

Spektrum

der Wissenschaft

Schwarzen Löchern entkommen

Wurmlöcher lösen ein
hartnäckiges Paradoxon

ERNÄHRUNG Wie lässt sie sich nachhaltig gestalten?

MATERIALWISSENSCHAFT Das ideale Glas

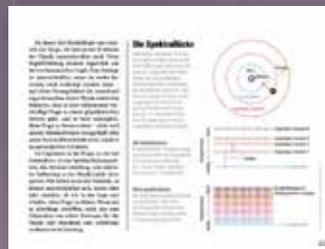
VERERBUNG Warum manche Lurche riesige Genome besitzen

Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**

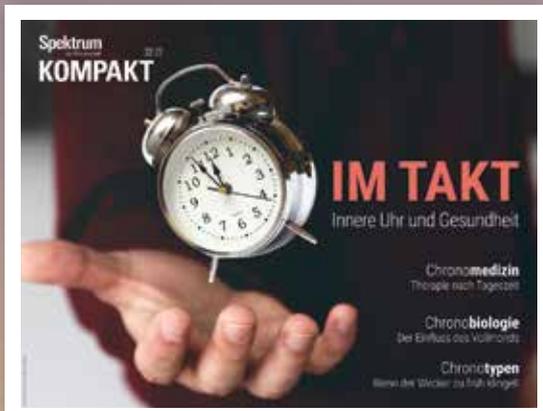


Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung.

Wählen Sie unter mehr als 300 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



Ausgewählte **Spektrum** KOMPAKT gibt es auch im Printformat!



Hier bestellen:
E-Mail: service@spektrum.de
[Spektrum.de/aktion/kompakt](https://www.spektrum.de/aktion/kompakt)



EDITORIAL IN EIGENER SACHE

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

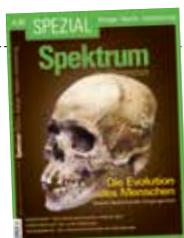
► Sicher ist Ihnen aufgefallen, dass wir den Umfang der vorliegenden Ausgabe reduziert haben. Die massiv gestiegenen Kosten für Papier, Energie und Transport ließen uns leider keine andere Wahl.

Wir möchten Ihnen die fehlenden Artikel selbstverständlich nicht vorenthalten, sondern bieten sie Ihnen auf papierlosem Weg an: Sie finden die Rezensionen, die Rubriken »Schlichting!« und »Futur III« sowie einen Artikel über gasförmige Botenstoffe im Gehirn vollständig online unter <https://www.spektrum.de/plus/>. Bedauerlicherweise können wir Ihnen zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht sagen, wie lange diese Reduzierung notwendig sein wird. Die jeweiligen aus dem Heft ausgelagerten Artikel werden wir Ihnen aber stets online zur Verfügung stellen und im Heft ankündigen.

Der Onlinezugriff bietet Ihnen zudem die Möglichkeit, direkt zu verwendeten Quellen oder weiterführenden Artikeln zu gelangen. Wir bieten Ihnen alle Annehmlichkeiten, die ein Text im Internet bieten kann. Wenn Sie Fragen zu diesem Angebot haben, dürfen Sie mir gerne an redaktion@spektrum.de schreiben.

Abgesehen davon versorgen wir Sie in diesem Heft wie gewohnt mit fundierten Informationen aus der Wissenschaft – etwa mit dem Start unserer beiden Serien zu »Schwarzen Löchern« und zur »Zukunft der Ernährung«. Und wie immer finden Sie in der Dezemberausgabe Hintergründe zu den aktuellen Nobelpreisen. Wir freuen uns und sind ein wenig stolz darauf, dass immerhin zwei der diesjährigen Laureaten in der Vergangenheit für »Spektrum« geschrieben haben: Svante Pääbo über das Genom unserer Vorfahren, Anton Zeilinger über quantenphysikalische Phänomene. Gerade diese beiden wissenschaftlichen Gebiete werden auch in Zukunft mit Sicherheit äußerst spannend und faszinierend bleiben.

Eine geruhsame Vorweihnachtszeit und Zeit zum Lesen wünscht Ihnen



NEU AM KIOSK!

Spektrum SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung
4.22 blickt in die faszinierende Vergangenheit unserer Spezies – unter anderem in einem Interview mit dem diesjährigen Nobelpreisträger Svante Pääbo.

