen, indem sie den Wirkungsgrad, mit dem sie die Sonnenenergie anzapft, immer weiter steigert – sofern dies nicht mit der Zeit die Umwelt zerstört. Doch das ist leichter gesagt als getan.

Das Kunststück heißt Entkopplung: Es muss gelingen, das Wachstum der Wirtschaft von dem der Umweltbelastung abzukoppeln. Tatsächlich bringt der technische Wandel oft Einsparungen an Energie und Material mit sich. Man vergleiche nur alte Kühlschränke, Fernseher, Glühlampen und Computer mit heutigen Produkten. Scheinbar schreitet die Entkopplung zügig voran. Während anno 1965 weltweit noch rund 760

Gramm CO₂ pro Dollar an produziertem Warenwert freigesetzt wurden, sind es heute weniger als 500 Gramm – ein Rückgang um 35 Prozent in einem halben Jahrhundert. Leider ist das aber bloß eine relative Entkopplung, wie der britische Umweltökonom Tim Jackson von der University of Surrey in Guildford und sein kanadischer Kollege Peter A. Victor von der York University in Toronto betonen (*Science* 366, S. 950, 2019).

Sobald Massen preiswerter und Energie sparender Geräte neue Märkte erschließen, tritt der notorische Rebound-Effekt ein: Wer für Haushaltsgeräte und Computer weniger bezahlt als früher, der kauft dafür öfter die nächste Neuerung oder ein teureres Auto; wer in seiner Wohnung Sparlampen installiert, knipst sie dafür seltener aus.

Relative Entkopplung – sinkende Umweltbelastung pro Produkteinheit – bringt ökologisch gesehen gar nichts, wenn der wirtschaftliche Output in Summe stärker wächst, als der Umweltschaden pro Wareneinheit abnimmt. Dadurch verschlechtert sich die so genannte absolute Entkopplung: Obgleich die einzelne Ware immer umweltfreundlicher hergestellt wird, schädigt das gesamte Wirtschaftswachstum die Umwelt zunehmend.

Genau das ist, wie Jackson und Victor unterstreichen, in der Tat der Fall. Seit 1990 hat der CO₂-Ausstoß der Weltwirtschaft absolut um 60 Prozent zugenommen; allein für 2018 wird die Steigerung auf 2,7 Prozent geschätzt. Somit setzen die von fast allen Staaten der Welt anvisierten Klimaziele eine spektakuläre Trendumkehr der absoluten Entkopplung voraus – die mit dem bloßen Vertrauen auf technischen Wandel kaum eintreten wird. In Frage stehen die absoluten Wachstumszahlen, an denen das gewohnte Wirtschaften seinen Erfolg misst.

HIRNFORSCHUNG DAS NETZWERK DES GEISTES

Unsere mentale Aktivität entsteht aus dem sorgfältig abgestimmten Zusammenspiel verschiedener Hirnareale.



Max Bertolero ist promovierter Neurowissenschaftler und forscht am Complex Systems Lab der University of Pennsylvania in Philadelphia (USA). **Danielle S. Bassett** ist promovierte Physikerin und leitet als außerordentliche Professorin für Bioingenieurwissenschaften die Arbeitsgruppe. Im Fokus der Forscher stehen Netzwerke in physikalischen und biologischen Systemen.

» spektrum.de/artikel/1701288

SERIE

Das menschliche Gehirn

Teil 1: Februar 2020

Was ist Bewusstsein?

Christof Koch

Unsere inneren Universen

Anil K. Seth

Teil 2: März 2020

Das Netzwerk des Geistes

Max Bertolero und Danielle S. Bassett

Ein Schaltplan fürs Gehirn

Sarah DeWeerd

Teil 3: April 2020

Die Intentionsmaschine

Richard Andersen

Der freie Wille und die Algorithmen

Liam Drew



▶ Netzwerke bestimmen unser Leben. Jeden Tag nutzen wir komplexe Netze von Straßen, Schienen, Schifffahrtswegen oder Flugrouten. Hinzu kommen andere, die sich unserer unmittelbaren Anschauung entziehen, wie das World Wide Web, das Stromnetz und nicht zuletzt das Universum, in dem die Milchstraße einen winzigen Knotenpunkt in einem scheinbar unendlichen Netz von Galaxien darstellt. Doch nur wenige solcher Systeme von interaktiven Verbindungen erreichen die Komplexität, die in unserem Kopf herrscht.

Viele kennen die farbig gestalteten Illustrationen, mit denen Hirnforscher gern demonstrieren, dass bestimmte Areale während einer mentalen Aufgabe »aufleuchten«, wie etwa der Schläfenlappen in der Nähe des Ohrs, der am Gedächtnis mitwirkt, oder der Hinterhauptlappen, der visuelle Signale verarbeitet. Was bei diesen Abbildungen jedoch fehlt, ist das Zusammenspiel zwischen all den verschiedenen Hirnregionen. Um die komplexen neuronalen Interaktionen zu untersuchen, zu analysieren und zu prognostizieren, nutzen unsere Arbeitsgruppe und andere Forscherteams Konzepte und Methoden der mathematischen Graphentheorie. Damit möchten wir die scheinbar unüberbrückbare Erkenntnislücke schließen, die zwischen rastloser neuronal-elektrischer Hirnaktivität und den kognitiven Leistungen wie Wahrnehmen, Erinnern, Entscheiden, Lernen und Koordinieren klafft. Das neue Forschungsgebiet der Netzwerkneurowissenschaften geht nach wie vor davon aus, dass konkrete Regionen des Gehirns definierte Aufgaben erfüllen. Doch die eigentliche Grundlage unseres Geistes beruht auf dessen Netzwerk von knapp 100 Milliarden Neuronen mit mindestens 100 Billionen Verknüpfungspunkten, den Synapsen.

Knoten und Kanten

Aus Daten bildgebender Verfahren lassen sich Graphen mit Knoten und Kanten modellieren. In solch einer Darstellung stellen die Knoten die Einheiten des Netzwerks dar – je nach Zusammenhang Neurone oder Flughäfen. Die Kanten symbolisieren die Verbindungen dazwischen – also die Flugrouten des Luftverkehrs oder die Nervenzellfortsätze, die als Trakte der weißen Substanz ganze Hirnregionen miteinander verschalten (siehe Bild S. 36). Unsere gegenwärtigen Modelle reduzieren das menschliche Gehirn auf einen Graph mit etwa 300 Knoten. Solche Darstellungen des Gehirns als Gesamtnetzwerk liefern uns den Schlüssel zu den Mechanismen kognitiver Funktionen. Diese Modelle bergen zudem praktische Nutzen: Mit einem tieferen Verständnis der neuronalen Netzwerke unseres Denkapparats ließen sich in Zukunft die Leistungsfähigkeit von Systemen künstlicher Intelligenz steigern, neue Medikamente und Methoden der Elektrostimulation für Depressionspatienten entwickeln und vielleicht sogar gezielte Gentherapien für psychische Erkrankungen entwerfen.

Im menschlichen Gehirn herrscht ständige Aktivität. Dabei bilden die komplex miteinander verschalteten Hirnareale die Grundlage unseres Denkens, Fühlens und Handelns.

AUF EINEN BLICK GUT VERNETZT

- 1** Netzwerkneurobiologen modellieren das Gehirn mit Hilfe der mathematischen Graphentheorie, die ebenfalls von Physikern, Chemikern und Linguisten verwendet wird.
- 2** Demnach bilden die neuronalen Bahnen unseres Denkorgans hochkomplexe Netzwerke, aus denen unsere kognitiven Fähigkeiten hervorgehen.
- 3** Die Graphentheorie soll die Erkenntnislücke zwischen biologischer Materie und menschlichem Geist schließen. Ziel ist auch, neue Diagnosen und Therapien für psychische Krankheiten zu entwickeln.

Eine Analogie zu den Netzwerken unseres Geistes liefert ein Sinfonieorchester. Bislang analysierten Neurowissenschaftler die Funktion der einzelnen Hirnregionen weitgehend isoliert – hörten also Streicher, Blechbläser, Holzbläser und Schlagwerk jeweils für sich allein. Die natürliche Struktur des Gehirns wurde in getrennt zu untersuchende Einzelteile zergliedert.

Selbstverständlich bleibt es interessant, wie die Amygdala Emotionen verarbeitet oder auf welche Weise die erste Geige wohlklingende hohe Töne erzeugt. Doch auch die detaillierteste Analyse aller Hirnregionen verrät uns nicht, wie das Gehirn als Ganzes funktioniert – genauso liefert ein komplettes Instrumentenverzeichnis noch nicht die Partitur einer Beethovensinfonie.

Netzwerkneurowissenschaftler kartieren daher die Verbindungen zwischen den Hirnregionen und untersuchen, wie jedes einzelne Areal in das Gesamtnetzwerk des Geistes integriert ist. Dabei verfolgen sie zwei Ansätze: Zunächst erfassen sie die strukturelle Konnektivität, also die Instrumentierung des Gehirnorchesters. Sie bildet die physikalische Grundlage, die festlegt, was überhaupt gespielt werden kann. Die Instrumentierung ist zwar essenziell, beschreibt aber nicht die Musik als solche. So wie eine Ansammlung von Instrumenten noch keine Musik darstellt, ist Denken mehr als die Summe aller Hirnverbindungen.

Daher betrachten wir im zweiten Schritt das Gehirn als gigantisches Orchester aus Neuronen, die in ganz bestimmten Mustern gemeinsam musizieren. Die neuronalen Klänge nehmen wir erst wahr, wenn wir die Aktivitäten einzelner Hirnregionen messen und dabei ihr Zusammenspiel erfassen. Das Ausmaß dieser Kooperationen wird als funktionelle Konnektivität bezeichnet – sie stellt die Musik des Gehirns dar. Feuern zwei Regionen zeitlich gekoppelt, gelten sie als funktionell verbunden.

Oft hört man die Behauptung, Menschen nutzen nur einen kleinen Teil ihrer Hirnkapazität. Tatsächlich jedoch arbeitet das gesamte Gehirn ständig; es moduliert nur je nach anstehender Aufgabe die Aktivitäten der jeweiligen Areale. Dabei erweisen sich zu jedem gegebenen Zeitpunkt

manche Bereiche aktiver als andere. Feuerten alle Neurone des Gehirns zusammen, wäre das, als spielten sämtliche Mitglieder eines Orchesters gleichzeitig so laut wie möglich. Das Ergebnis wäre Chaos – ein ohrenbetäubender Krach, der kaum die emotionale Botschaft einer großen Sinfonie vermittelt. Erst die Tonhöhen, Lautstärken, Rhythmen, Tempi und bewusst gesetzten Pausen bei den verschiedenen Stimmen machen die Musik – im Orchester wie in Ihrem Kopf.

Ebenso wie sich ein Orchester aus Gruppen von Instrumenten zusammensetzt, lässt sich das Gehirn in definierte Ansammlungen neuronaler Knoten unterteilen. Wir bezeichnen diese Gruppen von Knoten als Module, die jeweils lokal organisierten Netzwerken entsprechen. Ein Gehirn ist grundsätzlich modular aufgebaut: Selbst das aus nur 302 Neuronen bestehende Nervensystem des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans* besteht aus solchen Einheiten. Die Knoten innerhalb eines Moduls sind untereinander stärker vernetzt als mit Knoten anderer Module.

Jedes Hirnmodul erfüllt eine bestimmte Funktion, so wie jede Instrumentengruppe im Orchester einen bestimmten Part übernimmt. Dies zeigten wir in einer Metaanalyse einer großen Anzahl unabhängiger Studien mit insgesamt mehr als 10000 Experimenten, bei denen per funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) die Hirnaktivität von Versuchsteilnehmern beim Ausführen kognitiver Tests gemessen worden war. In die verschiedenen Aufgaben sind jeweils unterschiedliche Konstellationen von Netzwerkmodulen involviert. So gibt es Module für die Aufmerksamkeit, für das Gedächtnis oder für das introspektive Denken. Andere widmen sich dem Hören, dem Sehen oder der Bewegungssteuerung (siehe »100 Billionen Kontakte«, S. 34/35).

Großknoten verbinden die zentralen Module, die sich über mehrere Hirnlappen erstrecken

An diesen sensorischen, motorischen und kognitiven Prozessen wirken bestimmte zusammenhängende Module mit, von denen sich die meisten auf einen einzigen Hirnlappen beschränken. Wir stellten auch fest, dass die Informationsverarbeitung in einem Modul nicht zu einer Aktivitätssteigerung anderer Bereiche führt – ein entscheidender Aspekt modularer Arbeitens. Jedes einzelne Modul muss weitgehend unabhängig von den anderen funktionieren. Dies haben bereits Philosophen wie Platon (etwa 427–347 v. Chr.) oder Jerry Fodor (1935–2017) erkannt.

Doch auch wenn Hirnmodule getrennt agieren, erfordert eine Sinfonie, dass die verschiedenen Instrumentengruppen koordiniert zusammen musizieren. Die von einem Modul erzeugten Informationen müssen schließlich mit anderen integriert werden. Ein Spielfilm, bei dem nur das Hirnmodul für visuelle Wahrnehmung, nicht aber das Emotionsmodul reagiert, wäre wenig beeindruckend.

Deshalb müssen meist mehrere dieser Einheiten zusammenwirken, um komplexere kognitive Aufgaben zu erfüllen. Eine Kurzzeitgedächtnisaufgabe wie das Merken einer Telefonnummer erfordert das kontrollierte Zusammenspiel von Hör-, Aufmerksamkeits- und Gedächtnismodulen. Hierfür verwendet das Gehirn Hubs, also stark vernetzte

Knotenpunkte, an denen sich die Verbindungen zu verschiedenen Modulen des Gehirns treffen.

Einige zentrale Hirnmodule mischen sich stärker als andere in das Gesamtgeschehen ein. Ihre Verbindungen umfassen mehrere Hirnloben. Das frontoparietale Kontrollmodul zum Beispiel erstreckt sich über den Stirn-, Scheitel- und Schläfenlappen. Es entwickelte sich in der Evolutionsgeschichte erst recht spät und ist beim Menschen im Vergleich zu seinen nächsten Verwandten unter den Primaten besonders groß. In der Orchesteranalogie entspräche es dem Dirigenten. Beteiligt an einer Vielzahl von kognitiven Aufgaben stellt es sicher, dass die verschiedenen Module des Gehirns koordiniert arbeiten. Es spielt eine zentrale Rolle bei so genannten Exekutivfunktionen wie Entscheidungsfindung, Kurzzeitgedächtnis oder kognitiver Kontrolle. Letztere bezeichnet die Fähigkeit, komplexe Strategien zu entwickeln und unangemessenes Verhalten zu vermeiden.

Ein weiteres Bauteil stellt das direkt mit dem frontoparietalen Steuermodul vernetzte Salienzmodul dar, das an Verhaltensweisen wie Aufmerksamkeit oder der Reaktion auf neue auffällige Reize mitwirkt. Werfen Sie zum Beispiel einen Blick auf die beiden Wörter **blau** und **rot**! Wenn Sie die Druckfarben der beiden Wörter rasch benennen sollen, werden Sie das viel schneller bei dem rot gedruckten tun. Wollen Sie dagegen mit »grün« antworten, benötigen Sie hierfür sowohl Ihr frontoparietales als auch Ihr Salienzmodul, um zu unterdrücken, das Wort »blau« vorzulesen.

Weiterhin gibt es noch das Modul für den Grundzustand oder Ruhemodus (default mode), das sich über dieselben Hirnloben erstreckt wie das frontoparietale Kontrollnetzwerk. Es enthält zahlreiche Hubs und ist an einer Vielzahl kognitiver Aufgaben beteiligt, darunter introspektives Denken, Lernen, Gedächtnis, emotionale Verarbeitung, Erfassen des Gemütszustands anderer Menschen und sogar Glücksspiele. Schäden an solch hubreichen Modulen beeinträchtigen die funktionellen Verbindungen im gesamten Gehirn und führen zu vielfältigen kognitiven Störungen – genauso wie schlechtes Wetter an einem internationalen Drehkreuz den Flugverkehr weltweit lahmlegen kann.

Auch wenn die Gehirne aller Menschen grundlegende Komponenten wie die beschriebenen Module miteinander teilen, variiert bei jedem Einzelnen, wie die neuronalen Netzwerke miteinander verbunden sind. Auf diese individuelle Diversität zielt das Human Connectome Project, das Veränderungen in der Hirnnetzarchitektur von 1200 Probanden jahrzehntelang verfolgt. Dabei analysieren die Forscher mittels fMRT die strukturelle und funktionelle Konnektivität der neuronalen Netzwerke jedes Einzelnen und kombinieren die Bilddaten mit einer ganzen Batterie an Tests und Fragebögen, um insgesamt 280 Verhaltensweisen und kognitive Eigenschaften zu erfassen. Die Teilnehmer berichten, wie gut sie schlafen und wie oft sie Alkohol getrunken haben, ebenso werden ihre Sprach- und Gedächtnisfähigkeit sowie ihre emotionale Verfassung bestimmt. Neurowissenschaftler aus aller Welt durchforsten diesen vielfältigen Datensatz, um zu erfahren, wie unsere Hirnnetzwerke unser Menschsein formen.

Anhand der Daten von hunderten Teilnehmern des Human Connectome Project konnten unser Team sowie

andere Arbeitsgruppen belegen, dass das Konnektivitätsmuster des Gehirns wie der Fingerabdruck bei jedem einzigartig aussieht: Menschen mit ausgeprägten funktionalen Verbindungen zwischen bestimmten Regionen verfügen über einen umfangreichen Wortschatz, weisen eine höhere fluide Intelligenz auf und können es leichter aushalten, eine Belohnung aufzuschieben. Sie sind tendenziell gebildeter und zufriedener, und sie verfügen über ein besseres Gedächtnis sowie eine längere Aufmerksamkeitsspanne. Menschen mit weniger gut entwickelten funktionalen Verbindungen zwischen denselben Hirnarealen neigen eher zum Drogenmissbrauch, schlafen schlechter und sind weniger konzentrationsfähig.

All unsere Gedanken, Gefühle und Schruppen sind individuell im Hirnnetzwerk verankert

Diese Beobachtungen lassen sich mit den Verbindungsmustern zwischen den Hubs erklären: Weist das neuronale Netzwerk des Gehirns stark vernetzte Hubs mit vielen modulübergreifenden Verbindungen auf, verfügt es in der Regel auch über Module, die klar voneinander getrennt sind, und der Proband schneidet bei einer Reihe von psychologischen Tests besser ab, etwa zum Kurzzeitgedächtnis, zu mathematischen Fähigkeiten, zur Sprachkompetenz bis hin zur sozialen Kognition.

Einfach ausgedrückt sind unsere Gedanken, Gefühle, Schruppen, Unzulänglichkeiten und mentalen Stärken alle in der jeweils individuellen Organisation des Gehirns als integriertes Netzwerk verankert. Die Musik, die im Gehirn spielt, macht den Menschen zum Individuum.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



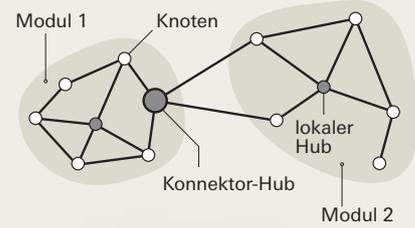
Das Ensemble der Module spielt offenbar stets ähnliche Kompositionen. Diese Selbstähnlichkeit wurde bei zwei weiteren Studien des Human Connectome Project beobachtet, bei denen ganz unterschiedliche Fähigkeiten getestet wurden: Kurzzeitgedächtnis, Erkennen der Emotionen anderer, Glücksspiel, Fingertrommeln, Sprache, Mathematik, soziales Denken sowie ein selbstinduzierter Ruhezustand, bei dem die Probanden ihren Geist frei wandern ließen. Faszinierenderweise zeigen die dabei aktivierten funktionalen Netzwerke mehr Ähnlichkeiten untereinander als erwartet. Diese Konsistenz ergibt sich aus der Tatsache, dass die anatomisch vorhandenen Pfade im Gehirn, also die strukturellen Verbindungen, die Vielfalt möglicher Routen eines neuronalen Signals im Gesamtnetzwerk einschränken. Und diese strukturellen Voraussetzungen bestimmen, wie funktionale Verbindungen – etwa für Mathematik oder für Sprache – konfiguriert werden können. Der Schlagzeuger des Orchesters kann nicht Klavier spielen.

100 Billionen Kontakte

Im menschlichen Gehirn sorgen 100 Billionen neuronale Verbindungen dafür, dass wir fühlen, denken und handeln. Die Zahl der Verknüpfungen übersteigt damit um drei Größenordnungen die Anzahl der Sterne in unserer Milchstraße. Diese Komplexität im Kopf lässt sich über mathematische Graphen modellieren, deren Knoten über Kanten verbunden und zu Modulen organisiert sind. Besonders stark vernetzte Knoten bilden so genannte Hubs.

Von Modulen über Hubs zu Gedanken

Knotenansammlungen bilden im Gehirn Module, die zum Beispiel visuelle Informationen verarbeiten oder Aufmerksamkeit und Bewegungen kontrollieren (A). Einige Knoten fungieren als lokale Hubs, die mit anderen Knoten desselben Moduls verbunden sind. Ein Knoten mit vielen Verbindungen zu mehreren Modulen wird als Konnektor-Hub bezeichnet (B). Aus den mannigfaltigen Verknüpfungen der Konnektor-Hubs resultieren zahlreiche Hirnfunktionen insbesondere bei komplexen Verhaltensweisen (C).



A Sieben Schlüsselmodule – hier farblich voneinander abgegrenzt – erstrecken sich teilweise über anatomisch entfernt liegende Hirnareale.

Hirnmodule

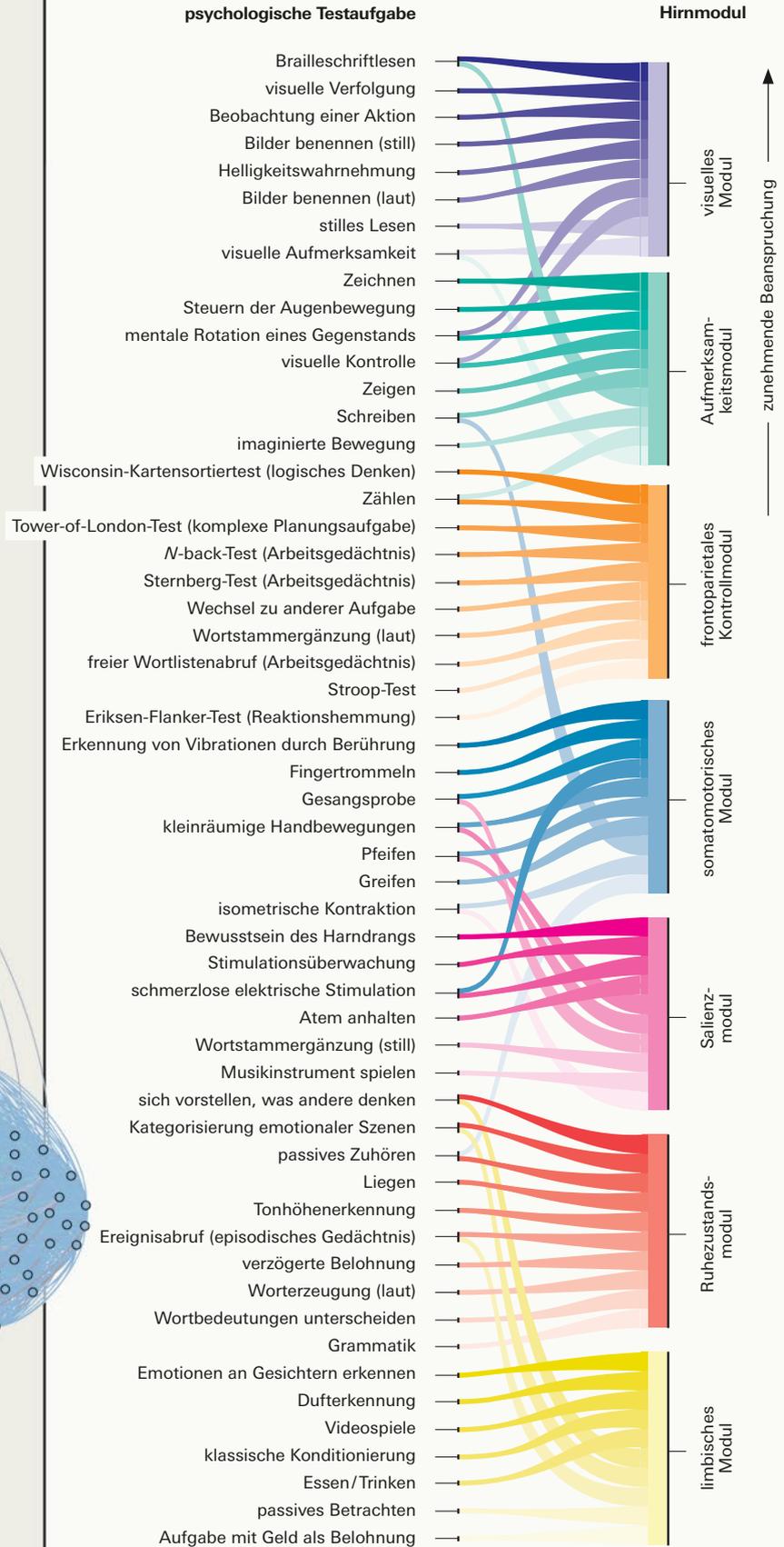
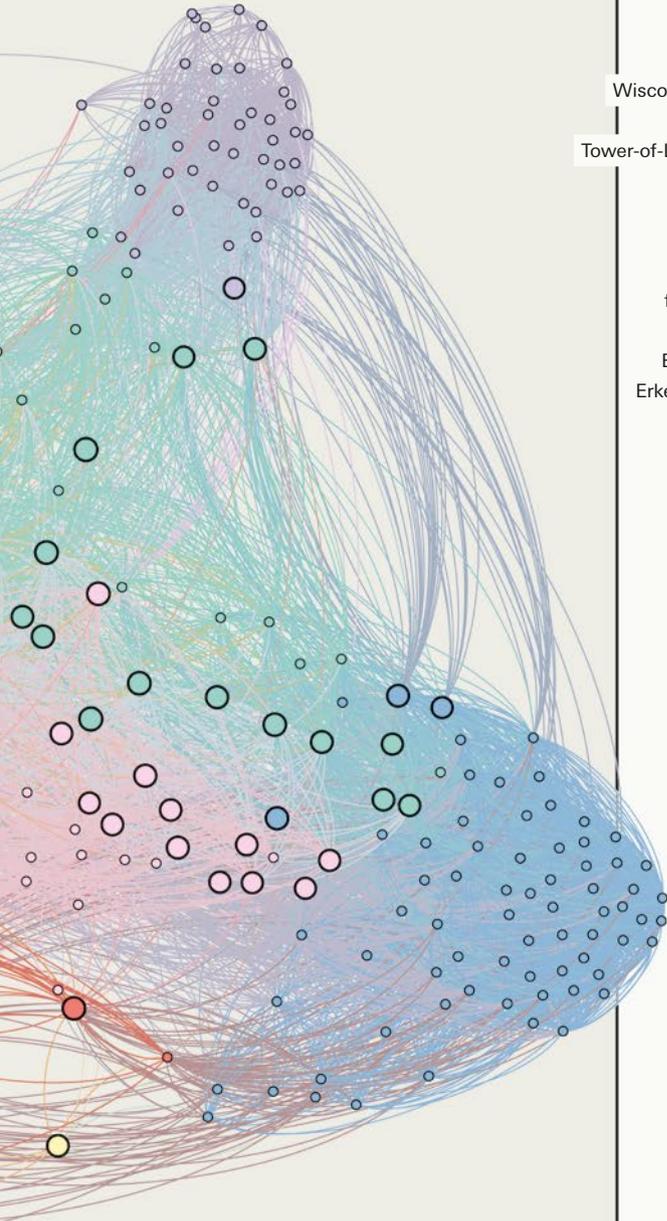
- visuelles Modul
- Aufmerksamkeitsmodul
- frontoparietales Kontrollmodul
- somatomotorisches Modul
- Salienzmodul
- Ruhezustandsmodul
- limbisches Modul

B Die Konnektor-Hubs der sieben Schlüsselmodule verteilen sich über die gesamte Großhirnrinde.

C Die Vergrößerung zeigt mehrere Konnektor-Hubs (große Kreise), die mit zahlreichen Knoten (kleine Kreise) verbunden sind. Dabei ordnen sich eng vernetzte Knoten bevorzugt zu lokalen Haufen an. Die Farbe entspricht dem zugehörigen Hirnmodul.

Verknüpfte Kooperation

Die Hirnmodule widmen sich jeweils spezifischen Leistungen, hier repräsentiert durch psychologische Testaufgaben. Dabei arbeiten oft mehrere Module zusammen. So beansprucht eine Aufgabe zur mentalen Rotation einer Figur sowohl das visuelle als auch das Aufmerksamkeitsmodul. Einige Bereiche übernehmen abstraktere Prozesse. Das frontoparietale Kontrollmodul schaltet sich beispielsweise ein, wenn zwischen verschiedenen Aufgaben gewechselt wird. Das Ruhezustandsmodul regt sich unter anderem bei subjektiven Gefühlen.



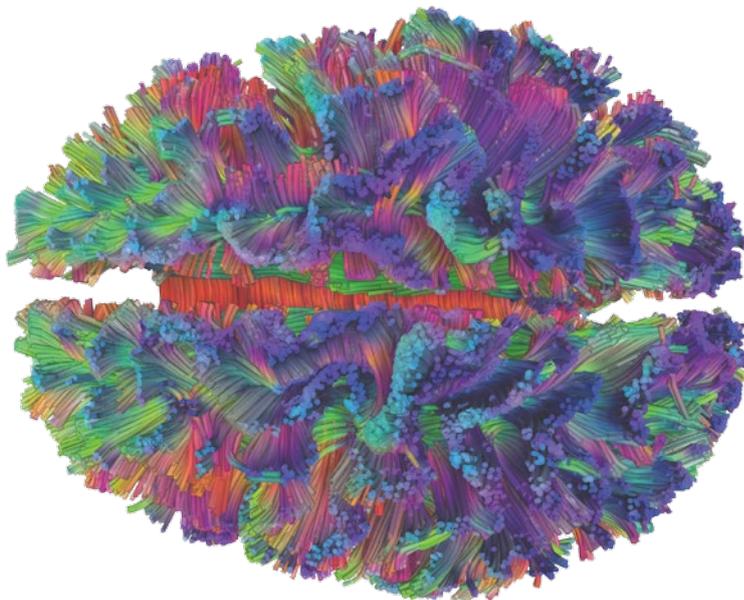
Natürlich wandelt sich die Musik des Gehirns, ebenso wie ein Orchester sein Repertoire immer wieder verändert. Die Netzwerkmodule des Gehirns entstehen bereits im Mutterleib; in der Kindheit und Jugend wird der neuronale Schaltplan durch Umbauten an der strukturellen und funktionellen Konnektivität verfeinert. Während die strukturellen Verbindungen zu den Hubs im Lauf der Kindheit gestärkt werden, sondern sich die einzelnen Module weiter ab. Diese Lebensphase ist daher von entscheidender Bedeutung – läuft hier etwas schief, können erste Anzeichen psychischer Erkrankungen auftreten. Gleichzeitig verbessern sich die Fähigkeiten junger Menschen bei Exekutivfunktionen wie komplexem Denken und Selbstregulation. Dabei konnten wir beobachten, dass das Ausmaß, in welchem die Module voneinander getrennt arbeiten, bei Kindern mit höherem sozioökonomischen Status schneller zunimmt, was die Bedeutung von Umweltfaktoren unterstreicht.

Während sich die strukturelle Konnektivität nur allmählich im Lauf von Monaten oder Jahren wandelt, gelingt die Anpassung funktionaler Verbindungen rasch – und zwar binnen weniger Sekunden bis Minuten. Diese schnelle Umstellung ist unabdingbar für den Wechsel zwischen verschiedenen Aufgaben und zur Bewältigung des hohen Lernaufwands, den bereits eine einzelne Aufgabe erfordern kann. In einer Reihe von seit 2011 veröffentlichten Studien konnten wir zeigen, dass Menschen mit besseren Exekutivfunktionen und Lernfähigkeiten über besonders rasch modifizierbare modulare Netzwerke verfügen.

Gestörte Netze

Um die Hintergründe dieser Beobachtung näher zu beleuchten, verwendeten wir öffentlich zugängliche Daten der Studie »MyConnectome« des Psychologen Russell Poldrack von der Stanford University, der mehr als ein Jahr lang dreimal pro Woche sein eigenes Gehirn und seine kognitiven Fähigkeiten untersuchte. Während die zerebralen Module weitgehend autonom und getrennt agieren, reorganisiert das Gehirn von Zeit zu Zeit spontan seine Verbindungen. Auf Grund dieser funktionellen Netzwerkflexibilität kann ein Knoten innerhalb eines Moduls schlagartig zahlreiche Verknüpfungen zu einem anderen Modul aufbauen, um so den Informationsfluss durch das Gesamtnetzwerk zu modifizieren. Wie die Daten belegen, passen die Tag für Tag wechselnden funktionellen Modifikationen eines Netzwerks zu der jeweiligen Stimmung, dem Erregungsgrad oder der Müdigkeit. Eine größere Netzwerkflexibilität korreliert ebenfalls mit besseren kognitiven Funktionen.

Der Zustand der neuronalen Verbindungen spiegelt die mentale Gesundheit wider. Abweichende Konnektivitätsmuster finden sich bei Patienten, die unter Depression, Schizophrenie, Alzheimerdemenz, Morbus Parkinson, Autismus, Aufmerksamkeitsstörungen oder Epilepsie leiden. Dabei bleiben die meisten neuropsychiatrischen Erkrankungen nicht auf einen Bereich des Gehirns beschränkt. So erstrecken sich die bei Schizophrenie betroffenen Schaltkreise recht weit über das gesamte Organ. Nach der so genannten Diskontinuitätshypothese funktionieren die



Die weiße Substanz des Gehirns besteht aus Nervenfaserbündeln (hier visualisiert durch unterschiedliche Farben), welche die verschiedenen Hirnareale miteinander verknüpfen. Aus diesen strukturellen Verflechtungen entstehen funktionale Netzwerke, die wiederum die verschiedensten kognitiven Aufgaben bewältigen.

einzelnen Module bei Schizophreniepatienten durchaus normal; das erkrankungstypische Chaos im Gehirn erwächst vielmehr aus einer Überfülle von Verbindungen zwischen den Modulen.

In einem gesunden Gehirn erweist sich die Fähigkeit, Netzwerkverbindungen flexibel – innerhalb bestimmter Grenzen – zu modifizieren, als vorteilhaft. Wie unser Team allerdings feststellte, besitzen die Gehirne von Schizophreniepatienten sowie die ihrer nächsten Verwandten eine besonders hohe Neigung zur Neukonfiguration der Netzwerke. Akustische Halluzinationen könnten demnach auftreten, wenn einige neuronale Knoten unerwartet ihre Verbindungen vom Sprach- zum Hörmodul umstellen. Auf Grund dieser unpassenden Vermischung glaubt dann der Patient, Stimmen in seinem Kopf zu hören.

Wie bei Schizophrenie werden schwere depressive Störungen nicht von einer einzigen abnorm funktionierenden Hirnregion verursacht. Hier scheinen alle drei der oben genannten übergreifenden Bauteile betroffen zu sein: das frontoparietale Kontrollmodul, das Salienzmodul sowie das Ruhezustandsmodul. Tatsächlich lassen sich ihnen typische Symptome einer Depression wie emotionale Enthemmung, Überempfindlichkeit oder Grübeln zuordnen.

Offenbar ist bei depressiven Patienten die normale Kommunikation zwischen den drei Modulen gestört. Üblicherweise wandern die neuronalen Aktivitäten von Modul zu Modul hin und her, um die Verarbeitung einlaufender sensorischer Signale mit introspektiven Gedanken auszubalancieren. Bei einer Depression dominiert jedoch der Ruhezustand, und der Betroffene verfällt in selbstquälerisches Grübeln. Demnach sollte die Kartierung des Konnektivitäts-

musters ermöglichen, bestimmte Subtypen der Depression zu diagnostizieren. Gleichzeitig ließ sich damit ermitteln, welche Hirnbereiche mittels Elektrostimulation behandelt werden könnten.

Neben der Entwicklung individueller neuronaler Netze interessieren sich Netzwerkneurowissenschaftler ebenfalls dafür, wie unser Denkkorgan in Zehntausenden von Jahren zu seiner jetzigen Konfiguration kam. Die als Hubs identifizierten Bereiche erweisen sich als genau diejenigen Stellen des menschlichen Gehirns, die sich im Lauf der Evolution am stärksten ausgedehnt haben, so dass sie jetzt bis zu 30-mal größer als bei Makaken sind. Mächtiger zerebrale Hubs erlauben wahrscheinlich eine stärkere Integration der Informationsverarbeitung über mehrere Module hinweg und damit komplexere kognitive Prozesse.

Tausende Teilnetze formieren sich spontan zu eng verknüpften Klubs

Netzwerke lassen sich künstlich am Computer erzeugen, die man dann einem Selektionsprozess unterziehen kann. Um die evolutionären Ursprünge der Hubs zu erforschen, starteten wir in unserem Labor mit einem Netz, in dem alle Kanten zufallsbestimmt und gleichmäßig platziert waren. Dann ließen wir das Netzwerk sich selbst neu verdrahten, wobei wir die natürliche Selektion auf die Entstehung abgetrennter Module nachahmten. Dabei bildete sich eine Eigenschaft heraus, die Netzwerkwissenschaftler als »kleine Welt« kennen: Mit überraschender Leichtigkeit entstanden Kommunikationspfade zwischen weit entfernten Knoten. Es entwickelten sich Tausende solcher Teilnetze, von denen jedes schließlich Hubs enthielt, die vielfach mit mehreren anderen Modulen, aber auch untereinander eng verbunden waren und damit einen so genannten Klub formten. Vorab deutete nichts auf die Entstehung eines Klubs von Hubs hin; die Struktur ging vielmehr spontan aus dem sich ständig wiederholenden Rekonfigurationsprozess hervor.

Diese Simulation verdeutlicht, wie sich in der Evolution Hubs mit hoher Konnektivität durchsetzen konnten. Reale Netzwerke wie im Gehirn, im Flugverkehr oder in der Stromversorgung verfügen tatsächlich über dauerhafte, eng miteinander verwobene Hubs, so wie es das Simulationsexperiment vorhersagt. Das heißt nicht, dass die biologische Evolution des menschlichen Gehirns zwingend genauso ablief, aber die Modellierung zeigt einen möglichen Weg.

Als der Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman 1988 starb, stand auf der Tafel in seinem Hörsaal: »Was ich nicht erschaffen kann, verstehe ich nicht.« Dieser wunderbare Aphorismus lässt einen wesentlichen Aspekt vermischen. Vielleicht sollte es besser heißen: »Was ich nicht erschaffen *und kontrollieren* kann, verstehe ich nicht.«

Wir verfügen heute über ein grundlegendes Verständnis des Aufbaus und der Netzwerkarchitektur des menschlichen Gehirns. Wir wissen, dass die Eigenschaften dieses etwa drei Pfund schweren Organs unser Menschsein bestimmen, doch wir beginnen erst allmählich zu begreifen, wie das alles geschieht. Um mit dem Mathematiker und Deterministen Pierre-Simon Laplace (1749–1827) zu spre-

chen, resultiert das Gehirn und damit die Psyche aus vorangegangenen Zuständen, die sich zur Vorhersage zukünftiger Verhältnisse eignen sollten. Demnach könnte ein Neurowissenschaftler, dem alle Prinzipien der Hirnfunktion bekannt wären und der alles Erdenkliche über das Gehirn eines Menschen wüsste, den psychischen Zustand dieser Person zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhersagen – Zukunft wie Vergangenheit wären im Gehirn präsent.

Mit derartigem Wissen ließe sich Schmerz und Leid lindern, da viele psychische Erkrankungen auf Anomalien neuronaler Netzwerke beruhen. Mit hinreichender Ingenieurskunst könnten wir Implantate entwickeln, die zerebrale Netzwerke gezielt modifizieren oder neu entstehen lassen. Wir könnten Genome verändern, um damit zu verhindern, dass desorganisierte Netzwerke überhaupt erst auftreten. Solche Techniken könnten uns vielleicht ermöglichen, psychische Krankheiten effektiv zu behandeln, die Hirnfunktion nach einem Schlaganfall oder einer Verletzung wiederherzustellen oder sie bei gesunden Menschen zu verbessern.

Doch bevor diese futuristischen Szenarien Wirklichkeit werden, müssen wir zwei große Wissenslücken schließen. Zuerst sollten wir mehr darüber herausfinden, wie sich individuelle Erbanlagen, frühkindliche Entwicklung und die mannigfaltigen Umweltfaktoren auf die Hirnstruktur auswirken und wie diese Struktur wiederum die funktionelle Leistungsfähigkeit bedingt. Wir beginnen erst allmählich zu begreifen, wie sich Netzwerke im Gehirn entwickeln und wie sie von der Umwelt geprägt werden. Noch schaffen wir es nicht, diesen Prozess in seiner gesamten Komplexität zu erklären. Die strukturelle Verkabelung des Gehirns schränkt die Möglichkeiten der Zusammenarbeit verschiedener Module untereinander ein. Wenn wir unsere Wissenslücken darüber schließen, könnten wir womöglich Maßnahmen entwickeln, mit denen wir fehlregulierte Hirnfunktionen in gesunde Bahnen lenken.