IN DIESER AUSGABE



NICK HIGGINS / SCIENTIFIC AMERICAN

AHMED ALMHEIRI

Der theoretische Physiker untersucht seit mehr als zehn Jahren das Innere und die Umgebung Schwarzer Löcher aus dem Blickwinkel der Quanteninformation. Seine neuen, erstaunlichen Erkenntnisse schildert er ab S. 12.



LUDIVOC BERTHIER, CAMILLE SCALLIET

Um herauszufinden, wie sich ein ideales Glas erzeugen lässt, nutzen die beiden theoretischen Physiker aufwändige Computersimulationen (ab S. 60).



CAROLINE GUTTMAN FOR QUANTA MAGAZINE

JUNE HUH

Ursprünglich wollte er Dichter werden. Dann begann er ein Physikstudium, in dem er erst spät seine Leidenschaft für die Mathematik entdeckte. Nun gilt er als absolute Koryphäe auf dem Gebiet (S. 74).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

20 FORSCHUNG AKTUELL

Physiker mit Fernwirkung
Nobelpreis für Experimente mit Verschränkung.

Baukasten für Reaktionen
Click-Chemie und Bioorthogonalität ausgezeichnet.

Erbgut der Frühmenschen
Höchste Ehrung für paläogenetische Studien.

29 IMPRESSUM

30 ZEITREISE

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Energiewende in der Krise
Autonome Behörden können Wandel vorantreiben.

59 FREISTETTERS FORMELWELT

Ist gleich gleich gleich?
Wann sind in der Mathematik zwei Dinge identisch?

82 VORSCHAU

Unter spektrum.de/plus/ finden Sie folgende Artikel:

**GASOTRANSMITTER
FLÜCHTIG, GIFTIG,
ÜBERLEBENSWICHTIG**

Von Janosch Deeg

**SCHLICHTING!
Licht im Schatten
einer Flamme**

REZENSIONEN

FUTUR III – KURZGESCHICHTE

12 QUANTENGRAVITATION INSELHOPPING ÜBER DEN EREIGNISHORIZONT

Serie »Schwarze Löcher« Teil 1 Ein hartnäckiges Rätsel über Schwarze Löcher lässt sich lösen, wenn ihr Inneres durch Wurmlöcher miteinander verbunden ist.

Von Ahmed Almheiri

32 ZOOLOGIE **GENETISCH AUFGEBLÄHT**

Manche Amphibien besitzen ein riesiges Genom, durchsetzt von Erbgutschnipseln, die sich unkontrolliert vermehren. Diese genetische Last behindert die Tiere in ihrer Entwicklung.

Von Douglas Fox

42 LEBENSMITTEL **GESUND ESSEN, OHNE DIE UMWELT ZU ZERSTÖREN**

Serie »Nachhaltige Ernährung« Teil 1 Das weltweite Bevölkerungswachstum erfordert eine Ernährungsumstellung: Auf den Speisezettel müssen weniger tierische Produkte, sonst droht ein ökologischer Kollaps.

Von Gayathri Vaidyanathan

50 KATALYSE **DER FLUCH DES PALLADIUMS**

Immer wieder versuchen Fachleute, Katalysatoren für die organische Chemie ohne das teure Element Palladium zu entwerfen – und scheitern.

Von Ariana Remmel

56 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **KRISTALLE FÜR WARMER HÄNDE**

Wenn Sie an frostigen Tagen Ihre Hände mit einem Taschenwärmer aufheizen, sprießen zwischen Ihren Fingern winzige Kristallbäumchen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

60 PHYSIK **AUF DER SUCHE NACH DEM IDEALEN GLAS**

Wir wissen seit Jahrtausenden, wie man Glas herstellt. Dennoch sind dessen physikalische Eigenschaften bis heute nicht vollständig geklärt.

Von Ludovic Berthier und Camille Scalliet

68 SYMBOLISCHE REGRESSION **NATURGESETZE AUS DEM COMPUTER**

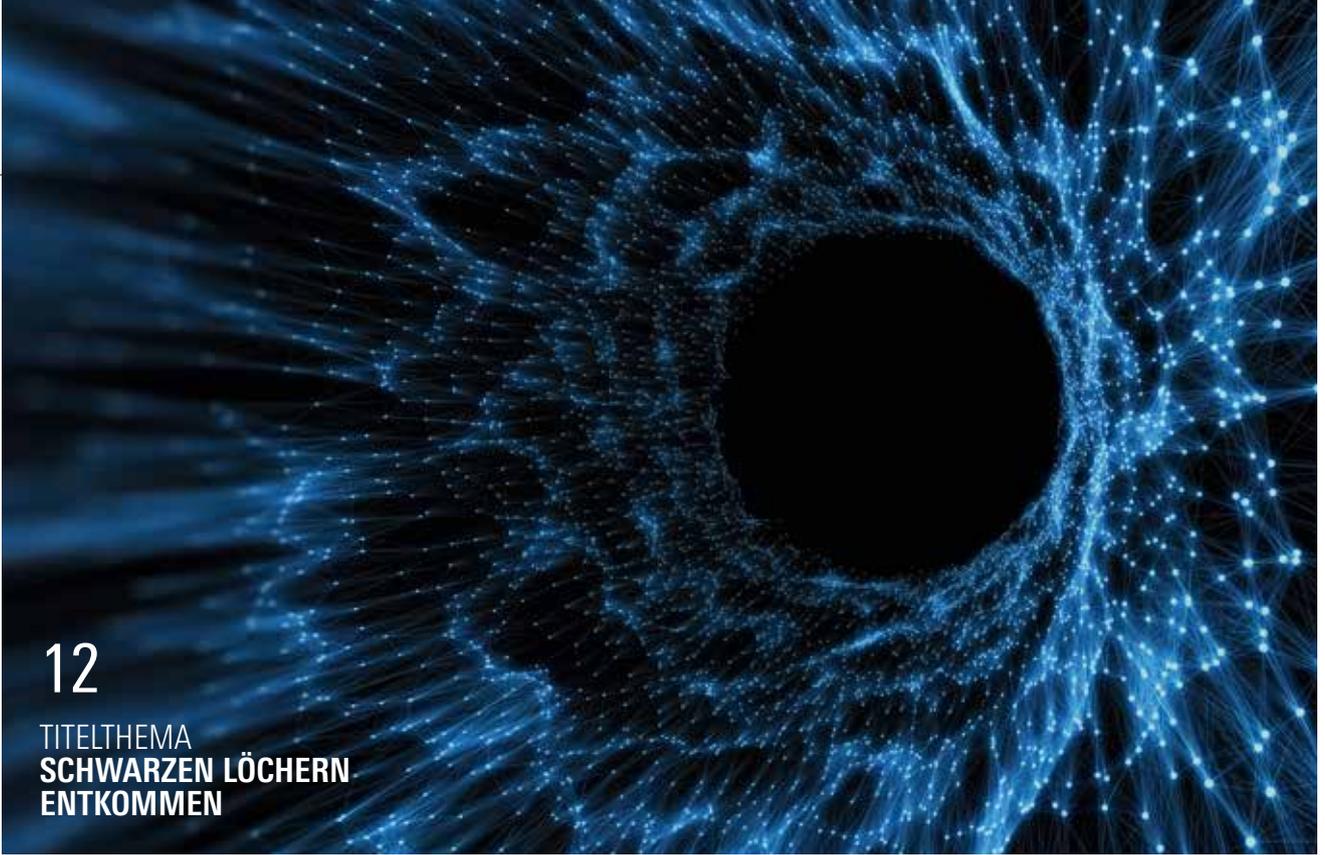
Eine neue Klasse von Algorithmen übernimmt die systematische Suche nach mathematischen Zusammenhängen in Datensätzen.

Von Charlie Wood

74 KOMBINATORIK **EIN UNGEWÖHNLICHER WEG**

Obgleich June Huh sein Talent für Mathematik erst sehr spät entdeckte, erhielt er 2022 die höchste Auszeichnung des Fachs.