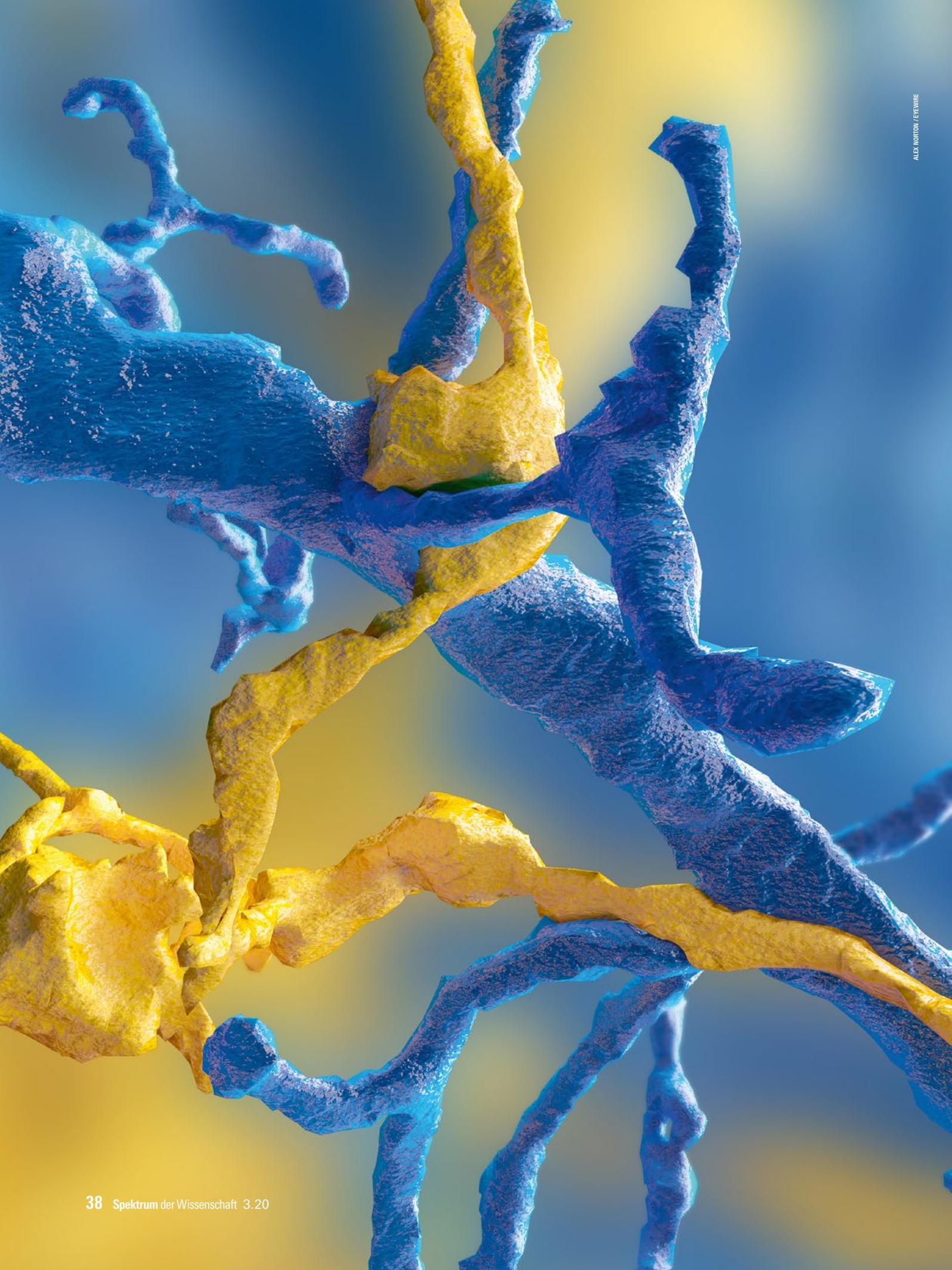
Zweitens behindert uns das immer noch recht verschwommene Bild, das wir vom Gehirn haben. Es ist, als stünden wir außerhalb des Konzertsaals und hielten nur einzelne Skizzen der Instrumente in den Händen. In jeder Hirnregion, die Neurowissenschaftler untersuchen, liegen Millionen von Neuronen, die im Millisekundentakt feuern. Wir sind bislang jedoch nur in der Lage, ihre durchschnittliche Aktivität in Zeiträumen von etwa einer Sekunde zu messen. Daher können wir die strukturelle Konnektivität des menschlichen Gehirns lediglich grob kartieren (siehe Artikel S. 38). Doch Wissenschaftler und Ingenieure entwickeln immer feinere Methoden, die tiefere Einblicke in das vielleicht komplexeste Netzwerk des bekannten Universums gestatten: Ihr Gehirn.

QUELLEN

Bassett, D.S., Sporns, O.: Network neuroscience. *Nature Neuroscience* 20, 2017

Bertolero, M.A. et al.: A mechanistic model of connector hubs, modularity and cognition. *Nature Human Behaviour* 2, 2018

Sporns, O.: Graph theory methods: applications in brain networks. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 20, 2018



KONNEKTOMIK EIN SCHALTPLAN FÜRS GEHIRN

Synapse für Synapse kartieren Forscher das Gehirn von verschiedenen Spezies. Erste Daten zum Mäusehirn existieren bereits. Doch bis der komplette Schaltplan des menschlichen Denkorgans vorliegt, bleibt noch viel zu tun.



Sarah DeWeerd ist Wissenschaftsjournalistin in Seattle (USA).

► spektrum.de/artikel/1701290

Im April 2019 herrscht am Allen Institute for Brain Science in Seattle (USA) gelöste Stimmung. In einem Raum, vollgestellt mit fünf Transmissionselektronenmikroskopen, fliegen sogar drei glänzende Partyballons umher. Denn die Wissenschaftler feiern ihren jüngsten Erfolg eines ehrgeizigen Projekts: In einem Kubikmillimeter Mäusehirn – etwa so groß wie ein Sandkorn – wollen sie jedes einzelne der 100 000 Neurone mitsamt einer Milliarde verbindender Synapsen kartieren.

Fünf Monate lang lieferten die Mikroskope mehr als 100 Millionen jeweils nur 40 Nanometer dünne Schnittbilder vom visuellen Kortex der Maus. Daraus kreierte ein von den Computerspezialisten des Instituts entwickeltes Programm innerhalb von drei Monaten eine einzige 3-D-Datei. Der auf den Ballons prangende blausilberne Schriftzug »2PB« steht für die Größe des erreichten Datensatzes von zwei Petabyte, also zwei Millionen Gigabyte. Zum Vergleich: Die Landsat-Mission hatte in über 30 Jahren lediglich 1,3 Petabyte Satellitendaten von der Erde gesammelt. Somit wurde das Mäusehirn zu einer »Welt in einem Sandkorn«, wie Clay Reid, einer der Neurobiologen des Allen Institute, in Anlehnung an den englischen Dichter William Blake bemerkt.

Das Projekt stellt nur einen der Versuche dar, für verschiedene Spezies ein Konnektom im Nanomaßstab zu erstellen: einen Schaltplan des Nervensystems mit synap-

sengenaue Auflösung. Die Neurowissenschaftler hoffen damit herauszufinden, wie neuronale Schaltkreise Informationen verschlüsseln und Verhalten steuern – oder kurz gesagt: wie das Gehirn funktioniert.

Bis zum endgültigen Ziel, dem Konnektom des menschlichen Gehirns, ist der Weg noch lang. Unser Denkorgan enthält 10^{14} bis 10^{15} Verbindungen; die Neuronenzahl entspricht mit knapp 100 Milliarden ungefähr der Zahl der Sterne in der Milchstraße (siehe Artikel ab S. 30). Mit derzeitigen Bildgebungstechniken müssten Dutzende Mikroskope jahrtausendlang rund um die Uhr laufen, allein um die nötigen Daten zu sammeln.

Das menschliche Gehirn im Visier

Doch die Fortschritte in der Mikroskopie sowie die Entwicklung leistungsfähigerer Computer und Algorithmen zur Bildanalyse trieben die Konnektomforschung bereits in einem Ausmaß voran, das selbst die Beteiligten überraschte. »Vor fünf Jahren galt es noch als aberwitzig, an einen Kubikmillimeter zu denken«, erzählt Reid. Inzwischen halten etliche Forscher die Kartierung des gesamten Mäusehirns – das sind etwa 500 Kubikmillimeter – für möglich. Damit könnte das auch beim wesentlich größeren menschlichen Denkorgan machbar sein. »Heute erscheint es nahezu ausgeschlossen, das menschliche Gehirn auf Synapsenebene zu kartieren«, meint Reid. »Aber wenn die Fortschritte in Rechnerkapazitäten und wissenschaftlichen Methoden wie bisher anhalten, ist eine weitere Steigerung um den Faktor 1000 nicht mehr so abwegig.«

Komplette Konnektome im Nanomaßstab gibt es bislang erst von zwei Tierarten: 1986 kartierten Forscher das ziem-

Das Projekt EyeWire rekonstruierte ein dreidimensionales Bild von der Verschaltung einzelner Zellen in der Netzhaut der Taufliede.

AUF EINEN BLICK NEUE METHODEN DER HIRNKARTIERUNG

- 1** Neurowissenschaftler versuchen, einen möglichst genauen Schaltplan des Gehirns – ein Konnektom – zu erstellen, um so dessen Funktionsweise zu verstehen.
- 2** Fortschritte in elektronenmikroskopischen Techniken erlauben inzwischen schnellere Analysen. Problematisch bleiben die dabei anfallenden Datenmengen.
- 3** Erste Ergebnisse für Hirngebiete von verschiedenen Tierarten existieren bereits. Wann das Konnektom des Menschen vorliegt, ist jedoch nicht absehbar.

lich überschaubare Nervensystem des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*; 2016 folgte die Larve der Schlauchseescheide *Ciona intestinalis*. Diese neuronalen Karten dienen als hilfreiches Werkzeug zum Aussortieren. »Zahlreiche Hypothesen konnten durch den Schaltplan von *C. elegans* widerlegt werden«, bemerkt der Neurowissenschaftler Narayanan Kasthuri vom Argonne National Laboratory.

Manche Wissenschaftler zweifeln allerdings am Sinn von Konnektomen im Nanomaßstab. Der enorme Aufwand an Zeit, Arbeit und Geld könne unverhältnismäßig werden, meint der Neurobiologe Anthony Movshon von der New York University, der Sehsysteme erforscht. Bei so komplexen Gehirnen wie denen von Maus und Mensch »muss ich nicht die genauen Details der Verbindungen von jeder Zelle und jeder Synapse kennen«, sagt er. »Vielmehr sollten wir die Organisationsprinzipien verstehen, die hinter den Verbindungen stecken.« Und das lasse sich auch mit einem gröberem Auflösungslevel erreichen.

Doch das Nanokonnektom beherrscht nach wie vor das Denken vieler Wissenschaftler. Sie glauben, dass sich damit die Ursachen von psychischen Erkrankungen ergünden und bessere Behandlungsmethoden entwickeln lassen. Weitere Anwendungen sehen sie auf Forschungsfeldern wie der künstlichen Intelligenz oder der Entwicklung von energieeffizienten Rechnersystemen.

Für die Kartierung des Konnektoms von *C. elegans* hatte das Team um den Biologen Sydney Brenner (1927–2019) von der University of Cambridge in den 1980er Jahren die nur millimeterlangen Würmer in dünne Scheiben geschnitten und jede einzelne mit einer auf einem Elektronenmikroskop montierten Kamera fotografiert. Auf den fertigen Bildern verfolgten die Forscher dann per Hand akribisch die Pfade der Nervenzellen und deren Verbindungen.

C. elegans besitzt lediglich 302 Neurone mit etwa 7600 Synapsen. Die Untersuchung größerer Nervensysteme blieb mit diesen Methoden undurchführbar – bis 2004 der Physiker Winfried Denk und der Neuroanatom Heinz Horstmann, damals beide am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg, auf die Idee kamen, das

Hirngewebe mit einem automatisierten Mikroskop zu schneiden und abzubilden, um dann die Bilder mittels einer Software zu schichten und auszurichten.

Denk, heute Direktor des Max-Planck-Instituts für Neurobiologie in Martinsried, präsentierte 2013 zusammen mit seinem Projektpartner Moritz Helmstaedter vom Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt eines der größten vollständigen Konnektome im Nanomaßstab: einen Würfel aus der Netzhaut der Maus von 100 Mikrometer Kantenlänge mit ungefähr 1000 Neuronen und 250000 Synapsen. Das Kubikmillimeter-Projekt des Mäusehirns soll allerdings 100-mal so viele Nervenzellen kartieren.

»Die Größe von einem Kubikmillimeter dürfte ausreichen, um wenigstens die meisten lokalen Verbindungen der Neurone im Innern dieses Sandkorns zu erfassen«, sagt der Neurowissenschaftler Nuno Maçarico da Costa vom Allen Institute. Das Mäusehirn-Projekt sollte es daher Wissenschaftlern ermöglichen, komplette lokale Schaltkreise statt nur einzelne, spärlich vernetzte Neurone zu untersuchen. Die Forscher des Allen Institute haben sich hierfür mit Wissenschaftlern vom Baylor College of Medicine, von der Princeton University sowie von der Harvard University zum von der US-Regierung finanzierten Programm »Machine Intelligence from Cortical Networks« zusammengeschlossen.

Auf Grund der bislang erzielten Fortschritte hoffen die Wissenschaftler, dass ein Nanokonnektom des kompletten Mäusehirns – mit einem Datenumfang von voraussichtlich einem Exabyte, also einer Milliarde Gigabyte – binnen einem Jahrzehnt vorliegt. »Wir brauchen dazu viele Labore«, erklärt der Neurobiologe Jeffrey Lichtman von der Harvard University. »Aber es ist machbar – und genau das ist das Spannende daran.«

Neuronale Schaltpläne von Fliegen, Fischen, Vögeln, Affen und Kraken

Andere bleiben skeptisch. Bei einem Projekt dieser Größenordnung »gibt es sehr viele logistische Herausforderungen«, betont der Computerwissenschaftler Stephen Plaza vom Janelia Research Campus. Das Fachgebiet solle sich zunächst Projekte mittlerer Größenordnung vornehmen, bevor es etwas so Komplexes wie das Mäusehirn in Angriff nimmt. »Was die Konnektomik angeht, üben wir noch.«

Plaza koordiniert das Projekt FlyEM, das ein Konnektom des Zentralnervensystems der Taufliege *Drosophila melanogaster* erstellen soll. Sein Team geht davon aus, im Lauf des Jahres 2020 die Daten für etwa ein Drittel des Fliegenhirns veröffentlichen zu können. Das komplette Konnektom, bestehend aus etwa 100000 Neuronen mit 100 Millionen Verbindungen allein im Gehirn sowie zusätzlich etwa genauso vielen Nervenzellen und Synapsen im Strickleiternerstrang, soll einige Jahre später vorliegen.

Derweil arbeitet Lichtman am Konnektom des Zebrafischblinds (*Danio rerio*) und analysiert gleichzeitig ein winziges Stück menschliches Gehirn aus dem Schläfenlappen eines Epilepsiepatienten, bei dem eine Hirnoperation durchgeführt wurde. Diese Probe ist ebenfalls etwa einen Kubikmillimeter groß, allerdings nicht würfelförmig, sondern flach.

Denk und seine Kollegen kartieren wiederum Teile des Konnektoms vom Zebrafinken (*Taeniopygia guttata*), der

seinen Gesang ähnlich wie der Mensch die Sprache lernt. »Da es jetzt schon viele Daten zur Verschaltung des Mäusehirns gibt, glaube ich, dass es am besten wäre, entweder artübergreifend oder über verschiedene Entwicklungsstufen vorzugehen«, meint Narayanan Kasthuri. »Am meisten Informationen bekommen wir, wenn wir diese Dinge miteinander vergleichen.«

Kasthuri versucht es mit der Kartierung des visuellen Kortex von nichtmenschlichen Primaten sowie von dem Kraken *Octopus bimaculoides*. »Dieses Tier kommt uns wahrscheinlich besonders fremdartig vor, es ist aber ziemlich schlau«, beschreibt er den Tintenfisch. »Es interessiert mich daher, worin sich die Verbindungen in diesem Gehirn von denen im Mäusehirn unterscheiden.«

Der Neurowissenschaftler arbeitet auch an Konnektomen von Jungtieren, um diese mit den ausgereiften Netzwerken der erwachsenen Mäuse oder Kraken zu vergleichen. Daraus lassen sich Einblicke gewinnen, wie das Gehirn durch Erfahrung lernt. Wegen seiner geringen Größe sollte das Konnektom des jungen Oktopus in einem Jahr kartierbar sein.

Die jetzt fertig gestellte Bilddatei des Mäusehirn-Kubikmillimeters reichten die Forscher des Allen Institute an den Neurowissenschaftler und Computerspezialisten Sebastian Seung von der Princeton University weiter. In dessen Labor sollen die Synapsen identifiziert sowie die schätzungsweise insgesamt vier Kilometer langen Nervenfasern nachverfolgt werden.

Diese Segmentierung blieb lange der limitierende Arbeitsschritt in der Konnektomik. Es kann Wochen dauern, den Verlauf eines einzigen Neurons in einem Stapel elektronenmikroskopischer Aufnahmen per Hand zu verfolgen. Inzwischen behelfen sich die Forscher mit künstlicher Intelligenz: Seungs Arbeitsgruppe entwickelte einen Lernalgorithmus, der die Bilder Pixel für Pixel auswertet, um die Position einzelner Nervenzellen zu bestimmen.

Computer können die Segmentierung viel schneller ausführen als Menschen, was die Arbeitszeit auf Stunden oder Minuten reduziert. Sie agieren jedoch nicht so akkurat: Algorithmen lassen mitunter Zellteile aus oder fügen zwei Neurone fälschlicherweise zusammen. Daher braucht es immer noch Menschen, um die Rekonstruktion zu überprüfen. Seung rekrutiert seine Tester über Crowdsourcing – vor allem durch ein Onlinespiel namens EyeWire, bei dem die Spieler die Fehler in einem groben Entwurf eines Konnektoms berichtigen sollen. Seit seiner Einführung 2012 hat EyeWire nach Angaben der Geschäftsführerin Amy Robinson

Verschiedene Nervenfaserverstränge (hier in unterschiedlichen Farben dargestellt) durchziehen das Gehirn eines Neugeborenen.

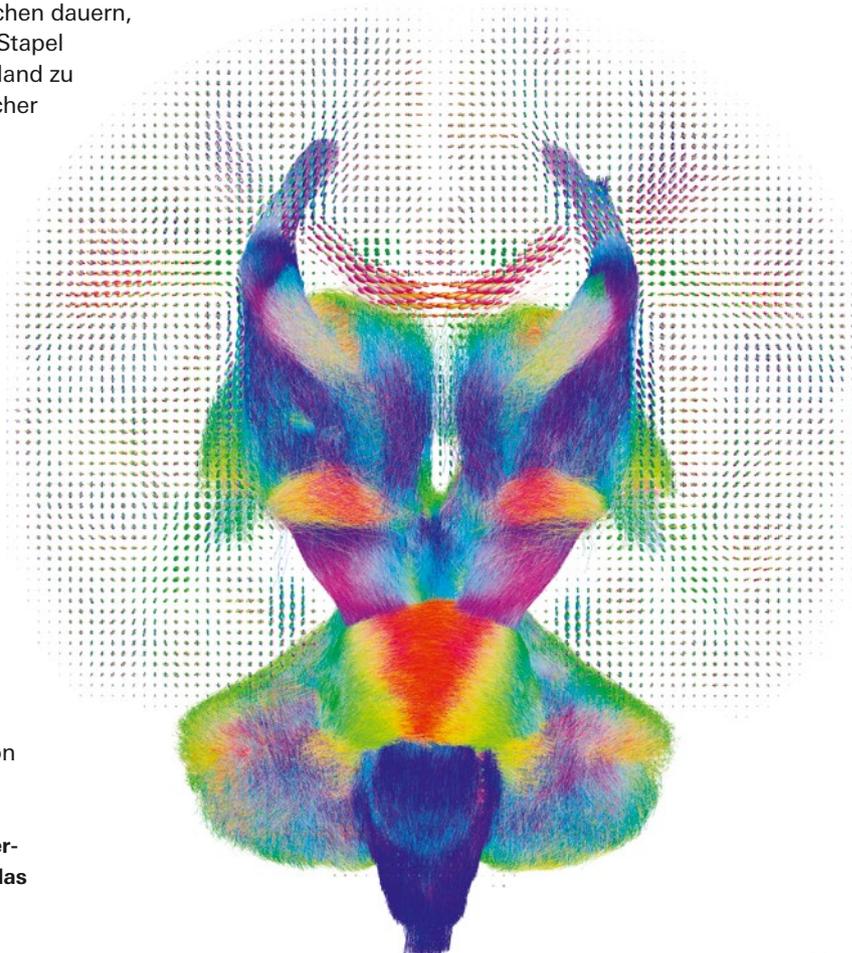
Sterling 290000 registrierte Benutzer, die zusammen die Arbeitsleistung von 32 Vollzeitkräften für sieben Jahre erbracht haben. Dabei stießen die Spieler bereits auf sechs bislang unbekannte Neuronentypen.

Eine neue Version des Spiels namens Neo basiert auf Neuroglancer, einem von Google entwickelten Programm, das die Schwarz-Weiß-Aufnahmen in einen bunten, dreidimensionalen Wald aus Neuronenbündeln verwandelt. Viele der Nanokonnektom-Projekte nutzen es zur Visualisierung.

Ausgefeilte Mikroskopiertechniken sollen noch schneller scharfe und detaillierte Bilder liefern

Google hat ebenfalls einen Segmentierungsalgorithmus entwickelt. Das von Viren Jain und seinen Kollegen kreierte Programm »Flood-Filling Networks« baut Strukturen von einem Bildpunkt ausgehend auf, anstatt zu versuchen, die Grenzen eines Neurons auf einen Schlag zu definieren. »Es funktioniert in etwa so wie ein Ausmalbuch«, erklärt Jain. Mit der Methode hat sein Team bereits einen Rohentwurf für ein Konnektom des gesamten Fliegenhirns erstellt, das auf den FlyEM-Daten des Janelia Research Campus beruht. Auch die Daten aus den Laboren von Denk und Lichtman sollen damit bearbeitet werden.

Derweil verfeinern die Wissenschaftler ihre Mikroskopiertechniken weiter, um schneller noch schärfere und detailreichere Abbildungen zu erhalten. Herkömmlich arbeiten Konnektomforscher mit der so genannten Serien-



schnitt-Elektronenmikroskopie. Dabei betten sie das neuronale Gewebe in Kunststoff ein und schneiden es in Scheiben, die um ein Vielfaches dünner sind als ein menschliches Haar. Die Schnitte kleben sie auf ein spezielles Band und führen es wie einen Film auf einer Rolle durch das Mikroskop.

Der Vorteil ist, dass die Probe erhalten bleibt und wenn nötig erneut abgebildet werden kann. Dennoch kommt es durch das Schneiden trotz höchster Präzision unvermeidlich zu Verzerrungen, die das Ausrichten der Bilder erschweren.



THOMAS SCHULTZ (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:01-SAGITTAL-FIBERS.JPG) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/LEGALCODE)

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Im Gegensatz dazu trägt bei der neueren Ionenfeinstrahl-Rasterelektronenmikroskopie (focused ion beam scanning electron microscopy oder kurz FIB-SEM) ein Strahl an geladenen Teilchen eine dünne Gewebeschicht ab. Das Mikroskop bildet die frei gelegte Oberfläche ab, und der Prozess wiederholt sich. Erstmals wurden damit Bilddaten des FlyEM-Projekts erzeugt.

FIB-SEM arbeitet zwar nicht sehr schnell, die entstehenden Bilder haben jedoch im Gegensatz zur bisherigen Methode in allen drei Dimensionen die gleiche Auflösung. Allerdings lassen sich die Proben nur einmal abbilden, da sie dabei verdampfen. Außerdem behindert das sehr kleine Sichtfeld die Arbeit: Selbst das nur mohnkorngroße Taufliegenhirn musste in kleinere Stücke geschnitten werden.

Immer mehr Daten, die kaum verarbeitet werden können

Die von Kenneth Hayworth am Janelia Research Campus entwickelte Gas-Cluster-Ionenstrahl-Rasterelektronenmikroskopie (gas cluster ion beam scanning electron microscopy oder GCIB-SEM) funktioniert ähnlich, hat aber ein größeres Sichtfeld. Diese Technik ließe sich auch mit mehrstrahligen Elektronenmikroskopen besser kombinieren, was auf schnellere Bilderzeugung hoffen lässt. Dabei scannen viele Elektronenstrahlen eine Probe gleichzeitig, so dass das Mikroskop hunderte Millionen an Pixeln pro Sekunde aufnehmen kann. Lichtman arbeitet mit einer Maschine der Firma Carl Zeiss mit 61 Strahlen, und Denk besitzt eine mit 91. Derzeit werden Elektronenmikroskope mit Hunderten von Strahlen entwickelt, womit die Aufzeichnung von einem Gigapixel Bilddaten pro Sekunde möglich sein sollte.

Die höhere Geschwindigkeit macht allerdings ebenfalls Probleme. »Uns stehen unglaublich viele Datensätze zur Verfügung, in denen man ständig neue Dinge finden könnte«, bemerkt Clay Reid. »Das ist viel mehr, als wir jemals bewältigen können.«

Unklar ist auch, wie man die Nanokonnektomdaten mit denen von anderen groß angelegten neurowissenschaftlichen Projekten wie dem Human Connectome Project (HCP) korrelieren kann. Bei diesem Großprojekt wurden per Magnetresonanztomografie die Gehirne von etwa 1200 Menschen gescannt, um millimetergenau die Verläufe der Nervenfasern zu vermessen, welche die Hirnregionen miteinander verbinden. Heraus kam eine Karte, die als Makrokonnektom bezeichnet wird.

»Das größte Problem in der Neurowissenschaft ist der Maßstab«, meint der Neonatologe David Edwards vom King's College London, der am Developing Human Connectome Project, einem Teilprojekt des HCP, mitwirkt. Ziel ist es, die Gehirne von hunderten Föten im Mutterleib sowie von Säuglingen und Frühchen zu scannen. »Es gibt großartige Arbeiten im Makro- und im Mikrobereich sowie auf Populationsniveau«, sagt er. »Aber wir können sie kaum miteinander verbinden.«

Neue und sogar noch detailreichere Datenquellen entstehen gerade erst. So liefert das Konnektom nur Informationen über die Position der Synapsen, nicht jedoch über ihren molekularen Aufbau. »Das ist eine Lücke, die es zu füllen gilt«, betont der Molekularbiologe Seth Grant von der University of Edinburgh. »Gelingt uns das nicht, werden wir auch den Weg zum Genom nicht finden.« Ohne diese Einblicke ins Erbgut können wir seiner Ansicht nach kaum verstehen, wie Evolution und Genetik die Hirnfunktionen beeinflussen.

Damit tritt das »Synaptom« auf den Plan: 2018 katalogisierten Grant und sein Team eine Milliarde Synapsen im gesamten Mäusehirn, wodurch sie auf Grund von Proteingehalt, Größe und Form 37 Unterarten definieren konnten, deren Muster wiederum für verschiedene Hirnregionen typisch waren. Nun gilt es, diese Synapsen-Subtypen mit den Verbindungen zu korrelieren, die sie ausbilden. »Das Zusammenbringen von Synaptom und Konnektom«, sagt Grant, »wird unsere nächste große Herausforderung.«

QUELLEN

Denk, W., Horstmann, H.: Serial block-face scanning electron microscopy to reconstruct three-dimensional tissue nanostructure. *PLoS Biology* 2, e329, 2004

Helmstaedter, M. et al.: Connectomic reconstruction of the inner plexiform layer in the mouse retina. *Nature* 500, 2013

Ryan, K. et al.: The CNS connectome of a tadpole larva of *Ciona intestinalis* (L.) highlights sidedness in the brain of a chordate sibling. *eLife* 5, e16962, 2016

White, J.G. et al.: The structure of the nervous system of the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 314, 1986

Zhu, F. et al.: Architecture of the mouse brain synaptome. *Neuron* 99, 2018

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 571, S. S6–S8, 2019



25 Jahre
Georg von Holtzbrinck
Preis für Wissenschaftsjournalismus
1995–2020

AUSSCHREIBUNG 2020

Der Preis wurde von der Verlagsgruppe von Holtzbrinck 1995 anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen und oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere in den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Text (Wortbeiträge Print und Online) und ein Preis in der Kategorie Elektronische Medien (TV, Hörfunk und Multimedia) sowie ein Nachwuchspreis (Jahrgang 1991 oder jünger) vergeben.

Der Preis in den Kategorien Text und Elektronische Medien ist mit je 10.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 5.000 Euro dotiert. Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2020 mit 3 Beiträgen (Text) bzw. 2–3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis.

KONTAKT

**Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group**

Torstraße 42, 10119 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Eine Shortlist mit den Nominierten wird vor der Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger auf der Webpage veröffentlicht. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Mitglied des Gesellschafterausschusses,
Boehringer Ingelheim

PROF. DR. KATJA BECKER

Präsidentin, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

ULRICH BLUMENTHAL

Redakteur „Forschung aktuell“, Deutschlandfunk

PROF. DR. ANTJE BOËTIUS

Direktorin, Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)

PROF. DR. MARTINA BROCKMEIER

ehemalige Vorsitzende, Wissenschaftsrat

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Geschäftsführer, Klaus Tschira Stiftung gGmbH

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Geschäftsführender Redakteur und Leiter Redaktion Wissen,
DIE ZEIT

RANGA YOGESHWAR

Publizist und Moderator ARD-Sendungen



Mitochondrien in Zellen (gelb) nehmen oft engen Kontakt zum endoplasmatischen Retikulum (gefaltete Struktur in der unteren Bildhälfte) auf, um Stoffe mit ihm auszutauschen.

KEITH R. PORTER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

ZYTOLOGIE AUF TUCHFÜHLUNG

Die verschiedenen Organellen haben in den Zellen überraschend engen Kontakt zueinander. Das dient dem Austausch von Substanzen und Signalen.



Elie Dolgin ist Wissenschaftsjournalist in Somerville, Massachusetts.

» [spektrum.de/artikel/1701292](https://www.spektrum.de/artikel/1701292)

► Kaum jemand nahm Notiz davon, als Jean Vance vor 30 Jahren etwas Fundamentales über Zellbestandteile herausfand. Zunächst zweifelte sie sogar selbst an ihren Ergebnissen, denn der Weg zu ihrer Entdeckung war voller Hindernisse gewesen. Vance arbeitete als Zellbiologin allein in einem frisch eingerichteten Labor an der University of Alberta in Edmonton, Kanada. Bei einem ihrer Versuche hatte sie mit Rattenlebern experimentiert und daraus – so meinte sie zumindest – reine Mitochondrien isoliert, jene Zellorganellen, die einer Zelle nutzbare Energie bereitstellen und deshalb winzigen Kraftwerken ähneln. Tests ergaben jedoch, dass ihre Probe noch etwas anderes enthielt, das eigentlich nicht darin sein sollte. »Ich glaubte, einen großen Fehler gemacht zu haben«, erinnert sich die Forscherin.

Nach zusätzlichen Reinigungsschritten stellte die Zellbiologin fest, dass an den Mitochondrien verschiedene Strukturen aus dem Zellinnern klebten – wie Kaugummi an einer Schuhsohle. Es handelte sich dabei um Bestandteile des endoplasmatischen Retikulums (ER), eines weiteren Zellorganells, das einem verzweigten Kanalsystem ähnelt und der Herstellung von Proteinen und Fetten dient. Andere Biologen hatten auch schon beobachtet, dass Teile des ER mitunter an Mitochondrien hängen bleiben, dies aber als einen Effekt interpretiert, der durch die Probenbehandlung künstlich entsteht. Vance hingegen erkannte, dass die Organellen nicht grundlos miteinander verklebt sind – und hier die Lösung eines großen Rätsels der Zellbiologie liegen könnte.

1990 schrieb Vance in einem Fachartikel, dass die »Klebspunkte« zwischen dem ER und den Mitochondrien sehr wichtig für den Stoffumsatz seien. Sie könnten die beiden Zellorganellen miteinander verbinden und als Tore dienen, um frisch hergestellte Lipidmoleküle durchzuschleusen. Das würde die seit Langem offene Frage beantworten, wie die Mitochondrien bestimmte Lipide erhalten: direkt vom ER aus. Doch die meisten von Vances Fachkollegen bezweifelten das und blieben dabei, dass es sich bei den angeklebten ER-Fragmenten um Verunreinigungen handle. »Ich hielt mehrere Vorträge zu diesem Thema«, erinnert sich die Zellbiologin, »doch die Leute blieben skeptisch.«

Heute zweifelt niemand mehr daran. Rund drei Jahrzehnte später gilt Vances Arbeit als Meilenstein – als Veröffentlichung, die das Verständnis davon revolutioniert hat, wie Zellen in ihrem prall gefülltem Innern voller Organellen (darunter Mitochondrien, das ER und der Zellkern) Ordnung und Funktion aufrechterhalten. Die Forscher wissen mittlerweile, dass es ständig zu intensiven Wechselwirkungen zwischen Zellorganellen kommt, wobei nahezu jeder Zellbestandteil mit fast allen anderen in engen Kontakt tritt. Beim Erforschen dieser Netzwerke haben Biologen verschiedene Proteine entdeckt, welche die Organellen zusammenklammern und damit die Integrität der Zelle gewährleisten.

Das führte zu einem drastischen Umdenken in der einschlägigen Forschung. »Innerhalb der Zellorganellen gibt es eine bislang völlig übersehene Ebene der Kommunikation«, sagt Jennifer Lippincott-Schwartz, Zellbiologin am Howard Hughes Medical Institute in Ashburn, Virginia, die auf dem Gebiet arbeitet. Dank fortschrittlicher Bildgebungsverfahren können sie und ihre Kollegen nun erkennen: Organellen sind mitunter so eng verknüpft, dass sie nur noch ein Spalt von 10 bis 30 Nanometer (milliardstel Meter) trennt – selbst die kleinsten Viren hätten Schwierigkeiten, sich dazwischen zu quetschen. Über diese Nahtstellen erfolgt ein Austausch von Ionen, Lipiden und Molekülen. Ist er unterbrochen, funktionieren die betroffenen Zellen nicht mehr richtig, was im Organismus zu Krebs, Diabetes, Alzheimer und anderen Erkrankungen führen kann.

Erste vage Hinweise auf Kontakte zwischen Zellorganellen tauchten etwa 40 Jahre vor Vances Entdeckung auf. In den 1950er Jahren machten Forscher mikroskopische Aufnahmen von Mitochondrien in Rattenzellen, die enge Verbindungen mit dem ER eingingen. Doch zu jener Zeit zogen die Biologen nicht ernsthaft in Erwägung, dies

könne für die Zellfunktionen bedeutsam sein. Zwischen den 1960er und 1980er Jahren kam nach und nach heraus, dass sich das ER häufig an andere Zellstrukturen anschmiegt – unter anderem an die Zellmembran sowie an den Golgi-Apparat, einen membranumschlossenen Reaktionsraum, der Sortier- und Transportfunktionen übernimmt und bei Pflanzen an der Produktion der Zellwand mitwirkt. Noch allerdings galten solche Phänomene als Ausnahmen von der vermeintlichen Regel, wonach intrazellulärer Transport über so genannte Vesikel ablaufe: lipid- oder proteinhüllte Bläschen, die ihre molekulare Fracht zwischen den Organellen hin und her befördern. Dieses Dogma hielt sich unter anderem deshalb so hartnäckig, weil es kaum einen fachlichen Austausch gab zwischen Wissenschaftlern, die den intrazellulären Vesikeltransport erforschten, und solchen, die sich auf Signalübertragung per Kalziumionen spezialisiert hatten.

Eiweiße als Kuppler

In diesem Umfeld erschien 1990 Vances Fachartikel. Die Arbeit wurde lange Zeit nur selten zitiert, bis man sie in den frühen 2000er Jahren wiederentdeckte. Damals begannen Forscher, jene spezifischen Proteine zu charakterisieren, welche die Kontaktpunkte zwischen Zellorganellen herstellen, die »Tether«. Nach und nach fanden die Zellbiologen heraus, um welche Moleküle es sich dabei handelt – was sie dazu befähigte, entsprechende Kontaktstellen künstlich zu erzeugen oder zu zerstören, um die Bedeutung der verschiedenen Austauschprozesse aufzuklären.

2009 beispielsweise erkannten Forscher um Benoît Kornmann, heute an der University of Oxford, dass in Hefezellen die vier Proteine Mmm1, Mdm10, Mdm34 und Mdm12 gemeinsam einen Tetherkomplex zwischen dem ER und Mitochondrien bilden. Wird irgendeines dieser Proteine inaktiviert, zerfällt der Komplex, was Lipidaustauschprozesse beeinträchtigt und das Zellwachstum verlangsamt. »Das war der erste Hinweis darauf, dass man den Stofftransport in der Zelle beeinflussen kann, indem man Tether manipuliert«, sagt Maya Schuldiner, Biologin am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel), die auf Hefezellen spezialisiert ist und an Kornmanns Studie mitwirkte.

Tetherkomplexe als solche zu erkennen und zu charakterisieren, ist allerdings oft schwierig. Denn anders als im

AUF EINEN BLICK DICHT AN DICHT

- 1 Zellorganellen treten in viel intensiveren Kontakt, als Wissenschaftler bisher annahmen.
- 2 Spezifische Proteine, so genannte Tether, stellen Verbindungen zwischen den Organellen her, die dem Austausch von Lipiden und anderen Substanzen dienen.
- 3 Eine gestörte Kontaktbildung zwischen Zellbestandteilen liegt offenbar zahlreichen Krankheiten zu Grunde.

eben beschriebenen Fall genügt es häufig nicht, eines ihrer Proteine auszuschalten, um sie kollabieren zu lassen. Der Biologe Scott Emr von der Cornell University in New York machte diese Erfahrung, als er in Hefezellen die Kontaktstellen zwischen dem ER und der Zellmembran untersuchte. Seine Kollegen und er identifizierten nicht weniger als sechs Tetherkomponenten, die jeweils allein dazu in Lage waren, die Verknüpfung aufrecht zu erhalten. Die ER-Zellmembran-Kontakte ließen sich nur durch Inaktivieren aller sechs Proteine lösen.

Auch die überaus verwickelten Wechselwirkungen zwischen den Zellbestandteilen erschweren es, Tether zu identifizieren. Zunächst schien es so, als sei an allen Verbindungen zwischen Organellen das ER beteiligt. Schon bald aber fanden Wissenschaftler andere Verknüpfungen, auf die das nicht zutraf. Sie erkannten, dass Zellen ihren Stofftransport umleiten können, wenn der direkte Weg blockiert ist.

Zwei Teams bewiesen das unabhängig voneinander im Jahr 2014: eines um Maya Schuldiner und eines um Christian Ungermann von der Universität Osnabrück. Wie beide Gruppen feststellten, befördern Hefezellen nach dem Zerstören der Tetherkomplexe zwischen ER und Mitochondrien nach wie vor Lipidmoleküle zwischen beiden Organellensorten hin und her, und zwar über den Umweg der Vakuole. Dieser flüssigkeitsgefüllte Hohlraum dient der Zelle normalerweise als Speicher für Nahrungsbestandteile.

Andere Studien belegten noch kompliziertere Vernetzungen. Die Biologin Jodi Nunnari von der University of California in Davis und ihre damalige Kollegin, die Zellbiologin Laura Lackner, beschrieben 2013 eine Art Super-Kontaktzone unter Beteiligung mindestens zweier Arten von Tetherkomplexen und dreier Zellbestandteile – dem ER, Mitochondrien und der Zellmembran. »Das war ein bis dahin unbekannter Grad räumlicher Organisation«, erinnert sich Lackner, die inzwischen an der Northwestern University in Evanston (Illinois) arbeitet.

Diese Entdeckungen zogen ein enorm gesteigertes Interesse an Zellorganellen und ihren Wechselwirkungen nach sich. Den Forschern, so Schuldiner, sei bewusst geworden, dass all diese überraschenden Verknüpfungen mit bisher unbekanntem Abläufen einhergehen müssen. In der Tat traten solche Funktionen auch schon bald zutage, etwa der zelluläre »Güterumschlag«: Versuche zeigten, dass sich die Kontaktpunkte zwischen Zellorganellen gut mit Stegen zwischen Schiffen vergleichen lassen, die dem Austausch von Erzeugnissen dienen. Sie lassen Cholesterin, ölige Wachse und andere fettartige Substanzen passieren, die sonst im wässrigen Zytoplasma zu Kügelchen verklumpen und die Zelle verstopfen würden wie Fettklumpen ein Abflussrohr.

Auch Kalzium, Wasserstoffperoxid und andere wasserlösliche Stoffe treten durch die Kontaktareale hindurch. Das ermöglicht es der Zelle, diese Substanzen für bestimmte Reaktionen anzureichern. So zeigten Schuldiner und ihr Team 2018: Mitochondrien verknüpfen sich manchmal mit den Entgiftungszentren der Zelle, den so genannten Peroxisomen, was den effektiven Transport des Essigsäurerests Acetyl-CoA aus den Peroxisomen in die Mito-

chondrien ermöglicht und eine wichtige Rolle im Fettsäureabbau spielt.

Kontaktstellen zwischen Organellen dienen aber nicht nur dem Austausch von Stoffen, sondern wirken auch daran mit, dass sich Zellbestandteile korrekt teilen. Dies wurde deutlich, als Forscher um die Zellbiologin Gia Voeltz von der University of Colorado in Boulder 2011 diverse Schnittbilder von Hefezellen anfertigten, um daraus hochauflösende dreidimensionale Abbildungen von ER-Mitochondrium-Kontaktzonen zu erstellen. Das ER »sah aus wie eine Hand, die das Mitochondrium umfasst und zusammenquetscht«, beschreibt Voeltz. Genau an diesen Stellen schnürte sich das Mitochondrium später ein und teilte sich.

Verräterisches Filmmaterial

Einige Jahre später demonstrierten Voeltz und ihre Kollegen, dass ein ähnlicher Prozess zur Teilung von Endosomen beiträgt – das sind Organellen, die bei einer so genannten Endozytose entstehen, der Aufnahme von Material aus der Umgebung der Zelle durch Einstülpungen der Zellmembran. Die meisten Wissenschaftler, so Voeltz, bezweifelten früher, dass ER-Endosom-Kontakte überhaupt existieren, geschweige denn einer wichtigen Funktion dienen. »Inzwischen wird dies als selbstverständlich vorausgesetzt«, berichtet sie. Videos, auf denen entsprechende Verbindungszonen zu erkennen sind, trugen maßgeblich zu diesem Sinneswandel bei. Voeltz hat solche Filme mit hohem Detailgrad mithilfe eines konventionellen Elektronenmikroskops erstellt. In den zurückliegenden Jahren haben moderne Verfahren die verschiedenen Organellkontakte in der Zelle noch in weit höherer Bildqualität dargestellt.