Von Jordana Cepelewicz



12

TITELTHEMA
SCHWARZEN LÖCHERN
ENTKOMMEN

BILDARCHIVES



BILDARCHIVES

32

ZOOLOGIE
GENETISCH
AUFGEBLÄHT



BILDARCHIVES

50

KATALYSE
DER FLUCH DES
PALLADIUMS



BILDARCHIVES

PHYSIK
DAS IDEALE GLAS

60



BILDARCHIVES

KOMBINATORIK
PORTRÄT JUNE HUH

74



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

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

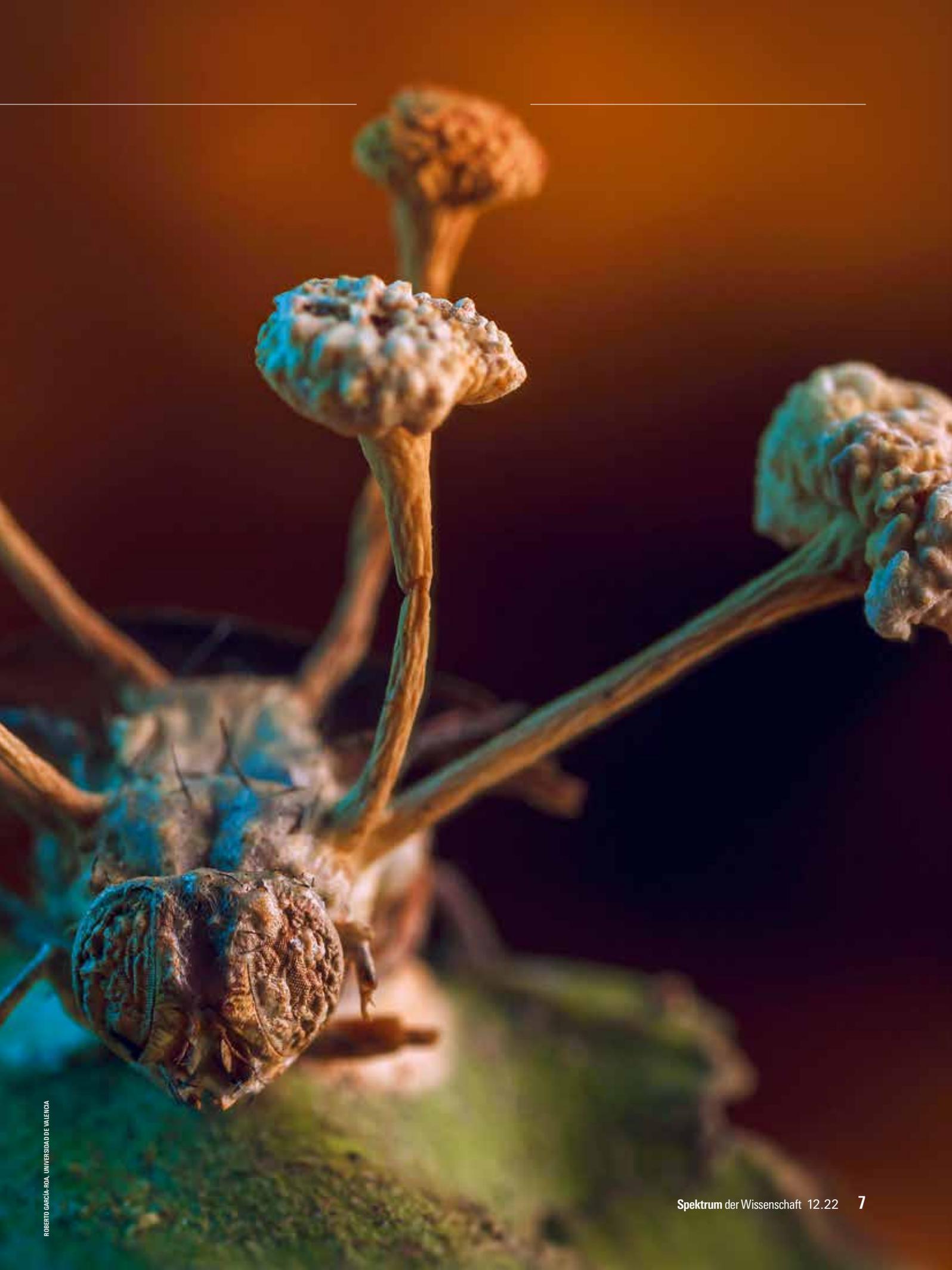
SPEKTROGRAMM

LEBEN IM TOD

▶ Das Foto wirkt wie aus dem Sciencefiction-Horrorfilm »Alien«, doch stammt es aus dem peruanischen Regenwald. Es zeigt Fruchtkörper eines parasitären Pilzes, die aus dem Körper einer toten Fliege wachsen. Roberto García-Roa von der schwedischen Universität Lund hat damit den ersten Preis beim »BMC Ecology and Evolution«-Fotowettbewerb gewonnen.