Im Jahr 2017 machten Jennifer Lippincott-Schwartz und ihr Kollege, der Mikroskopieexperte Eric Betzig, hochauflösende lichtmikroskopische 3D-Aufnahmen von den komplizierten Interaktionen zwischen sechs Organellen: ER, Mitochondrien, Golgi-Apparat, Peroxisomen, Lysosomen und

Diese fibroblastenähnlichen Zellen von Affen wurden mit verschiedenen Farbstoffen markiert. Das endoplasmatische Retikulum erscheint gelb, die Mitochondrien grün, der Golgi-Apparat rot und die Lysosomen blau.



VALM, A.M., ET AL., APPLYING SYSTEMS LEVEL SPECTRAL IMAGING AND ANALYSIS TO REVEAL THE ORGANELLE INTERACTIONS. NATURE 546, 2017. SUPPLEMENTARY VIDEO 1. NUTZUNG GEMEINFREI VON SPRINGER NATURE / CCC

intrazellulären Fettdepots. Eine Woche später veröffentlichten Forscher um den Neurowissenschaftler Pietro De Camilli von der Yale University (New Haven) mikroskopische Schwarzweiß-Bildsequenzen, die zeigen, wie Mitochondrien und andere Organellen in Mausneuronen vom ER quasi umwickelt werden.

Um solche Video-Nachweise zusätzlich zu untermauern, hat ein Team unter Leitung von Schuldiner und dem Zellbiologen Einat Zalckvar vom Weizmann Institute systematisch alle Organell-Kontaktstellen in Hefezellen kartiert und demonstriert, wie sich die beteiligten Tethermoleküle charakterisieren lassen. Im Mai 2018 berichteten die Forscher vom Einsatz eines zweiteiligen Fluoreszenzfarbstoffs, der erst aufleuchtet, wenn seine beiden Hälften zusammenkommen. Auf Organellen angewendet, liefert er ein Fluoreszenzsignal, sobald Zellbestandteile »auf Tuchfühlung« gehen. Die Wissenschaftler haben damit dutzende Proteine identifiziert, die nahe an Kontaktstellen sitzen. Manche davon dienen als Tether, andere offenbar nicht. »Die meisten dieser Proteine sind noch gänzlich unerforscht und könnten unbekannte Funktionen ausüben«, sagt Schuldiner.

Ein Beispiel hierfür haben Pietro De Camilli, Karin Reinisch und ihre Mitarbeiter (alle an der Yale University) im Jahr 2017 geliefert. Sie wiesen nach, dass in Bauchspeicheldrüsenzellen der Ratten ein Protein, das an der Insulin-Ausschüttung mitwirkt, zugleich als Tether zwischen ER und Plasmamembran dient. Dieses Eiweiß koordiniert den Transport von Kalzium und Lipidmolekülen zwischen den genannten Zellbestandteilen und hilft somit, schubweise Insulin ins Blut abzugeben, um den Blutzuckerspiegel zu regulieren. Der Stoffwechselexperte Gökhan Hotamisligil von der Harvard T. H. Chan School of Public Health (Boston) wiederum zeigte 2014, dass ein zu starker Kontakt zwischen dem ER und Mitochondrien in Leberzellen einer Maus mit Insulinresistenz, Diabetes und Fettleibigkeit einhergeht. Diese Erkenntnisse könnten bei für die Behandlung des Diabetes Typ 2 bedeutsam sein.

Je mehr Proteine die Forscher finden, die an Kontaktstellen von Organellen sitzen, umso mehr Verbindungen zu Krankheiten treten zu Tage. So liegt der Bauplan für Mitofusin 2, eines der mutmaßlichen Tetherproteine zwischen ER und Mitochondrien, auf einem Gen, das bei Menschen mit Morbus Charcot-Marie-Tooth (einer seltenen neuromuskulären Erkrankung) häufig mutiert ist. Und das Gen *VAPB*, verantwortlich für manche Fälle angeborener amyotropher Lateralsklerose, codiert für ein Eiweiß, mit dessen Hilfe das ER Verknüpfungen zu anderen Organellen aufbaut.

Weitere krankheitsrelevante Befunde haben sich bei Alzheimerpatienten gezeigt, in deren Gehirnen meist Ablagerungen aus verklumptem Amyloid- β -Peptiden vorliegen. Die Zellbiologen Estela Area Gómez und Eric Schon von der Columbia University in New York City haben nachgewiesen, dass sich in betroffenen Zellen ein bestimmter Abkömmling von Amyloid- β an der Oberfläche des ER anreichert. Bekannt unter der Bezeichnung C99, fördert er die Bindung des Kanalsystems an benachbarte Mitochondrien, wodurch der Cholesterol-Transport aus dem Takt gerät. Laut Area Gómez, die mit Zelllinien von Nagern und von Menschen arbeitet, werden in so einem Fall bestimmte Stoffwechsel-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/biologie-der-zelle



FOTOLIA / DR. KATERYNA

produkte in einer charakteristischen Zusammensetzung freigesetzt. Gómez untersucht nun, ob der Nachweis dieser Substanzen im Blut dabei helfen kann, Alzheimer im Frühstadium zu erkennen.

Weil Organellkontakte medizinisch so offensichtlich bedeutsam sind, fordern einige Wissenschaftler ein grundlegend erneuertes Bild zellulärer Transportvorgänge. Denn die vielfältigen und engen Wechselwirkungen zwischen den Zellbestandteilen finden sich in den Lehrbüchern bislang nur teilweise wieder. Was fehlt, ist eine umfassende Kenntnis sämtlicher über die Kontaktstellen transportierten Substanzen und Signale.

Gia Voeltz nutzt für ihre universitären Kurse über Zellorganellen und Membrantransport ein Lehrbuch, das zwar 2015 überarbeitet wurde, aber Zellen immer noch wie vor 20 Jahren darstellt. Oft sogar unterscheiden sich Lehrbuchabbildungen des Zellinnern kaum von den Zeichnungen, die der Zytologe Edmund Beecher Wilson im Jahr 1896 anfertigte, als er Zellen mit ordentlich verstaubten und fein säuberlich voneinander getrennten Organellen zu Papier brachte. Vom ER über den Golgi-Apparat bis hin zur Vakuole und dem Endosom bilden sie jede Organelle immer noch für sich allein ab – und nicht als Teil jenes dynamischen Tanzes von Strukturen, die sich permanent umarmen und wieder trennen. »Wir zeigen unseren Schülern und Studenten immer noch Darstellungen, die in keiner Weise der Realität entsprechen«, meint Voeltz. »Es wäre schön, hier auf einen aktuelleren Stand zu kommen.« ◀

QUELLEN

Area-Gómez, E. et al.: A key role for MAM in mediating mitochondrial dysfunction in Alzheimer disease. *Cell Death & Disease* 9, 335, 2018

Lees, J.A. et al.: Lipid transport by TMEM24 at ER-plasma membrane contacts regulates pulsatile insulin secretion. *Science* 355, 2017

Rowland, A.A. et al.: ER contact sites define the position and timing of endosome fission. *Cell* 159, 2014

Shai, N. et al.: Systematic mapping of contact sites reveals tethers and a function for the peroxisome-mitochondria contact. *Nature Communications* 9, 2018

Valm, A.M. et al.: Applying systems-level spectral imaging and analysis to reveal the organelle interactome. *Nature* 546, 2017

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 567, S. 162–164, 2019

GEOLOGIE DER THERMOSTAT DER ERDE

Ein faszinierender Regelkreislauf hält natürliche Emissionen von CO_2 aus Vulkanismus und dessen Verbrauch durch Gesteinsverwitterung in einer Balance. Damit reguliert er das Erdklima. Modernste Isotopenmessungen verraten, wieso sich die Erde trotzdem in den letzten 15 Millionen Jahren bis zur Eiszeit abkühlte.

Die mächtigen Gipfel des Himalajagebirges ragen teils über 8000 Meter in die Höhe. Innerhalb von Jahrtausenden verwittert das Gestein, wird zu Boden und durch Erosion abgetragen. Bei der Verwitterung wird CO_2 gebunden – allerdings sehr langsam.

Friedhelm von Blanckenburg
forscht am GFZ Deutsches
GeoForschungsZentrum
Potsdam zur Geochemie der
Erdoberfläche und lehrt als
Professor an der Freien Uni-
versität Berlin.



► spektrum.de/artikel/1701294

AUF EINEN BLICK EMPFINDLICHES GLEICHGEWICHT

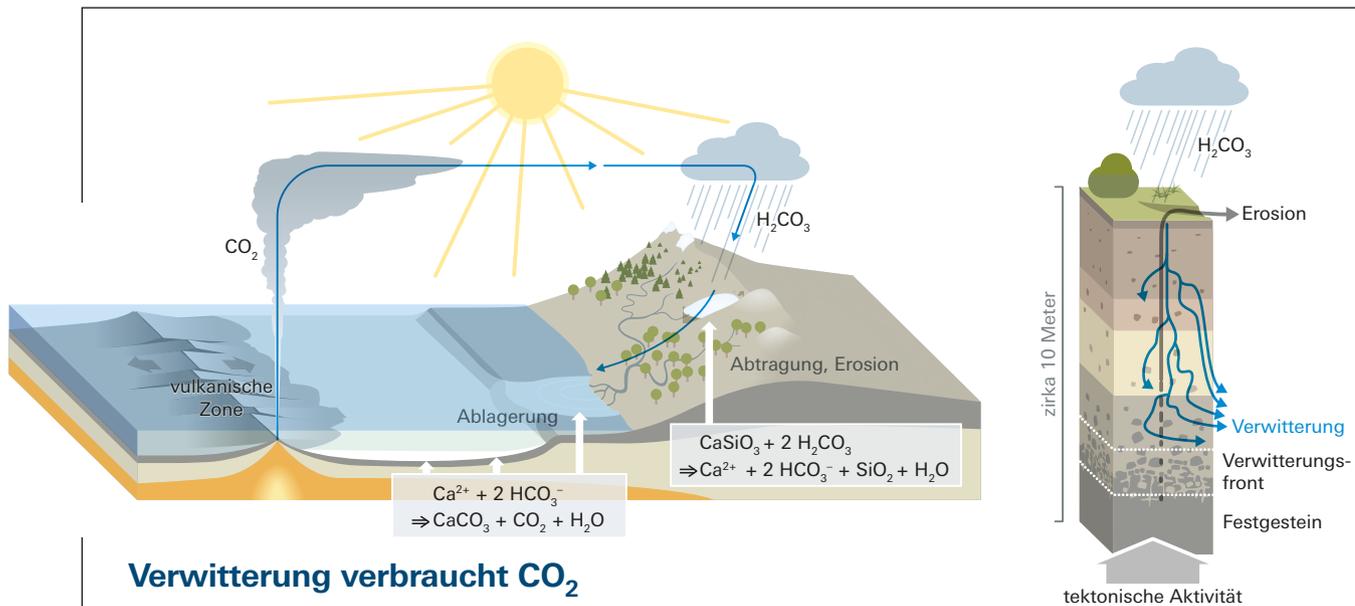
- 1 Durch Prozesse an der Landoberfläche reguliert die Erde seit Milliarden Jahren den CO₂-Gehalt der Atmosphäre und somit ihre Temperatur, ähnlich einem Thermostat.
- 2 Erdgeschichtliche Rekonstruktionen aus neuen Isotopenmessungen zeigen, dass sich dieses Gleichgewicht in den letzten 15 Millionen Jahren verschoben hat.
- 3 Eine drastische Verschiebung steht bevor, denn der Mensch greift massiv in die empfindliche Balance ein.

Die Erde ist ein ganz besonderer Planet: Schon fast seit Beginn ihrer Geschichte vor viereinhalb Milliarden Jahren enthält sie flüssiges Wasser. Ein Glück, denn wäre alles davon gefroren – wie derzeit auf unserem eiskalten Nachbarplaneten Mars –, hätte sich kein Leben entwickelt. Befände sich andererseits alles Wasser als Dampf in der Atmosphäre, gäbe es ebenfalls keine Lebewesen, denn dann würde durch Ultraviolettstrahlung von der Sonne der Wasserdampf in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten, die in das Weltall entweichen würden. Das gesamte Wasser wäre längst verschwunden, wie auf unserer 470 Grad

heißen Nachbarin Venus. Hingegen befindet sich die Oberfläche der Erde schon lange in dem für Leben geeigneten Temperaturintervall zwischen 0 und 100 Grad Celsius.

Anhand eines einfachen Wärmebudgets für die Erde sieht man schnell, dass die hier herrschenden lebenserhaltenden Temperaturen keineswegs selbstverständlich sind. An der Erdoberfläche ist die hauptsächliche Wärmequelle die Sonnenstrahlung. Angenommen, die Erde wäre ein perfekter Schwarzkörper, der alles Licht absorbiert, dann läge die Temperatur an der Erdoberfläche bei fünf Grad Celsius. Unser Planet ist allerdings kein perfekter Schwarzkörper, denn weiße Wolken, Gletscher und helle Wüstenböden reflektieren Sonnenlicht zurück in das Weltall. Diese hellen Flächen bezeichnet man zusammengenommen als die Albedo der Erde. Berechnet man diese Wärmerückstrahlung mit ein, kommt man auf eine Erdtemperatur von minus 18 Grad Celsius, bei der alles Wasser gefroren und Leben unmöglich wäre.

Dass auf der Erde heute jedoch eine angenehme Durchschnittstemperatur von rund 15 Grad herrscht, verdanken wir dem natürlichen Treibhauseffekt. Denn die Wärmestrahlung, die ursprünglich von der Sonne stammt und die Erdoberfläche erwärmt, wird nicht direkt in den Weltraum zurückgestrahlt, sondern trifft in der Atmosphäre auf Moleküle, welche sie zurück zur Erdoberfläche reflektieren – wie etwa Wasser, Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan oder Ozon. Die Atmosphäre erwärmt sich also stärker, je mehr dieser Treibhausgase sie enthält. Der Schlüssel für die natürliche Temperaturregelung der Erde ist, dass der Planet schon



Verwitterung verbraucht CO₂

Vulkanische CO₂-Emissionen werden mit CO₂-Verbrauch in der Verwitterungszone balanciert. Ein Silikatmineral der Formel CaSiO₃ wird mit Kohlensäure (H₂CO₃) zersetzt. Das durch Flüsse transportierte Ca²⁺ wird mit Hydrogencarbonat HCO₃⁻ im Ozean als Kalziummineral CaCO₃ ausgefällt und dann in Kalkstein umgewandelt. Die Bodensäule rechts zeigt die »kritische Zone« für den Teil der globalen Erdoberfläche, in dem in Gebirgen Gestein von unten durch tectonische Kräfte ständig hochgehoben wird. Das Gestein verwittert gleichzeitig mit Wasser und Kohlensäure in der Zone, und der dabei entstehende Boden wird an der Oberfläche durch Erosion laufend abgetragen.



UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS)



FRIEDHELM VON BLANCKENBURG, IGEZ POTSDAM



MUTIHANDER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Der geologische CO₂-Kreislauf. Links die Quelle: vulkanische Emissionen. Oben rechts der Reaktor: die Verwitterungszone (hier im chilenischen Küstengebirge). Der Boden ist bereits stark verwittert, aber Granitblöcke verbleiben und können chemisch reagieren. Unten rechts die Senke: Korallenriffe.

immer über einen mal stärkeren, mal schwächeren Treibhauseffekt verfügte – und dieser wird vor allem durch den CO₂-Gehalt der Atmosphäre reguliert. Bevor der Mensch in großem Maß eingriff, stammte das CO₂ hauptsächlich aus vulkanischen Gasemissionen.

Schon seit Beginn der Erdgeschichte entlassen Vulkane das Treibhausgas CO₂ in die Atmosphäre. Heute sind dies ungefähr 0,55 Milliarden Tonnen pro Jahr (weit weniger, als der Mensch durch industrielle Aktivitäten aktuell ausstößt: 37 Milliarden Tonnen CO₂ im Jahr 2019). Warum hat das CO₂ sich inzwischen also nicht so stark angereichert, dass auf der Erde eine Wärmehölle wie auf der Venus herrscht? Was uns vor diesem Schicksal bewahrt, ist die Gesteinsverwitterung. Denn sie bindet CO₂ und reduziert damit dessen Konzentration in der Atmosphäre, obwohl Vulkane ihr ständig neues CO₂ hinzufügen.

Das Kohlenstoffdioxid in der Luft bildet mit dem Wasser geringe Mengen an Kohlensäure, H₂CO₃. Regnet es, trifft die Kohlensäure zusammen mit dem Regenwasser auf die Erdoberfläche. Kommen dort harte Silikatgesteine vor, löst sie die darin enthaltenen Minerale wie Feldspat und Glimmer teilweise auf; dies geschieht sehr langsam, mit nur 5

bis 100 Millimetern in 1000 Jahren. Bei der in der Grafik links (»Verwitterung verbraucht CO₂«) gezeigten chemischen Reaktion werden aus dem Gestein Kalzium- und Magnesiumionen (Ca²⁺ und Mg²⁺) freigesetzt, die ebenso wie das aus der Kohlensäure umgewandelte Hydrogencarbonat (HCO₃⁻) über die Flüsse in die Ozeane gelangen. Dort verbindet sich Kalzium mit Karbonat zu Kalzit (CaCO₃), und über Hunderttausende von Jahren werden diese Kalzitkristalle zu Kalkgestein am Meeresboden. Der Prozess entsorgt das durch die Gesteinsverwitterung gebundene CO₂ langfristig: Im Kalkgestein verweilt es Hunderte von Millionen Jahren fernab der Atmosphäre. Sind Vulkane also die natürliche CO₂-Quelle, so ist die Gesteinsverwitterung der Reaktor, und Kalkablagerungen in den Ozeanen bilden die CO₂-Senke (Bilder oben).

Seit der frühen Erdgeschichte sind die vulkanischen CO₂-Emissionen immer mit der »Verwitterungs-Ozean-Senke« im Gleichgewicht. Allein das gewährleistet, dass sich die Atmosphäre – und damit das Klima – nicht aus der lebenswerten Zone herausbewegt. Nun muss sich diese Balance nicht jedes Jahr exakt einstellen. Es genügt, wenn sie über einen bestimmten Zeitraum besteht, und zwar un-

gefähr so lange, wie sich ein CO_2 -Molekül im Mittel in der Atmosphäre aufhält, nachdem es aus einem Vulkan dorthin gelangt ist und bevor es durch die Verwitterung wieder aus ihr verschwindet. Diese Zeitspanne betrug im Holozän vor der Industrialisierung etwa 250 000 Jahre. Das ist immer noch ziemlich kurz, wenn man bedenkt, dass die Erde über Hunderte von Millionen Jahren ihren CO_2 -Gehalt und damit das Klima stabil gehalten hat. Wenn der Zyklus eines CO_2 -Teilchens aber so kurz ist, würde dann nicht eine Verdopplung der Verwitterung alles Kohlenstoffdioxid in ein paar hunderttausend Jahren entzogen haben? Oder hätte umgekehrt eine dauerhafte Zunahme der vulkanischen Emissionen nicht die Erde in eine Wärmehölle verwandeln müssen?

Ein Feedback-Prozess wie in einem Kühlschrank reguliert die Erdtemperatur

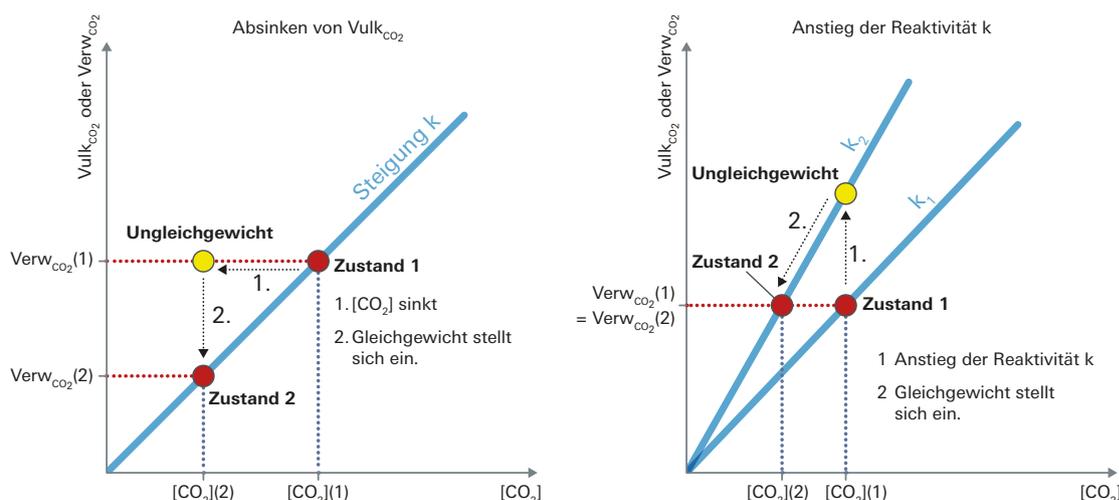
Der Mechanismus, der Entzug und Emissionen von CO_2 balanciert, ist eine Rückkopplung, ein Feedback. Solche Regelungskreisläufe kennt man aus technischen Systemen, beispielsweise in einem Kühlschrank: Entnimmt jemand ein Getränk, wird es im Inneren des Geräts durch die eindringende Außenluft wärmer. Das elektronische

Thermometer teilt daraufhin dem Kompressor mit, die Kühlflüssigkeit zu kühlen. Dieser bleibt so lange in Aktion, bis der Innenraum wieder kalt ist, worauf sich der Kompressor ausschaltet.

Auf der Erde bewirkt die Gesteinsverwitterung das Feedback. Angenommen, erhöhte tektonische Aktivität führt zu mehr Vulkanismus an den Plattengrenzen. Dadurch gelangt mehr CO_2 in die Atmosphäre. Über den Treibhauseffekt steigt die Erdtemperatur, und die Böden erwärmen sich. Außerdem verdunstet in den Ozeanen mehr Wasser, und es regnet demnach mehr auf die Kontinente. Diese drei Effekte beschleunigen die Gesteinsverwitterung. Dadurch wird der Atmosphäre wiederum mehr CO_2 entzogen, und der Treibhauseffekt verringert sich, so dass sich die Erde wieder abkühlt. Der Temperaturregler funktioniert aber auch andersherum: Wachsen zum Beispiel die Eisschilde auf den Polkappen, erhöht sich die Albedo der Erde, und es wird kälter. Weil Wasserverdunstung und Niederschlag abnehmen, verlangsamt sich jedoch gleichzeitig die Gesteinsverwitterung. Weniger CO_2 wird der Atmosphäre entzogen, und die Erde erwärmt sich wieder. Dieser natürliche Regelungskreislauf ist der faszinierende geologische Thermostat der Erde.

Rückkopplung im Koordinatensystem

Die mathematische Darstellung des Feedbacks zeigt, wie eine bestimmte vulkanische Emission $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ durch die Verwitterungsreaktionskonstante k die atmosphärische CO_2 -Konzentration $[\text{CO}_2]$ beeinflusst. $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ und der Verbrauch von CO_2 durch Verwitterung $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$ werden beide auf der y-Achse gezeigt. Sind vulkanische CO_2 -Emissionen und der CO_2 -Entzug durch Verwitterung im Gleichgewicht, sind beide Größen auf der y-Achse zudem identisch. Im linken Diagramm sehen wir einen Abfall von $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ (1 auf 2). Vorübergehend ist damit der Kreislauf aus der Balance (gelber Punkt). Die Verwitterung nimmt durch das Feedback ab, bis sich das System erneut im Gleichgewicht befindet (Position 2), jedoch bei niedrigerer $[\text{CO}_2]$. Rechts sehen wir, was geschieht, wenn die Reaktionskonstante k ansteigt, etwa durch erhöhte Gebirgserosion (1 auf 2). Dann ist $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$ vorübergehend höher als $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ (gelber Punkt). Doch die Balance wird auch hier wiederhergestellt, weil $[\text{CO}_2]$ fällt, so dass zum Schluss die gleiche Verwitterungsrate wie vorher herrscht, allerdings bei niedrigerer $[\text{CO}_2]$.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: F. VON BLANCKENBURG, GFZ POTSDAM

Doch das bedeutet keineswegs, dass die CO_2 -Menge in der Atmosphäre, und damit die Erdtemperatur, stets gleichförmig war. Im Gegenteil, die Antriebskräfte des Thermosats haben sich ständig geändert: Durch Anstieg und Abfall vulkanischer Emissionen oder aber durch die Bildung von Gebirgen, welche die Verwitterung erhöhen, hat der Kohlenstoffdioxidgehalt fortlaufend variiert. Wie CO_2 zwischen Quellen und Senken balanciert wird, lässt sich in einer einfachen Ratengleichung darstellen:

$$d\text{CO}_2/dt = \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - \text{Verw}_{\text{CO}_2} = \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - k \cdot [\text{CO}_2]$$

In dieser Gleichung steht $d\text{CO}_2/dt$ für die Änderung der Menge des atmosphärischen CO_2 mit der Zeit. $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ gibt die Menge an CO_2 an, die der Atmosphäre pro Zeiteinheit durch Vulkanausbrüche zugeführt wird, während $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$ das CO_2 bezeichnet, das ihr durch Verwitterung entzogen wird. $[\text{CO}_2]$ steht für die Konzentration von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre, und die Reaktionskonstante k beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Atmosphäre ein CO_2 -Molekül durch die Gesteinsverwitterung verliert.

Scheinbare Balance

Wenn CO_2 -Emissionen und CO_2 -Senken, also $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ und $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$, in Balance sind – und das müssen sie über den genannten Zeitraum von rund 250 000 Jahren innerhalb weniger Prozent gewesen sein, um eine lebenswerte Erdtemperatur zu gewährleisten –, ist $d\text{CO}_2/dt$ gleich null. Diesen Zustand bezeichnet man als das »stationäre Gleichgewicht«: Obwohl CO_2 zwischen Vulkanen, Atmosphäre und Verwitterung ständig ausgetauscht wird, bleibt seine Konzentration in der Atmosphäre $[\text{CO}_2]$ annähernd konstant.

Zeichen der Veränderung

In den letzten 15 Millionen Jahren der Erdgeschichte hat sich die Klimaregulierung durch ein stärkeres Feedback verändert. 1 Es wurde kälter (dies wissen wir aus stabilen Sauerstoffisotopen). 2 Die atmosphärische CO_2 -Konzentration nahm ab (dies wissen wir aus stabilen Borisotopen). 3 Die Verwitterungsrate blieb trotzdem konstant (dies wissen wir aus dem Verhältnis des kosmogenen ^{10}Be und des stabilen ^9Be -Isotops im Vergleich zum heutigen $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ -Verhältnis im Ozeanwasser von 0,2 bis $1,4 \times 10^{-7}$). 4 Dennoch hat sich die chemische Reaktivität der Landoberfläche erhöht (dies wissen wir aus stabilen Lithiumisotopen).

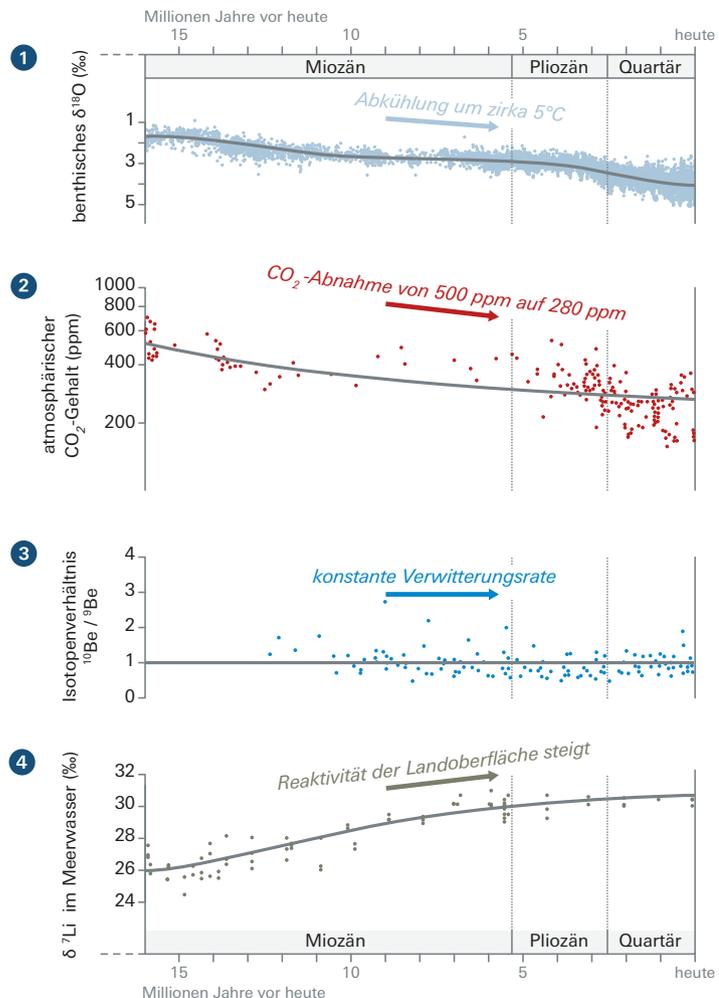
Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/gebirge-und-hochgebirge



ISTOCK / KIWISOUL

Zwei Faktoren können diese Balance stören, so dass sich die mittlere Konzentration von CO_2 ändert: ein plötzlicher Anstieg oder Abfall der vulkanischen Emissionen oder eine Veränderung der Verwitterung. Sinken beispielsweise die vulkanischen Emissionen, stellt sich $[\text{CO}_2]$ auf ein niedrigeres Niveau ein. Durch das Feedback wird daraufhin aber das Gleichgewicht wiederhergestellt: Die Verwitterung nimmt so lange ab, bis das Gleichgewicht erreicht ist – nun ist jedoch die atmosphärische CO_2 -Konzentration geringer (siehe »Rückkopplung im Koordinatensystem«, S. 52, linkes Diagramm). Die Dauer des »Ungleichgewichtszustands« beträgt die besagten 250 000 Jahre.



Die Erdgeschichte kennt solche Ereignisse. Beispielsweise wissen wir, dass es im frühen Eozän, vor 52 Millionen Jahren, auf der Erde um etwa zehn Grad Celsius wärmer war als im späten Eozän vor 35 Millionen Jahren und dass die Atmosphäre zu ersterem Zeitpunkt rund 3000 ppm (Millionstel Teile) Kohlenstoffdioxid enthielt. In vorindustrieller Zeit war das CO₂-Niveau hingegen niedrig: bei 280 ppm.

In den letzten 15 Millionen Jahren hat die globale Jahrestemperatur stetig abgenommen – allein in den vergangenen 5 Millionen Jahren um etwa 3 Grad Celsius. Infolgedessen bildeten sich vor 2,5 Millionen Jahren riesige Eisschilde auf der nördlichen Hemisphäre aus, ein Prozess, der als quartäre Vereisung bekannt ist.

Über die Gründe für diese Abkühlung tobt in den Geowissenschaften seit mehr als 20 Jahren eine lebhaft

Debatte: Eine beliebte Hypothese besagt, dass durch das Aufsteigen der großen Gebirge wie des Himalaja, der Anden oder der Alpen die Erosion und damit auch die Verwitterungsrate global zugenommen hat. Dadurch habe auch der Gehalt an CO₂ in der Atmosphäre abgenommen, so dass es kälter wurde.

Der Haken an einer beliebten Hypothese

Der berühmte Geochemiker Bob Berner (1935–2015) von der Yale University und sein Kollege Ken Caldeira von der Stanford University haben 1997 allerdings auf einen großen Haken an dieser Hypothese aufmerksam gemacht: Solche beträchtlichen Änderungen in der Verwitterung hätten bei gleich bleibenden vulkanischen Emissionen die empfindliche CO₂-Balance sehr schnell völlig aus dem Gleichgewicht

Isotope als Fingerabdrücke der geologischen Vergangenheit

Die Eigenschaften des Erdsystems heute, wie die Temperatur, der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre oder die Erosions- und Verwitterungsraten der Landoberfläche, sind direkt messbar. Um derartige Informationen für die geologische Vergangenheit zu rekonstruieren, sind Wissenschaftler hingegen auf Daten angewiesen, die indirekt Auskunft über die gesuchten Parameter geben (Proxies, englisch für Stellvertreter). Die Verhältnisse bestimmter Isotope zueinander sind solche Stellvertreterdaten. Isotope sind Varianten eines chemischen Elements, die sich allein durch ihre Masse voneinander unterscheiden. Ermittelt man die Menge eines schweren Isotops relativ zur Menge eines leichten Isotops – das Isotopenverhältnis –, erhält man einen charakteristischen Isotopenfingerabdruck.

¹⁸O/¹⁶O als Anzeiger für die Temperatur: Das Verhältnis der stabilen Isotope des Sauerstoffs (O) im Meerwasser, ¹⁸O zu ¹⁶O, steigt an, wenn es kälter wird. Dies passiert, weil sich die Häufigkeiten der beiden Isotope bei der Verdunstung von Wasser verschieben – sie »fraktionieren« (Grafik rechts). Das leichtere Isotop ¹⁶O verdunstet bevorzugt gegenüber ¹⁸O, auch wenn sich dies nur mit zehn Tausendstel im Isotopenverhältnis äußert. Kühlt sich die Erde ab, wird

mehr Niederschlag in den wachsenden kontinentalen Eismassen gebunden. Das so im Eis angereicherte ¹⁶O fehlt dem Ozeanwasser. Sammelt man nun Kalkschalen benthischer Foraminiferen – abgestorbene marine Kleinstlebewesen, die am Ozeanboden lebten –, so zeigt der Sauerstoff, den sie enthalten, die Schwankungen des Verhältnisses von ¹⁸O zu ¹⁶O im Meerwasser an. Er zeigt auch die Wassertemperatur direkt an, denn beim Einbau in die Kalkschalen verschieben sich die Sauerstoffisotope mal schwächer und mal stärker, je nach Wassertemperatur. Die Schwankungen lassen wiederum auf die Änderungen der Wassertemperatur und auch der Eismassen und somit die Temperatur der Atmosphäre in der Vergangenheit schließen. Weil die Verschiebungen in den Isotopenverhältnissen sehr klein sind und sich

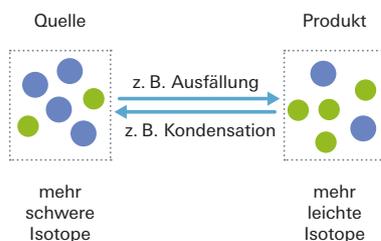
erst auf der dritten oder vierten Nachkommastelle ausdrücken, gibt man sie in Promille (‰) relativ zu einem Referenzmaterial (Standard) an:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{Probe}}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{Standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

¹¹B/¹⁰B als Anzeiger für den CO₂-Gehalt: Im Wasser gelöstes Bor (B) bildet verschiedene Verbindungen, deren Verhältnis mit dem pH-Wert des Meerwassers variiert. Je nach Verbindung ist auch das Verhältnis der stabilen Isotope des Elements ¹¹B zu ¹⁰B unterschiedlich. Foraminiferen bauen in geringen Mengen eine der im Wasser gelösten Borverbindungen ein. Das ¹¹B/¹⁰B-Verhältnis in Foraminiferenschalen hängt also vom pH-Wert des Meerwassers ab. Dieser ist umso niedriger, je mehr Kohlenstoffdioxid in der Luft enthalten ist und sich als Kohlensäure im Wasser löst. Somit geben die Kalkschalen alter Sedimente über den CO₂-Gehalt der Atmosphäre in vergangenen Zeiten Auskunft.

¹⁰Be/⁹Be als Anzeiger für die Verwitterungsrate: Beryllium (Be) kommt in der Erde als seltenes Spurenelement mit eigentlich nur einem Isotop vor: ⁹Be. Das schwerere ¹⁰Be hingegen ist ein »kosmogenes« Isotop, das in der

Isotopenfraktionierung



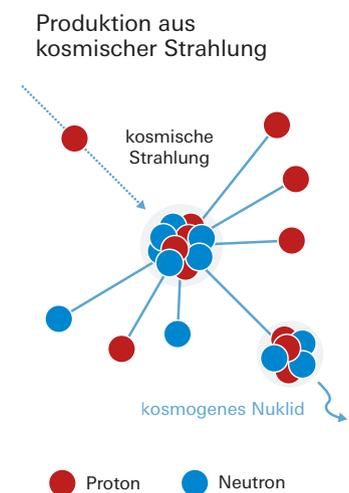
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ILLUSTRATIONEN
MACH: F. VON BLANKENBURG, GIZ PUTZAM

geworfen, so dass kaum noch CO₂ übrig geblieben wäre. Eine total vereiste Erde wäre die Folge gewesen. Dies war jedoch nicht der Fall.

Um herauszufinden, wo der Fehler bei der Hypothese liegt, müssen wir genauer wissen, was in den letzten 15 Millionen Jahren in der Atmosphäre und an der Landoberfläche passiert ist. Solche Kenntnisse über die Geschichte des Erdklimas gewinnen Geologen aus so genannten Sedimentarchiven. Indem sie Ablagerungen bekannten Alters analysieren, erhalten sie Aufschluss über verschiedene Parameter wie die Temperatur der Erdoberfläche oder die Zusammensetzung der Atmosphäre (siehe »Isotope als Fingerabdrücke der geologischen Vergangenheit«, unten). So lässt sich beispielsweise aus Messungen der stabilen Sauerstoffisotope in Kalkschalen am Meeresgrund ermit-

teln, wie groß die Eismassen waren, die die Erde zu einem bestimmten Zeitpunkt bedeckten. Das wiederum lässt Rückschlüsse auf die Temperatur zu: Sie ist kontinuierlich gesunken (siehe »Zeichen der Veränderung«, S. 53).

Aus Messungen der stabilen Borisotope in Ozeansediment wissen wir indessen, dass die Konzentration von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre in den letzten 15 Millionen Jahren in der Tat abgenommen hat: von rund 550 ppm auf 280 ppm in der Holozänzeit, wo sie von vor 10000 Jahren bis zu Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts relativ konstant blieb. Diese Reduktion reichte aus, um die Erde deutlich abzukühlen. Ein großes Rätsel aber gab in den vergangenen Jahren ein neuer Isotopenindikator auf, den ich mit meiner Forschungsgruppe im Jahr 2014 entwickelt habe: das Verhältnis der Berylliumisotope



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDEGRAFIK NACH: F. VON BLANCKENBURG, GIZ POTS DAM

Atmosphäre und an der Erdoberfläche ständig in sehr geringen Mengen durch kosmische Strahlung entsteht (Grafik oben). Weil ¹⁰Be außerdem radioaktiv ist und eine Halbwertszeit von 1,4 Millionen Jahren besitzt, gibt es dieses Isotop innerhalb der inneren Erde nicht, da die Erde viel älter ist. Fällt jedoch Regen auf die Ozeane oder die Kontinente, sammelt sich dort frisches ¹⁰Be an. Wir kennen die Anzahl der ¹⁰Be-Atome, die pro Jahr auf der Erdoberfläche ankommen, ziemlich genau. Das stabile Isotop ⁹Be hingegen wird bei der Verwitterung von Gestein freigesetzt und gelangt über Flüsse in geringen Mengen in die Ozeane, wo es sich mit ¹⁰Be mischt. Je höher die globale Verwitterungsrate, desto niedriger ist das

¹⁰Be/⁹Be-Verhältnis im Ozeanwasser, aus dem beide Isotope in Sedimente der Tiefsee eingelagert werden. Löst man sie daraus wieder auf und korrigiert das ¹⁰Be für radioaktiven Zerfall, erhält man die kontinentale Verwitterungsrate aus der Zeit der Sedimentablagerung. Diese Methode zur Bestimmung der Verwitterungsrate haben wir in unserem Geochemielaboratorium kürzlich entwickelt.

⁷Li/⁶Li als Anzeiger für die Reaktivität der Landoberfläche: Löst sich Gestein durch Verwitterung auf, gelangen die darin enthaltenen stabilen Lithiumisotope ⁷Li und ⁶Li in das Wasser der Poren des verwitternden Gesteins. Aus diesem Porenwasser bilden sich Tonminerale, die ein wichtiger Bestandteil aller Böden sind. Dabei nehmen sie durch die Isotopenfraktionierung bevorzugt ⁶Li auf, und zwar 15 Tausendstel mehr als ⁷Li. Das Porenwasser ist also verarmt an ⁶Li. Je mehr ursprüngliche Minerale bei der Verwitterung noch vorhanden sind (je »reaktiver« die Erdoberfläche also ist, siehe Grafik S. 56), desto mehr Tonminerale können sich bilden und desto höher wird das ⁷Li/⁶Li-Verhältnis des Porenwassers. Ist der Grad der Verwitterung hingegen sehr hoch (ist die Erdoberfläche also unreaktiv), werden Tonminerale wieder aufge-

löst, so dass das ⁷Li/⁶Li-Verhältnis des Porenwassers niedrig ist. Über Grundwasser gelangt dieses Lithium in die Flüsse und von dort in die Ozeane, wo es sich mit dem Lithium mischt, das durch heiße Lösungen an Mittelozeanischen Rücken freigesetzt wird. Auch dieses Element wird in kleinsten Mengen in marine Kalkschalen eingebaut. Je höher das ⁷Li/⁶Li-Verhältnis in den Kalkschalen, desto höher war demnach die Reaktivität der Landoberfläche in der Vergangenheit.

Messtechnik: Isotopenverhältnisse werden am Massenspektrometer gemessen. Für die Bestimmung von ¹⁸O/¹⁶O löst man dazu Kalkschalen direkt am Gasmassenspektrometer auf und bestimmt das freigesetzte CO₂. ¹¹B/¹⁰B und ⁷Li/⁶Li werden an einem speziellen Massenspektrometer, dem so genannten Multikollektor induktiv gekoppelten Massenspektrometer (ICP-MS) nach Auflösen der Probe und chemischer Separation als Ionen (B⁺ und Li⁺) gemessen. Da ¹⁰Be nur in geringen Mengen vorhanden ist, ermittelt man es nach Auflösen und chemischer Abtrennung an einem hochempfindlichen Beschleuniger-Massenspektrometer, während stabiles ⁹Be mit einem optischen ICP-Spektrometer oder ICP-MS separat bestimmt wird.

$^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ in Ozeansediment. Es zeigt die Geschwindigkeit der vergangenen Gesteinsverwitterung an. Die Verwitterung war gemäß diesem Indikator über den Zeitraum, in dem die Abkühlung stattfand, konstant (siehe »Zeichen der Veränderung«, S. 53). Wir wissen außerdem aus plattentektonischen Rekonstruktionen, dass die vulkanischen Emissionen in der betreffenden Zeit nicht abgenommen haben.

Wie können jedoch die CO_2 -Konzentration und die Temperatur abnehmen, wenn sich weder Verwitterung noch vulkanische Emissionen verändert haben? Jeremy Caves von der ETH Zürich, Dan Ibarra von der Stanford University und ich haben das Feedback-Konzept genutzt, um eine Hypothese zu liefern: k , die Reaktionskonstante, muss sich erhöht haben (siehe »Rückkopplung im Koordinatensystem«, S. 52, rechtes Diagramm). Nimmt k bei einer gegebenen CO_2 -Konzentration zu, so steigt dadurch vorübergehend auch die Verwitterungsrate, und das System gerät aus dem Gleichgewicht. Doch weil die vulkanische Aktivität nicht gleichzeitig zunimmt, wird nicht genügend CO_2 nachgeliefert, so dass sich die Verwitterung wieder verlangsamt. Das Gleichgewicht pendelt sich bei der vorherigen Verwitterungsrate ein – nun ist jedoch der CO_2 -Gehalt niedriger. Die Balance hat sich also bei den gleichen Umsätzen, aber geringerem Kohlenstoffdioxidgehalt eingestellt. Wegen Letzterem kühlt es sich ab, obwohl die Verwitterungsrate gleich groß ist wie zuvor. Das erklärt auch die Befunde aus den Berylliumisotopen, die eine konstante Verwitterungsrate während der Abkühlung anzeigen. Es bleibt die Frage: Was hat die Reaktionskonstante k geändert?

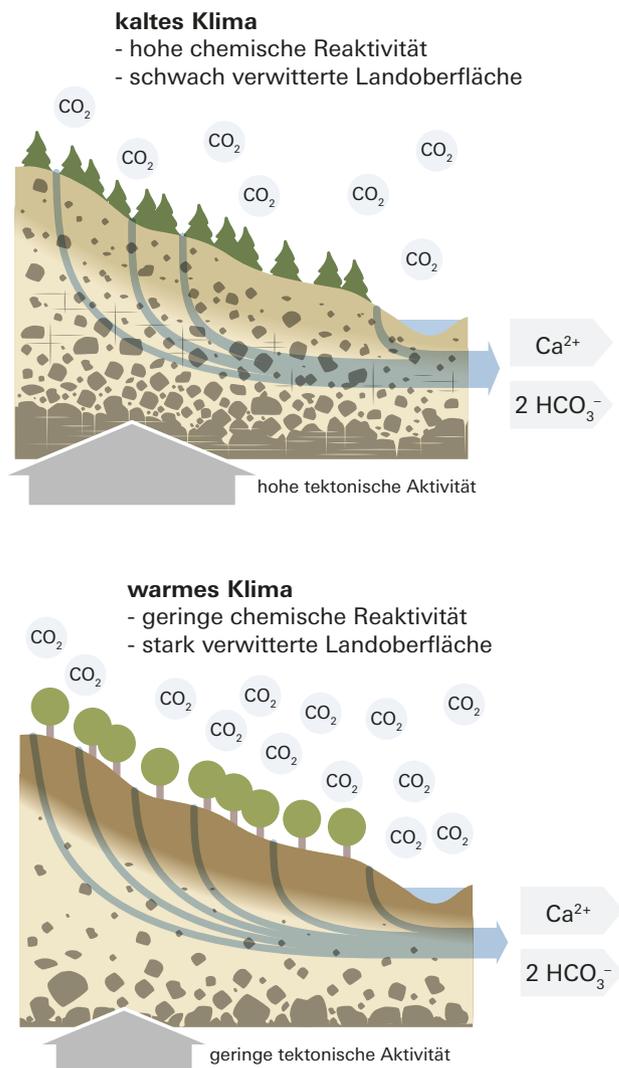
Die Landoberfläche kann mehr oder weniger bereitwillig mit CO_2 reagieren

Auf der Suche nach einer Erklärung kommt die Landoberfläche ins Spiel. Diese Zone reicht bis einige Dutzend Meter tief und wird auch als »kritische Zone« der Erde bezeichnet. In ihr laufen die wichtigen Umwandlungen von Gestein in Boden ab. Abhängig von den Mineralen, die in diesem Bereich vorhanden sind, unterscheidet man mehr und weniger reaktive Verwitterungszonen. Erstere können CO_2 schon bei einem geringen Gehalt in der Atmosphäre effizient binden, und die Reaktionskonstante k ist hoch. Eine wenig reaktive Verwitterungszone hingegen hat ein niedriges k und somit eine geringere Wahrscheinlichkeit, mit CO_2 zu reagieren.

Ganz praktisch bestimmt die Menge der vorhandenen »primären« Minerale die Reaktivität (Grafik rechts). Dies sind solche, die schon im ursprünglich gebildeten Gestein enthalten waren, wie Feldspat, Biotit-Glimmer, Hornblende oder Pyroxen. In einer reaktiven Landoberfläche (oberes Bild) befinden sich so viele dieser Silikatminerale, dass bereits wenige Mengen an CO_2 mit ihnen effizient reagieren können: Das Gestein verwittert. In der Folge entstehen so genannte Sekundärminerale und mit ihnen der Boden. Reaktive Landoberflächen befinden sich heute in den Hoch- und Mittelgebirgen, wie im Himalaja, den Alpen, dem Schwarzwald oder in ehemals vereisten Gebieten etwa in Nordeuropa oder Amerika. Tektonische Bewegungen und eine mittelhohe Erosionsrate reichen aus, um die Landschaft laufend so zu verjüngen, dass stets genügend frische

Primärminerale zur Reaktion zur Verfügung stehen und die nicht reaktiven Sekundärminerale oben abgetragen werden.

In einer wenig reaktiven Verwitterungszone hingegen sind die »frischen« Primärminerale bereits verbraucht (unteres Bild). An ihrer Stelle befinden sich vor allem sekundäre, die sich im Lauf der Verwitterung gebildet haben, wie Tonminerale (Kaolinit, Illit) oder Eisenoxide. Um diese noch weiter zu verwittern, sind viel Wasser, Wärme und CO_2 vonnöten. Solche stark verwitterten Landoberflächen findet man in den tropischen und tektonisch inaktiven Gebieten Afrikas, Brasiliens oder Australiens. Sie dominierten die Erde anscheinend vor 15 Millionen Jahren.



Die »Reaktivität« der Landoberfläche: Befinden sich mehr unverwitterte silikatische Mineralkörner wie Feldspat oder Glimmer im Boden (oben), kann dieser mit wenig CO_2 in der Atmosphäre ebenso gut chemisch reagieren wie ein bereits stark verwitterter Boden mit viel CO_2 in der Atmosphäre (unten). Die Verwitterungsrate und somit die Menge an CO_2 , die der Atmosphäre pro Zeitintervall entzogen wird, bleibt jedoch gleich.

Einen Hinweis darauf, wie aktiv die Landoberfläche in der Vergangenheit war, liefert eine relativ neue Isotopenmethode: Weil Lithium (Li) in Spuren in Gesteinen vorkommt, wird es bei der Verwitterung freigesetzt und gelangt in das Porenwasser, aus dem sich Tonminerale bilden. Dabei wird in Letztere bevorzugt das leichtere ${}^6\text{Li}$ eingebaut. Entstehen mehr Tonminerale mit ${}^6\text{Li}$, wird verhältnismäßig mehr ${}^7\text{Li}$ über das Grundwasser in Flüsse und Ozeane transportiert. Aus dem Verhältnis ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ in marinen Kalkschalen, die sich aus dem Ozeanwasser bilden, können wir dadurch auf die Reaktivität der Landoberfläche in der Erdgeschichte schließen. Und tatsächlich hat das Verhältnis der Lithiumisotope (${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$) im Ozeansediment in den letzten 15 Millionen Jahren zugenommen (siehe »Zeichen der Veränderung«, S. 53), was bedeutet, dass die Reaktivität der Landoberfläche im globalen Mittel stetig gestiegen ist.

Wir schätzen, dass bei gleich bleibender Verwitterungsrate eine Verdopplung der Erosionsrate genügt haben könnte, um diese erhöhte Reaktivität herzustellen. Das hat die Erde in den letzten 15 Millionen Jahren zunehmend abgekühlt und letztendlich die Vereisung der nördlichen Hemisphäre eingeleitet. Was wiederum die Erosion verändert hat, ist noch offen. Ein guter Kandidat sind nach wie vor die aufsteigenden Hochgebirge. Aber auch die Bildung kleiner Täler an neuen tektonischen Gräben, beispielsweise des ostafrikanischen Rift-Grabens oder des Rheingrabens, und die Freilegung reaktiverer Gesteine sind Möglichkeiten. Ebenso könnten Änderungen in der Vegetation oder beim Anwachsen und Schmelzen von Gletschern eine Rolle gespielt haben – alle Prozesse also, welche die Landoberfläche durchmischt und dabei reaktivere Primärminerale in die Verwitterungszone transportiert haben.

Fest steht, dass der geologische Thermostat sowohl die Stabilität des Erdklimas über die gesamte Erdgeschichte garantiert und gleichzeitig Fluktuationen innerhalb des lebenswerten Bereichs zugelassen hat.

Jenseits der Regulierungsmöglichkeiten

Eine der größten Störungen dieser empfindlichen Balance steht uns unmittelbar bevor. Durch den Verbrauch fossiler Brennstoffe hat der Mensch den CO_2 -Anteil in der Atmosphäre etwa seit dem Jahr 1900 bereits von 280 ppm auf mehr als 400 ppm erhöht. Handeln wir nicht sofort, werden wir nach dem pessimistischsten Szenario des Weltklimarats (IPCC) im Jahr 2100 eine Erdatmosphäre mit 1000 und 100 Jahre später sogar mit 2000 ppm CO_2 erleben. Gegen die Menge des CO_2 wie auch die Geschwindigkeit, mit der sie steigt, werden die natürlichen Regulierungsmechanismen nicht schnell genug ankommen. Eine Erde, wie der Mensch sie nie gekannt hat, wird die Folge sein.

Die Enormität dieser Entwicklung wird vielleicht am deutlichsten, wenn man betrachtet, wie lange es dauern wird, bis die Erde den CO_2 -Gehalt auf das vorindustrielle Niveau zurückgebracht haben wird. Der Klimawissenschaftler David Archer von der University of Chicago und der Hamburger Klimamodellierer Victor Brovkin vom Max-Planck-Institut für Meteorologie haben das 2008 berechnet: Die Absorption von Kohlenstoffdioxid durch die Ozeane wird dessen Konzentration in der Atmosphäre in rund

Zwei CO_2 -Zyklen

Bereits 1845 erkannte der französische Bergbauingenieur Jacques-Joseph Ébelmen (1814–1852), dass der im Artikel beschriebene CO_2 -Kreislauf ein geologischer ist, der langsam verläuft, aber wegen seiner ozeanischen Kalkgesteinssenke das Erdklima langfristig stabilisiert. Nur 0,1 Milliarden Tonnen Kohlenstoff entzieht dieser Prozess der Atmosphäre pro Jahr. Viel größer ist hingegen der organische Kohlenstoffzyklus: Landpflanzen entfernen durch Fotosynthese jährlich 60 Milliarden Tonnen Kohlenstoff aus der Atmosphäre, weitere 90 Milliarden Tonnen entziehen ihr Gas-Wasser-Austausch und Kleinstlebewesen im Ozean. Dieser gigantische CO_2 -Kreislauf ist jedoch geschlossen, weil der organische Kohlenstoff mit der gleichen Rate oxidiert wird, wie er durch Fotosynthese fixiert wird. Deshalb betrachten wir ihn hier für die geologische Temperaturregelung nicht. Er kann dennoch das CO_2 -Budget der Atmosphäre beeinflussen, wenn – wie in der Karbonzeit – große Mengen organischen Kohlenstoffs in Sedimente eingelagert werden, die später zu Kohle werden. Mit 10 Milliarden Tonnen Kohlenstoff (sie entsprechen 37 Milliarden Tonnen CO_2) werfen heute allerdings die massiven zusätzlichen CO_2 -Emissionen aus fossilen Brennstoffen auch den organischen CO_2 -Zyklus aus der Balance.

3000 Jahren ausgehend von rund 1400 ppm auf 600 ppm reduziert haben. Nach 20000 Jahren wird die Verwitterung von Karbonatgestein den CO_2 -Anteil auf 450 ppm gesenkt haben, und erst nach 200000 bis 400000 Jahren wird die hier besprochene Verwitterung von Silikatgestein das ursprüngliche Niveau von 280 ppm wiederhergestellt haben. Ohne Zweifel wäre es besser, wenn der Mensch schnellstmöglich die Finger von diesem unvorstellbaren Experiment ließe. ◀

QUELLEN

Archer, D., Brovkin, V.: The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO_2 . *Climatic Change* 90, 2008

Berner, R. A., Caldeira, K.: The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle. *Geology* 25, 1997

Caves Rugenstein, J. K. et al.: Neogene cooling driven by land surface reactivity rather than increased weathering fluxes. *Nature* 571, 2019

Galvez, M. E., Gaillardet, J.: Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept. *Comptes Rendus Geoscience* 344, 2012

Von Blanckenburg, F., Bouchez, J.: River fluxes to the sea from the ocean's Be-10/Be-9 ratio. *Earth and Planetary Science Letters* 387, 2014

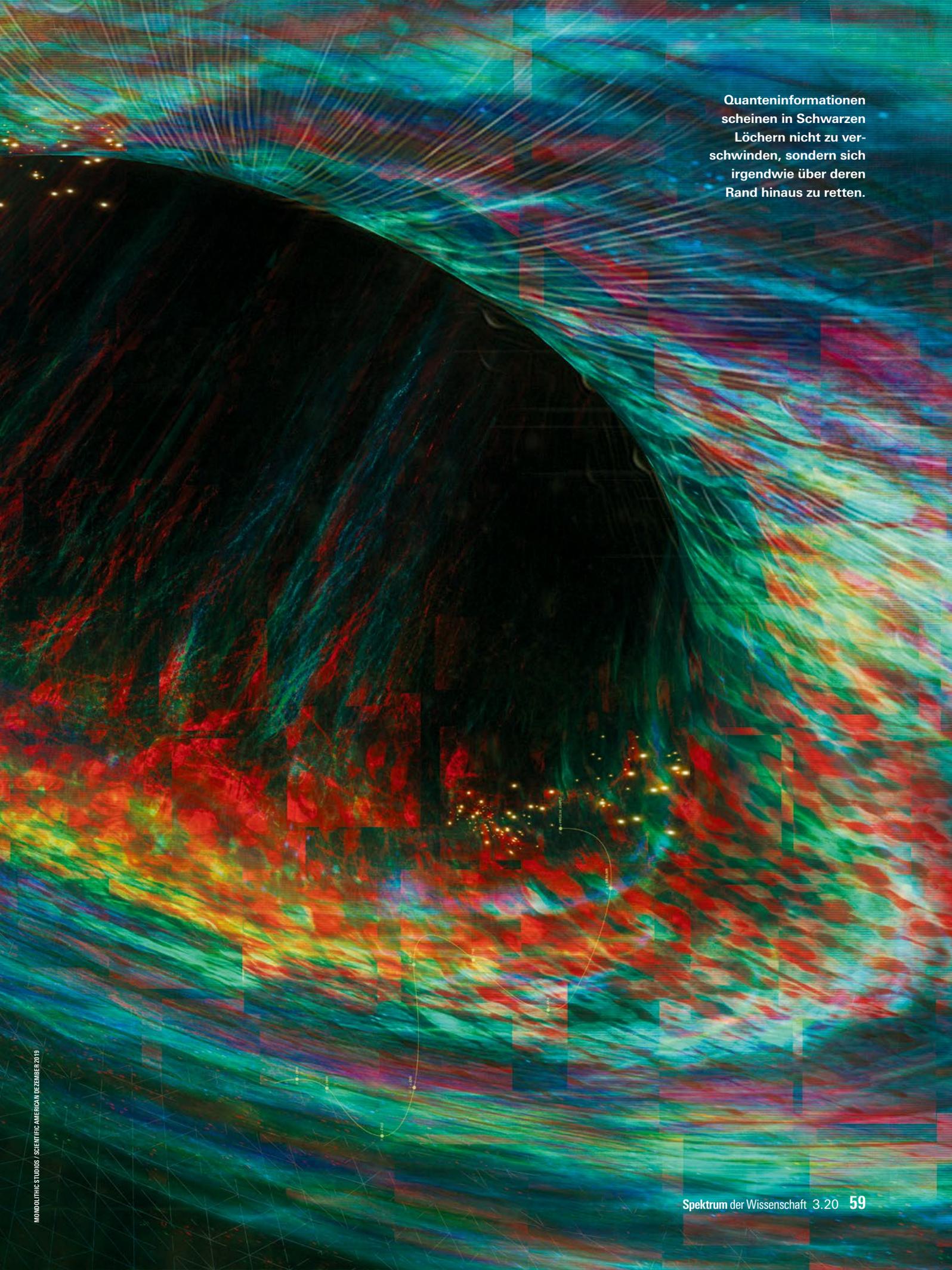
PHYSIK AUSWEG AUS DEM SCHWARZEN LOCH

Was Schwarze Löcher einmal verschluckt haben, sollten sie eigentlich nie mehr frei geben. Doch dem widersprechen quantenmechanische Grundsätze. Unterschiedliche Szenarien sollen das Problem lösen. Können neue Beobachtungstechniken offenbaren, was wirklich passiert?



Steven B. Giddings lehrt an der University of California in Santa Barbara. Er beschäftigt sich dort mit Hochenergiephysik, Schwarzen Löchern und der Schnittstelle von Quantentheorie und Gravitation.

» [spektrum.de/artikel/1701296](https://www.spektrum.de/artikel/1701296)



Quanteninformationen
scheinen in Schwarzen
Löchern nicht zu ver-
schwinden, sondern sich
irgendwie über deren
Rand hinaus zu retten.

Am 10. April 2019 bekam die Menschheit zum ersten Mal die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Lochs zu sehen. Zuvor hatte das Team des Event Horizon Telescope (EHT) weltweit verteilte Observatorien vernetzt und auf die Galaxie M87 gerichtet. Nach intensiver Auswertung präsentierten sie das Ergebnis: eine Aufnahme des Objekts im Zentrum der Galaxie, das die 6,5-milliardenfache Masse unserer Sonne auf sich vereint (siehe »Ins Herz der Finsternis«, »Spektrum« Juli 2019, S. 42). Das war eine atemberaubende Leistung – der erste direkte Blick auf eines der geheimnisvollsten Objekte des Universums. Darüber hinaus geben solche Bilder und ähnliche Beobachtungen vielleicht neue Hinweise auf die Lösung eines ebenso hartnäckigen wie grundlegenden physikalischen Rätsels.

Dabei handelt es sich um das so genannte Informationsparadoxon. Es dreht sich um die Frage, was mit der Information über Dinge geschieht, die in ein Schwarzes Loch stürzen. Die darauf aufbauenden Überlegungen machen allem Anschein nach die bloße Existenz von Schwarzen Löchern mit den quantenmechanischen Gesetzen unvereinbar: jenen Regeln, denen sämtliche Materie im Universum auf kleinsten Skalen folgt. Diese Inkonsistenz aufzulösen, könnte nicht weniger als eine Revolution erfordern – wie vor einem Jahrhundert beim Sturz der klassischen Physik durch die Quantenmechanik.

Theoretiker haben im Lauf der letzten Jahrzehnte viele Ideen untersucht, mussten dabei aber praktisch ohne direkte Hinweise aus Experimenten auskommen. Das erste Bild eines Schwarzen Lochs rückt solche Daten endlich in greifbare Nähe. Zukünftige EHT-Beobachtungen könnten enthüllen, wie sich die Objekte mit der Zeit entwickeln. Dazu kommen seit 2016 immer mehr Messungen von kollidierenden Schwarzen Löchern durch Gravitationswellenobservatorien.

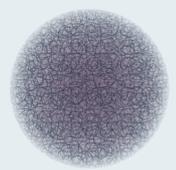
So geheimnisvoll sie sind, so allgegenwärtig scheinen Schwarze Löcher im Kosmos zu sein. Die jüngsten Messungen sind nur die neuesten und robustesten Beweise dafür, dass die Objekte tatsächlich real sind. Doch ihre Existenz passt nicht reibungslos zu den heutigen Grundlagen der Physik. Die Prinzipien der Quantenmechanik sollten sich eigentlich in allen Vorgängen in der Natur widerspiegeln, aber sobald sie auf Schwarze Löcher angewendet werden, führen sie zu einem Widerspruch.

Sturz ohne Wiederkehr

Das Problem entspringt einer der scheinbar einfachsten Fragen, die wir in Bezug auf Schwarze Löcher stellen können: Was passiert, wenn etwas hineinfällt? Dazu müssen wir zunächst ein wenig genauer umreißen, was die Frage bedeutet. Unseren derzeitigen quantenmechanischen Gesetzen zufolge wandeln sich Materie und Energie ständig ineinander um, und ein Teilchen wird manchmal nach bestimmten Regeln zu einem anderen. Nur eines darf nie verloren gehen: Information. Sofern wir die vollständige Beschreibung eines Systems auf Quantenebene kennen, sollten wir immer in der Lage sein, seine früheren Zustände und möglichen zukünftigen Entwicklungen genau zu berechnen. Etwas präziser formuliert sollte unsere Frage also lauten: Was geschieht mit Quanteninformationen in einem

Das Informationsparadoxon

Schwarze Löcher sind von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Gebilde, denen nichts entkommen kann. Inzwischen deuten diverse Beobachtungen darauf hin, dass es die Objekte wirklich gibt. Seit 1974 ist zudem klar: Sie sollten langsam an Masse verlieren und irgendwann verschwinden – mitsamt allen Informationen über die Objekte, die hineingefallen sind. Die Regeln der Quantenmechanik verbieten das allerdings. Physiker haben daher verschiedene Szenarien entwickelt, wie die Informationen erhalten bleiben könnten.

	Hypothese	Beschreibung	Problem
Information wird vernichtet	klassisches Schwarzes Loch  Ereignishorizont	Information, die den Ereignishorizont überschreitet und ins Schwarze Loch fällt, geht endgültig verloren, sobald dieses verdampft.	Widerspricht fundamentalen Konzepten, nach denen Energie und quantenmechanische Information stets erhalten bleibt.
	weiches Haar  Abdruck der Information	Information verschwindet nicht vollständig im Schwarzen Loch, sondern hinterlässt Spuren außerhalb des Ereignishorizonts.	Den meisten Experten zufolge liefert das Szenario keine überzeugende Lösung.
Information wird nicht vernichtet	Fuzzball 	An der Stelle des Ereignishorizonts befindet sich eine Oberfläche mit höherdimensionaler Geometrie, welche die einfallende Information codiert.	Alle Szenarien erfordern Eingriffe in das Konzept der Lokalität – die Vorstellung, nichts könne schneller reisen als Licht.
	Feuerwand  energiereiche Teilchen	Energereiche Prozesse entreißen allem, was auf den Ereignishorizont stürzt, die enthaltene Information und speichern sie dort.	
	Quantenhalo 	Das Schwarze Loch wechselwirkt mit seiner Umgebung, etwa mittels Fluktuationen in der Raumzeit, und lässt so Informationen wieder herausgelangen.	

Schwarzen Loch? Das führt zurück zu dem Grundgedanken hinter den Objekten.

Sie entstammen ursprünglich Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie, welche die Gravitation als Folge einer Krümmung von Raum und Zeit beschreibt. Die verzerrte Raumzeit verbiegt die Flugbahnen von allem darin, inklusive des Lichts. Wenn eine Masse in einer genügend kleinen Umgebung ausreichend stark konzentriert ist, dehnt sie die Raumzeit so sehr ein, dass selbst Licht nicht mehr entkommen kann. Die Region, ab der das Licht gefangen ist, bezeichnen Physiker als Ereignishorizont. Und da nichts schneller reisen kann als Licht, bleibt alles innerhalb dieser Grenze stecken, einschließlich Informationen.

Hinzu kommt die wohl bedeutendste Entdeckung des 2018 verstorbenen Theoretikers Stephen Hawking. Er sagte 1974 voraus, dass Schwarze Löcher nicht ewig existieren, sondern irgendwann verdampfen. Denn gemäß der Quantenmechanik gibt es ständig und überall Paare von »virtuellen Teilchen«. Typischerweise vernichtet sich ein solches Duo, bestehend aus einem Teilchen und seinem Gegenstück aus Antimaterie, schnell wieder selbst. Aber wenn es sich in der Nähe des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs bildet, könnte einer der Partner entweichen. Er trägt Energie weg, während der andere in den Ereignishorizont stürzt. Das Gesetz der Energieerhaltung erfordert nun, dass das Schwarze Loch daraufhin Energie verliert. Die Emission dieser »Hawking-Strahlung« lässt das Schwarze Loch schrumpfen und zerstört es mit der Zeit vollständig.

Das Problem: Die austretenden Teilchen enthalten keine Informationen darüber, was ursprünglich in das Schwarze Loch gelangt ist. Daher scheinen Hawkings Berechnungen zu zeigen, dass Quanteninformationen, die in ein solches Objekt fallen, gemeinsam mit diesem irgendwann spurlos verschwinden – unvereinbar mit der Quantenmechanik.

Die Erkenntnis löste eine tiefe Krise in der Physik aus. Früher kam es oft zu entscheidenden Fortschritten, wenn es gelang, solche Spannungen im Theoriegebäude aufzulösen. So schien beispielsweise zu Beginn des 20. Jahrhunderts die klassische Physik die Instabilität aller Atome vorherzusagen, im offensichtlichen Widerspruch zur Existenz stabiler Materie. Die um den positiv geladenen Kern laufenden negativ geladenen Elektronen müssten wegen ihrer steten Richtungswechsel unablässig elektromagnetische Strahlung aussenden, also ständig Energie verlieren und deswegen spiralförmig in die Tiefe stürzen. 1913 vermutete Niels Bohr, Elektronen könnten sich innerhalb quantisierter Bahnen aufhalten, auf denen sie ihre Energie beibehalten. Die radikale Idee spielte eine Schlüsselrolle auf dem Weg zu einem umfassenderen quantenmechanischen Weltbild, das die Natur grundlegend neu ordnete. Zunehmend scheint es, als würde die Krise rund um Schwarze Löcher zu einem weiteren Paradigmenwechsel in der Physik führen.

Als Hawking 1974 zum ersten Mal den Effekt der heutzutage nach ihm benannten Strahlung erkannte, meinte er, die Quantenmechanik müsse falsch und die Vernichtung von Information möglich sein. Doch einige Physiker ermittelten bald, dass entsprechend geänderte Regeln katastrophale

AUF EINEN BLICK HARTNÄCKIGE INFORMATION

- 1 Den Regeln der Quantenmechanik zufolge werden Informationen nie zerstört. Doch genau das müsste bei Schwarzen Löchern passieren, wenn man Quanteneffekte mit der allgemeinen Relativitätstheorie verbindet.
- 2 Wissenschaftler diskutieren verschiedene Möglichkeiten, um das Paradoxon zu lösen. Aber bisher fehlten ihnen Beobachtungsdaten, an denen sich einige der Ideen testen lassen.
- 3 Neue Instrumente ändern das vielleicht: 2019 gab es das erste Detailbild eines Schwarzen Lochs, und seit 2016 gestatten Gravitationswellen Einblicke in die Vorgänge bei der Kollision solcher Objekte.

Folgen für die Energieerhaltung hätten und mit der gegenwärtigen Beschreibung des Universums unvereinbar wären. Anscheinend muss die Lösung an anderer Stelle gesucht werden.

Viele Wissenschaftler vermuteten anfangs, Schwarze Löcher würden vielleicht nicht vollständig verdampfen, sondern irgendwann damit aufhören. Dann ließen sie, auf eine winzige Größe geschrumpft, in ihren Überresten die ursprünglichen Informationen schlicht zurück. Aber wenn das wahr wäre, entstünden Berechnungen zufolge solche Überreste auch im Rahmen alltäglicher physikalischer Vorgänge bei gewöhnlicher Materie. Das hätte für diese katastrophale, zerstörerische Konsequenzen – von denen wir nichts beobachten.

Nur eine Reise mit Überlichtgeschwindigkeit führt aus einem Schwarzen Loch heraus

Offensichtlich ist grundsätzlich etwas faul. Es ist verführerisch zu schließen, der Fehler liege bei Hawkings Analyse. Vielleicht entweichen parallel zur Hawking-Strahlung irgendwie doch Informationen aus einem Schwarzen Loch. Die Herausforderung besteht allerdings darin, dieses Szenario mit einem anderen grundlegenden Konzept der heutigen Physik in Übereinstimmung zu bringen, dem Prinzip der Lokalität. Es besagt, dass sich Informationen von einem Ort zum anderen niemals rascher als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Aber entsprechend der Definition von Schwarzen Löchern ist der einzige Ausweg aus einem solchen, schneller als das Licht zu reisen, und das gilt gleichermaßen für Informationen. In den vier Jahrzehnten seit Hawkings Entdeckung haben Physiker nach einem Schlupfloch gesucht, das im Rahmen der konventionellen Physik bleibt, jedoch keines gefunden.

Eine Lösung schien zum Greifen nahe, als die Physiker Malcolm Perry und Andrew Strominger 2016 gemeinsam mit Hawking einen möglichen Fehler in der ursprünglichen Analyse aufdeckten. Dieser würde bedeuten, dass Informationen tatsächlich nie vollständig in ein Schwarzes Loch

gelangen, sondern stattdessen auf der Außenseite eine Art Abdruck hinterlassen. Die drei Kollegen nannten das Phänomen »weiches Haar«. Es scheint genaueren Untersuchungen allerdings nicht standzuhalten, und die meisten Experten glauben heute nicht daran. Vielmehr dürften radikalere Schritte nötig sein.

Eine nahe liegende Idee ist: Ein unbekannter physikalischer Vorgang unterbindet die Entstehung echter Schwarzer Löcher. Im Prinzip brechen dabei sehr große Sterne am Ende ihres Lebens unter der Schwerkraft ihrer Masse unaufhaltsam zusammen. Aber was ist, wenn sie nie dieses Stadium erreichen und sich vielmehr in etwas verwandeln, das sich berechenbarer verhält? Schließlich ist das bei masseärmeren Sternen wie unserer Sonne der Fall – ihre Überreste bilden zum Beispiel so genannte Weiße Zwerge oder Neutronensterne. Vielleicht hindern unbekannte Gesetze der Physik größere Sterne daran, zu Schwarzen Löchern zu werden, und lassen ausgedehnte Überreste entstehen.

Es gibt allerdings keine plausiblen Modelle dafür, was solche Objekte stabilisieren soll. Keine bekannte Kraft kann den endlosen Kollaps unter der Schwerkraft aufhalten, und jede denkbare Physik, die das täte, würde allem Anschein nach überlichtschnelle Signalübertragung von einer Seite der zusammenfallenden Materie zur anderen erfordern.

Bei einem verwandten Konzept könnten Schwarze Löcher sich umwandeln, nachdem sie sich gebildet haben, jedoch lange bevor sie verdampfen. Das Produkt dieses Vorgangs würde dann die ursprünglichen Informationen enthalten. Aber wie man es auch dreht und wendet: Derlei Prozesse verletzen das Prinzip der Lokalität, da Informationen aus dem Inneren des Schwarzen Lochs auf den Überrest übergehen.

Verzweifelte Flucht in Feuerwände und hochdimensionale Fusselknäuel

Trotz der Probleme solcher Szenarien haben Physiker näher untersucht, unter welchen Bedingungen sie doch noch möglich wären. Beispielsweise hat der Stringtheoretiker Samir Mathur 2003 einen Vorschlag vorgelegt, laut dem sich ein Schwarzes Loch in einen »Fuzzball« (auf Deutsch etwa: Fusselknäuel) verwandelt, oder dass sich so ein Objekt von Anfang an statt eines Schwarzen Lochs bildet. In der Stringtheorie, die auf mehr als den üblichen vier Dimensionen der Raumzeit basiert, besitzt ein Fuzzball eine komplizierte, höherdimensionale Geometrie. An Stelle der scharfen Grenze eines Schwarzen Lochs am Ereignishorizont gäbe es eher eine verwaschene Oberfläche mit seltsamen mathematischen Gebilden darauf.

Ein etwas jüngeres Szenario ist ein von einer »Feuerwand« umhüllter Überrest. Die Wand liegt dort, wo sich der Ereignishorizont befinden würde, und beherbergt energiereiche Teilchen (siehe »Feuerwand am Horizont«, »Spektrum« September 2015, S. 34). Sie verbrennt alles, was ihr begegnet, und verwandelt es in reine Energie. Sowohl die Feuerwand als auch der Fuzzball teilen jedoch das Problem, nicht mit der Lokalität vereinbar zu sein, und die resultierenden Objekte hätten weitere schwer zu erklärende Eigenschaften.

Um den Widerspruch zu lösen, der sich aus der Quantenmechanik ergibt, verstößt man leicht gegen die Geschwindigkeitsbegrenzung des Lichts. Dieser Regelbruch kann ebenso katastrophale Folgen haben wie ein Herumdoktern an der Quantenphysik und führt typischerweise lediglich zu einem anderen Paradoxon. Konkret besagen die Gesetze der Relativitätstheorie: Könnte man ein Signal durch den leeren, ungekrümmten Raum schicken, das schneller als Licht ist, wäre man im Stande, mit der Vergangenheit zu kommunizieren. Die Fähigkeit, eine Botschaft in der Zeit rückwärts zu senden, führt zu allerlei unmöglichen Situationen – man könnte seine Großmutter umbringen lassen, bevor die eigene Mutter geboren wird.

Doch obwohl der Eingriff in die Lokalität im Widerspruch zu grundlegender Physik zu stehen scheint, lohnt es sich, genauer hinzuschauen. Schließlich ist jede bekannte Alternative ebenfalls auf irgendeine Art verrückt. Der ausgesprochen hartnäckige Charakter der Krise deutet nachdrücklich auf eine Antwort hin, bei der das Prinzip der Lokalität auf eine subtile Weise verletzt ist, die keine Paradoxien hervorruft. Vielleicht offenbart sich die dafür nötige, spezielle Form der Delokalisierung erst in der Lösung eines der schwierigsten Probleme der heutigen Physik, der Vereinigung von Quantenmechanik und Schwerkraft. Jedenfalls ist die grundsätzliche Vorstellung von Informationen, die genau an einem Ort und nicht an einem anderen existieren, in Theorien mit Schwerkraft besonders heikel. Gravitationsfelder erstrecken sich nämlich bis ins Unendliche und erschweren so das Konzept der Lokalisierung.

Falls Informationen aus Schwarzen Löchern entkommen, braucht es dafür möglicherweise keine dramatische Veränderung, sei es als Fuzzball, als Feuerwand oder als andere Variante eines Überrests. Nicht zuletzt deuten immer mehr Beobachtungsdaten darauf hin, dass es im Universum Objekte gibt, die wie ganz normale Schwarze Löcher aussehen und nicht messbar von Einsteins Vorhersagen abweichen. Vielleicht wirken gemäßigte, derzeit unbekannte Effekte, die Informationen delokalisieren und aus Schwarzen Löchern austreten lassen, ohne dass wir die bisherige Vorstellung von der Raumzeit völlig über den Haufen werfen müssen. Solche Effekte habe ich theoretisch genauer untersucht und zwei viel versprechende Varianten gefunden.

Beim ersten, »starken« Szenario verändert sich die Geometrie der Raumzeit in der Nähe eines Schwarzen Lochs. Sie biegt und kräuselt sich in einer Weise, die von den enthaltenen Informationen abhängt. Aber auf sanfter Art – anders als bei der Feuerwand würde beispielsweise ein Astronaut nicht zerstört werden, wenn er in die Region stürzt, in der sich der Ereignishorizont befinden sollte. Diese Veränderungen der Raumzeit selbst können dann die Informationen übertragen.

Außerdem gibt es womöglich einen subtileren, rein quantenmechanischen Ausweg. Quantenfluktuationen der Raumzeitgeometrie in der Nähe des Schwarzen Lochs spielen dabei die entscheidende Rolle. Sie vermitteln Informationen an Teilchen, die dem Loch entkommen. In diesem »schwachen« Szenario ist der Informationsfluss immer noch stark genug, um die Quantenmechanik zu retten. Das

2019 haben Astrophysiker das Bild eines Rings aus heißer Materie um das Schwarze Loch in der Galaxie M87 erzeugt. Es entstand auf Basis von Messdaten weltweit verteilter Observatorien.

hängt mit der großen möglichen Menge an Informationen im Schwarzen Loch zusammen. Bei beiden Modellen hätte ein Schwarzes Loch einen »Quantenhalo« um sich herum – eine kleine Wolke, aus der Informationen an die Umgebung zurückfließen.

Die Szenarien scheinen zwar ebenfalls eine überlichtschnelle Übertragung von Informationen zu erfordern, erzeugen aber trotzdem nicht zwangsläufig ein Paradoxon wie beim Beispiel mit der Großmutter. Die Informationsübertragung ist nämlich an die Existenz des Schwarzen Lochs gebunden. Dessen Geometrie unterscheidet sich von der leeren, flachen Raumzeit. Und nur in dieser gilt ohne Weiteres das zuvor genannte Argument der Kommunikation mit der Vergangenheit.

Gespannter Blick auf empfindliche Instrumente

Bisher lassen sich die Quantenhalo-Szenarien aus keiner physikalischen Theorie herleiten, welche die Quantenmechanik mit der Gravitation in Einklang brächte. Sie sind lediglich denkbare Lösungsansätze für die Probleme, vor denen wir stehen, und vereinbar mit dem, was wir sehen. Falls sie zutreffen, beschreiben sie die Realität nur ungefähr. Für ein besseres Bild bedürfen unsere Vorstellungen von Raum und Zeit einer grundlegenden Neuordnung. Gegenwärtige Arbeiten zum Verständnis der Schwarzen Löcher ähneln insofern den ersten Versuchen durch Bohr und andere, die Physik des Atoms zu erklären. Die frühen Atommodelle waren ebenfalls nur grob annähernd und führten erst allmählich zu der heutigen, tiefen theoretischen Struktur der Quantenmechanik. Am Prinzip der Lokalität herum-

zuschrauben, mag zunächst absurd erscheinen, aber die Ideen der Quantenmechanik wirkten zum Zeitpunkt ihrer Entdeckung nicht weniger verrückt.

In so einer Situation hoffen Physiker auf experimentelle Hinweise, die auf dem Weg zu einer neuen Theorie die Richtung vorgeben. Inzwischen hat die Menschheit zwei Möglichkeiten, Schwarze Löcher zu beobachten: einerseits die Bilder der EHT, andererseits Einrichtungen wie LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), die Gravitationswellen von Ereignissen erfassen, bei denen Schwarze Löcher zusammenstoßen und verschmelzen. Die Wellen tragen wertvolle Informationen über die Eigenschaften und das Verhalten der Objekte, die sie erzeugt haben.

Auf den ersten Blick erscheint es überzogen, zu verlangen, mit EHT oder LIGO kleinste Abweichungen von Einsteins Beschreibung der Schwarzen Löcher zu erkennen. Denn eigentlich erwarten Physiker merkbare Unterschiede zur Relativitätstheorie erst dann, wenn die Raumzeit extrem verbogen wird. Das geschieht nahe dem Zentrum eines Schwarzen Lochs; die Krümmungen in der Nähe des Horizonts sind hingegen recht schwach. Aber das beschriebene Informationsparadoxon macht deutlich: Änderungen an den aktuellen Gesetzen der Physik sind nicht allein dafür nötig, um Phänomene tief in einem Schwarzen Loch zu beschreiben. Abweichungen von klassischen Vorhersagen offenbaren sich auch in dessen Außenbereichen. Beim Schwarzen Loch in M87 etwa umfasst der Ereignishorizont die vielfache Größe unseres Sonnensystems.

Bereits mit den heutigen Daten von EHT und LIGO lassen sich einige besonders exotische, aber grundsätzlich

logisch konsistente Konstruktionen für Schwarze Löcher ausschließen. Befänden sich an der Stelle Schwarzer Löcher beispielsweise Überreste mit einem etwas mehr als doppelt so großen Durchmesser, hätten Physiker in den Daten beider Experimente Anzeichen dafür gefunden. Im Fall des EHT stammt die Strahlung, auf deren Basis das heute berühmte Bild (siehe S. 63) entstand, aus einer Region, die nur etwa anderthalbmal so ausgedehnt ist wie der Ereignishorizont. Und bei LIGO entspringt ein Teil des Signals einem Bereich, bei dem sich die kollidierenden Objekte in ähnlich geringem Abstand befinden. Zwar werden die Messungen weiterhin genauer analysiert, aber offenbar zeigen EHT und LIGO sehr dunkle und sehr kompakte Objekte, die genau so aussehen, wie man es für Schwarze Löcher erwarten sollte. Eingehendere Untersuchungen der Signale liefern vielleicht mehr Hinweise auf die Quanteneigenschaften von Schwarzen Löchern. Selbst wenn es keine überraschenden Effekte gibt, könnte das einige Modelle aussortieren.