Sporen so genannter Zombie-Pilze, etwa der Gattung *Ophiocordyceps*, infizieren Insekten und andere Gliederfüßer und beeinträchtigen deren Nervensystem. Die Tiere wandern dann quasi fremdgesteuert an einen Ort, der für das Wachstum des Pilzes günstig ist, und sterben. Der Pilz durchwuchert den Kadaver und bildet Fruchtkörper, die Sporen ausstoßen, um neue Tiere zu infizieren.

BMC Ecology and Evolution 10.1186/s12862-022-02049-y, 2022



PALÄONTOLOGIE LÖWENGROSSER OTTER STREIFTE DURCH ÄTHIOPIEN

► Verglichen mit seinen heutigen Verwandten war *Enhydriodon omoensis* ein Riese. Der vor Jahrmillionen ausgestorbene Otter erreichte die Größe eines Löwen und wog auch so viel: rund 200 Kilogramm. Hinsichtlich der Schulterhöhe übertraf er den südamerikanischen Riesenotter um das Doppelte. Der Paläontologe Kevin Uno vom Lamont-Doherty Earth Observatory und sein Team haben die Fossilien des gigantischen Tiers ausgegraben und untersucht.

E. omoensis lebte von vor etwa 3,5 bis vor 2,5 Millionen Jahren. Sein Artname leitet sich vom Fundort im unteren Omo-Tal im Südwesten Äthiopiens her. Der Otter fraß offenbar vor allem terrestrische Beutetiere. Seine Größe und sein Gewicht ließen sich aus den gefundenen Zähnen und Oberschenkelknochen abschätzen.

Sehr große Otterarten kennt man aus der Zeit von vor sechs bis vor zwei Millionen Jahren. Sie streiften durch Europa, Asien und Afrika. Doch keine von ihnen erreichte die Ausmaße von *E. omoensis*.

Für unsere Vorfahren stellte der Riese womöglich eine direkte Bedrohung dar; zumindest sind in seiner Fundregion auch Homininen aus der Gattung *Australopithecus* nachgewiesen, die auf das gleiche Alter datieren. Otter-Arten, die mit *E. omoensis*

verwandt sind, leben amphibisch und ernähren sich von Weichtieren, Schildkröten, Krokodilen, Welsen und anderer aquatischer Beute. Es lag nahe, dies ebenso für den ausgestorbenen Giganten anzunehmen. Doch die relativen Mengen stabiler Sauerstoff- und Kohlenstoffisotope in seinem Zahnschmelz lassen anderes vermuten. Sie ähneln nicht denen fossiler

Flusspferde oder anderer wasserbewohnender Tiere, sondern denen von Landsäugetieren – insbesondere von zeitgleich lebenden Großkatzen und Hyänen. Der gewaltige Otter ernährte sich demnach überwiegend von tropischen Pflanzenfressern. Warum er ausstarb, bleibt zu klären.

Comptes Rendus Palevol 10.5852/
cr-palevol2022v21a30, 2022

GRÖSSENVERGLEICH *Enhydriodon omoensis* übertraf alle heutigen Otterarten (Tiersilhouetten). Für unsere Vorfahren war er möglicherweise eine Bedrohung; zeitgleich mit ihm lebten Homininen aus der Gattung *Australopithecus* (links). Ganz links: Größe eines heutigen Menschen.



SABINE RIFAUT, CAMILLE GROHE / PALEVOPIRM / CNRS, UNIVERSITÉ DE FORTIERS
ILLUSTRATION OF AUSTRALOPITHECUS AFARENSIS BY ENCICLOPEDIA BRITANNICA

GEOLOGIE NACH DEM CHICXULUB-EINSCHLAG BEBTE ES MONATELANG

► Der Einschlag des Chicxulub-Asteroiden vor 66 Millionen Jahren löste vermutlich monatelange Erdbeben aus. Das hat eine Studie des Geologen Hermann Bermúdez von der Montclair State University und seinem Team ergeben.

Bereits bekannt ist, dass der Impakt globale Folgen hatte: Die extreme Druck- und Hitzewelle und der Trümmerregen löschten weithin jedes Leben aus; gigantische Tsunamis

jagten um den Erdball; Ruß und Staub in der Atmosphäre verursachten einen jähen Temperatursturz. Hinzu kamen gewaltige Erdbeben, die den Berechnungen von Bermúdez & Co zufolge insgesamt eine Energie von 10^{23} Joule freisetzten – fünf Milliarden Mal so viel wie die Hiroshima-Atombombe.