ISTOCK / OBRKA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Überreste mit stark abweichendem Durchmesser sind also bereits ausgeschlossen. Aber was ist mit Szenarien, die sich nur hinsichtlich der jeweiligen Beschreibung ganz nahe am Horizont des Schwarzen Lochs unterscheiden? Für konkrete Vorhersagen müssten die Theorien von Fuzzballs, Feuerwänden und ähnlichen Überresten detaillierter ausgearbeitet sein. Immerhin gibt es einige erste Hinweise. Wenn allerdings diese Objekte kaum größer wären als der Ereignishorizont eines entsprechenden Schwarzen Lochs, könnten weder EHT- noch LIGO-Beobachtungen Unterschiede zwischen den denkbaren Strukturen aufdecken. Doch möglicherweise haben wir trotzdem Chancen.

2016 haben die Physiker Vitor Cardoso von der Universität Lissabon, Edgardo Franzin von der Universität Barcelona und Paolo Pani von der Universität Rom vorhergesagt: Wenn zwei kollidierende Objekte verschmelzen, könnte der fusionierte Überrest Gravitationswellen an seiner Oberfläche reflektieren – sofern es eine solche gibt. Diese »Echos« ließen sich im Signal aufspüren. Es ist es jedoch offen, warum derlei Strukturen überhaupt stabil sein sollten, anstatt unter ihrem eigenen Gewicht schlicht zu Schwarzen Löchern zusammenzubrechen. Freilich ist das ein allgemeines Problem sämtlicher Szenarien, bei denen ein ausgedehnter Überrest entsteht, aber angesichts der enormen Kräfte bei einer Kollision wäre das hier besonders schwer zu erklären.

Wenn wir es hingegen lediglich mit subtilen Änderungen der Raumzeitgeometrie in einer weiten Umgebung über den

Horizont hinaus zu tun haben, sind die Aussichten auf eine experimentelle Überprüfung besser. In dem von mir vorgeschlagenen starken Szenario beispielsweise lenkt das Kräuseln des Quantenhalos das Licht ab, das in der Nähe des Schwarzen Lochs entlangläuft. Dies könnte sich mit der Zeit in den Bildern des EHT niederschlagen.

Detektivische Spurensuche auf dem Weg zur Neuordnung von Raum und Zeit

Gemeinsam mit dem EHT-Wissenschaftler Dimitrios Psaltis habe ich für den Fall des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße berechnet: Die Veränderungen, die in Verzerrungen im Umfeld des Objekts auszumachen wären, liefen auf einer typischen Zeitskala von einer Stunde ab. Da das EHT mehrstündige Beobachtungen zu einem Durchschnitt kombiniert, wäre das hier kaum zu sehen. Aber die entsprechende Zeit läge beim mehr als 1000-mal größeren Schwarzen Loch in der Galaxie M87 eher im Bereich dutzender Tage. Womöglich können wir also etwas erkennen, sofern wir die EHT-Beobachtungszeit über die ursprüngliche Projektdauer von einer Woche hinaus ausdehnen. Falls das keinen Hinweis bringt, wäre weiterhin das subtilere schwache Quantenszenario möglich.

Letzteres ist auf Grund der winzigen Änderungen der Raumzeitgeometrie schwieriger zu testen. Laut vorläufigen Untersuchungen könnte die Absorption oder Reflexion von Gravitationswellen dabei anders ablaufen. Möglicherweise führt das zu beobachtbaren Effekten in Gravitationswellensignalen. Oder aber es kommt noch exotischere Physik zum Tragen.

Alle bisherigen Ansätze auf Basis der Quantenmechanik legen jedenfalls nahe, dass die Raumzeit selbst nicht fundamental ist, sondern aus einer grundlegenden mathematischen Struktur hervorgeht. Doch Chancen auf Messungen haben wir nur, wenn wir sowohl die Observatorien des EHT als auch diejenigen für Gravitationswellen erweitern und verbessern. Für das EHT sind bereits deutlich länger andauernde Beobachtungen geplant. Im Fall der Gravitationswellen werden zusätzliche Detektoren etwa in Japan und Indien die bestehenden Einrichtungen in den USA und Europa ergänzen. Dazu müssen weitere theoretische Anstrengungen kommen, um Szenarien für das Umfeld Schwarzer Löcher zu verfeinern und deren Ursprünge und Konsequenzen zu verstehen. Genau wie die Vorgänge in Atomen auf dem Weg zur Theorie der Quantenmechanik geholfen haben, werden Schwarze Löcher wahrscheinlich entscheidende Hinweise liefern, die nächste konzeptionelle Revolution in der Physik anzustoßen. ◀

QUELLEN

Giddings, S. B.: Black holes in the quantum universe. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 377, 2019

Harlow, D.: Jerusalem lectures on black holes and quantum information. *Reviews of Modern Physics* 88, 2016

Hawking, S. W.: Particle creation by black holes. *Communications in Mathematical Physics* 43, 1975

Hawking, S. W., Perry, M. J. et al.: Soft hair on black holes. *Physical Review Letters* 116, 2016

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

EE D JAN / GETTY IMAGES / ISTOCK

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

- 9. 3. 2020** Leserekursion zum Haus der Astronomie, Heidelberg
8. 5. 2020 Leserekursion zum Radioteleskop Effelsberg

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

- 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
17. 4. 2020 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Östringen
24. 4. 2020 **Spektrum** Schreibwerkstatt, Heidelberg
19. 6. 2020 **Spektrum** Schreibwerkstatt, Heidelberg

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im Februar: **Spektrum** Kompakt »Ganz Ohr«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen
reduzierte Digitalpakete »Immunsystem«, »Natur extrem« sowie **Spektrum** SPEZIAL Archäologie Geschichte Kultur Jahrgang 2018«

Leserreisen

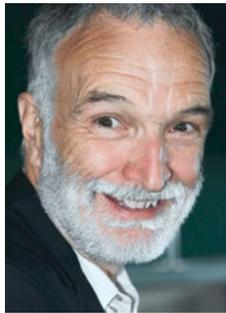
Islands faszinierende Geologie im August 2020 mit Mol Reisen
Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours.de
travel-to-nature: Reisen nach **Namibia**, **Peru** oder **Costa Rica** zum **Vorteilspreis**
Einkaufsgutschein für den **Spektrum** Shop bei Buchung der **Chile-**, der **Polarlicht-** oder der **Mexikoreise** von Wittmann Travel e. K.
Vorteilspreis der Astronomie-Leserreise nach **Nordfinland** mit GLUR, bei der Beobachtung und Fotografie der Polarlichter sowie Vorträge über Astronomie im Vordergrund stehen

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

SCHLICHTING! BLAU WIE DAS MEER

Im Alltag erscheint uns Wasser völlig transparent. Tatsächlich hat es eine blaue Eigenfarbe – doch die bemerkt man erst beim Blick durch dicke Schichten. Zusätzlich verändern Reflexionen und Schwebeteilchen den optischen Eindruck.



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/1701306](https://www.spektrum.de/artikel/1701306)

**Mit tausend Augen blickte der Fluß ihn an,
mit grünen, mit weißen,
mit kristallinen, mit himmelblauen**

Hermann Hesse (1877–1962)

► Ob man ein Glas mit Wasser aus der Leitung füllt oder ob man am Strand aus dem Ozean schöpft – meist sieht die Flüssigkeit einfach transparent aus. Wie kommen also Meere, Seen und andere große Gewässer zu ihrer charakteristischen blauen Farbe? Da sie bei einem Sonnenuntergang außerdem gelb und rot schimmern, könnte man leicht denken, sie reflektierten lediglich das Himmelslicht und würden so »eingefärbt«.

Für diese These scheint zu sprechen: Selbst eine flache Pfütze nimmt, aus einiger Entfernung betrachtet, die Farbe des jeweils gespiegelten Gegenstands an, seien es der blaue Himmel, die weißen Wolken oder die grünen Bäume. Die Reflexion verliert erst an Wirkung, wenn man sich nähert und von oben hineinblickt. Dann ist das Wasser wieder klar, und man sieht auf den Boden.

Allerdings wird diese Auffassung beispielsweise bei einem Besuch am Meer fraglich. Dort erlebt man selbst



ULLU GAU, MY FRODO, GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

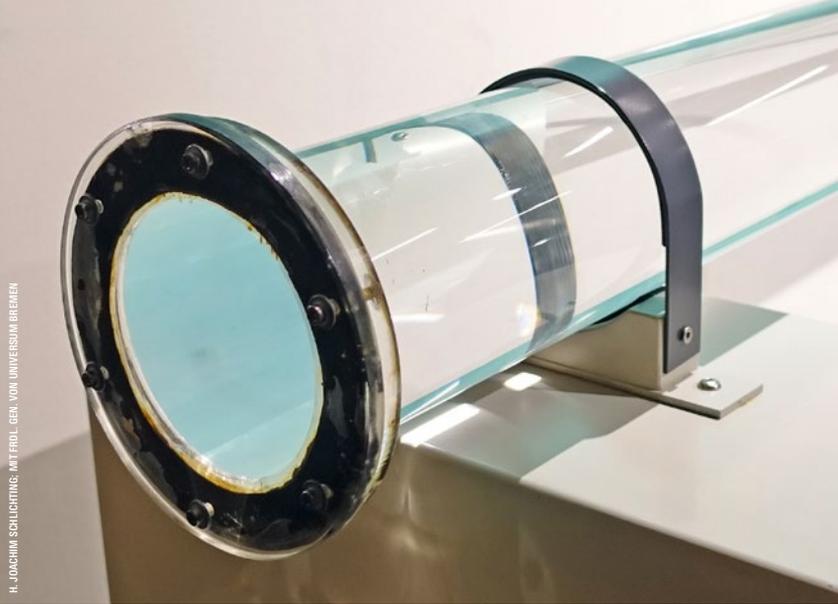
unter dem Grau eines bedeckten Himmels Blau-, Türkis- und Grüntöne. Letztere dominieren meist im flachen, strandnahen Bereich – offenbar durch Mischung mit dem Gelb des Sandbodens. Wo es tiefer wird, schwindet der Einfluss des Untergrunds, und das Blau wird satter und dunkler.

Anscheinend bestimmen mehrere Effekte gemeinsam die wahrgenommene Farbe. Schiffsreisende sehen etwas anderes als Flugzeugpassagiere aus zehn Kilometer Höhe, Küstenbereiche unterscheiden sich von der Tiefsee, und der Eindruck kann je nach Jahreszeit und manchmal sogar von Tag zu Tag wechseln.

Um die verschiedenen Einflüsse voneinander zu trennen, ist es sinnvoll, zunächst von reinem Wasser auszugehen. Es soll von weißem Sonnenlicht bestrahlt werden und tief genug sein, damit der Grund mit seiner Eigenfarbe keine Rolle spielt, weil das Licht ihn nicht erreicht.



H. JOACHIM SPÜHLING



H. JOACHIM SPÜHLING; MITFOTOLEN VON UNIVERSUM BREMEN

Je nachdem, ob man senkrecht ins Wasser schaut oder flach darüber hinweg, kommt eher seine Eigenfarbe oder die Reflexion des Himmels zur Geltung. Bei einer steilen Welle kann man beides gleichzeitig sehen (links, oben). Aufgewirbelte Teilchen verschieben das Blau des Wassers leicht in den grünen Spektralbereich. Im Licht der untergehenden Sonne erscheint der Fluss wie der Himmel in Rottönen (links, unten). Bei Stufen in einem Pool wird mit zunehmender Tiefe der Blauschimmer intensiver (er mischt sich mit dem Gelbanteil des Untergrunds zu Grün, oben). Wenn man durch ein mehrere Meter langes, mit reinem Wasser gefülltes Rohr sieht, erscheint die Flüssigkeit infolge der Absorption roter Lichtanteile deutlich blau (Aufnahme im Science Center »Universum Bremen«; oben, rechts).

Die Wassermoleküle absorbieren vor allem rote Anteile des Spektrums. Der Effekt ist so gering, dass man davon im alltäglichen Umgang nichts merkt. Bei Trinkgläsern und Badewannen haben wir es lediglich mit einigen zehn Zentimeter dicken Wasserkörpern zu tun; man müsste schon durch mehrere Meter hindurchblicken, um von dem übrig gebliebenen Blau etwas zu sehen. Für die Natur ist das geringe Absorptionsvermögen enorm wichtig – andernfalls wäre das Leben von Tieren und Pflanzen, die auf Licht angewiesen sind, nur in einer kleinen Zone unter der Oberfläche möglich.

Wenn man reines Wasser in ein transparentes Rohr von einigen Metern Länge füllt, erscheint es beim Blick in Längsrichtung deutlich blau, während es von der Seite betrachtet weiterhin farblos ist (siehe Foto oben, rechts). In hell gefliesten Schwimmbecken erkennt man manchmal an den Treppenstufen, wie die Blauanteile schrittweise zunehmen (siehe Foto oben, links).

Die Absorption durch Wassermoleküle erklärt die Färbung beim Blick aus dem Wasser heraus in Richtung Lichtquelle, allerdings reicht sie allein nicht aus, um den Eindruck beim Herabschauen in die Tiefe zu verstehen.

Denn die nicht absorbierten, kurzwelligen Komponenten müssen ja irgendwie von dort zurückkommen und in unsere Augen gelangen. Dafür sorgt diffuse Reflexion (Streuung) des verbleibenden Anteils des weißen Lichts. Erst sie lässt tiefes Wasser blau erscheinen.

Wasser ist in der Realität niemals ganz rein. Es enthält Schwebeteilchen, die das Licht streuen – und zwar wesentlich ausgeprägter als die Wassermoleküle selbst. So kommt das typische Blau des Meeres zur Geltung. Reines, tiefes Wasser hätte eine sehr dunkle, vermutlich fast als schwarz wahrgenommene Färbung. Nur durch die intensive Streuung an herumschwimmenden Partikeln fällt das hindurchlaufende Licht effektiv zurück in Richtung Oberfläche.

In küstennahen Regionen ist die Konzentration etwa von trübendem Sand, Kalk, Ton oder Plankton besonders groß. Das macht das Meeresblau dort nicht nur wesentlich heller, sondern verschiebt es zudem in den grünen Spektralbereich. Dazu trägt die gelbliche oder bräunliche Eigenfarbe der Teilchen wesentlich bei. Oft sind die Wege zwischen den Streueignissen so gering, dass das Licht wieder aus dem Wasser herausläuft, bevor die Absorption ihre Wirkung entfaltet. So ist an den schlickreichen Wattstränden der Nordsee vom intrinsischen Meeresblau kaum noch etwas zu erkennen.

Der Einfluss der Tiefe auf die Farbe lässt sich schön verfolgen, wenn man mit einem Boot oder Flugzeug vom blauen Meer der Küste näher kommt. Man kann die Änderungen aber auch schon beim Schwimmen mit Hilfe einer Taucherbrille sehen.

Nicht nur feste Objekte streuen Licht; winzige Gasbläschen wirken sich ebenfalls auf die Farbe aus. Besonders eindrucksvoll zeigt sich das an der weißen Gischt brechender Wellen.

Die gleiche Absorption längerer Wellenlängen gibt es bei Wasser in seiner festen Form. An sich ist es ebenfalls blau, was sich bei Löchern in dicken Schneeschichten sowie an Eisbergen oder Gletschern erkennen lässt. Aber nur, wenn nicht eingeschlossene Luft das Licht vorzeitig wieder herausstreut – und das Eis dadurch glänzend weiß strahlt.

PHOTONIK SCHALTEN MIT LICHT

Beim Verkleinern elektronischer Bauteile stoßen Forscher mittlerweile an unüberwindbare Grenzen. Einen Ausweg könnten Systeme bieten, die Signale durch Licht übertragen. Der junge Bereich der topologischen Photonik soll schon bald derartige Schaltungen ermöglichen.



Olivier Bleu (links) war Doktorand, **Dmitry Solnyshkov** (Mitte) ist Professor und **Guillaume Malpuech** Forschungsdirektor des CNRS am Institut Pascal in Clermont-Ferrand.

» [spektrum.de/artikel/1701298](https://www.spektrum.de/artikel/1701298)

Mordechai Segev und seine Kollegen leiteten 2018 Licht (rot) durch den Rand eines Gitters aus optischen, ringförmigen Resonatoren.

▶ In den 1970er Jahren begann das Informationszeitalter: Seither verarbeiten und verbreiten Menschen immer größere Datenmengen, sei es in Form von Texten, Bildern oder Videos. Während die Telekommunikationsnetzwerke 1986 weltweit jährlich etwa 0,3 Exabits (10^{18} Bits) an Daten austauschten, waren es 2014 schon mehrere 100 Exabits – und die Werte wachsen weiterhin mit rasanter Geschwindigkeit an.

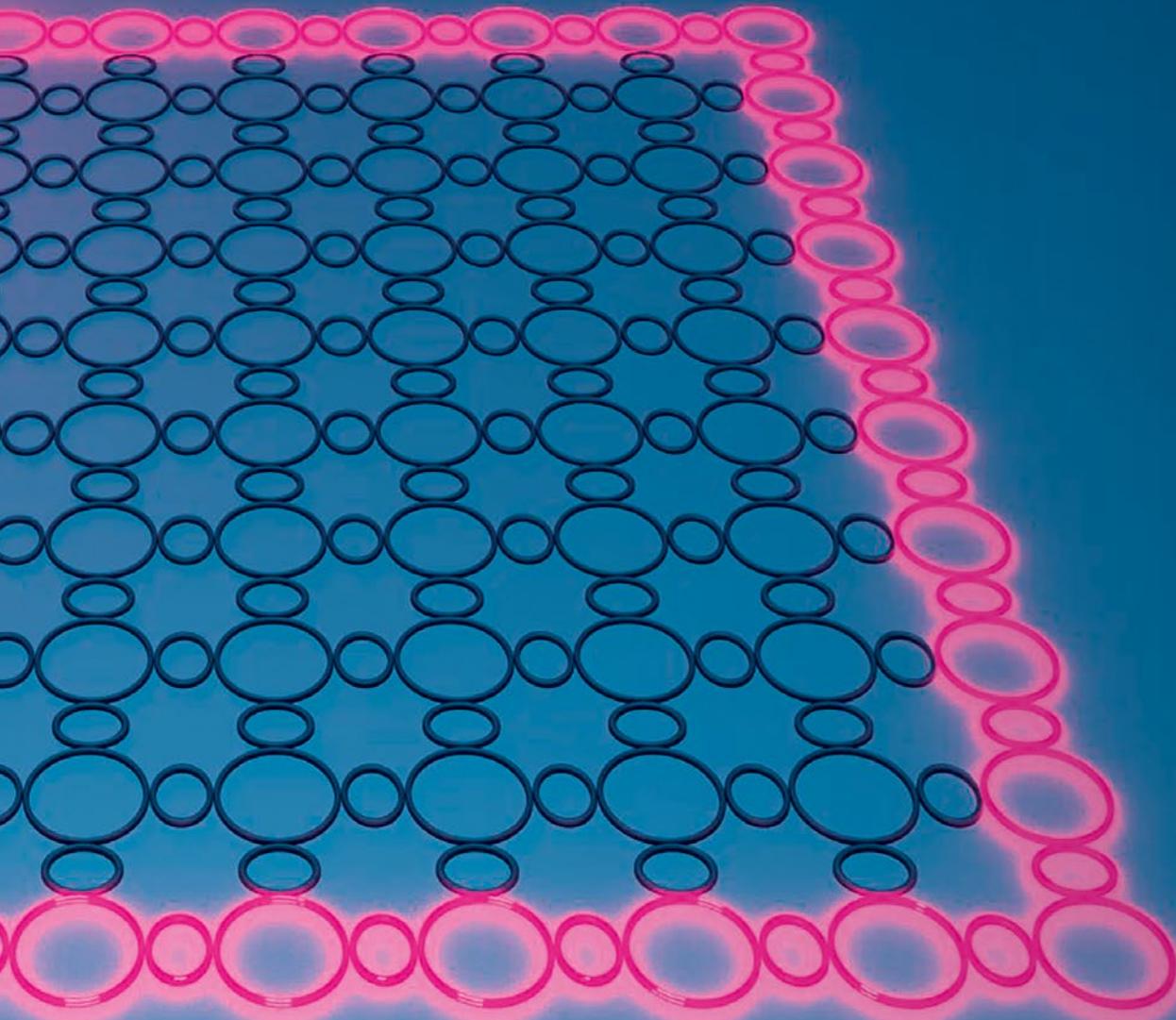
Inzwischen stoßen Informationssysteme jedoch an ihre Grenzen. Deshalb suchen Forscher fieberhaft nach neuen Technologien, mit denen sich der wachsende Bedarf zufrieden stellen ließe. In Zukunft könnten optische Systeme das Problem lösen, allerdings sind diese bisher nicht leistungsfähig genug. Deshalb setzen einige Physiker ihre Hoffnungen in die topologische Photonik, in der abstrakte mathematische Konzepte dabei helfen, viel versprechende Technologien zu entwickeln (siehe »Spektrum« Februar 2019, S. 50).

So ausgeklügelt heutige Informationssysteme erscheinen, basieren sie doch größtenteils auf zwei sehr unterschiedlichen Erfindungen des 19. Jahrhunderts: dem Radio,

das der Italiener Guglielmo Marconi 1895 konstruierte, und dem 1840 vom US-Amerikaner Samuel Morse entwickelten Telegrafen.

Das Radio ermöglichte es erstmals, Informationen durch elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit zu verbreiten. Dank zahlreicher technischer Fortschritte ließen sich Antennen immer weiter verkleinern; inzwischen findet man sie in etlichen technischen Geräten wie Mobiltelefonen. Allerdings büßen die winzigen Antennen bei hohen Übertragungsraten ihre Reichweite ein: Möchte man etwa 100 Megabit pro Sekunde verbreiten, ist nach wenigen hundert Metern Schluss.

Um große Datenmengen schnell auszutauschen, nutzen Forscher daher einen anderen Ansatz, der auf dem Telegrafen basiert. Anders als das Radio verwendet dieser nicht elektromagnetische Wellen, sondern elektrische Signale in leitfähigen Kabeln. In den 1960er und 1970er Jahren entdeckten Wissenschaftler, dass sie auch Photonen über so genannte Lichtleiter, zu denen Glasfaserkabel zählen, übertragen können. Strahlt man Licht mit einer Wellenlänge von etwa 1,5 Mikrometern in einen solchen Leiter, lassen sich



Signale über mehrere tausend Kilometer transportieren – und das bei einer Rate von bis zu 100 Gigabit pro Sekunde!

Heute übertragen wir aber nicht nur große Mengen an Informationen, sondern verarbeiten sie durch Computer. Diese enthalten Prozessoren, die wiederum aus Transistoren bestehen. Solche Bauteile ändern ihre Leitfähigkeit, wenn man eine elektrische Spannung an sie anlegt, wodurch sie logische Operationen durchführen können.

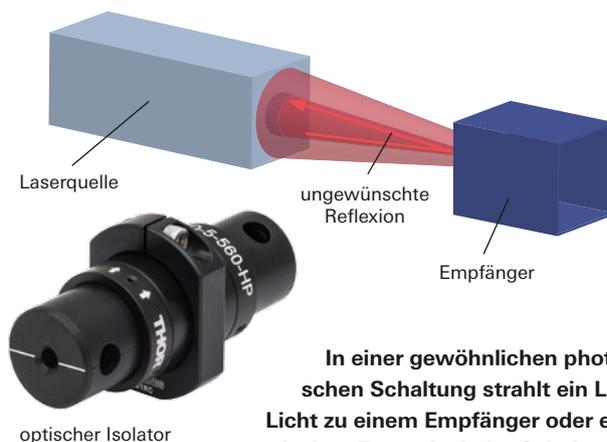
Die Rechenleistung eines Computers hängt von der Anzahl der Transistoren und der Taktfrequenz des Prozessors ab, also von der Geschwindigkeit, mit der er Daten manipuliert. Die ersten Rechner, die noch vor dem Zweiten Weltkrieg entstanden, verwendeten mechanische Schalter. Danach tauchten elektrische Komponenten auf, die allerdings so groß waren, dass man bloß einige Zehntausend davon zusammenschließen konnte. In den 1950er Jahren revolutionierten Halbleiter die Computerindustrie. Dank dieser Materialien ließen sich Transistoren stark verkleinern, ihre Länge beträgt teilweise nur noch zehn Nanometer. In einen Prozessor passen inzwischen Milliarden einzelne Transistoren. Insgesamt erreichen aktuelle Rechner dadurch Taktfrequenzen von einigen Gigahertz, was bedeutet, dass sie Milliarden Bits pro Sekunde bearbeiten können.

Allerdings haben Wissenschaftler nun eine Grenze erreicht: Die bekannten Technologien können kaum noch zu wesentlichen weiteren Fortschritten führen. Der Bedarf der modernen Welt, möglichst viel Information schnell zu verarbeiten, steigt aber weiterhin exponentiell an. Daher setzen Forscher auf neue Ansätze.

Beispielsweise könnte man wie in der Signalübertragung Informationen zumindest teilweise durch Licht verarbeiten, was zu deutlich höheren Taktfrequenzen bis in den Terahertz-Bereich (1000 Gigahertz) führt. Solche photonischen Bauteile sind derzeit aber größer und energieintensiver als halbleiterbasierte Versionen. Bevor ein photonischer Supercomputer entsteht, müssen Forscher noch viele Hürden überwinden. Doch es gibt Hoffnung: Die Topologie könnte einige dieser Probleme aus dem Weg räumen.

AUF EINEN BLICK UNUMKEHRBARE PHOTONEN

- 1 Um Bauteile wie Transistoren zu verkleinern, könnten Forscher photonische Systeme verwenden, die Informationen mit Licht statt Elektronen transportieren.
- 2 Derartige Systeme lassen sich bisher jedoch kaum nutzen, weil die Lichtstrahlen innerhalb der Bauteile reflektiert werden, was die Signalübertragung stört.
- 3 Einen Ausweg bietet die Topologie. Durch abstrakte mathematische Konzepte können Physiker nun photonische Systeme entwerfen, in denen keine ungewünschte Reflexion stattfindet.



In einer gewöhnlichen photonischen Schaltung strahlt ein Laser Licht zu einem Empfänger oder einer optischen Faser. An jeder Schnittstelle wird jedoch ein Teil des Lichts reflektiert, das zum Laser zurückkehrt, wo es dessen Betrieb stört. Am Ausgang des Lasers kann man daher einen optischen Isolator einsetzen, der Streulicht blockiert. Aber seine Größe von einigen Zentimetern verhindert die Entwicklung photonischer Mikroschaltungen.

Der größte Nachteil photonischer Systeme ist, dass sich Licht in ihnen nicht ungestört ausbreitet. Strahlt man Photonen aus einer Laserquelle in einen Lichtleiter, können sie an verschiedenen Hindernissen streuen, etwa an Fehlstellen innerhalb des Leiters. Einige Lichtquanten werden dadurch in den Laser zurückreflektiert und stören seinen Betrieb (siehe Abbildung oben). Hätte man es mit Elektronen zu tun, könnte man sie einfach durch ein äußeres elektrisches Feld steuern, doch für die elektrisch neutralen Photonen gibt es keine so simple Lösung.

Teilchen im Gleichtakt

In den letzten Jahren haben Forscher ein Bauteil entwickelt, das Abhilfe schaffen könnte. Ein zwischen Laser und Lichtleiter platzierter »optischer Isolator« verhindert, dass Photonen zurückgestreut werden. Allerdings lassen sich diese neuartigen Geräte bisher nicht kompakt genug produzieren. Daher suchten Wissenschaftler nach anderen Lösungen.

Dabei stießen sie auf ungewöhnliche physikalische Systeme, die Forschern jahrzehntelang Kopfschmerzen bereitet hatten und erst in den letzten Jahren neu beleuchtet wurden. Ein Beispiel dafür sind Suprafluide, die der sowjetischen Physiker Piotr Kapitsa 1937 entdeckt hat. Solche Fluide verlieren bei extrem niedrigen Temperaturen jegliche Viskosität, weil dann quantenmechanische Wechselwirkungen die kinetische Energie der Teilchen übersteigen. Die Partikel beeinflussen sich dabei so stark, dass sie sich alle gleich verhalten: Sie stoßen nicht mehr gegeneinander, was auf großem Maßstab zur Folge hat, dass die Viskosität des Fluids verschwindet. Die Moleküle fließen alle ungestört in eine Richtung, ohne an Hindernissen zu streuen.

Da man sich genau diese Eigenschaft in photonischen Bauteilen wünscht, haben Forscher daraufhin versucht, eine suprafluide Version von Licht zu erzeugen. Auch wenn ein solcher Zustand rein theoretisch möglich ist, müssen Photonen dafür extrem stark miteinander wechselwirken. Doch die Gesetze der Quantenelektrodynamik besagen,

dass Lichtteilchen nicht direkt aneinanderkoppeln können. Daher bedienen sich Physiker eines Tricks: Statt reinen Photonen verwenden sie Quasiteilchen, die sich aus Lichtquanten und Elektronen zusammensetzen.

Materialwissenschaftler nutzen das Konzept von Quasiteilchen, um Phänomene in Festkörpern zu beschreiben, die aus Abermilliarden miteinander wechselwirkender Partikel bestehen. Wie eine La-Ola-Welle, die tausende einzelne Personen in einem Stadion bilden, lassen sich bestimmte Vorgänge in Festkörpern einfacher durch Quasiteilchen erklären, die teilweise mehrere Partikel und ihre Wechselwirkungen beinhalten.

Zu den bekanntesten Quasiteilchen gehören fehlende Elektronen (»Löcher«) oder Phononen, die den Grundschwingungen eines Kristalls entsprechen. Ein Elektron (negative Ladung), das mit einem Loch (positive Ladung) verbunden ist, bildet ein so genanntes Exziton. Dieses kann sich wiederum mit einem Photon zusammenschließen, wodurch ein »Exziton-Polariton« entsteht. Obwohl solche Quasiteilchen elektrisch neutral sind, können sie über ihren elektronischen Teil miteinander wechselwirken.

Dem Team um den Physiker Alberto Bramati gelang es 2010 im Laboratoire Kastler Brossel in Paris erstmals, ein Suprafluid aus Exziton-Polaritonen bei extrem tiefen Temperaturen zu erzeugen. Sieben Jahre später konnte Daniele Sanvitto vom CNR Nanotec-Labor in Lecce mit seinen Kollegen diesen Zustand bei Raumtemperatur beobachten,

was für technische Anwendungen unentbehrlich ist. Allerdings braucht man extrem viel Energie, um die benötigte Teilchendichte zu erreichen, was den praktischen Einsatz suprafluider Exziton-Polaritonen in weite Ferne rückt.

Doch die Forschung auf dem Gebiet war nicht vergebens. Sie brachte viele Physiker dazu, sich mit den Konzepten der Topologie vertraut zu machen. Bei dieser mathematischen Disziplin geht es um die globalen Eigenschaften eines Objekts. Topologen betrachten zwei Körper als gleich, wenn man sie ineinander verformen kann, ohne sie auseinanderzureißen. So sind für sie ein Donut und eine Tasse gleich, wobei das Loch des einen dem Henkel des anderen entspricht.

Durch solche Verformungen verändern sich zwar lokale Merkmale wie Abstände und Winkel auf einem Objekt, aber die globalen Eigenschaften bleiben erhalten. Daher weisen Mathematiker Objekten bestimmte Zahlen zu, so genannte topologische Invarianten, welche die erlaubten Umwandlungen überstehen: etwa die Anzahl der Löcher in einer geometrischen Oberfläche.

Wie sich Mitte der 1980er Jahre herausstellte, kann die Topologie verschiedene Phänomene aus der Festkörperphysik erklären. Ein Beispiel dafür sind die vom norwegischen theoretischen Physiker Lars Onsager (1903–1976) vorhergesagten Wirbel, so genannte Vortizes, die in Suprafluiden auftreten. Das Besondere an ihnen ist, dass ihre Drehgeschwindigkeit nur bestimmte feste Werte annimmt. Diese

Quanten-Hall-Effekt

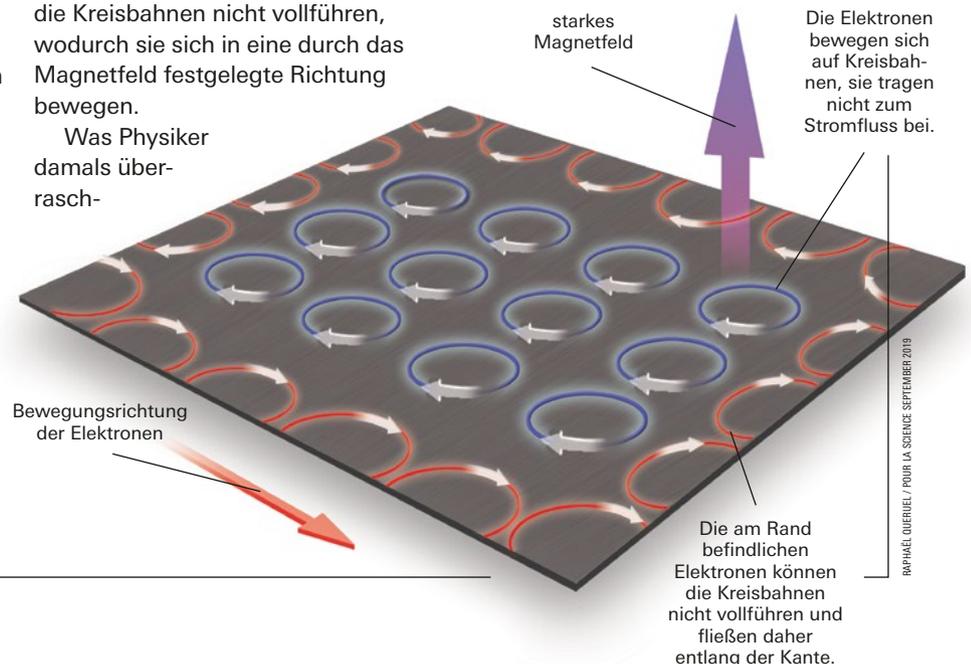
1879 entdeckte der US-amerikanische Physiker Edwin Hall die klassische Version des nach ihm benannten Effekts. Er platzierte einen stromdurchflossenen Leiter in ein Magnetfeld, das die Elektronen im Material ablenkte. Daraus entstand ein senkrechter Strom, dessen zugehöriger »Hall-Widerstand« proportional zum Magnetfeld ist.

1980 nahm Klaus von Klitzing am Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses in Grenoble dieses Experiment unter besonderen Bedingungen wieder auf. Er kühlte ein extrem dünnes Material auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt ab und setzte es einem starken Magnetfeld aus. Dem deutschen Forscher fiel auf, dass der Hall-Widerstand in diesem Fall nur noch quantisierte Werte annahm: Er stieg ruckartig mit zunehmender Magnetfeldstärke an.

Für dieses Phänomen gibt es eine anschauliche Erklärung. Wenn das Magnetfeld stark genug ist, bewegen sich die Elektronen entlang kreisförmiger Bahnen und tragen nicht zum Stromtransport bei. Ihre elektronischen Zustände heißen Landau-Niveaus und haben eine quantisierte Energie. Doch am Rand können die Elektronen die Kreisbahnen nicht vollführen, wodurch sie sich in eine durch das Magnetfeld festgelegte Richtung bewegen.

Was Physiker damals überrascht

te, ist, dass die Leitfähigkeit am Rand proportional zu einer topologischen Invariante ist, die nicht von der Wahl des zweidimensionalen Materials abhängt. Der Strom am Rand des Materials ist topologisch geschützt, lokale Störungen wie Verunreinigungen können ihm nichts anhaben.



hängen mit einer topologischen Größe zusammen, der Windungszahl, die bestimmt, wie häufig eine Kurve ein Objekt umkreist.

Eine weitere Verbindung zu der abstrakten mathematischen Disziplin offenbart sich, wenn man die quantenmechanische Wellenfunktion eines Suprafluids betrachtet, die ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit seiner Teilchen darstellt. Im Zentrum eines Wirbels hat die Wellenfunktion immer den Wert null – was einem Loch gleichkommt. Sobald also ein Vortex entsteht, lässt sich die Wellenfunktion nicht mehr so verformen, dass sich das Loch auflöst und der Wirbel verschwindet. Die Topologie erklärt daher die außerordentliche Stabilität der Vortizes, die Forschern lange Zeit viele Fragen aufgab.

Darüber hinaus haben Physiker in den letzten Jahrzehnten dank dieses Fachgebiets völlig neue Materialklassen entdeckt, die topologischen Isolatoren. Solche ungewöhnlichen Stoffe haben ein isolierendes Inneres, während sie an der Oberfläche extrem gut Strom leiten. Zudem breiten sich die beweglichen Elektronen nur in eine Richtung aus, ohne an Hindernissen zu streuen, was die neuen Stoffe für technische Anwendungen interessant macht – unter anderem auch im Bereich der Photonik.

Die ersten topologischen Isolatoren entdeckte der deutsche Physiker Klaus von Klitzing in Form des Quanten-Hall-

Effekts während eines Forschungsaufenthalts 1980 am Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses in Grenoble. Damals untersuchte er extrem dünne zweikomponentige Halbleitermaterialien, deren Elektronen in einer zweidimensionalen Ebene eingesperrt sind. Setzt man sie starken magnetischen Feldern aus, folgen die Elektronen wegen der Lorentzkraft kreisförmigen Bahnen und tragen daher nicht mehr zum Stromtransport bei: Das Material ist isolierend. Die am Rand befindlichen Teilchen können die Kreisbahnen allerdings nicht vollenden, so dass sie sich entlang der Kanten in eine feste Richtung bewegen (siehe »Quanten-Hall-Effekt«, S. 71).

Zunächst nahmen Physiker an, dass dieser seltsame Zustand eines leitenden Rands mit isolierendem Inneren ein bizarrer Spezialfall ist, der mit den niedrigen Temperaturen, starken Magnetfeldern und Kreisbahnen der Elektronen zusammenhängt. Doch wie der britische Festkörperphysiker Duncan Haldane 1988 zeigte, ist das Phänomen viel allgemeiner.

Um seine Argumentation nachzuvollziehen, muss man verstehen, woraus sich die Leitfähigkeit eines Materials ergibt. In einem einzelnen Atom können Elektronen nur bestimmte Energiewerte annehmen, die durch Atomorbitale definiert sind. In kristallinen Festkörpern beeinflussen sich die vielen Teilchen gegenseitig, wodurch sich die

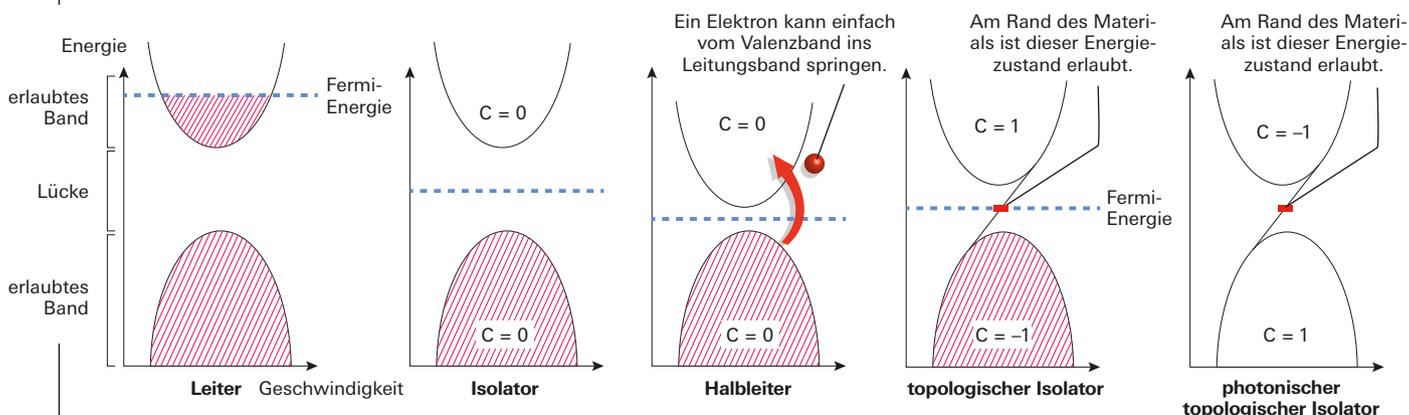
Bändermodell und Topologie

In einem Atom belegen Elektronen diskrete Energieniveaus. Im Gegensatz dazu erstrecken sich die möglichen Energiewerte in Festkörpern über kontinuierliche Intervalle, so genannte Bänder, unterbrochen von verbotenen Bereichen, die man als Lücken bezeichnet.

Die Elektronen eines Materials bevölkern die Bänder, indem sie bestimmten Regeln folgen. Da sie zur Klasse der Fermionen gehören, können keine zwei Elektronen den gleichen Quantenzustand besetzen. Sie füllen die Bänder daher mit den niedrigsten Energien beginnend auf. Das höchste Energieniveau, das ein Elektron am absoluten Nullpunkt (etwa minus 273 Grad Celsius) einnehmen würde, heißt Fermi-Energie.

Liegt die Fermi-Energie innerhalb eines Bands, ist das Material leitend und die Elektronen können sich in alle Richtungen frei ausbreiten. Wenn sie sich dagegen in einer großen Bandlücke befindet, ist der Stoff ein Isolator. Bei kleinen Bandlücken hat man es mit einem Halbleiter zu tun: Es genügt ein kleiner »Stups«, damit ein Elektron zum darüber befindlichen Band, dem »Leitungsband«, durchdringt und zum Stromtransport beiträgt.

In den 1980er Jahren entdeckten Physiker, dass das Bändermodell nicht ausreicht, um die elektronischen Eigenschaften eines Materials zu beschreiben. Man braucht einen weiteren Parameter für jedes Band: eine topologische Invariante namens Chern-Zahl (C). Ist diese von null verschieden, gehört der Stoff einer neuartigen Materialklasse an, einem topologischen Isolator.



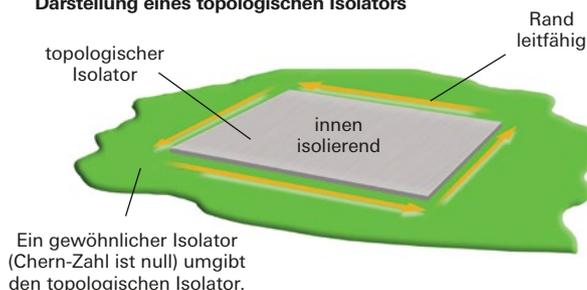
erlaubten Energiewerte der Elektronen über kontinuierliche Bänder erstrecken. Diese sind durch Bereiche mit verbotenen Werten getrennt, so genannten Bandlücken. Je nachdem, wie die Bänder angeordnet sind und wie sie mit Elektronen gefüllt sind, ist ein Material entweder leitend, isolierend oder halbleitend (siehe »Bändermodell und Topologie«, unten).

In den 1980er Jahren stellten Physiker überrascht fest, dass sich die besondere Leitfähigkeit von topologischen Isolatoren nicht allein durch das Bändermodell beschreiben lässt. Bei ihnen spielt außerdem die Struktur der Elektronenwellenfunktion eine wichtige Rolle, die man mit topologischen Methoden untersuchen kann.

Verwirbelte quantenmechanische Wellenfunktionen

Denn wie Suprafluide besitzen auch topologische Isolatoren eine Art Vortex. Dabei handelt es sich aber nicht um Wirbel aus Materie, sondern sie sind mit der Wellenfunktion eines Teilchens im »Impulsraum« verbunden. Anders als der gewöhnliche »Ortsraum«, bei dem jeder Punkt einer Position entspricht, eignet sich der Impulsraum besser, um Wellen zu beschreiben. Die Wellenfunktion hängt dann nicht von den Raum- und Zeitkoordinaten ab, sondern von der Energie und dem Impuls der Teilchen. In diesem Raum

Darstellung eines topologischen Isolators



Bei solchen Festkörpern liegt die Fermi-Energie in einer großen Lücke, wodurch es im Innern isolierend ist. Doch am Rand des Materials gibt es anders als bei gewöhnlichen Isolatoren einen zulässigen Energiezustand innerhalb der Bandlücke. Dadurch entsteht ein Stromfluss entlang der Kanten, der bloß in eine Richtung verläuft.

Dieses Prinzip lässt sich auch auf photonische Systeme übertragen. Dabei füllen die Lichtteilchen die Bänder allerdings nicht wie Elektronen auf, da Photonen keine Fermionen sind. Stattdessen können sie ein Energieniveau mehrfach besetzen. Dennoch haben einige Geräte wie photonische Kristalle Bandlücken, deren Energiewerte für Photonen verboten sind. Ebenso lässt sich diesen Systemen eine Chern-Zahl zuweisen, die von null verschieden sein kann, was auch in photonischen Kristallen einen reflexionsfreien Lichttransport ermöglicht.

Dank der Topologie fanden Physiker eine völlig neue Materialklasse

kann die Wellenfunktion Wirbel aufweisen, die sich durch eine topologische Invariante charakterisieren lassen: die nach dem chinesisch-US-amerikanischen Mathematiker Shiing-Shen Chern benannte Chern-Zahl, die einer Windungszahl ähnelt.

Wie die meisten anderen topologischen Invarianten lässt sich die Chern-Zahl durch ein Integral berechnen. Möchte man beispielsweise wissen, wie viele Löcher eine Oberfläche hat, muss man ihre Krümmung an jedem Ort kennen. Indem man die Krümmung über die gesamte Oberfläche integriert, erhält man eine Zahl, die mit der Anzahl der Löcher zusammenhängt.

Bei topologischen Isolatoren gehen Physiker ähnlich vor. Sie bestimmen zuerst eine so genannte Berry-Krümmung, die der theoretische Physiker Michael Berry 1984 einführte, um bestimmte Quantenphänomene zu beschreiben. Dann integriert man die Berry-Krümmung über alle Elektronen in einem vollständig gefüllten Band und erhält die Chern-Zahl, die angibt, ob es einen Wirbel im Impulsraum gibt.

In gewöhnlichen Materialien ist die Summe der Chern-Zahlen gefüllter Bänder immer null. Ist das jedoch nicht der Fall, ist die darauf folgende Bandlücke topologisch: Innerhalb der Lücke mit den verbotenen Energieniveaus gibt es Werte, die bestimmte Elektronen annehmen können. Wie sich herausstellt, können bloß Elektronen an der Grenzfläche des Materials diese Energien haben. Diese Teilchen sind dann frei beweglich; am Rand ist der Stoff also ein Leiter. Dabei handelt es sich um ein globales Phänomen, denn die Topologie der Bänder (definiert durch die Elektronen im Innern des Materials) bestimmt die Eigenschaften der Elektronen am Rand. Physiker sprechen hier von einer Volumen-Rand-Korrespondenz.

Diese Tatsache führt zu einer weiteren Besonderheit. Wie auf einer Einbahnstraße fließen die Elektronen am Rand von topologischen Isolatoren nur in eine Richtung, ohne zu streuen. Weil sich die Teilchen überhaupt erst durch globale Faktoren bewegen, die durch das Innere des Materials definiert sind, ist ihre Ausbreitungsrichtung »topologisch geschützt«. Lokale Störungen wie Defekte oder Verunreinigungen im Kristallgitter können dem Stromfluss nichts anhaben.

Dank der Topologie ist es Physikern gelungen, den Quanten-Hall-Effekt mathematisch zu beschreiben. Doch nicht nur das: Die abstrakte Disziplin führte sogar zu neuen Entdeckungen. So bewies Haldane, dass die Bänder eines Materials auch dann gekrümmt sein können, wenn die Elektronen nicht kreisen, was er als anormalen Quanten-Hall-Effekt bezeichnete. Das eröffnete völlig neue Möglichkeiten. Plötzlich stellten Physiker fest, dass der seltsame Materiezustand, bei dem das Innere eines Stoffs isoliert und der Rand außerordentlich gut leitet, kein bizarrer Spezialfall ist, der besondere externe Bedingungen benötigt. Darauf-

Auf dem Rand topologischer Isolatoren fließen Elektronen wie auf einer Einbahnstraße

hin begannen sowohl theoretische als auch experimentelle Physiker nach topologischen Isolatoren zu suchen, die ohne starkes Magnetfeld funktionieren – und wurden schnell fündig.

Denn in manchen Festkörpern gibt es einen Effekt, der dem eines Magnetfelds ähnelt. Der Spin eines Elektrons besitzt zwei mögliche Ausrichtungen, entweder positiv (rechtsdrehend) oder negativ (linksdrehend). Üblicherweise spielt es für die Eigenschaften eines Elektrons keine Rolle, welchen Spin es hat, während es um einen Atomkern herumschwirrt. Wenn es aber schnell genug ist, spürt es wegen der positiven Ladung des Kerns ein starkes Magnetfeld, das seinen Spin in dieselbe Richtung zwingt. Oberhalb einer bestimmten Geschwindigkeit ändern Elektronen mit hoher Geschwindigkeit daher ihre Flugbahn, um das wahrgenommene Kernmagnetfeld ihrem Spin anzupassen. Diese »Spin-Bahn-Kopplung« wirkt wie ein äußeres Magnetfeld und kann topologische Zustände erzeugen. Charles Kane und Eugene Mele von der University of Pennsylvania schlugen 2005 ein Material vor, das dank seiner starken Spin-Bahn-Kopplung ein topologischer Isolator sein könnte.

In solchen Stoffen bewegen sich die Zustände am Rand nicht nur in eine, sondern zwei entgegengesetzte Richtungen, abhängig von ihrer Spinausrichtung. Die Ströme sind wie beim Quanten-Hall-Effekt topologisch geschützt, weshalb das Phänomen Quanten-Spin-Hall-Effekt heißt. Es ist für Physiker besonders interessant, weil es durch die intrinsischen Eigenschaften eines Stoffs entsteht, anstatt aus einem angelegten Magnetfeld hervorzugehen. Kurz nach seiner Vorhersage konnten Experimentalphysiker den Quanten-Spin-Hall-Effekt 2006 erstmals im Labor beobachten.

Allgegenwärtige Topologie

Duncan Haldane bewies im Jahr 2005, dass topologische Prinzipien nicht nur auf elektronische und photonische Systeme anwendbar sind, sondern auf jede Art von Welle. Inzwischen nutzen Physiker topologische Konzepte in den verschiedensten Zusammenhängen, etwa um die Bewegung äquatorialer geophysikalischer Wellen zu beschreiben. 2017 beleuchtete ein Team der École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles in Paris und der École Polytechnique Fédérale in Lausanne topologische Effekte, indem es akustische Wellen studierte, die sich in Coca-Cola-Dosen ausbreiten!

Topologische Isolatoren sind der Beweis dafür, dass es möglich ist, Strom störungsfrei zu transportieren, ohne auf externe Mittel wie elektromagnetische Felder zurückzugreifen. Die Aufregung unter Wissenschaftlern war daher groß, als sie herausfanden, dass sich dieses Phänomen auf Photonen übertragen lässt, denn das könnte mit einem Schlag die Hauptprobleme der Photonik lösen.

Einen ersten Schritt in diese Richtung machten Eli Yablonovitch von Bell Communications Research und Sajeev John von der Princeton University 1988, als sie die ersten photonischen Kristalle entwickelten. In solchen Materialien variiert der Brechungsindex in periodischer Weise, wodurch Energiebänder entstehen. Photonen nehmen dann bloß erlaubte Energiewerte an, so wie Elektronen in einem periodischen Kristall.

Wieder war es Haldane, der 2005 zeigte, dass sich die Konzepte der topologischen Physik auf jede Art von Welle anwenden lassen – und damit auf photonische Systeme. Er erklärte, dass man photonischen Energiebändern ebenfalls eine Krümmung zuweisen kann und es somit auch einen Quanten-Hall-Effekt für Licht gibt.

Der kleine, aber feine Unterschied zwischen Materie und Licht

Allerdings dauerte es drei Jahre, bis seine Arbeit veröffentlicht wurde. Anfangs zweifelten Physiker stark an den Ergebnissen ihres Kollegen. Das kann man ihnen nicht verübeln – schließlich unterscheiden sich Photonen und Elektronen grundlegend. Selbst wenn es in photonischen Kristallen beispielsweise Energiebänder gibt, fehlt jedoch das Konzept der Füllung. Denn anders als Elektronen, die zur Klasse der Fermionen gehören, sind Photonen so genannte Bosonen. Diese zwei Teilchensorten sind völlig verschieden: Fermionen folgen Paulis Ausschlussprinzip, wonach keine zwei identischen Partikel den gleichen Quantenzustand einnehmen können. Aus diesem Grund bilden sich Energieniveaus in Atomen und Festkörpern aus. Photonen unterliegen hingegen nicht dem Pauli-Prinzip, wodurch die Lichtquanten ein Energieniveau mehrfach besetzen können. Wenn man in der Photonik also von einem Isolator spricht, meint man bloß, dass es eine Bandlücke mit verbotenen Energiewerten gibt.

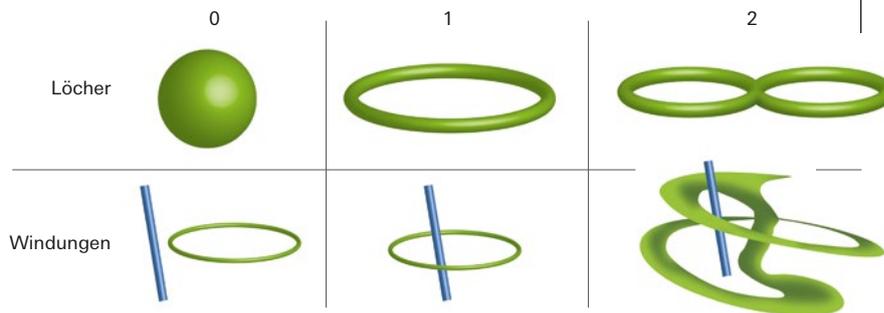
Außerdem sind Elektronen geladen, so dass ein äußeres Magnetfeld sie beeinflusst. Durch ein solches Feld ist der zeitliche Verlauf eines Systems nicht mehr symmetrisch. Würde man die Zeit rückwärts ablaufen lassen, sähen die physikalischen Prozesse anders aus. Tatsächlich ist diese Symmetriebrechung für eine nicht verschwindende Chern-Zahl verantwortlich.

Aber auch in photonischen Systemen kann eine solche Symmetriebrechung stattfinden: Diese spielt sich in der Polarisation ab, also der Richtung, in der das elektrische Feld einer Welle zeigt. Gyromagnetische Materialien weisen je nach Polarisation einen unterschiedlichen Brechungsindex auf – was einer Symmetriebrechung gleichkommt. So wie die Berry-Krümmung die Wellenfunktion eines Elektrons beeinflusst, kann man eine Art Krümmung in den Materialien definieren, die sich auf die Polarisation eines Photons auswirkt. Die Bandlücke eines photonischen

Von der Topologie zu Chern-Zahlen

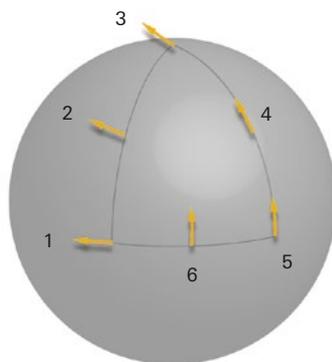
Die Topologie ist der Teil der Mathematik, der sich auf die globalen Eigenschaften geometrischer Objekte konzentriert. Topologische Invarianten sind ganz- oder halbzahlige Werte, die diese globalen Merkmale charakterisieren. Die wohl bekannteste Invariante für Oberflächen ist das so genannte Geschlecht, das der Anzahl der Löcher entspricht. Man kann es berechnen, indem man die Krümmung einer Oberfläche integriert, die an jedem Punkt lokal definiert ist. Obwohl ein amerikanischer Football und ein Fußball unterschiedlich gekrümmt sind und sich daher geometrisch unterscheiden, ist ihr Geschlecht gleich. Man kann sie ineinander verformen, ohne Löcher in ihre Oberfläche zu reißen, so dass sie topologisch gesehen identisch sind.

Auch Kurven kann man eine topologische Invariante zuweisen: eine Windungszahl, die bestimmt, wie oft eine Kurve um ein Objekt herumläuft. Die Windungszahl lässt sich berechnen, indem man den Winkel jedes Punkts in Polarkoordinaten auf der Kurve integriert.



Die Topologie klassifiziert Dinge nach der Anzahl ihrer Löcher oder Windungen. Diese Eigenschaften bleiben erhalten, wenn ein Körper kontinuierlich verformt wird.

Überraschenderweise lassen sich topologische Invarianten stets durch Integrale über lokale Merkmale wie Krümmungen oder Winkel kalkulieren. Die Integrale speichern dabei nur die globalen Informationen eines Objekts.



In der Festkörperphysik wendet man die Prinzipien der Topologie auf die Bandstruktur an. Zuerst muss man den Bändern eine Berry-Krümmung zuweisen, die der Krümmung einer gewöhnlichen Oberfläche ähnelt. Folgt etwa ein Pfeil auf einer gekrümmten Oberfläche einem geschlossenen Pfad, kann die Pfeilspitze nach der Umrundung in eine andere Richtung zeigen – zwischen Anfangs- (1) und Endzustand (6) gibt es dann einen Winkel (Bild links). Die Wellenfunktion, die ein Elektron in einem Band beschreibt, ist wie ein solcher Pfeil. Bewegt sich ein Elektron durch den Impulsraum, bewirkt die Berry-Krümmung, dass der Pfeil seine Ausrichtung ändert. Indem man die Berry-Krümmung über ein Band integriert, erhält man eine zugehörige topologische Invariante, die Chern-Zahl.

Kristalls kann dadurch eine von null verschiedene Chern-Zahl haben. Das hat zur Folge, dass sich nur die Lichtteilchen am Rand des Kristalls ungestört in eine Richtung fortbewegen, genau wie beim Quanten-Hall-Effekt. Die Arbeitsgruppe von Marin Soljačić am Massachusetts Institute of Technology (MIT) bestätigte die Vorhersage 2009 im Labor.

Das Problem schien fast gelöst. Man hatte Materialien gefunden, in denen sich Photonen unter bestimmten Umständen ohne störende Reflexionen bloß in eine Richtung ausbreiten. Doch leider sind Stoffe typischerweise nur für Wellen im Mikrowellenbereich gyromagnetisch aktiv, was sehr weit von den optischen Frequenzen entfernt ist, die man benötigt, um Informationen zu übertragen.

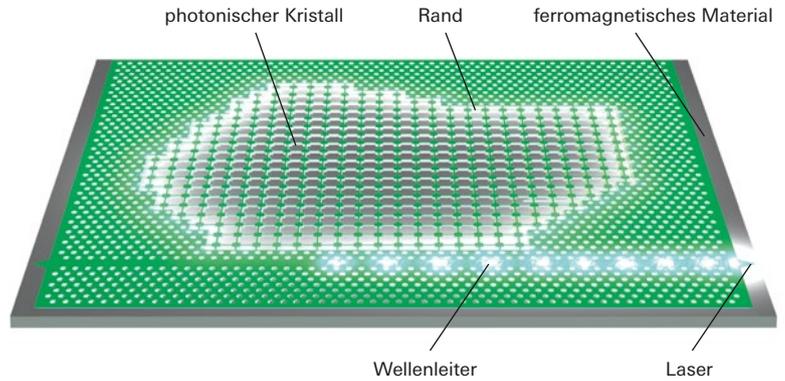
Daher wandten sich einige Forscher der photonischen Version des Quanten-Spin-Hall-Effekts zu. Dafür brauchten sie ein photonisches Äquivalent des Elektronenspins. Wieder bietet die Polarisation eine passende Möglichkeit, denn sie lässt sich immer in zwei lineare Komponenten zerlegen, eine horizontale und eine vertikale. Damit kann

man einer elektromagnetischen Welle einen Pseudospin zuweisen.

Diese Idee griffen Mohammad Hafezi und seine Kollegen von der University of Maryland 2011 in einem Versuch auf. Die Forscher verwendeten mehrere kreisförmige Lichtleiter, die sie periodisch in einem zweidimensionalen Gitter anordneten. Abhängig von der Richtung, in der sich das Licht ausbreitete, besaß jeder Leiter einen von zwei Zuständen, der den Pseudospin darstellte. Und tatsächlich konnten sie das bizarre Phänomen aus der Festkörperphysik in ihrem Aufbau beobachten: Am Rand zeigte sich eine hohe Lichtintensität, die den Kristall umkreiste, während die Helligkeit im Inneren gegen null ging. Allerdings ist die Ausbreitungsrichtung der Photonen in diesem Aufbau nicht vollständig topologisch geschützt. Anders als bei Elektronen, die eine feste Spinrichtung besitzen, kann ein Photon seinen Pseudospin ändern.

Aus diesem Grund widmeten sich Wissenschaftler wieder den Quasiteilchen aus Licht und Materie, den anfangs erwähnten Exziton-Polaritonen. Diese haben den

Boubacar Kanté und sein Team entwickelten 2017 einen topologischen Laser. Auf einem ferromagnetischen Material, das ein Magnetfeld verstärkt, haben die Forscher einen photonischen Kristall in ein Halbleitermaterial geätzt. Dadurch können sich die Photonen nur entlang des Rands ungestört ausbreiten. Dieses System bildet einen Hohlraum, in dem sich die stimulierte Emission des Lasers entwickelt. Ein in der Nähe platzierter Wellenleiter ermöglicht es, das Licht zu transportieren.



Vorteil, dass sie wegen ihres elektronischen Anteils magnetisch aktiv sind – selbst bei optischen Frequenzen.

Meine Arbeitsgruppe berechnete 2015, dass man einen anomalen Quanten-Hall-Effekt für Exziton-Polaritonen erzeugen kann, wenn man die Quasiteilchen in einem periodischen Gitter anordnet. Kurz darauf beobachtete die Arbeitsgruppe von Sven Höfling an der Universität Würzburg diesen Effekt im Labor. Das eröffnet die Möglichkeit, extrem kleine photonische Isolatoren herzustellen, die bei optischen Frequenzen arbeiten. Schaltet man solche »Mikroisolatoren« hinter eine Laserdiode, kann das Licht nicht in die Diode zurückkehren und ihren Betrieb stören.

Die Vielfalt der topologischen Photonik erlaubt es sogar, noch weiter zu gehen. Unser Team schlug 2016 daher vor,

Die Topologie hat viele Lösungen geliefert, um Licht reflexionsfrei zu transportieren

auf einen externen Mikroisolator zu verzichten und direkt einen topologischen Laser zu entwickeln: Ein solcher erzeugt bloß Photonen, deren Energiewerte innerhalb einer topologischen Bandlücke liegen und die sich daher – wie die Elektronen am Rand eines topologischen Isolators – nur in eine Richtung ausbreiten können. Dadurch ließen sich Laser und Isolator im gleichen Bauteil integrieren. Ein Jahr später setzte das Team um Jacqueline Bloch am Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies in Palaiseau bei Paris diese Idee erstmals in einem eindimensionalen System um. Allerdings gab es ein Problem: Damit der topologische Laser auch bei optischen Frequenzen funktioniert, braucht man unglaublich starke Magnetfelder, was in der Praxis nicht umsetzbar ist.

Im selben Jahr fanden Boubacar Kanté von der University of California in San Diego und seine Kollegen eine Lösung und erzeugten einen zweidimensionalen topologischen Laser (siehe Bild oben), der elektromagnetische Wellen nahe optischer Frequenzen erzeugt. Dazu kombinierten sie das zweidimensionale Netzwerk mit einem ferromagnetischen Material, das die Wirkung des äußeren Magnetfelds verstärkt, wodurch eine topologische Bandlücke entsteht. Die Photonen bewegen sich dann entlang des Rands ungestört fort. Zudem funktioniert der Aufbau

wie ein Laser, in dem sich das Licht durch eine stimulierte Emission verstärkt. Die Forscher konnten das Gerät direkt an einen Lichtleiter koppeln, ohne dass der erzeugte Lichtstrahl seine Richtung umkehrt. Die Vorrichtung stellt daher Laser und Mikroisolator in einem dar.

Mordechai Segev vom Technion in Israel entwickelte 2018 zusammen mit seinen Kollegen eine etwas andere Version eines topologischen Lasers, die auf dem Quanten-Spin-Hall-Effekt basiert. Ähnlich wie Hafezi nutzten die Forscher ein Netzwerk gekoppelter Resonatoren (siehe Bild, S. 68/69), so dass sie kein externes Magnetfeld benötigten. Allerdings können die Photonen ihre Ausbreitungsrichtung ändern, weil sie bloß einen Pseudospin haben.

Kürzlich schlug unser Team vor, eine neue Version des Quanten-Spin-Hall-Effekts mit suprafluidem Licht zu erzeugen. In diesem Fall soll die Drehrichtung der Wirbel die Rolle des Spins übernehmen. Da die Rotationsrichtung topologisch geschützt ist, ist der Pseudospin erhalten, und es findet keine Reflexion statt. Ein solches System muss experimentell allerdings noch umgesetzt werden.

Die vielfältigen Versuche und spannenden Ergebnisse im Bereich der topologischen Photonik der letzten Jahre sind beeindruckend. Das Forschungsgebiet entwickelt sich mit unglaublicher Geschwindigkeit. Unerwarteterweise war es eine mathematische Disziplin, die Topologie, die so viele verschiedene Lösungen geliefert hat, um Licht reflexionsfrei zu transportieren. Damit rücken industriell nutzbare optische Mikroisolatoren in greifbare Nähe, was den Weg für eine neuartige Form der Informationsverarbeitung ebnet. ◀

QUELLEN

Bahari, B. et al.: Nonreciprocal lasing in topological cavities of arbitrary geometries. *Science* 358, 2017

Bandres, M. A. et al.: Topological insulator laser: experiments. *Science* 359, 2018

Haldane, F.D.M.: Model for a quantum Hall effect without Landau levels. *Physical Review Letters* 61, 1988

Nalitov, A.V. et al.: Polariton Z topological insulator. *Physical Review Letters* 114, 2015

Solnyshkov, D. et al.: Kibble-Zurek mechanism in topologically nontrivial zigzag chains of polariton micropillars. *Physical Review Letters* 116, 2016

St-Jean, P. et al.: Lasing in topological edge states of a one-dimensional lattice. *Nature Photonics* 11, 2017



FRANZISCHÄDEL, FLORIAN-FREISTETTER.DE/PRESSE//
CC BY-SA 4.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SYNDICATE/LEGALCODE

FREISTETTERS FORMELWELT DESORIENTIERTE BÄNDER

Kann es das geben: eine Fläche, die keine Rückseite besitzt? Ja, kann es!

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

» spektrum.de/artikel/1701308

Was ist groß, grau, nicht orientierbar und schwimmt im Meer? Möbius Dick! Um über den Witz lachen zu können, muss man allerdings verstehen, was mit »nicht orientierbar« gemeint ist. So nennt man in der Mathematik eine Fläche, die nur eine Seite und eine Kante hat; bei der man also nicht unterscheiden kann, wo innen und außen beziehungsweise oben und unten ist.

Diese Formel beschreibt eine solche Fläche (in Zylinderkoordinaten):

$$\log(r) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = z \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Überraschenderweise kann man nicht orientierbare Flächen in der Realität ganz leicht selbst basteln. Dazu braucht man nur einen ausreichend langen Papierstreifen, den man zu einem Ring zusammenklebt. Zuvor muss man aber ein Ende in Bezug auf das andere um 180 Grad drehen. Die so entstandene Fläche ist dann tatsächlich nicht orientierbar. Wer daran zweifelt, kann gerne versuchen, die Innen- und Außenseite des Bands farblich unterschiedlich zu markieren – und wird dabei zwangsläufig scheitern: Die Figur hat nämlich nur eine Seite. Beginnt man auf einer Seite mit dem Färben und arbeitet sich entlang des Rings vor, hat man am Schluss das komplette Band bemalt, ohne dass eine leere Rückseite übrig geblieben ist.

Benannt ist ein solches Band nach dem deutschen Mathematiker August Ferdinand Möbius (1790–1868), der Professor für Astronomie an der Universität Leipzig war und danach bis zu seinem Tod Professor für Höhere Mechanik und Astronomie an der Universität Jena. Er beschäftigte sich jedoch vor allem mit Mathematik und beschrieb im Jahr 1858 die wundersame Fläche, das Möbiusband. Unabhängig von (und wahrscheinlich sogar ein wenig vor) ihm tat das auch der Göttinger Mathematiker Johann Benedict Listing (1808–1882). Aber wie so oft in der Wissenschaft hat eine Person allen Ruhm geerntet, und die andere ging leer aus.

Das Möbiusband besitzt lauter faszinierende Eigenschaften. Schneidet man es in der Mitte entlang der Längsachse auseinander, erhält man nicht etwa zwei Ringe, sondern ein einziges Band, das doppelt so groß ist. Was passiert, wenn man das Band entlang der langen Achse drittelt und zerschneidet, möchte ich nicht verraten. Die Leserschaft ist gerne aufgerufen, es selbst auszuprobieren und sich überraschen zu lassen.

Die seltsame Figur zieht nicht nur Mathematiker in ihren Bann, sondern auch Künstler. Berühmt sind die Möbiusbilder des niederländischen Grafikers M.C. Escher. Die Idee der nicht orientierbaren Fläche findet man ebenso in der Sciencefiction-Literatur oder in Kinofilmen. Es taucht im Logo der Deutschen Mathematiker-Vereinigung auf und sogar – etwas unerwartet – in dem des Bundesinventionsverbands der Gebäudedienstleister. Zudem gibt es eine Schachvariante, bei der das Spielbrett die Form eines Möbiusbands besitzt, und sogar mechanische Getriebe, deren Riemen nur eine Seite haben. Für den Winter könnte man sich einen Möbiusschal stricken, der zwar nicht besser wärmt als ein gewöhnlicher, aber auf jeden Fall die Freunde der Mathematik beeindrucken wird.

Selbst in der Natur findet man die erstaunlichen geometrischen Figuren. Manche pflanzlichen Peptide bestehen aus bestimmten Ketten von Aminosäuren, so genannten Möbius-Zyklotiden, die sich zu einem Möbiusband zusammenschließen. In experimentellen Kernfusionsreaktoren wird das heiße Plasma durch Magnete auf eine Möbiusbahn gezwungen, und beim Videospiel »Mario Kart 8« kann man seinen Gegnern auf einer nicht orientierbaren Fahrbahn davonrasen.

Egal wie oft man es mit dieser Fläche zu tun hat: Es ist immer wieder verwunderlich, dass sie tatsächlich existiert. Hat man sich dann doch einmal damit abgefunden, kann man sich der Kleinschen Flasche zuwenden – und alles wird noch schlimmer. Aber das ist eine andere Geschichte ...

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN HARMONISCHE REIHEN UND DER SALZKRISTALL

Man addiert eine große Anzahl positiver und negativer Zahlen, und das Ergebnis ist – beliebig? Das kann bei unendlich vielen Summanden in der Tat vorkommen. Wenn aber die unendliche Summe einen physikalischen Sachverhalt wiedergibt, stellt sich die Frage, wie die Natur ihren Wert bestimmt.

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

» [spektrum.de/artikel/1701310](https://www.spektrum.de/artikel/1701310)

Welche Kraft wirkt auf ein Chloridion im Inneren eines unendlich großen Kochsalzkristalls? Die anderen Chloridionen stoßen es ab, während die Natriumionen es anziehen. Mit zunehmender Entfernung lässt ihre Wirkung zwar nach, aber das wird durch ihre zunehmende Anzahl wettgemacht.





*Im Mengenreich – das leuchtet ein –
kann das Budget nicht endlich sein;
die Zahl der Posten (jedes Jahr)
ist dort unendlich abzählbar.*

*Einst war das Reich nach schweren Zeiten
in finanziellen Schwierigkeiten;
das Kabinett war sehr verlegen:
Es war der Posten unendliche Reihe
zur Konvergenz nicht zu bewegen;
im Gegenteil! Sie strebte schändlich
nach minus unendlich.*

*Die Lage wurde trist und trister, –
da kam ein neuer Finanzminister.
Der hat das Ende der Nöte gar leicht
durch passende Ordnung der Glieder erreicht.*

*Und seither blieb im Mengenland
der Pleitegeier unbekannt.*

Cremer, H.: Finanzpolitik. Carmina Mathematica,
J. A. Mayer, 1962

► Zum Abschluss des Geschäftsjahrs muss der Finanzbuchhalter seinen Vorgesetzten, den Controllern, die gesammelten Einnahmen und Ausgaben vorlegen. Schlimmer noch: Diese erwarten, dass die Gesamtbilanz zumindest ungefähr der in der Planung vorgegebenen Zahl entspricht. An den Daten selbst gibt es nichts zu manipulieren; die einzige Freiheit, die der Buchhalter hat, besteht in der Reihenfolge, in der er die Zahlen vorlegt. Der Controller addiert die einzelnen Posten auf, sowie sie genannt werden, und zwar mit wechselnden Vorzeichen, denn der Buchhalter präsentiert Einnahmen und Ausgaben in bunter Mischung, allerdings beide nach Größe geordnet: Stets ist die aktuell angegebene Ausgabe kleiner als alle vorigen; dasselbe gilt für die Einnahmen.

Wundersamerweise nähert sich die Summe, die der Controller auf seinem Taschenrechner hat, immer mehr dem vorgegebenen Zielwert. Und als sein Gegenüber bei den Kleckerbeträgen in der Größenordnung von wenigen Cent angelangt ist, lässt er es gut sein und quittiert die Zielerreichung, obgleich in der Liste der Posten kein Ende abzusehen ist.

Das geht? Ja, und zwar mit jeder beliebigen Zielvorgabe. Der Buchhalter kann mit ein und demselben Datenmaterial sowohl einen sagenhaften Gewinn ausweisen als auch einen katastrophalen Verlust, der Heuschrecken-Investoren das Weite suchen lassen würde. Allerdings nur unter Voraussetzungen, die in der Geschäftswelt eher nicht erfüllt sind: Auf der Einnahmen- und auf der Ausgabe-seite gibt es unendlich viele Posten, die zwar immer unbedeutender werden – genauer: gegen null streben –, gleichwohl aber in der Summe unendlich sind.

Das klassische Beispiel hat bei den Mathematikern den etwas weit hergeholten Namen »alternierende harmonische Reihe«:

$$1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \frac{1}{7} - \frac{1}{8} + \dots$$

Man nennt sie alternierend, weil das Vorzeichen ständig wechselt, und harmonisch, weil die Folgenglieder dem Betrag nach den Längen der Saiten entsprechen, auf denen ein musikalischer Ton mitsamt all seinen Obertönen erklingen würde. Das Wort Reihe bedeutet in diesem Kontext die Summe aller unendlich vielen Folgenglieder.

Die Folge der Kehrwerte der natürlichen Zahlen $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots$ strebt offensichtlich gegen null. Gleiches gilt für die Teilfolgen der ungeraden Glieder – die in der Geschichte mit dem Buchhalter die Rolle der Einnahmen spielen – und der geraden Glieder (der Ausgaben).

Weniger deutlich ist die Tatsache, dass die gewöhnliche, nicht alternierende harmonische Reihe nicht konvergiert. Die Summe

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} + \dots$$

wächst quälend langsam, aber unaufhaltsam über alle Grenzen (siehe »Die harmonische Reihe divergiert«, unten). Dagegen hat die alternierende harmonische Reihe einen endlichen Wert. Und zwar gilt

$$\sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^{j-1}}{j} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \dots = \ln 2 \approx 0,693147$$

Wieso ausgerechnet der natürliche Logarithmus von zwei? Das ist eine längere Geschichte, die hier nicht ausgebreitet werden soll.

Allerdings ist dieser Wert von zweifelhafter Qualität und auf jeden Fall mit Vorsicht zu genießen. Denn wenn man dieselben Zahlen in einer leicht unterschiedlichen Reihenfolge addiert, kommt etwas ganz anderes heraus.

Wer nach dem Vorbild des gerissenen Buchhalters den Wert der Gesamtsumme kleinrechnen will, kann zum Beispiel die Einnahmen zur rechten, die Ausgaben zur linken Seite sortieren und dann wie bei einem Strickmuster »eins rechts, zwei links« zusammenführen:

$$1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} + \frac{1}{3} - \frac{1}{6} - \frac{1}{8} + \frac{1}{5} - \frac{1}{10} - \frac{1}{12} + \dots$$

Dabei wird kein Folgenglied unterschlagen! Es kommen alle an die Reihe, die positiven eben nur etwas später. Diese Darstellung lässt sich umformen:

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{4} + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{6}\right) - \frac{1}{8} + \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{10}\right) - \frac{1}{12} + \dots \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{4} + \frac{1}{6} - \frac{1}{8} + \frac{1}{10} - \frac{1}{12} + \dots \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \dots\right) \\ &= \frac{1}{2} \ln 2 \end{aligned}$$

mit dem Ergebnis, dass die Gesamtbilanz nur noch halb so groß ist wie zuvor.

Das Verfahren lässt sich verallgemeinern. Mit irgendeiner Zielvorgabe Z konfrontiert, geht der Buchhalter folgendermaßen vor: Er nimmt (positive) Werte von der rechten Seite so lange, bis die erreichte Zwischensumme größer ist als Z . Das gelingt immer, denn die Summe der rechten Werte überschreitet alle Grenzen. Anschließend nimmt er Werte von links, bis er Z wieder unterschreitet. Auch das schafft er, denn der Vorrat der negativen Werte ist ebenfalls unerschöpflich. Erneut greift er zur rechten Seite, bis er über Z hinauskommt, dann zur linken, und so weiter. Da die Werte, die noch zur Verfügung stehen, laufend kleiner werden, wird die Abweichung der Summe von Z immer geringer und im Grenzwert gleich null. Formal korrekt formuliert wird dieser Gedankengang zum Beweis eines Satzes, der als riemannscher Umordnungssatz in der Literatur zu finden ist.

An der Stelle wird die ohnehin unrealistische Geschichte vollends absurd. Unweigerlich würde der Controller, der dem Buchhalter auf die Finger schaut, Verdacht schöpfen ob der Willkür, mit welcher dieser ihm die Zahlen präsentiert. Der Buchhalter muss sich also nicht nur darum bemühen, seinen Aufpassern die Zahlen in geeigneter

Die harmonische Reihe divergiert

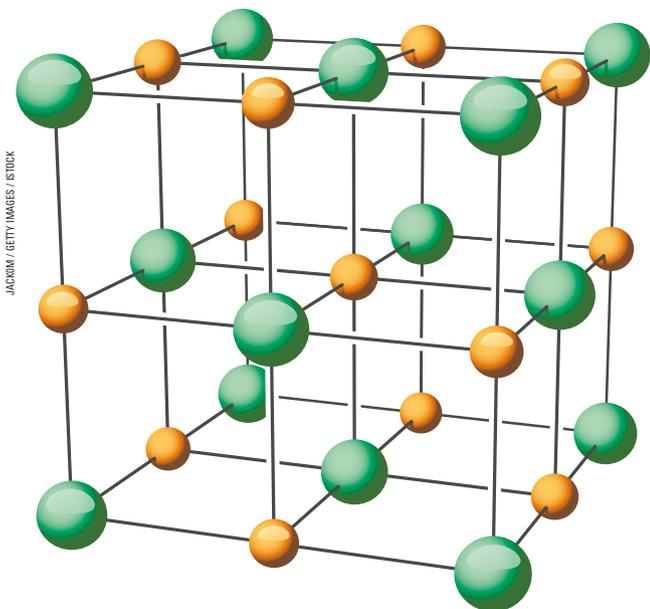
Anders als man vielleicht erwarten würde, strebt die harmonische Reihe gegen unendlich – wenn auch sehr langsam.

Der Beweis dazu ist folgender: Man fasst zunächst die Glieder der Reihe $a_j = \frac{1}{j}$ zu Teilsummen zusammen, die jeweils von der Nummer $2^k + 1$ bis zur Nummer 2^{k+1} laufen:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j} &= 1 + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4}\right) + \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8}\right) \\ &+ \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{10} + \frac{1}{11} + \frac{1}{12} + \frac{1}{13} + \frac{1}{14} + \frac{1}{15} + \frac{1}{16}\right) + \dots \end{aligned}$$

Innerhalb der k -ten Klammer sind alle Glieder größer als das letzte oder zumindest gleich groß. Die k -te Klammer enthält demnach 2^k Summanden, die sämtlich größer oder gleich $\frac{1}{2^{k+1}}$ sind. Also ist der Inhalt der Klammer größer als $\frac{2^k}{2^{k+1}} = \frac{1}{2}$.

Es gibt aber unendlich viele Klammern! Somit müsste die Summe der Reihe größer sein als unendlich mal $\frac{1}{2}$, was zu beweisen war.



Miniaturausgabe Kochsalzkristall. Ein mittiges Natriumion (orange) ist umgeben von sechs Chloridionen (grün) in der Entfernung $r = 1$, zwölf Natriumionen in der Entfernung $r = \sqrt{2}$ und acht Chloridionen in der Entfernung $r = \sqrt{3}$.

Reihenfolge unter die Nase zu reiben, sondern diese auch irgendwie plausibel oder natürlich erscheinen zu lassen.

Mathematisch formuliert: Es gibt zwar für jeden gewünschten Grenzwert eine Umordnung der Folgenglieder, mit der die Reihe gegen den Grenzwert konvergiert. Aber die Umordnung stellt sich erst im Lauf der Zeit heraus, während man dem oben beschriebenen Rezept folgt. Der arme Buchhalter muss ja unendlich oft zwischen der rechten und der linken Seite wechseln. Da wünscht man sich ein Rezept, das man unendlich oft anwenden kann, ohne jedes Mal nach dem Zielwert zu schielen – und zwar ein möglichst einfaches. Nur unter dieser Voraussetzung lassen sich überhaupt allgemeine Aussagen über dessen Wirkung finden.

Die einfachsten Umordnungen sind diejenigen, die immer nur jeweils zwei Elemente miteinander vertauschen und alle anderen unberührt lassen. Ein klassisches Rezept lautet: »Vertausche jedes Glied mit ungerader Nummer mit dem Glied mit der doppelten Nummer und mache sonst nichts.« Das läuft für die alternierende harmonische Reihe auf die Anordnung

$$-\frac{1}{2} + 1 - \frac{1}{6} - \frac{1}{4} - \frac{1}{10} + \frac{1}{3} - \frac{1}{14} - \frac{1}{8} \dots$$

hinaus. Und siehe da: Schon hat der geschickte Buchhalter die Bilanzsumme auf ein Viertel des ursprünglichen Werts heruntergerechnet (siehe »Die alternierende harmonische Reihe, umgeordnet«, S. 82).

Maxim Gilula, zurzeit Lehrer an der Stanford Online High School für Hochbegabte, hat dieses bemerkenswerte

Ergebnis noch erheblich verallgemeinert. Das oben genannte Rezept lässt sich ausdrücken als »Vertausche Glied Nummer $2k + 1$ mit dem Glied Nummer $4k + 2$ «. Gilula kann nun explizit ausrechnen, was passiert, wenn man Glied Nummer $ak + b$ mit Glied Nummer $ck + d$ vertauscht. Dabei hat man bei der Wahl der natürlichen Zahlen a, b, c und d große Freiheiten – so groß, dass man zwar nicht jede Zielzahl exakt erreicht, aber ihr beliebig nahekommt. Der Controller wäre mehr als zufrieden.

Es wäre ja schön, wenn sich das Problem mit den manipulierbaren Reihensummen auf so abgedrehte Szenarien wie das mit dem Buchhalter und der unendlichen Firmenbilanz beschränken würde. Aber dem ist leider nicht so. Vielmehr stellt diese seltsame Beliebigkeit etliche Gewissheiten über die elementarste arithmetische Operation in Frage.

Wir verlassen uns darauf, dass beim Addieren stets dasselbe herauskommt, einerlei in welcher Reihenfolge wir die Summanden zusammenzählen – selbst wenn es sehr viele sind. Insbesondere darf es keinen Unterschied machen, ob man innerhalb der langen Summe Klammern setzt, das heißt, die Pluszeichen in einer anderen Reihenfolge als streng von links nach rechts anwendet (Assoziativgesetz). Und es darf sich auf die Gesamtsumme auch nicht auswirken, wenn man aus der langen Kette der Summanden zwei miteinander vertauscht (Kommutativgesetz).