Das Team hat Ablagerungen in der Kreide-Paläogen-Grenzschicht im Gestein verschiedener Fundorte untersucht. Dort lassen sich glasartige

Kügelchen nachweisen, die während des Einschlags durch hohen Druck und starke Hitze entstanden. Eingebettet sind sie in abgelagertem Material mit typischen Erschütterungsspuren, etwa Brüchen und Verformungen. Diese Spuren setzen sich in der Grenzschicht mehrere Zentimeter weit nach oben fort, was darauf hindeutet, dass die Beben monatelang anhielten.

Pressemitteilung der Geological Society of America, 06.10.2022

PHYSIK

SUPERHARTES MINERAL LONSDALEIT ENTSTAND BEI METEORITENEINSCHLÄGEN

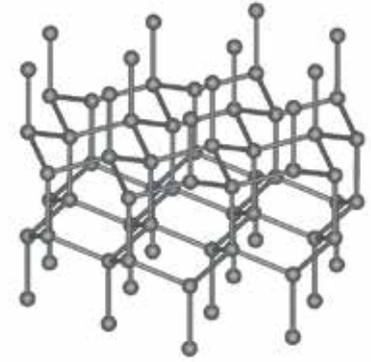
► Gewaltige Meteoriteneinschläge, die Zwergplaneten zerstörten, könnten einen der härtesten Stoffe im Universum hervorgebracht haben. Das postuliert ein Team um den Geowissenschaftler Andrew G. Tomkins von der Monash University. Die Hypothese erklärt, warum Ureilite – eine Untergruppe der Steinmeteorite – eine besondere Mischung aus Graphit, Diamant und dem Mineral Lonsdaleit enthalten. Laut den Forschern könnte dieses Gemenge entstanden sein, als der Druck im Zwergplaneten infolge seiner Zerstörung abrupt abfiel. Möglicherweise lässt sich das in der industriellen Fertigung simulieren, um Lonsdaleit künstlich herzustellen.

Lonsdaleit oder »hexagonaler Diamant« ist eine seltene Modifikation des Kohlenstoffs. Er besitzt eine hexagonale Kristallstruktur und kann prinzipiell bis zu 60 Prozent härter sein als Diamant. Normalerweise entsteht er bei Meteoriteneinschlägen durch extreme Stoßwellen. Man kann die Bedingungen eines solchen Aufpralls

im Labor simulieren; dabei entstandene Kristalle weisen jedoch viele Strukturfehler auf und erreichen nicht ihre theoretisch mögliche Härte. Trifft die Hypothese von Tomkins und seinem Team zu, gibt es aber noch einen anderen Weg, das Mineral zu erzeugen. Dann wären es nicht Druckwellen, sondern chemische Prozesse, die den Stoff hervorbringen.

Ureilite sind vermutlich Trümmer aus dem tiefen Mantelgestein von Zwergplaneten. Als die Himmelskörper bei Meteoriteneinschlägen zerstört wurden, sanken im plötzlich frei gelegten Mantelmaterial der Druck und die Temperatur rapide ab. Dadurch perlt flüchtige Stoffe wie Wasserstoff, Methan, Kohlenstoffdioxid und Schwefelwasserstoff aus und zersetzten sich an Mineraloberflächen, wobei Kohlenstoff in verschiedenen Modifikationen abgeschieden wurde. Je nach Bedingungen entstanden dabei andere Produkte.

Brocken, die ins All geschleudert wurden, bekamen lediglich feine



MICHAEL STRÖCK (NIST/DECK) / COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:LONSDALEITE_STRUCTURE.PNG / CC BY-SA 3.0 (CREATIVE COMMONS ORG/LICENSING/RYSA3.0/LEGALCODE)

SELTENER STOFF Lonsdaleit hat eine hexagonale Kristallstruktur.