Zumindest das letztere Gesetz gilt zwar für endliche Summen, aber offensichtlich nicht für unendliche. Wie kann das sein? Hat eine eherne Regel wie das Kommutativgesetz Ausnahmen im Kleingedruckten?

Nein. Vielmehr ist eine unendliche Summe nicht wirklich eine Summe; sie sieht nur so aus (und die üblichen Schreibweisen sind darauf angelegt, diesem Anschein Vorschub zu leisten). Man kann nicht unendlich viele Zahlen addieren, schon weil man damit in endlicher Zeit – auch theoretisch – nicht fertig würde; das muss man dem antiken Philosophen Zenon aus Elea lassen, der sich mit seinem viel zitierten Paradox von Achilles und der Schildkröte einen Namen gemacht hat (siehe »Achilles und die Schildkröte«, S. 83). Aber was Zenon nicht gesehen hat: Man kann ermitteln, was herauskäme, wenn man es könnte, und wenn das Ergebnis eindeutig ist, dann kann man das mit Fug und Recht als die Summe der unendlichen Reihe bezeichnen.

Diese Ermittlung funktioniert über den Grenzwertbegriff. Zu einer Zahlenfolge a_1, a_2, a_3, \dots definiert man die Folge der Teilsummen $s_1 = a_1, s_2 = a_1 + a_2, s_3 = a_1 + a_2 + a_3, \dots$. Die Summe aller a_j wäre dann »das unendlichste Glied« der Folge s_n . Das gibt es zwar auch nicht, aber wenn die Werte s_n einer bestimmten Zahl beliebig nahekommen (»konvergieren«), nennt man die Zahl den Grenzwert der Folge und verwendet sie als würdigen Stellvertreter des unendlichsten Glieds.

Die Grundidee ist: Man nutzt zwar allgemeine Aussagen, die für jedes der unendlich vielen Folgenglieder gelten, vermeidet es jedoch sorgsam, tatsächlich unendlich viele von ihnen zugleich in die Hand zu nehmen, und kommt am Ende zu einem Ergebnis, das der – nicht existierenden – Summe über unendlich viele Glieder zum Ver-

Die alternierende harmonische Reihe, umgeordnet

Die Wirkung des Rezepts »Vertausche die Glieder mit ungerader Nummer mit denen mit gerader Nummer« lässt sich vollständig an einem Teilstück der Folge mit den Nummern $4k + 1$ bis $4k + 4$ beobachten. Für $k = 1$ sind das die Nummern 5 bis 8. Die Glieder mit den Nummern $4k + 1$ und $4k + 3$ sind durch die mit den doppelten Nummern ersetzt worden, das sind $-1/2_{2(4k+1)}$ und $-1/2_{2(4k+3)}$. (Man beachte: Glieder mit ungerader Nummer sind positiv, die mit gerader Nummer negativ.) Da $4k + 2$ das Doppelte einer ungeraden Zahl ist, steht dort das Glied mit der halben Nummer, also $1/2_{2k+1}$. Glied Nummer $4k + 4$ bleibt unverändert.

Die Teilsumme über diese Vierergruppe

$$S_k = -\frac{1}{2(4k+1)} + \frac{1}{2k+1} - \frac{1}{2(4k+3)} - \frac{1}{4k+4}$$

lässt sich durch trickreiche Anwendung der gewöhnlichen Bruchrechnung umformen zu

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{4k+1} - \frac{1}{4k+2} + \frac{1}{4k+3} - \frac{1}{4k+4} \right) + \frac{3}{4} \left(\frac{1}{2k+1} - \frac{1}{2k+2} \right)$$

In der ersten Klammer steht eine Vierergruppe der gewöhnlichen alternierenden harmonische Reihe und in der zweiten eine Zweiergruppe derselben. Summieren wir jetzt über alle Vierergruppen S_k , so ergibt sich daher:

$$-1/2 \ln 2 + 3/4 \ln 2 = 1/4 \ln 2.$$

wechsellähnlich ist. Das erfordert einige gewöhnungsbedürftige gedankliche Hakenschlänge, die man mit dem rituellen Satz »sei epsilon größer als null« einzuleiten pflegt.

Mit der so etablierten Definition können wir uns zunächst vergewissern, dass das Assoziativgesetz auch für unendliche Summen nicht angekratzt wird. Indem man Klammern setzt, bestimmt man, dass die Additionen innerhalb jeder Klammer vorweg ausgeführt werden sollen. Für die Folge der Teilsummen bedeutet das lediglich, dass einige Glieder ausfallen, nämlich diejenigen Teilsummen, die sich ergeben, solange noch »eine Klammer offen« ist. Und es lässt sich leicht beweisen, dass jede Teilfolge einer konvergenten Folge gegen denselben Grenzwert konvergiert wie die Folge selbst. Also haben die Klammern keinen Effekt für das Endergebnis. Insbesondere ist der

Beweis im Kasten »Die harmonische Reihe divergiert, S. 80« gültig.

Das Kommutativgesetz allerdings ist mit keinem Argument zu retten. Es hilft auch nicht, dass die Grenzwerte aller Teilsummenfolgen – von der originalen ebenso wie von jeder umsortierten alternierenden harmonischen Folge – eindeutig bestimmt sind; die Glieder der Teilsummenfolge ändern sich ja durch das Umordnen.

Worauf kann man sich überhaupt noch verlassen? Es gibt einen Rettungsanker: Man mache bei den Gliedern der Folge $a_1, a_2, a_3 \dots$ alle Minuszeichen zu Pluszeichen. Wenn die Summe dieser Absolutbeträge einen (endlichen) Grenzwert hat, nennt man die Reihe »absolut konvergent«. Und unter einer solchen Voraussetzung ist auch die unendliche Summe der originalen (positiven und negativen) Folgenglieder eindeutig bestimmt und unabhängig von irgendwelchen Umordnungen.

Auf diese Weise führt Maxim Gilula seine Beweise. Er vergewissert sich, dass die Zweier- und Vierergruppen, mit denen er argumentiert (siehe »Die alternierende harmonische Reihe, umgeordnet«, links), sämtlich positiv sind. Dann ist ihre Summe nämlich absolut konvergent, wenn sie überhaupt konvergiert. Und deswegen darf er im Beweis unendlichfachen Gebrauch vom Kommutativgesetz machen. Der unangenehme Nebeneffekt: Gilula muss seine Rechnungen so führen, dass alle Terme unterwegs positiv sind, und nicht so, wie es am einfachsten ist. Das macht den Beweis für den allgemeinen Fall – sagen wir mal – etwas unübersichtlich.

Aber sind diese problematischen (»bedingt konvergenten«) Reihen nur Stoff für Übungsaufgaben im ersten Semester des Mathematikstudiums oder kommen sie auch in der Natur vor? Überraschenderweise ja. Beispiele finden sich zu Tausenden in jedem Salzstreuer.

Ein Kochsalzkristall besteht aus positiv geladenen Natriumionen und negativ geladenen Chloridionen, die an den Knotenpunkten eines Würfelgitters sitzen. Wählen wir ein Koordinatensystem so, dass alle Ionen auf Punkten mit ganzzahligen Koordinaten zu liegen kommen und – zum Beispiel – der Nullpunkt von einem Chloridion besetzt ist, so fühlt dieses sich angezogen von den sechs Natriumionen, die in seiner unmittelbaren Nähe auf den drei Koordinatenachsen sitzen (siehe Bild S. 81), zugleich aber abgestoßen von den zwölf Chloridionen, die etwas weiter entfernt auf den Kantenmitten des umgebenden Würfels zu finden sind, und noch ein bisschen angezogen von den acht Natriumionen an den Ecken.

Wenn man nun wissen will, was die Welt – na ja, in diesem Fall den Salzkristall – im Innersten zusammenhält, setzt man das Verfahren fort, zählt also aus, wie viele anziehende beziehungsweise abstoßende Ionen es in jeder Entfernung r vom Nullpunkt gibt. Auf das Ion im Mittelpunkt wirkt die Summe aller Kräfte der anderen Ionen. Daher teilt man die Anzahl der Ionen in der Entfernung r durch eine Konstante mal r^2 , denn die elektrostatische Anziehungskraft ist umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstands, versieht dann diesen Term mit dem jeweils zutreffenden Vorzeichen – abwechselnd positiv und negativ – und addiert alle Terme auf, bis

ins Unendliche. Das pflegen die Physiker so zu tun, nicht etwa, weil sie ernsthaft über unendlich große Salzkristalle nachdenken würden, sondern aus Bequemlichkeit. Für Ionen am Rand eines Kristalls oder in der Nähe des Rands ist die Gesamtkraft viel schwieriger auszurechnen; und für die übergroße Mehrheit der randfernen Ionen ist der Unterschied zu einem unendlichen Kristall nicht der Rede wert.

So steht es auch in den meisten Lehrbüchern. Der Ärger ist nur: Diese Reihe konvergiert nicht! Für den Grenzwert kommt es nicht nur darauf an, in welcher Reihenfolge man die Glieder summiert; es gibt ihn gar nicht. Drei kanadische Mathematiker, David Borwein, dessen Sohn Jonathan Borwein und Keith F. Taylor, haben das 1985 herausgefunden.

Doch wie kann das sein? Alle Ionen mit Abstand r vom Nullpunkt liegen auf einer Kugelschale mit Radius r . Und weit draußen, wo die Kantenlänge der Gitterwürfel klein gegenüber dem Radius wird, hängt die Anzahl der Ionen nicht mehr besonders von ihrer geometrischen Anordnung ab, sondern ist im Wesentlichen proportional zur Fläche

Achilles und die Schildkröte

Ein antiker Philosoph namens Zenon von Elea hat mit einer ziemlich dreisten Behauptung das Kunststück fertiggebracht, sich bis heute einen Platz im öffentlichen Bewusstsein zu sichern.

Seine Geschichte geht so: Achilles läuft zehnten so schnell wie eine Schildkröte. Beide rennen um die Wette, und zum Ausgleich der unterschiedlichen Fähigkeiten gibt er ihr ein Stadion (ungefähr 200 Meter) Vorsprung. Dann, so Zenon, wird er sie nie einholen! Denn während Achilles das eine Stadion zurücklegt, kriecht die Schildkröte ein zehntel Stadion weiter; hat der schnelle Läufer auch diese Strecke überwunden, ist das Reptil ein hundertstel Stadion voraus, und so weiter. Im Endeffekt müsste Achilles eine unendliche Summe von immer kürzer werdenden Strecken zurücklegen. Jedes der Wegstücke braucht seine Zeit, also besteht die Zeitspanne, bis er die Schildkröte erreicht, aus unendlich vielen Zeitabschnitten. Da man aber unendlich viele Summanden nicht addieren kann, wird er die Schildkröte nie erreichen.

Nun kann allerdings jeder sehen, dass in der Wirklichkeit der Schnellere den Langsameren stets erreicht und sogar überholt, und zwar binnen endlicher Zeit. Demnach besteht ein unauflöslicher Widerspruch zwischen Theorie und Realität. Also, schließt Zenon messerscharf, muss die Realität falsch sein. Anscheinend litt der Mann nicht unter mangelhaftem Selbstbewusstsein.

der Kugelschale. Diese ist ihrerseits proportional zu r^2 (sie ist gleich $4\pi \cdot r^2$, um genau zu sein). Also sitzen auf der Kugelschale zirka $c \cdot r^2$ Ionen, wobei c eine Konstante ist. Sie üben eine Kraft proportional zu $1/r^2$ aus. Somit ist die Gesamtkraft aller Ionen der Kugelschale ungefähr gleich einer Konstanten – denn der Faktor r^2 im Zähler hebt sich gegen das r^2 im Nenner weg –, und zwar abwechselnd mit positivem und negativem Vorzeichen. Das kann nicht konvergieren, ebenso wenig wie die Folge $1, -1, 1, -1, 1, -1$, und so weiter eine unendliche Summe hat: Die Teilsummen schwanken ewig zwischen eins und null hin und her.

Jetzt hat das arme Chloridion im Zentrum ein ernsthaftes Problem. Es ist nicht nur so, dass die Kraft, die es verspürt, von der Reihenfolge abhängt, in der es die Beiträge seiner Kollegen zur Kenntnis nimmt. Sondern die naheliegendste Reihenfolge – die nächsten zuerst und dann nach zunehmender Entfernung – führt auch noch in die Irre. Woran soll es sich halten? Ernsthafter und ohne Spekulationen über den Denkprozess eines Ions gefragt: Woran hält sich die Natur? Immerhin handelt es sich bei der Kraft, um die es geht, um eine messbare Größe. Sie bestimmt die Bruchfestigkeit eines Kristalls ebenso wie die Energie, die frei wird, wenn sich ein freies Ion an einen wachsenden Kristall anlagert. Da ist für Beliebigkeiten bei der Summation kein Platz.

Vater und Sohn Borwein sowie Taylor haben nicht nur gezeigt, dass Summieren über wachsende Kugelschalen scheitert, sondern auch eine Abhilfe gefunden: Summieren über wachsende Würfelschalen. Das entscheidende Hilfsmittel ist von derselben Art wie das, welches Gilula mit seinen Zweier- und Vierergruppen angewandt hat. Diesmal sind es Achtergruppen.

Und zwar zerlegen die Kanadier den unendlich großen Kristall gedanklich in Teilwürfel aus $2 \times 2 \times 2$ Ionen. Sie berechnen dann, dass der Gesamtbeitrag dieser acht Ionen zur Kraft stets positiv ist – oder stets negativ, je nachdem, welche Ionensorte in dem Würfelchen dem Nullpunkt am nächsten liegt. Man kann es stets so einrichten, dass das immer dieselbe Ionensorte ist. So gesehen ist die Gesamtkraft eine Summe über lauter positive – oder lauter negative – Terme, wodurch die Reihe absolut konvergent wird. Die ganze Rechnerei mündet in einer dimensionslosen Zahl, die bei den Chemikern Madelung-Konstante heißt. Und das Ergebnis stimmt mit den Messwerten gut überein. ◀

QUELLEN

Borwein, D. et al.: Convergence of lattice sums and Madelung's constant. *Journal of Mathematical Physics* 26, 1985

Gilula, M.: A class of simple rearrangements of the alternating harmonic series. *The American Mathematical Monthly* 125, 2018

LITERATURTIPP

Baker, A. D. et al.: Corner ion, edge-center ion, and face-center ion Madelung expressions for sodium chloride. *Journal of Mathematical Chemistry* 49(6), 2011

In diesem Artikel wird die alternierende harmonische Reihe in einem Natriumchloridkristall beschrieben.

WISSENSCHAFTSPHILOSOPHIE

GUTE THEORIEN, SCHLECHTE THEORIEN

Naturforscher formulieren und überprüfen Hypothesen. Allerdings ist umstritten, nach welchen Kriterien das geschehen sollte – und wann es sich lohnt, ein Modell zu verwerfen oder zu akzeptieren.



Alexander Mäder ist promovierter Philosoph, arbeitet als Wissenschaftsjournalist und lehrt an der Hochschule der Medien in Stuttgart.

► [spektrum.de/artikel/1701300](https://www.spektrum.de/artikel/1701300)

Theorien sind allgemein gültige Aussagen, so wie der Satz »Alle Schwäne sind weiß«. Man kann sie nicht endgültig beweisen, denn dazu müsste man jeden Schwan anschauen. Die Widerlegung ist hingegen einfacher – es genügt ein schwarzes Exemplar.

Wie viele seiner Zeitgenossen war Karl Popper von den revolutionären Arbeiten Einsteins fasziniert. So geht Forschung, dachte der Wiener sich und versuchte, sie philosophisch zu beschreiben. Er und seine Kollegen im zu Anfang des 20. Jahrhunderts noch jungen Fach der Wissenschaftsphilosophie wollten genau erfassen, was Erkenntnissuche wie bei Einstein ausmacht: der kritische Diskurs über nachprüfbar Behauptungen und das Verwerfen alter Theorien zu Gunsten besserer.

Der Fortschritt kann spektakulär sein. Im 19. Jahrhundert diskutierten Physiker noch über den Äther, den sie sich als Medium vorstellten, in dem sich Licht ausbreitet. In den 1880er Jahren versuchte der Experimentator Albert Michelson zunächst in Potsdam, später zusammen mit Edward Morley in Chicago den Unterschied zwischen zwei Lichtstrahlen zu messen, die einmal in Bewegungsrichtung der Erde und einmal senkrecht dazu ausgestrahlt werden. Das Licht müsste sich im Äther mit leicht unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten. Das wäre vergleichbar zu einem Schwimmer, der sich gegen den Strom langsamer fortbewegt, und einem zweiten, der quer dazu rascher vorankommt. Doch Michelson und Morley fanden keinen Unterschied. Die Lösung lieferte Albert Einstein 1905, indem er den Äther in seiner speziellen Relativitätstheorie einfach wegließ. Ihr zufolge ist die Geschwindigkeit des Lichts immer gleich, egal, wie schnell und in welche Richtung es sich bewegt.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit kann man auch als Naturgesetz bezeichnen. Der Begriff stand im ersten Teil der Serie im Mittelpunkt. Hier soll es nun um das Konzept der Theorie gehen – nicht um die grundlegenden Regeln des Universums, sondern um unser Wissen darüber. Das kann sich als falsch herausstellen. Ob unsere Theorien also Naturgesetze beschreiben, ist nicht völlig klar. Daher ist die Frage: Was macht eine Theorie zu einer guten, die größere Chancen hat, ein Naturgesetz zu erfassen?

Karl Popper analysierte verschiedene Beispiele vor allem aus der Physik und entwickelte in seinem 1935 erschienenen Buch »Logik der Forschung« ein Kriterium, das Schule machte: Wissenschaft besteht darin, allgemeine Aussagen zu falsifizieren. Wenn das gelingt, muss man diese aufgeben. Fortschritt besteht nicht darin, eine Theorie nach der anderen in die Lehrbücher zu schreiben. Oft kommt man vielmehr weiter, indem man eine Theorie wieder herausschreift, wie beim Fall des Experiments von Michelson und Morley. Scheitert die Falsifikation jedoch trotz hartnäckiger Bemühungen, dann könnte die Aussage wahr sein. Man sagt dann, die Theorie sei bestätigt worden.

Hundertprozentig beweisen kann man sie nie, denn eine Widerlegung ist später immer noch möglich. Aber klar war für Popper: Forscher sollten ihre Theorien so formulieren, dass man sie prüfen kann. Wie weit man die Kontrolle treibt, dürfen die Wissenschaftler pragmatisch entscheiden.

Schließlich sind auch die Falsifikationen nicht vor Kritik gefeit und können ihrerseits untersucht werden. Popper schrieb, die Forschung habe nichts Absolutes an sich: »Die Wissenschaft baut nicht auf Felsengrund. Es ist eher ein Sumpfland, über dem sich die kühne Konstruktion ihrer Theorien erhebt.« Die Pfeiler, die das Gebäude stabilisieren

sollen – also die Überprüfungen –, müssten nur so tief in den Boden getrieben werden, wie es eben nötig ist. »Wenn man hofft, dass sie das Gebäude tragen werden, beschließt man, sich vorläufig mit der Festigkeit der Pfeiler zu begnügen.«

Bei dieser Sichtweise auf die Wissenschaft half Popper die Logik, denn Widerlegungen allgemeiner Aussagen sind einfacher als deren Beweise. Um einen Satz der Art »Alle Schwäne sind weiß« als falsch zu erkennen, genügt als Gegenbeispiel ein schwarzer Schwan. Um ihn hingegen hieb- und stichfest zu beweisen, müsste man sich alle Schwäne anschauen und sicherstellen, dass nicht der letzte doch noch schwarz ist. Wissenschaftliche Theorien, so Popper, sind in der Regel solche allgemein gültigen Aussagen. Man kann sie auch Hypothesen nennen, das spielt keine entscheidende Rolle. Üblicherweise wird der Begriff der Theorie für größere Gedankengebäude reserviert, während Hypothesen nachgeordnete Behauptungen darstellen.

Der kleinste Planet des Sonnensystems gegen die Lehren der Himmelsmechanik

Popper war klar: Praktisch ist es nicht so einfach. Kein Wissenschaftler gibt seine lieb gewonnene Theorie auf, weil ein Kollege ein Gegenbeispiel präsentiert. Der Philosoph Ulrich Gähde verdeutlichte das am Beispiel des Merkurs, des kleinen, sonnennächsten Planeten. Durch den Einfluss der übrigen Himmelskörper dreht sich seine elliptische Bahn von Umlauf zu Umlauf jeweils ein wenig. Mit der Zeit läuft Merkur also in Form einer Rosette um die Sonne. Anders ausgedrückt beschreibt das Perihel, der sonnennächste Punkt der Merkurbahn, einen Kreis. Es benötigt mehr als 200000 Jahre für eine Umrundung. Mitte des 19. Jahrhunderts konnten Astronomen die Periheldrehung genau vermessen und stellten fest, dass sie etwas schneller verläuft als erwartet. War die newtonsche Gravitationslehre, mit der sie alles berechnet hatten, demnach falsch?

Die Forscher probierten eine Rettung, die zuvor schon bei Bahnabweichungen des Uranus am Rand des Sonnensystems erfolgreich gewesen war. Sie suchten nach einem unbekanntem Planeten, der durch seine Schwerkraft Merkurs Abweichung erklärt. Auf die gleiche Weise hatten sie im Fall von Uranus Neptun gefunden. Nun wollten sie so einen kleinen, sonnennahen Planeten entdecken. Die Suche nach »Vulkan« blieb erfolglos. Die Astronomen brachten noch einige weitere Ideen für eine Ursache der schnelleren Peri-

SERIE

Grundbegriffe der Wissenschaft

Alexander Mäder

Teil 1: Februar 2020

Wie universell sind Naturgesetze?

Teil 2: März 2020

Gute Theorien, schlechte Theorien

Teil 3: April 2020

Experimente und Daten

heldrehung vor, doch die führten ebenfalls ins Leere. Irgendwann muss Schluss sein, sonst könnte man jede noch so abwegige Theorie bis ans Ende aller Tage verteidigen. Im Fall der Periheldrehung des Merkurs kam die Lösung 1915 mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Newtons Gravitationsgesetze allein beschreiben die Merkur-Bahn tatsächlich nicht korrekt.

Wann aber ist der richtige Zeitpunkt gekommen, die Rettungsversuche aufzugeben? Wie funktioniert der rationale Entscheidungsprozess für oder gegen eine Theorie? Popper zufolge geht die wissenschaftliche Diskussion in die richtige Richtung, wenn eine Theorie konkreter wird. Denn je klarer deren Voraussagen, umso leichter lassen sie sich widerlegen – und umso beeindruckender ist es, wenn sie bestätigt werden. In Poppers Terminologie steigt mit der Falsifizierbarkeit der empirische Gehalt einer Aussage. Er wollte damit verhindern, dass man eine Theorie rettet, indem man sie immer schwächer macht – und etwa lauter Ausnahmen zulässt.

Als Negativbeispiel zitierte Popper die Traumdeutung von Sigmund Freud. Im Grunde, so beschrieb Popper dessen Ansatz, machen Träume geheime Wünsche deutlich. Dagegen spricht allerdings, dass wir nachts Dinge erleben, die wir überhaupt nicht ersehnen. Einige dieser Träume habe Freud uminterpretiert, argumentierte Popper. Sie machen angeblich doch einen Wunsch des Patienten deutlich – und zwar den, dass Freud falschliegen möge. Mit solchen Kniffen tue man einer Theorie keinen Gefallen.

Zurück zum unbekanntem Planeten Vulkan. Ist dieser Rettungsversuch besser als der von Freud? Das könne man nach Poppers Beschreibung gar nicht entscheiden, kritisiert Ulrich Gähde. Denn Vulkan in die Theorie der Periheldrehung einzuführen, mache sie weder einfacher noch schwieriger zu falsifizieren. Vielmehr verändere das die Theorie: Man setzt die Umlaufbahn des Merkurs nun als gegeben voraus und leitet daraus ab, wo sich der störende Planet befinden müsste. Die Theorie macht also keine Vorhersagen mehr zu Merkur, sondern stattdessen zu

Vulkan. Poppers Beschreibung der Wissenschaft hilft in dem Punkt nicht weiter. Sie erfasst nicht vollständig, wie Forscher vorgehen, wenn sie eine Theorie prüfen und eventuell zu Gunsten einer anderen verwerfen.

In manchen Fällen erscheint Poppers Minimalbedingung sogar zu hart. Der Philosoph lehnte nicht nur die Psychoanalyse als unwissenschaftlich ab, sondern auch einen zentralen Teil von Darwins Evolutionstheorie, den Erfolg der am besten Angepassten. Der Philosoph Marcel Weber stellte Poppers Auseinandersetzung so dar: »Wenn man fragt, welches denn die Fittesten seien, so sei die Antwort: Das sind diejenigen, die im Kampf ums Dasein am besten überleben. Popper meinte, der Begriff der Fitness sei so definiert.« Das würde bedeuten, dass nach Darwin diejenigen am häufigsten überleben, die eben am häufigsten überleben – die Theorie der natürlichen Selektion wäre eine Tautologie und nicht falsifizierbar.

Experimente bleiben sogar dann spannend, wenn man ahnt, was herauskommt

Wie kann man auf Poppers Kritik reagieren? Eine Möglichkeit, die Weber vorschlug: Darwin will mit seiner Theorie die Entwicklung von Populationen beschreiben. Die fitteren Mitglieder haben eine höhere Chance, sich fortzupflanzen. Daher nimmt ihr Anteil in der Gesamtzahl aller Individuen zu. Das ist durchaus falsifizierbar, denn wenn die Vielfalt der Eigenschaften innerhalb jeder Art stabil bliebe, wäre Darwin widerlegt. Zudem kann man erklären, warum eine Veränderung eine höhere Überlebenschance bietet. Wenn zum Beispiel die Blütenkelche tiefer sind, hilft dem Vogel ein langer Schnabel, an den Nektar zu kommen. Man darf also nicht einen Teil einer Theorie herausgreifen und behaupten, für diesen funktioniere die Falsifikation nicht. Immerhin kann man Poppers Kritik als Warnung davor verstehen, komplexe Theorien durch einfache Slogans wiederzugeben.

Als größter Konkurrent Poppers gilt der US-Wissenschaftshistoriker Thomas Kuhn. Sein Buch »The Structure of Scientific Revolutions« erschien 1962, drei Jahre nach der englischen Übersetzung von Poppers »Logik der Forschung«. Kuhns Werk prägte den Begriff Paradigmenwechsel: den revolutionären Übergang von einem alten Theoriegebäude zu einem neuen. Unter einem Paradigma verstand Kuhn neben den zentralen Annahmen eines Fachgebiets auch typische Anwendungsfälle, die im Studium gelehrt werden. Zum Welle-Teilchen-Dualismus gehören die Experimente, mit deren Hilfe das Modell paradigmatisch erklärt wird: die Interferenz von Licht mit sich selbst, nachdem es einen Doppelspalt passiert hat, und der so genannte Compton-Effekt, bei dem Lichtteilchen auf Elektronen stoßen.

In den normalen, ruhigen Phasen des wissenschaftlichen Geschäfts wird das aktuelle Paradigma Kuhn zufolge nicht in Frage gestellt, sondern ausgearbeitet. Diese Forschung zeichnet sich dann durch eine Besonderheit aus – die Experimentierenden wissen in der Regel, was bei ihren Versuchen herauskommen soll. Doch das mache diese nicht weniger spannend und herausfordernd, schreibt Kuhn: »Ein normales Forschungsproblem zu einem Abschluss zu bringen heißt, das Erwartete auf einem neuen

AUF EINEN BLICK SUCHE NACH DEM WIDERSPRUCH

- 1** Sprechen Beobachtungen gegen eine Hypothese, lohnt es sich irgendwann nicht mehr, daran festzuhalten. Dann kommt man weiter, indem man das Modell durch ein besseres ersetzt.
- 2** Scheitert hingegen trotz hartnäckiger Bemühungen der Versuch, eine Theorie zu widerlegen, gilt sie als immer besser bestätigt. Endgültig beweisen kann man sie aber nie.
- 3** In der Praxis ist die Indizienlage oft kompliziert: Wann sollte man bei einer Theorie die Rettungsversuche aufgeben, und wie weit muss man die Prüfung treiben, bis man etwas akzeptiert?

Klimaprognosen: Theorien über die Zukunft?

Wenn Klimaforscher prognostizieren, wie sich der Klimawandel auswirken wird, dann stellen sie auf den ersten Blick falsifizierbare Behauptungen auf. Es könnte schließlich anders kommen. Doch so sind die Szenarien nicht gemeint. Sie sagen nicht die Zukunft exakt vorher. Vielmehr sollen sie aufzeigen, welche Folgen bestimmte Entscheidungen hätten.

Bis 2014 bildeten Emissionsszenarien die Grundlage der Modelle des Weltklimarats IPCC. Sie hingen zum Beispiel davon ab, wie stark Industrieproduktion und Bevölke-

rung wachsen. Inzwischen bauen die Sachstandsberichte nicht mehr auf wirtschaftlichen Annahmen auf, sondern auf bestimmten CO₂-Anteilen in der Atmosphäre. Welche sozioökonomischen Szenarien dazu führen könnten, wird hinterher ermittelt. Die »Repräsentativen Konzentrationspfade« (Representative Concentration Pathways, RCPs) stehen für größere Klassen ähnlicher Entwicklungen. Mit ihnen versuchen Forscher weiterhin, alle Möglichkeiten vom besten Klimaschutz bis zum schlimmsten Fall einzufangen. Politiker sollen sich

auf dieser Basis fragen können, was zu tun ist, um einem wünschenswerten Entwicklungspfad zu folgen.

Nur wenn die Computermodelle die Entwicklung des Klimas in der Vergangenheit korrekt wiedergeben, sind sie vertrauenswürdig. Um die Aussagekraft der RCPs für die Zukunft abzuschätzen, lassen die Teams unterschiedlich programmierte Modelle laufen. Stimmen die Ergebnisse gut überein, sind sie robust, hängen also nicht mehr entscheidend von kleinen Details ab. Dann gelten sie als besonders zuverlässig.

Weg zu erreichen, und es erfordert die Lösung einer Vielzahl umfangreicher instrumenteller, begrifflicher und mathematischer Rätsel.« Das klingt anders als bei Popper, und heute setzt man auf eine gute Mischung der beiden Betrachtungen. Die Arbeitshypothesen wissenschaftlicher Projekte sollten einerseits riskant, also leicht falsifizierbar sein, andererseits sich an das vorherrschende Paradigma anschließen und nicht frei im Raum schweben.

Es gibt noch einen zweiten Unterschied zwischen den beiden Sichtweisen; er betrifft das Verwerfen einer Theorie zu Gunsten einer neuen. Popper beschreibt den Wandel als Fortschritt. Die alte Theorie lässt sich irgendwann nicht mehr retten und gilt als falsifiziert, während die neue die Phänomene besser erklärt und bei Tests bestätigt wird. Auch nach Kuhns Darstellung ist es mit der Ausarbeitung eines Paradigmas irgendwann vorbei. Es gibt immer mehr offene Fragen, die Theorien haben ausgedient und werden – nach einer Phase der Unsicherheit und des Suchens – durch neue ersetzt. Doch dieser Paradigmenwechsel führt Kuhn zufolge nicht dazu, dass man sich der Wahrheit nähert, wie Popper es sieht. Vielmehr bietet das neue Paradigma einen ganz anderen Ansatz, um die Welt zu erklären.

»In einer Revolution werden Kernbestandteile des zuvor akzeptierten theoretischen Rahmens aufgegeben und neuartige Vorstellungen an ihre Stelle gesetzt«, fasst der Philosoph Martin Carrier Kuhns Ansichten zusammen. »Ein Aspekt solcher nicht-akkumulativer Veränderungen ist die Auflösung von Problemen anstelle ihrer Lösung.« Kuhn bezeichnet Paradigmen auch als »inkommensurabel«. Sie lassen sich nicht vergleichen, das eine ist nicht näher an der Wahrheit als das andere. Das neue erfüllt vielmehr einen anderen Zweck, denn mit ihm können die Forscher besser arbeiten, also mehr Phänomene erklären oder ihre Theorien genauer ausarbeiten. Als Beispiel nennt Carrier den bereits erwähnten Äther. Im 19. Jahrhundert bemühten sich Physiker, dessen Eigenschaften zu ermitteln. Die kannten sie im

20. Jahrhundert immer noch nicht, fanden aber auch die Frage danach nicht mehr interessant. »Aus rückblickender, post-revolutionärer Perspektive sind die Wissenschaftler der Vergangenheit einem Trugbild zum Opfer gefallen«, schreibt Carrier.

Können wir trotzdem davon ausgehen, mit gut bestätigten Theorien der Wahrheit nahezukommen? Das ist unter Philosophen umstritten. Die meisten neigen zu der Sicht, dass solchen Theorien tatsächlich etwas Reales entspricht. Auch die Naturwissenschaftler sind hin- und hergerissen zwischen Skepsis und Zuversicht. »Einerseits betonen Forscher die Vorläufigkeit ihres Tuns«, schreibt Carrier. Umgekehrt finde sich unter ihnen »ein markanter Realismus, dem zufolge gerade die physikalische Grundlagenforschung die Natur gleichsam ausschöpft und ihre wahre Beschaffenheit erschließt.«

QUELLEN

Carrier, M.: Wissenschaftstheorie zur Einführung. Junius, 2006

Gähde, U.: Modelle der Struktur und Dynamik wissenschaftlicher Theorien. In: Bartels, A., Stöckler, M. (Hg.): Wissenschaftstheorie. Ein Studienbuch. Mentis, 2007, S. 45–65

Kuhn, T.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Suhrkamp, 1973

Popper, K.: Logik der Forschung. Mohr, 1976

Weber, M.: Philosophie der Evolutionstheorie. In: Bartels, A., Stöckler, M. (Hg.): Wissenschaftstheorie. Ein Studienbuch. Mentis, 2007, S. 265–285

WEBLINK

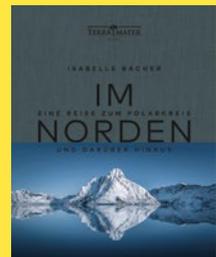
<https://plato.stanford.edu>

Das englischsprachige Onlinelexikon gibt zum Thema »scientific progress« sowie zu Karl Popper und Thomas Kuhn einen ausführlichen Überblick.

REZENSIONEN



Isabelle Bacher
IM NORDEN
Eine Reise zum
Polarkreis und
darüber hinaus
Terra Mater,
Elsbethen b.
Salzburg 2019
160 S., € 40,-



ISABELLE BACHER, AUS BACHER, I., IM NORDEN, MIT FROL, GEN, VON TERRA MATER BOOKS

NATURFOTOGRAFIE LIEBESERKLÄRUNG AN DEN NORDEN

Die Fotografin Isabelle Bacher hat die Schönheit der Arktis eingefangen.

Die Natur im Norden gilt als erbarungslos, doch genau darin liegt ihr Reiz, findet die Autorin Isabelle Bacher. Sie beschreibt die Welt dort als »schroff, kühl und atemberaubend schön«, und genau so präsentiert sie die einmaligen Landschaften des Nordens auch auf ihren Fotos. Bachers Begeisterung für den Norden ist auf jeder Seite spürbar. Die hat sie von

ihrer norwegischen Mutter. Ihr österreichischer Vater brachte sie zur Fotografie. Gekonnt kombiniert sie die beiden Leidenschaften und präsentiert ihr Werk als gelungenen Mix aus Bildband, Kurzbiografie und Reise-reportage.

In den Texten, an denen die freie Lektorin Caroline Metzger mitwirkte, erzählt Bacher von den Sommerurlaube ihrer Kindheit in Südnorwegen. Dort lernte die Autorin, mit der Natur zu leben und sich ihr zu fügen – die ihrer Ansicht nach vielleicht wichtigste Lektion. Fotos zeigen die Familie unter anderem beim Angeln. 2013 wanderte die Architektin und preisgekrönte Fotografin dann nach Nordnorwegen

aus, lebte und arbeitete unter anderem in Tromsø und auf den Lofoten.

Um der Natur und ihren Fotomotiven nah zu sein, riskiert Bacher oft Kopf und Kragen. Einmal schloss ein Orkan sie für 30 ungewisse Stunden in ihrem »Rorbu« ein, einer kleinen roten Fischerhütte ohne Strom, Wasser und Feuerholz. Gerettet wurde sie von ihrem Vermieter Yngvar, der sich im Nachhinein als entfernter Verwandter herausstellte.

Die Autorin stellt fünf Regionen Nordnorwegens vor: Spitzbergen, Finnmark, Troms, Lofoten und Vesterålen. Diese bilden zusammen die nördliche Grenze zwischen der Zivilisation und der arktischen Wildnis. Schon



ESSELLE BACHER, AUS BACHER, I., IM NORDEN, MIT FROL, GBN, VON TERRA MATER BOOKS

Während der Polarnacht werden die arktischen Landschaften immer wieder in beeindruckende Blautöne getaucht.

beim ersten Durchblättern fühlt man sich in die Stille und Weite des Nordens versetzt: Das Cover sowie die Innenseiten sind überwiegend in Grau, Blau und Weiß gehalten; das klare, schlichte Design gibt ausreichend Platz für Texte und Fotografien.

Viele Fotos bedecken jeweils etwa ein Drittel der meist weißen Seiten. Das lässt sie wie in einer Kunstausstellung auf weißem Hintergrund präsentiert erscheinen. Andere Abbildungen erstrecken sich über eine Doppelseite und geben ein weites Landschaftspanorama preis. Menschen sind nie abgebildet.

Bacher gelingt es, die Natur Norwegens in den besonderen Lichtverhält-

nissen am Polarkreis in Szene zu setzen. Dazu gehören beispielsweise nackte Felswände im warmen Licht der tief stehenden Sonne; strahlend weiße Eisberge, die sich aus der schwarzen See erheben; und türkis schimmernde Berge. Eine besondere Faszination üben seit jeher die Polarlichter aus. Sie auf einem Foto naturnah wiederzugeben, erfordert viel fotografische Expertise, denn neben der richtigen Ausrüstung muss der Fokus nahezu blind und gleichzeitig sehr genau gesetzt werden; der Autorin ist dies sehr gut geglückt.

Die Bilder sind nur mit Datum, Uhrzeit, Ort und Koordinaten beschriftet. Unterschriften und Seitenzahlen

fehlen auf den entsprechenden Seiten. So lenkt den Betrachter nichts ab – der Fokus liegt ganz auf den Naturaufnahmen. Informationen zu den Orten, an denen die Fotos entstanden, vermitteln die einleitenden Texte.

Trotz seines »frostigen« Themas erweist sich das Buch als erwärmendes Werk über die Natur und Schönheit des Nordens. Es lässt sich Reise lustigen und generell allen empfehlen, die sich für Naturfotografie beziehungsweise die Polarregionen interessieren.

Die Rezensentin Franziska Müschenich hat Biologie und Kognitionswissenschaften studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Köln.

PHYSIK ÜBER DIE QUANTEN- WELT HINAUS

Noch immer ist die allumfassende Theorie für Quanten und Gravitation nicht in Sicht. Dieses Buch rollt den Grundlagenstreit auf.

► In der modernen Physik koexistieren zwei grundverschiedene Theoriegebäude. Einsteins allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Schwerkraft als kontinuierliche Krümmung der Raumzeit. Die Quantenmechanik, begründet unter anderem von Niels Bohr, postuliert hingegen körnige Strukturen, die sich – was gemäß der klassischen Physik unmöglich ist – abwechselnd einmal wie Wellen, einmal wie Teilchen verhalten. Beide Theorien sind in ihrer jeweiligen Domäne ungemein erfolgreich: Die Gravitationstheorie erfasst kosmologische Phänomene, die Quantenmechanik subatomare Teilchenprozesse mit größter Genauigkeit.

Diese Zweiteilung der Grundlagenphysik wird spätestens dann problematisch, wenn die zwei Bereiche einander ins Gehege kommen. Zum einen spielen Quantenprozesse in der heutigen Kosmologie eine wichtige Rolle, um Vorgänge kurz nach dem Urknall, die Struktur der kosmischen Hintergrundstrahlung oder das Verhalten Schwarzer Löcher zu erklären. Zum anderen bezweifelt heute kaum ein Physiker, dass die Gravitationswellen, die zum Aufspüren und Abbilden Schwarzer Löcher in gigantischen Observatorien zur Überlagerung gebracht werden, ähnlich quantisiert sind wie etwa das elektromagnetische Feld: Den Quanten des Letzteren, den Photonen, entsprechen beim Schwerefeld die – vorderhand hypothetischen – Gravitonen.

Nur: Wie bringt man Quanten und Schwerkraft unter einen theoretischen Hut? Der populärste Ansatz ist die Stringtheorie; sie versucht alle Elementarteilchen als mehrdimensionale Schwingungen winziger Fäden und Flächen zu beschreiben. Eine prominente Konkurrentin dieses Ansatzes ist die Schleifenquanten-

gravitation, die vor allem Lee Smolin, der Autor des vorliegenden Buchs, entwickelt hat. In ihr spielt die Raumzeit eine ähnlich aktive Rolle wie in Einsteins Gravitationstheorie – nur erweist sich ihre Quantisierung mathematisch als ungeheuer schwierig: Raum und Zeit werden aus winzigen Schleifen aufgebaut, die komplizierte Netzwerke bilden sollen.

Das Manko all dieser Versuche ist, dass sie sich mit heutigen Mitteln kaum verifizieren lassen. Die Hoffnung, mit dem Large Hadron Collider beim CERN stringtheoretische Effekte nachzuweisen, hat sich bisher nicht erfüllt, und auch empirische Erfolge der Schleifenquantengravitation stehen bislang in den Sternen. In dieser unbefriedigenden Situation nimmt Smolin erneut den historischen Ausgangspunkt des Dilemmas unter die Lupe, nämlich die Spaltung zwischen Einsteins Gravitationstheorie und der von Bohr initiierten Interpretation der Quantentheorie. In jener legendären Bohr-Einstein-Debatte der 1930er Jahre versuchte Einstein mehrfach nachzuweisen, dass die Quantentheorie unvollständig sei; es müsse dahinter »verborgene Parameter« geben, die aus ihr erst eine richtige Beschreibung der subatomaren Wirklichkeit machen würden.

Die Quantentheorie müsse unvollständig sein, meinte Einstein

Nach Meinung fast aller Physiker unterlag Einstein damals, und Bohrs »Kopenhagener Deutung« etablierte sich als die gängige Interpretation der Quantenphysik. Diesen Prozess rollt Smolin nun abermals auf und gibt diesmal Einstein im Wesentlichen Recht: Jawohl, die Quantentheorie sei unvollständig. Sie sei geradezu falsch, wenn man sie als grundlegende Aussage über die Wirklichkeit ausbeugt und auf das Universum als Ganzes anwende. Darum müsse eine erfolgreiche Theorie von Allem zu Einstein zurückkehren und die gängige Auffassung der Quanten verwerfen.

Lee Smolin
QUANTENWELT

Wie wir zu Ende denken, was mit Einstein begonnen hat

Aus dem Englischen von Klaus-Dieter Schmidt

DVA, München
2019

390 S., € 25,-



Worin bestand Einsteins Kritik? Er verlangte von jeder physikalischen Theorie, sie müsse dem »lokalen Realismus« entsprechen, wie wir ihn im Alltag für selbstverständlich halten. Mit »Realismus« meinte Einstein die Überzeugung, dass ein wiederholt beobachtetes Ding in der Regel auch dann vorhanden ist, wenn wir es gerade nicht betrachten. »Lokal« muss dieser Realismus laut Einstein sein, weil ein an einem Ort stattfindendes Ereignis von lokalen Ursachen abhängen muss und nicht etwa von beliebig weit entfernten Vorgängen, die das lokale Ereignis augenblicklich – das hieße mit Überlichtgeschwindigkeit! – beeinflussen würden.

Tatsächlich konnten die Quantenphysiker anhand des Phänomens der Verschränkung zeigen, dass ihre Theorien mit dem lokalen Realismus unvereinbar sind, und in diesem Punkt wurde Einstein widerlegt. Das will Smolin auch gar nicht bestreiten, sich aber mit der gängigen, tendenziell antirealistischen Kopenhagener Deutung dennoch nicht abfinden. Er referiert mehrere Versuche, den Realismus zu retten und dafür die Lokalität zu opfern. So schlug der US-Physiker David Bohm in den 1950er Jahren eine Theorie vor, bei der die Quantenteilchen einem nichtlokalen Führungsfeld folgen, und Hugh Everett III postulierte, alle möglichen Zustände eines Quantensystems seien gleichermaßen wirklich, aber in parallelen Welten.

Lee Smolin gibt eine ausgezeichnete Darstellung solcher nichtlokal-realistischen Ansätze, wobei er ihre Mängel gebührend herausarbeitet. Vor allem kritisiert er überzeugend die letztlich

antirealistischen Versuche, den schillernden Begriff der Information als eine Art Grundsubstanz der Quantenwelt auszugeben. Auf diese Weise arbeitet der Autor in aller Schärfe das Problem heraus, einen halbwegs alltagsnahen Realismus mit der Quantenphysik zu vereinbaren.

Abschließend präsentiert Smolin eine Idee, wie eine realistische Theorie von Allem aussehen könnte, die jenseits sowohl der Quantenwelt als auch der einsteinschen Raumzeit liegt. Überraschenderweise weist er der Zeit die fundamentale Rolle zu. Sie verlaufe irreversibel von der Vergangenheit in die Zukunft gemäß Ursache und Wirkung, wohingegen der Raum als Schauplatz von Ereignissen ein bloß abgeleitetes, »emergentes« Phänomen sei.

Diese Idee ist erstaunlich unschön in dem Sinn, dass sie fundamentale Symmetrien aufhebt: Die Gleichberechtigung von Welle- und Teilchenaspekt verschwindet wie in der bohmischen Theorie, da sie den Teilchen Vorrang gegenüber dem abstrakten Führungsfeld verleiht, und die in der Relativitätstheorie grundlegende Symmetrie von Raum und Zeit wird zu Gunsten Letzterer preisgegeben. Dabei ist die Zeit in der Quantenmechanik gar keine Beobachtungsgröße (»Observable«), sondern bloß ein Parameter, und in Einsteins Theorie sind Vergangenheit und Zukunft vom Bezugssystem abhängige »relative« Begriffe.

Jedenfalls ist Smolins Idee gewagt. Aber vielleicht muss das ein in seinem Sinn realistischer Lösungsversuch des physikalischen Grunddilemmas sein? Oder würde eher eine »Liberalisierung« des Realismusbegriffs weiterhelfen? In der Quantenphysik sind »möglich« und »wirklich« ganz offensichtlich keine absoluten Gegensätze mehr. So wenig verlockend das klingt: Vielleicht müssen wir uns an einen Stückwerk-Realismus gewöhnen, der für unterschiedliche Wirklichkeitsbereiche separate Beschreibungsformen zulässt.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

ZOOLOGIE AALSTAUNLICHES

Lange Zeit war umstritten, ob Aale überhaupt Fische sind. Dieses Buch stellt die spannende Geschichte ihrer Erforschung vor.

► Kann man ein ganzes Buch über eine Fischart schreiben? Noch dazu über eine wie den Aal, der keine große wirtschaftliche Bedeutung hat und auch sonst auf den ersten Blick nicht mit Superlativen aufwarten kann? Tatsächlich gelingt dem schwedischen Journalisten Patrik Svensson dieses Kunststück in »Das Evangelium der Aale« sehr überzeugend. Schnell wird klar, dass am Aal – genauer am Europäischen Aal (*Anguilla anguilla*) – mehr dran ist, als die meisten denken. So bergen die Tiere trotz immer besserer wissenschaftlicher Untersuchungsmethoden bis heute manches Geheimnis. Kein Wunder, dass Aale in antiken Mythen genauso vorkommen, wie sie in der modernen Literatur eine Rolle spielen.

Schon seit jeher haben die wurmähnlichen Wasserbewohner den Menschen fasziniert. Bereits in der Antike studierte Aristoteles sie und wunderte sich darüber, keine Geschlechtsorgane finden zu können. Waren Aale also überhaupt Fische? Aristoteles vermutete, sie würden nicht geboren, sondern in einer Art Spontanzeugung dem Schlamm entspringen.

Zahllose weitere Forscher widmeten sich in den folgenden Jahrhunderten der »Aalfrage«, der Suche nach den geschlechtsreifen Tieren und vor allem ihrem Laichort. Svensson zeich-

net diese Entdeckungsreise anhand diverser Forscherpersönlichkeiten nach – darunter überraschenderweise alte Bekannte wie Sigmund Freud, der als junger Mann an der »Aalfrage« scheiterte. Dieser Misserfolg könnte mit ein Grund dafür gewesen sein, warum Freud sich später ausgerechnet der Psychotherapie zuwandte, wie Svensson überzeugend dargelegt. Auch Rachel Carson, frühe Umweltschützerin und Autorin des weltweit bekannten Klassikers »Der stumme Frühling«, hat in ihren frühen Jahren als Meeresbiologin über Aale geschrieben und mit dem Trick der Vermenschlichung die rätselhaften Tiere den Menschen nähergebracht.

Inzwischen wissen wir recht viel über Aale, kennen ihre Metamorphosen von der kleinen Weidenblattlarve über den Glas- zum Gelb- und schließlich zum geschlechtsreifen Blankaal, aber auch die vermutlichen Laichgründe in der Sargassosee, einem Atlantikgebiet vor der Küste Floridas, das nur von Meeresströmungen begrenzt wird. Jedoch hat bis heute noch kein Forscher einen Aal beim Laichen beobachtet. Und es tauchen neue Fragen auf, etwa warum die Bestände des Europäischen Aals in letzter Zeit so besorgniserregend zurückgegangen sind.

»Das Evangelium der Aale« ist ein Stück Wissenschaftshistorie, in dem zwei Geschichten kunstvoll miteinander verwoben sind: jene der Aalforschung sowie Svenssons eigene Familiengeschichte. Bindeglied ist Svenssons Vater, mit dem der Autor die Leidenschaft für Aale und das Fangen derselben teilte. Daneben ist das Buch voll von literarischen Bezügen, Mythen und kulturgeschichtlichen Betrachtungen rund um den Aal, die deutlich machen, welche Faszination diese Fische schon immer auf den Menschen ausübten. Von der ersten Seite an zieht Svenssons fundiert recherchiertes Werk seine Leser in den Bann des Geheimnisvollen. Eine wunderbare Synthese aus Literatur, Wissenschaftsgeschichte und Zoologie.

Die Rezensentin Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.



DIGITALISIERUNG CODE ALS WAFFE

Die Gefahren digitaler Kriegführung: ein Buch über die Risiken, die uns aus im Netz drohen.

► »Hallo, Opfer. Ich kenne dein Passwort: torno 2001. Das ist meine letzte Warnung. Ich schreibe dir, weil ich einen Trojaner auf einer Pornografie-Webseite installiert habe. (...) Du warst unanständig, und ich habe dich dabei gefilmt. Das schmutzige Video und deine Daten werde ich löschen, wenn du mir 500 US-Dollar in Bitcoin bezahlst.« Mit diesem Auszug aus einer Erpresser-Mail beginnt die Juristin und KI-Expertin Yvonne Hofstetter ihr jüngstes Buch »Der unsichtbare Krieg«. Zwar sei die E-Mail-Drohung nichts weiter als ein Bluff gewesen, weil die Autorin kein kompromittierendes Material auf ihrem Rechner hatte. Trotzdem zeigt das Beispiel das riesige Bedrohungs- und Zerstörungspotenzial von Schadsoftware.



Die Digitalisierung habe nicht nur unser Privatleben und unseren Arbeitsalltag fest im Griff, mit ihr durchlaufe die Kriegführung die nächste Evolutionsstufe: »Der Umbau der Gesellschaft in einen sozialen Megacomputer erlaubt es scheinbar, auf klassische militärische Mittel zu verzichten und dennoch Kriege zu führen.« Digitalisierung mache neue Mittel von Macht und Gewalt möglich: Digitale Spionage, Sabotage und Online-Subversion seien die Operationen, die im 21. Jahrhundert Alternativen zu militärischen Einsätzen bieten. Die Kriege von morgen würden auf

dem »Schlachtfeld der Umgebungsintelligenz« ausgetragen.

Die Tatsache, dass der Code zur Waffe werde, wie die Autorin konstatiert, führe zu einer geopolitischen Neuordnung: Staaten werden mit ihrer digitalen Infrastruktur verwundbar, kleine, nichtstaatliche Akteure wie Hackergruppen und Trollfabriken könnten sich der Waffe bemächtigen. Auf der anderen Seite können Regierungen solche Hackerorganisationen beauftragen, andere Staaten anzugreifen – zum Beispiel, um Kraftwerke zu sabotieren. Diese »Externalisierung staatlicher Angriffe« an Private und die damit einhergehende »Ökonomisierung der öffentlichen Sicherheit« hält Hofstetter nicht nur für eine Gefahr innerhalb der Nationalstaaten, sondern auch für das gesamte internationale System.

Beispiel WannaCry: Im Mai 2017 hatte das Schadprogramm rund 200 000 Rechner in 150 Ländern auf dem Globus infiziert und ganze Informationssysteme in Krankenhäusern lahmgelegt. Die betroffene Microsoft-Sicherheitslücke war lange nur dem US-amerikanischen Auslandsgeheimdienst NSA bekannt. Sicherheitsbehörden, erklärt Hofstetter, sammeln Sicherheitslücken von Computerprogrammen, um bei Bedarf in jeden Rechner weltweit einbrechen zu können. Das Problem: Die NSA wurde selbst Opfer eines Datenklau. Eine Hackergruppe mit dem treffenden Namen »Shadow Brokers« hatte die streng geheime Information entwendet und im April 2017 im Internet veröffentlicht. Wenige Tage später schlug WannaCry zu. Dass das Angriffstool aus dem Waffenschrank der NSA kam, ist nur eine von vielen unübersichtlichen Schlachtfeld.

Die Autorin beleuchtet das unwägbar Terrain von Desinformationskampagnen über Doxing (so nennt man die Veröffentlichung privater Informationen) bis zu autonomen Waffensystemen und hybrider Kriegführung. Und sie tut das mit einer erzählerischen Leichtigkeit, die man von ihren Bestsellern »Das Ende der Demokratie« oder »Sie wissen alles« kennt. Einige Passagen, etwa wenn die Autorin

Sachverhalte zeitlich rekonstruiert, sind fesselnd und lesen sich wie ein Thriller. Das ist die Stärke des Buchs: die Fähigkeit der Autorin, die analytische Ebene mit einer erzählerischen zu verschränken. Die komplexen Techniken werden auch Laien verständlich erklärt.

Trotzdem erfahren die Leser in diesem Buch nicht viel Neues. Die Privatisierung des Cyberkriegs und die Hackergefahren aus dem Netz sind mittlerweile hinreichend bekannt und beschrieben, etwa in Adam Segals »The Hacked World Order« (2016) oder in dem von Constanze Kurz und Frank Rieger verfassten Buch »Cyberwar – Die Gefahr aus dem Netz«, das im Jahr 2018 erschienen ist. Hofstetter fügt dem nicht viel hinzu.

Sollte die Bundesregierung Cyberattacken mittels »Hackback« vergelten?

Details etwa zu Trumps Skandalvideo aus dem US-Präsidentenwahlkampf 2016 (»grab them by the pussy«) hat man schon häufiger gelesen, und so wirken diese Ausführungen stellenweise etwas ermüdend. Das durchaus diskussionswürdige Plädoyer, Europa solle »mehr Demokratiepoltik wagen«, bleibt vage und in seiner Formelhaftigkeit nicht hinreichend begründet.

Trotz dieser Schwächen ist es ein solides Buch, das den Lesern die Gefahren der digitalen Welt vor Augen führt und ein Problembewusstsein für die geopolitischen Verwerfungen schafft. Wer künftig mitdiskutieren will, ob die Bundesregierung mit einem »Hackback« Vergeltungsangriffe auf Cyberattacken durchführen sollte, der sollte dieses Buch lesen.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«. Vor Kurzem erschien sein Buch »Speichern und Strafen: Die Gesellschaft im Datengefängnis« (C.H.Beck).

ANTHROPOLOGIE SCHICKSAL BESIEGELT?

Für den Evolutionsbiologen Kurt Kotschal besteht wenig Zweifel daran, dass unsere Art aussterben wird.

► Kurt Kotschal ist überzeugt davon, dass Menschen ihr Leben lang darum bemüht sind, ihre evolutionär bedingten Prägungen unter Kontrolle zu bringen. Deshalb hält er es für sinnvoll, diese Anlagen und Antriebe genauer kennen zu lernen. In seinem neuen Buch »Mensch« möchte er seinen Leser(inne)n dies auf dem aktuellen Stand der evolutionsbiologischen Forschung ermöglichen. Kotschal ist Professor für Verhaltensbiologie an der Universität Wien, Leiter der Konrad Lorenz Forschungsstelle und Mitbegründer des Wolfsforschungszentrums im österreichischen Ernstbrunn. Er hat bereits mehrere Bücher veröffentlicht, in denen er sich vor allem mit der Beziehung zwischen Mensch und Tier, insbesondere zwischen Mensch und Hund, befasst.

Menschen, betont Kotschal, gehören zu den Primaten, und ihre nächsten Verwandten sind die anderen Menschenaffen. Zentrale Schlüsselinnovationen, die den Menschen hervorbrachten, seien die Sprachentwicklung und die Fähigkeit zum symbolischen Denken gewesen. Unsere Vorfahren überlebten, indem sie hochkomplexe Sozialsysteme entwickelten, in denen Kooperation erforderlich wurde. Dies brachte die Sprachfähigkeit und ein großes Stirnhirn zur Impulskontrolle hervor; Letzteres lieferte quasi als Nebenprodukt die für den Menschen

typische Bewusstseins- und Reflexionsfähigkeit. Unser hoch spezialisiertes Gehirn scheint aber auch Nachteile zu haben. So meint der Autor, das menschliche Gehirn sei heute nicht mehr flexibel genug, um sich an eine naturferne Umwelt weitgehend ohne Pflanzen und Tiere anzupassen, wie sie in den Städten anzutreffen ist. Kotschal sieht viele Bürger vom »Nature-Deficit-Syndrom« bedroht, das mit diversen mentalen Erkrankungen einhergehe.

Häufig benutzt der Autor den Begriff »menschliche Universalien«. Darunter versteht er Merkmale, die bei diversen Ethnien unabhängig von der Kultur vorhanden und damit anscheinend ein evolutionäres Erbe sind. Es sind allerdings mitnichten Alleinstellungsmerkmale des Menschen, denn viele von ihnen treten auch bei Tieren auf, etwa der Vermehrungsdrang und die Vaterschaftssicherung. Auch weisen Universalien eine gewisse individuelle und kulturelle Variationsbreite auf. Kotschal nennt Beispiele wie den Ausdruck von Emotionen, das Kommunikationsverhalten, das Vermenschlichen, die Liebe zu Natur und Tieren oder das Bedürfnis nach Transzendenz. Streben nach Macht, Abgrenzung von anderen und Gier nach Reichtum sind dem Autor zufolge die »Basis-Universalien«, die angepasst an den sozioökonomischen und ökologischen Kontext die soziale Organisationsform von Gesellschaften bestimmen.

Der Autor widmet sich auch politischen Themen wie dem Fremdenhass. Er sieht durchaus eine genetische Veranlagung zu »vorsichtigem Interesse an Unbekanntem«, das er aber keineswegs als genetisch terminierte Angst vor Fremden fehlinterpretiert wissen will, um nicht ein wissenschaftlich fundiertes Argument für die Rechtfertigung von Rassismus und Rechtsextremismus zu liefern. Ganz im Gegenteil weist er darauf hin, dass sich das vorsichtige Interesse häufig in freundliche Gastfreundschaft wandelt. Seiner Meinung nach können nur starke Demokratien für Toleranz gegenüber Fremden sorgen. Bildung und kluge Politik sind für ihn die Mittel,

solchen Herausforderungen zu begegnen. Auch die ökologischen und ökonomischen Probleme der Menschheit seien nur damit zu bewältigen.

Kotschal fühlt sich als Wissenschaftler der Realität verpflichtet. Eine realistische Sicht auf unser evolutionäres Erbe sei wichtig, damit wir uns von altsteinzeitlichen Verhaltensantrieben frei machen könnten. Da der Mensch immer wieder den Eigennutz über das Gemeinwohl stelle und Kurzzeitvorteile über Langzeitstrategien, könne er kaum zum Wohl aller auf eigene Vorteile wie Wohlstand und

Die Evolution verfolgt kein bestimmtes Ziel

Mobilität verzichten. Die Hoffnung, mit neuen Techniken die gegenwärtigen ökologischen Probleme in den Griff zu bekommen, hält der Autor für einen »Kopf-in-den-Sand-Optimismus«. Daraus leitet er die Überzeugung ab, unsere Art werde über kurz oder lang aussterben. Ungeachtet des menschlichen Wunsches, dem Leben einen Sinn zuzuschreiben, verfolge die Evolution kein bestimmtes Ziel. Durch Anpassung an neue Lebensumstände und Anforderungen entstünden neue Arten, der Verlust einer Spezies werde langfristig durch andere ersetzt. So zeichnet Kotschal auf die Frage, wie es für uns weitergehen kann, ein eher düsteres Bild.

Insgesamt ist das Buch gut zu lesen, allerdings reißt der Autor bereits in der Einführung viele fachspezifische Themen an. Ein kurzer Hinweis auf das sehr gute und ausführliche Glossar am Ende des Buchs wäre an dieser Stelle sinnvoll gewesen. Wer sich aus evolutionsbiologischer Sicht für den Menschen und seine irdischen Mitbewohner interessiert, wird mit diesem Buch auf seine Kosten kommen. Doch selbst ausgesprochen optimistische Leser dürften nach der Lektüre einige Zeit benötigen, um ihren positiven Blick auf die Zukunft wieder zurückzugewinnen.

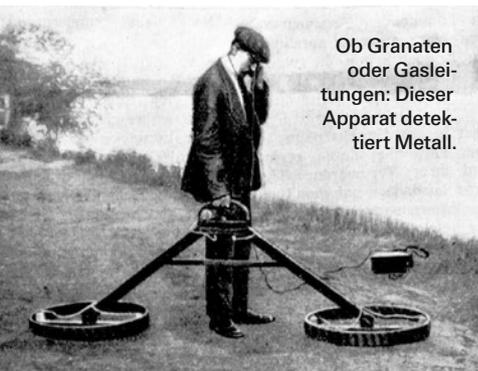
Die Rezensentin Tanja Neuvians hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.



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

HANDLICHER DETEKTOR FÜR FRIEDLICHE ZWECKE

1920



Ob Granaten oder Gasleitungen: Dieser Apparat detektiert Metall.

»In der ›Umschau No. 30 (1919) ist ein Apparat zur Entdeckung eingegrabener Geschosse beschrieben. Sein Erfinder, Ingenieur Chanoit, hat ihn weiter verbessert sowie leichter transportabel gemacht und schlägt jetzt eine friedliche Verwendungsart vor. Er soll dazu dienen, die Verschlüsse von Wasser-

und Gasleitungen aufzusuchen, die unter der Straßenoberfläche liegen, ohne daß es dabei nötig wäre, auf größere Strecken hin den Straßendamm aufzureißen. Das neue Modell kann von einem Manne benützt werden.« *Die Umschau 12, S. 233*

BILLIG IST BESSER – DANK FORTSCHRITT

»In den meisten Fabriken werden Maschinen im Verlaufe von zehn Jahren abgeschrieben. Können sie länger verwendet werden, so arbeiten sie außerordentlich billig. In Amerika nimmt man von jeher für viele Maschinen billigeres Material als bei uns. Man geht von der Ansicht aus, daß eine Maschine nicht länger als fünf Jahre arbeiten soll, da bei den heutigen schnellen Fortschritten der Technik die meisten Maschinen doch schon nach wenigen Jahren veraltet sind. In Deutschland sind während des Krieges die Maschinen besonders stark in Anspruch genommen worden. Man hat dabei die Beobachtung gemacht, daß es durchaus nicht nötig ist, alle Maschinenteile aus den bisherigen besten und teuren Materialien herzustellen.« *Technische Monatshefte 3, S. 96*

EDLES JAGDWILD WIEDER HEIMISCH

»Etwa vom 16. Jahrhundert an ging der Bestand der Steinböcke in den Schweizeralpen stetig zurück und seit ca. 100 Jahren ist das seltene Wild ganz ausgestorben gewesen. Den Bestrebungen zweier St. Galler Naturfreunde ist es zu danken, daß Versuche unternommen worden sind, den Steinbock in den Schweizer-Alpen wieder einzubürgern. Die Tatsache, daß die beiden alle Eigenheiten dieses Alpenwildes berücksichtigten, führte zum Erfolg. 1911 wurden die ersten 5 Stück Steinwild ausgesetzt. [Es] wurden dann alljährlich in den Bergen junge Kitzen geboren, sodaß heute schon ein Bestand von etwa 40 Stück sich tummelt. In 20 Jahren vielleicht wird man in der Schweiz wieder auf die edle Steinbockjagd gehen können.« *Die Umschau 10, S. 191*

ATOMBOMBEN KÖNNEN ERDBEBEN VERHINDERN

1970

»Im Zuge der zahlreichen unterirdischen Atomversuche, die in den USA und Rußland stattfinden, wurde auch deren Einfluß auf die Tektonik der Erdkruste geprüft. Die bisherigen Experimente lassen die Hoffnung zu, daß man größere Erdbeben dadurch verhindern kann, daß man mit Atomexplosionen entlang der Bruchzonen die Spannungen frühzeitig ausgleichen kann, ehe sie zu Katastrophen führen. Natürlich bringt das kleinere Verschiebungen einzelner Landflächen mit sich. Man sollte aber kleine lokale Beben in Kauf nehmen, wenn man größere Katastrophen damit verhüten kann.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 23(3), S. 120*

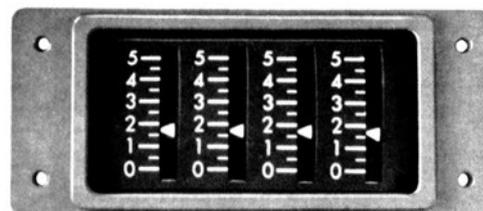
INSEKTEN HOLEN LUFT BEI PFLANZEN

»Einige unter Wasser lebende Insektenarten, wie zum Beispiel die Larven und Puppen der Sandmücke *Notiphila riparia* und der Schnake *Erioptera squalida*, erlangen einen Teil des von ihnen benötigten Sauerstoffs aus den luftgefüllten Interzellularräumen der Wurzeln von Wasserpflanzen. Sie durchbohren deren Epidermis mittels ihrer beiden mit eigentümlichen Spitzen versehenen, ausstülpbaren Atemöffnungen. Die Larven leben im schlammigen Gewässergrund, dessen Sauerstoffgehalt offenbar für ihre Atmung nicht ausreicht.« *Die Umschau 6, S. 186*

ANALOG STATT DIGITAL-FANATISCH

»Die in vielen Fällen unbestreitbaren Vorteile der numerischen Anzeige, verbunden mit den spektakulären Fortschritten der Digitaltechnik, bewirkten vielfach eine Art Übereifer auf diesem Gebiet. Ein solcher Übereifer, um nicht zu sagen ›Digital-Fanatismus‹, ist natürlich in der modernen Technik fehl am Platze. Gerade bei der Anzeige von Meßwerten gibt es genügend Fälle, in denen die analoge Anzeige zweckmäßiger ist als die digitale. Ist es doch so, daß dem Operateur schon ein flüchtiger Blick auf die Zeigerstellung sofort sagt, ob ein Wert richtig liegt. Diese Art der *sinnfälligen* Anzeige ist z. B. die einzig annehmbare in Flugzeugkanzeln, wo der Pilot unmöglich in der Lage wäre, einige Dutzend drei- oder mehrstellige Digitalinstrumente abzulesen und sich bei jeder Zahl zu überlegen, ob sie normal liegt.« *Elektronik 3, S. 101*

Analoges Instrument zur Anzeige von Vibrationen in den vier Triebwerken einer Boeing 747.



UNTERSCHÄTZTER NUTZEN DES SCHLAFS

Der Anthropologe Herman Pontzer erläuterte, wie die evolutionäre Anpassung des Menschen an hohe körperliche Aktivität heutige Zivilisationskrankheiten begünstigt. (»Zum Laufen geboren«, »Spektrum« Januar 2020, S. 46)

Florian Schäfer, Kassel: Bei dem Artikel fiel mir ein Satz ins Auge, den ich ungern so stehen lassen würde: »Rund um den Globus brauchen Erwachsene rund sieben Stunden Schlaf pro Nacht und damit weitaus weniger als andere Menschenaffen.« Dass wir weniger Schlaf benötigen als andere Menschenaffen ist zwar korrekt, jedoch sind sieben Stunden nicht unbedingt ausreichend. Besonders der Schlafforscher Matthew Walker weist in seinem Buch »Why We Sleep: Unlocking the Power of Sleep and Dreams« darauf hin, dass man regelmäßig eher acht bis neun Stunden schlafen sollte. Er widmet sogar ein ganzes Kapitel der Studie zum Volk der Hazda, welche im Artikel aufgegriffen wird, und beschreibt, warum die Schlussfolgerung falsch ist, wir würden mit sieben Stunden Schlaf auskommen.

Das Thema Schlafmangel ist viel zu wenig präsent in unserer Gesellschaft. Wobei die möglichen Folgen, nach den Angaben von Walker, verheerend sind. Dazu gehören Immunschwäche, Depression und ein erhöhtes Risiko für Alzheimerdemenz oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen.



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

IRREFÜHRENDE VERANSCHAULICHUNG

Jüngste Experimente machen zusammen mit theoretischen Ansätzen Hoffnung auf neuartige supraleitende Materialien ohne elektrischen Widerstand. (»Vorstoß zur Raumtemperatur«, »Spektrum« Januar 2020, S. 12)

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.

Jürgen Gutowski, Bremen: Ich bin fast ein wenig schockiert über den Kasten »Kurz erklärt: Supraleitung« auf S. 16 im Artikel. Schon meine Fünftsemester warne ich im Grundkurs Festkörperphysik vor dem suggestiv so schön scheinenden Laienbild, dass ein Cooper-Paar aus zwei Elektronen besteht, von denen eines »ein weiteres Elektron hinter dem ersten herzieht«, wie es in Bild 2 heißt.

Cooper-Paare werden praktisch ausschließlich durch je zwei Elektronen (im konventionellen Supraleiter über Phononenwechselwirkung) mit genau entgegengerichteten Impulswerten und Spins gebildet, und das natürlich jeweils nur für ultrakurze Zeit, weil sie ja gerade wegen der entgegengesetzten Bewegungsrichtungen »auseinanderfliegen«. Ein in die Paarbildung involviertes Elektron wechselt somit ununterbrochen seine Partner für die Wechselwirkung.

SICHERHEITSHINWEISE WÄREN HILFREICH

Im Rahmen ihrer »Chemischen Unterhaltungen« machten die Chemiedidaktiker Matthias Ducci und Marco Oetken, dieses Mal zusammen mit ihrer Kollegin Rachel Fischer, Fingerabdrücke auf verschiedenen Oberflächen sichtbar – mit Hilfe von Elektrolyse und Alltagsgegenständen. (»Spurensicherung mit Bleistift, Büroklammer und Blockbatterie«, »Spektrum« Dezember 2019, S. 60)

Florian Buth, München: Das Konzept der Kolumne finde ich als Chemiestudent richtig gut und wichtig! Nun bricht der Artikel durch die Verwendung von Wasserglas, Bleistift und Tafelmesser mit dem Grundsatz, Experimente von Lebensmitteln fernzuhalten. Ein eindeutiger Abschnitt über die sachgerechte Entsorgung der verwendeten Substanzen (Lösungen stark verdünnt in den Abfluss) und die Reinigung der Gegenstände hätte dies aufwiegen können. Zudem wäre der Sicherheitshinweis angebracht, dass die Elektrolyse der Cyanidoferrate nicht ohne Aufsicht weiterlaufen oder mit starken Haushaltsreinigern und erhöhten Temperaturen kombiniert werden sollte. Ich freue mich schon auf die nächste »Chemische Unterhaltung«!

Undichte Stellen

Nicht alle Parallelwelten sind streng parallel.

Eine Kurzgeschichte von George Zebrowski

Da Felix wieder einmal nicht ans Telefon ging, humpelte Bruno schließlich über die Straße zum Haus seines Freundes und hielt ihm den rätselhaften Zahlungsbeleg unter die Nase. »Was soll der Quatsch, Felix?«

Obwohl Bruno schon lange Rentner war, erinnerte er sich noch gut an die Freuden seines früheren Klempnerberufs. Er liebte das kunstfertige Ausgestalten von Wasserleitungen, oft ganz ohne Notwendigkeit, nur wegen des schönen Aussehens, mit Edelstahl, Kupfer oder mit speziellen Verbindungsstücken aus Kunststoff. Es war schon eine ganze Weile her, dass jemand ihn um eine Reparatur gebeten hatte oder auch nur um einen Kostenvoranschlag. Doch jetzt war eine Zahlung seines langjährigen Freundes, eines emeritierten Physikprofessors, eingegangen, mit einem »Besten Dank dem Installateur« als Betreff.

Felix sah Bruno verständnislos an. »Aber ... aber du hast die Arbeit erledigt, während ich unterwegs war.«

»Hab ich nicht«, erwiderte Bruno.

»Hast du das etwa vergessen?«, fragte Felix den auf einmal fremd wirkenden Freund.

»Ich habe dir keine Rechnung geschickt«, beharrte Bruno.

»Ganz wie du meinst«, versetzte Felix frostig und schlug Bruno die Tür vor der Nase zu.

Einen Monat später wiederholte sich die Szene, und diesmal wedelte Bruno mit einer bezahlten Rechnung für Badewannen-Armaturen, die er nicht installiert hatte.

Beim dritten Mal wurde Felix nachdenklich: »Man kann ja nicht leugnen, dass es diese Rechnungen gibt, und jede ist unterschrieben von uns beiden. Also: Wer veräppelt uns da, Bruno?«

»Vielleicht bist du's?«, meinte Bruno.

»Du warst das wirklich nicht?«, fragte Felix. »Sind wir beide denn schon so vergesslich geworden?«

Bruno lehnte sich auf dem Sofa zurück und knetete sein krankes Knie, während sie auf die Papiere starrten, die vor ihnen auf dem Couchtisch lagen.

»Weißt du, Bruno«, sagte Felix, »ich bin ja nur ein mittelprächtiger Physiker, aber ich habe eine tollkühne Erklärung für das alles.«

»Wirklich? Das ist ja ganz was Neues.«

»Du gleitest, Bruno.«

»Ich gleite?«

»Jawohl, durch die Summe aller deiner Geschichten.«

»Meine was?«

»Du rutschst quer durch die Wahrscheinlichkeiten.

Irgendeine Version von dir hat all diese Arbeiten ausgeführt.«

»Oh ja, und du hast mich dafür bezahlt«, seufzte Bruno. Ihn bekümmerte, offenbar die ersten Anzeichen von Wahnvorstellungen und geistigem Verfall bei seinem Freund feststellen zu müssen.

»Wir können es nachprüfen«, schlug Felix vor.

Sie gingen in sein Badezimmer und sahen unter dem Waschbecken nach, wo der neue Abfluss und die Wasserleitungen vor höchster Handwerkskunst nur so strahlten. Dann begutachteten sie die tadellose Ausführung von Dusche und Bad. Felix bückte sich unter die Wanne und betastete den Abfluss und die Leitungen. »Oh ja, sauber und trocken«, murmelte er zufrieden und sah sich auf dem Boden um. »Aber was haben wir denn da!«, rief er plötzlich und nahm ein langes graues Haar von den Fliesen. »Das ist sicher von dir!« Er stand auf, hielt das Haar gegen das Licht und sagte: »Weißt du, Bruno, wenn das stimmt, wirst du in der Physik berühmter werden, als ich das je sein könnte. Das ist die klassische, makroskopische Version von Feynmans Pfadintegral und Schrödingers Superposition der Wellenfunktionen.«

»Was sagt schon ein einzelnes Haar aus?«, fragte Bruno skeptisch.

»Eines ist genug ... und ich werde es mathematisch beweisen«, antwortete Felix.

»Vielleicht wird noch eine Rechnung kommen«, meinte Bruno misstrauisch.

Felix seufzte. »Du hast Recht, ein Fachartikel mit der richtigen Mathematik und einem einzelnen Haar wird wohl nicht reichen. Es könnte auf mehrere Arten hierhergelangt sein, und schon gibt es endlose Debatten. Wir werden sehen, ob es noch einmal passiert, aber selbst das wäre nicht genug.«

»Also können wir im Moment nicht viel tun«, sagte Bruno in der Hoffnung, ein Aufschub würde den offensichtlich überarbeiteten Freund von seinen Wahnideen befreien.

»Aber trotzdem ...«, grübelte Felix mit einem leicht irren Glitzern in seinen Augen. »Stell dir all die unendlich divergierenden Momente vor, wie sie an jeder Kreuzung eigene Wege gehen, jeden Tag, jede Minute, jeden Sekundenbruchteil, überall in allen Galaxien! Das ist doch faszinierend, davon einmal Zeuge zu sein!«

»Warum soll das ausgerechnet uns passieren?«, fragte Bruno, um seinem verwirrten Freund einen Gefallen zu tun.

»Warum geschieht überhaupt etwas in der Quantenwelt? Niemand weiß warum, außer dass es passiert und sich beschreiben lässt. Sogar vorhersagen kann man es und für technische Anwendungen nutzen. Die Frage nach dem Warum ist da sinnlos.«

Bruno fragte: »Und warum sind ausgerechnet wir in der Lage, es zu bemerken?«

»Irgendein Ausrutscher«, mutmaßte Felix.

»Aber dieses ... dieses Überschwappen vom Kleinen zum Großen ...«

»Der Mikrokosmos beeinflusst den Makrokosmos.«

»Sind solche Divergenzen denn häufig?«, fragte Bruno ungläubig.

»Es könnte sich um endliche Mengen handeln.«

Zermüht und verwirrt ging Bruno heim und schlief schlecht. Unter anderem träumte er von den Objekten in der Arbeitswelt seines Freundes – eine riesige graue Unendlichkeit von raumlosen Abständen und blinzelnden Punkten, die mit der Unterseite eines Waschbeckens wenig gemein hatten. Er wachte mit dem Gedanken auf, dass das eine mit dem anderen gar nichts zu tun haben konnte, ungeachtet der Tatsache, dass die sichtbare Welt von einem unsichtbaren Quantenbereich abhängt.

Nachdem er aufgestanden war, setzte er sich an den Schreibtisch und arbeitete an den Fahnen der neuen Ausgabe seines Physikbuchs, die irgendwie unvertraut anmuteten, als hätte jemand anderer sie geschrieben. Aber schließlich ließ er sich auf ihre doch altbekannten und inzwischen oft überarbeiteten Details ein. »Wahrscheinlichkeiten ähneln den dünnen Seiten eines unendlichen Buchs«, schrieb er an den Rand des Manuskripts, »und manchmal kleben sie zusammen, gehen sogar ineinander über. Das mag durchaus die Realität sein, die menschliche Entscheidungen ermöglicht, wodurch wir einem strengen Determinismus durch eine Form von begrenztem Chaos entkommen ...«

Ein kluger Gedanke, sagte er sich.

Klebriger Stoff, undichte Stellen.

Manche Weltseiten hafteten aneinander, andere nicht. Lächelnd nahm er ein Buch zur Hand und blätterte rasch die Seiten durch, wobei er sich fragte, inwiefern die Struktur des Universums einer Klempnerarbeit glich ...

Leider klopfte gerade jetzt jemand an seine Tür; Bruno ärgerte sich über die Unterbrechung so früh am Morgen.

Er öffnete die Tür und erkannte Felix, seinen alten Schulfreund, mit einer Werkzeugkiste unter dem Arm.

»Also, da bin ich«, sagte Felix lächelnd. »Ich hoffe, du hast dein Spülbecken nicht nur kaputtgemacht, damit ich dich mal wieder besuchen komme.«

Bruno war einen Augenblick verwirrt, aber dann trat er beiseite, und der Klempner humpelte herein. ◀

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 495, S. 292, 2013

DER AUTOR

George Zebrowski ist ein preisgekrönter Autor und Herausgeber von Sciencefiction-Geschichten, Essays und Gedichten. Gemeinsam mit der Sciencefiction-Autorin Pamela Sargent hat er unter anderem Romanfassungen von Star-Trek-Episoden verfasst.

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: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: 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. Markus Fischer, Dr. Julia Freund, Dr. Claudia Hecker, 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), des VCBG 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 Werbung der Fa. RSD Reisedienst 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: © 2020 (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 Floreck, Vice President Magazines: Stephen Pincock



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU



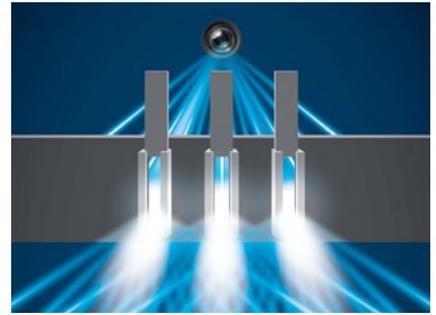
GRÜNE GENTECHNIK

Seit rund 40 Jahren verändern Forscher das Erbgut von Pflanzen mit molekularbiologischen Verfahren – anfangs per Einfügen von Fremdgenen, heute oft durch gezieltes Verändern einzelner Nukleotide. Damit lassen sich etwa herbizid- oder insektenresistente, trocken-tolerante oder ertragreichere Kulturgewächse schaffen. Die Nachfrage danach steigt: Die weltweite Anbaufläche für solche Pflanzen ist auf etwa 200 Millionen Hektar gewachsen. Dennoch bleibt sie in Deutschland umstritten.



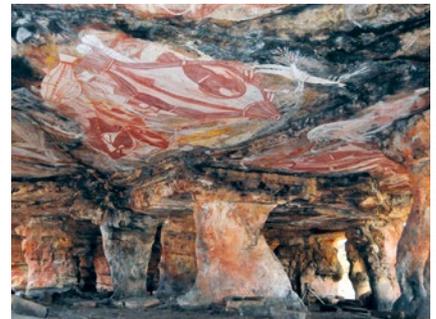
FEUER AM HIMMEL

Großfeuer wie die verheerenden Buschbrände in Australien können kilometerhohe Feuersäulen mit ungeheuren Windgeschwindigkeiten hervorrufen: Feuertornados. Lassen sie sich bald vorhersagen?



DOPPELSPALT 3.0

Wenn Physiker quantenmechanische Überlagerungen berechnen, vernachlässigen sie einige subtile Effekte. Doch raffinierte Versuche mit einem Dreifachspalt zeigen: Manchmal weicht die Realität von der Theorie stärker ab als gedacht.



AUSTRALISCHE FELSENKUNST

Die Aborigines malen seit Jahrtausenden Bild über Bild auf Felswände. Forscher haben das Motivgewirr mit neuen digitalfotografischen Methoden analysiert und verblasste Malereien rekonstruiert. Damit konnten sie auch das Alter der Werke genauer bestimmen – und erlebten Überraschungen.

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](https://www.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. Inlandspporto (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, Leserexkursionen 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.

Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR
04
23.01
2020

- > Katzen würden Tote fressen
- > Ältester bekannter Krater ist halb so alt wie die Erde
- > Masern im Kongo: Nothilfe allein reicht nicht

TITELTHEMA: KAKAO

Die größte Bedrohung, seit es Schokolade gibt

Schokolade könnte in einigen Jahren zur Mangelware werden. Vom Klimawandel geschwächte Kakaobäume in Westafrika sind immer öfter von Seuchen befallen.

ASTROPHYSIK

Was am Hype um Beteigeuze wirklich dran ist

CORONAVIRUS

Wie gefährlich ist das neue Coronavirus aus China?

ZAHLENTHEORIE

Das Collatz-Problem, Sirenen-gesang für Mathematiker

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

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