Diamantkristalle mit, weil die Reaktionen kurz und unter geringem Druck abliefen. In den Bereichen des Mantels aber, die im restlichen Zwergplaneten verblieben, lagen unter hohen Drücken und Temperaturen überkritische Lösungen vor – ein Zustand jenseits von Gas und Flüssigkeit. Dort wandelte sich Graphit in Lonsdaleit um. Später fiel der Druck so weit ab, dass die überkritischen Lösungen zu kohlenstoffreichen Gasen wurden. Diese bildeten um die Lonsdaleit-Kristalle eine Hülle aus Graphit und Diamant.

PNAS 10.1073/pnas.2208814119, 2022

PHYSIOLOGIE

WARUM WALE BEIM ABTAUCHEN KEINEN HIRNSCHLAG BEKOMMEN

► Pottwale können bis zu 1000 Meter tief tauchen, Cuvier-Schnabelwale sogar bis 3000 Meter. Dabei gleiten die Tiere mit dem kraftvollen Schlag ihrer Schwanzflossen hinab, der jedes Mal starke Druckwellen durch ihren Körper schickt. Gleichzeitig müssen sie die Luft anhalten, was die Kompressionskräfte im Organismus noch erhöht. Dennoch erleiden ihre Blutgefäße und ihr Gehirn keinen Schaden. Der Biologe Robert Shadwick von der University of British Columbia und sein Team haben herausgefunden, warum.

Die Wale verfügen in ihrem Schädel über ein besonderes Netz an Blutgefäßen, das so genannte Rete mirabile: ein Geflecht feinsten Adern, die aus einer Arterie abzweigen und sich

später wieder zu einer solchen vereinigen. Es wurde bereits im 17. Jahrhundert entdeckt und kommt ebenso bei anderen Säugetieren vor, etwa im Bereich der Nieren. Bei den Großwalen war seine Funktion lange Zeit unklar.

Shadwick & Co. haben ein Computermodell entwickelt, mit dem sie die Druckschwankungen im Walkörper und deren Folgen für das Gefäßsystem simulieren können. Das Modell basiert auf physiologischen Daten elf verschiedener Spezies – vom Tümmler bis zum Großwal. Laut den Modellrechnungen spielt das Rete mirabile eine entscheidende Rolle: Es hält den Blutdruck im Gehirn konstant, ohne dass die Wale hierzu ihre Schwanzschläge abschwächen müssten.

Das feine Adergeflecht leitet das Blut weiter und nimmt dabei die Druckwellen aus den Arterien auf, wobei sich die Kräfte großflächig auf die Gefäßwände verteilen. Das glättet die Pulse des Blutstroms, ohne ihn dabei einzuschränken. Auf diese Weise wirkt das Rete mirabile wie ein schützender Stoßdämpfer: Es bewahrt das Gehirn vor übermäßig starken Kompressionen. Laut den Simulationen mindert das Adernetz die Druckpegelspitze, die ein Schwanzschlag verursacht, um mehr als 90 Prozent. Das reicht offensichtlich, um kilometertief zu tauchen, ohne dass es zum Hirnschlag kommt.

Science 10.1126/science.abn331, 2022

ASTRONOMIE SPUREN GIGANTISCHER FLUTEN AUF DEM MARS

► Eine der bekanntesten Marsregionen ist womöglich von riesigen Überschwemmungen heimgesucht worden. Darauf deuten Radardaten des chinesischen Marsrovers Zhurong hin. Wie ein Team um Chao Li vom Institut für Geologie und Geophysik der Chinesischen Akademie der Wissenschaften berichtet, befindet sich im Untergrund der Tiefebene »Utopia Planitia« ein mehr als 70 Meter dicker Stapel zweier separater Sedimentschichten. Sie entstanden wahrscheinlich bei Flutereignissen, die mitgeführtes Material ablagerten.

Seit Jahren spekulieren Fachleute, ob Utopia Planitia einst einen Ozean beherbergte. In der Region gibt es dutzende Kilometer große Vielecke, die beim Zusammensacken von Schlamm- und Schichtungen unter Wasser entstanden sein könnten. Kegelförmige Landformen dort interpretieren Experten als mögliche Reste von Schlammvulkanen. Manche Fachleute wollen sogar Spuren ehemaliger Küsten erkennen. Bis heute ist das



ABFAHRBEREIT
Der Marsrover Zhurong, kurz bevor er vom Landemodul rollte (Illustration).

CHINESE SASTIND VIA XINHUA / AP PHOTO / PICTURE ALLIANCE

Gebiet reich an Eis und Landschaftsformen, die damit in Verbindung stehen.

Der Rover Zhurong trägt ein Radarsystem, das unterirdische Strukturen bis in 100 Meter Tiefe abbildet. Während er auf dem Roten Planeten umherfuhr, wobei er etliche hundert Meter Wegstrecke zurücklegte, hat er damit immer wieder Messungen durchgeführt. Die Daten ergeben ein Schnittbild durch den Marsboden. Es zeigt an der Oberfläche eine zehn Meter dicke Schicht aus Lockermaterial. Darunter sind zwei Lagen zu erkennen, deren Bestandteile von unten nach oben immer feiner werden. Eine solche Sortierung ist typisch für feste Bestandteile, die von Wasser mitgeführt werden: Große Brocken setzen sich zuerst ab, gefolgt

von kleineren Steinen, Kies, Sand und Schlamm.

Schätzungen anhand der Kratergröße und -dichte ergeben: Die obere Lage ist rund 1,6 Milliarden Jahre alt, die untere 3,2 Milliarden Jahre. Unter beiden liegt die noch ältere Vastitas-Borealis-Formation, die als möglicher Rückstand eines dauerhaften Gewässers gilt. Einst könnte demnach ein großer Ozean das Tiefland der nördlichen Marshemisphäre bedeckt haben. Als der Planet immer kälter und trockener wurde, verschwand das Meer, doch zweimal noch füllten gewaltige Fluten, die Schlamm und Geröll mit sich führten, das Gebiet vorübergehend mit Wasser. Heute zeigt sich dort eine eisige, trockene Ebene.

Nature 10.1038/s41586-022-05147-5, 2022

GENETIK SARS-COV-2 MANIPULIERT MENSCHLICHE EPIGENETIK

► Das pandemische Coronavirus Sars-CoV-2 beeinflusst die Verpackung der DNA und unterbindet so, dass seine Wirtszelle ihre Immungene korrekt abliest. Zu diesem Ergebnis kommen Forscherinnen und Forscher um Erica Korb von der University of Pennsylvania, nachdem sie einen Proteinbestandteil des Erregers eingehend analysiert haben. Das Eiweiß verhindert eine chemische Modifikation des menschlichen Histonmoleküls H3. Das wirkt sich auf die DNA-Struktur aus, wodurch wichtige Erbanlagen nicht mehr zugänglich sind.

Histone sind Proteinkomplexe, um die sich der lange DNA-Strang wickelt. Sie sorgen dafür, dass unsere Erbsubstanz geordnet in den Körperzellen liegt

und sich dort nicht verheddert. Zudem regulieren sie, wie eng das Erbgutmolekül aufgespult wird. In locker gewickelten DNA-Abschnitten sind die Gene gut zugänglich und lassen sich leicht ablesen. Um das zu erreichen, muss der Zellapparat eine chemische Gruppe an die dort befindlichen Histonproteine H3 anhängen. Dies übernimmt das zelleigene Protein KAT2A.

Das Viruseiweiß ORF8 enthält allerdings einen Abschnitt, der einem Teil des Histonproteins H3 ähnelt. Infolgedessen fügt KAT2A die chemische Gruppe an ORF8 an und nicht an sein eigentliches Ziel H3. Somit bleibt H3 unverändert – und der DNA-Strang weiterhin eng aufgespult und unzugänglich.

Untersuchungen der Arbeitsgruppe belegen zudem: Taucht ORF8 in der Zelle auf, sinkt die Konzentration an KAT2A. Anscheinend stört das Viruseiweiß nicht nur die chemische Modifikation des Histonproteins, sondern sorgt überdies für einen Abbau des dafür zuständigen menschlichen Proteins. Korb und ihr Team vermuten, dass ORF8 noch weitere Funktionen ausübt, durch welche die Wirtszelle nicht mehr auf wichtige antivirale Gene zugreifen kann. Die Fähigkeit, mittels der Histone in die DNA-Verpackung der Wirtszelle einzugreifen, haben Fachleute auch bei anderen Sars-Viren nachgewiesen.

Nature 10.1038/s41586-022-05282-z, 2022

UMWELT

STRASSENLATERNEN MIT LEDS VERSTÄRKEN LICHTVERSCHMUTZUNG

► Das Ausrüsten von Straßenlampen mit Leuchtdioden (LEDs) hat vielerorts das Farbspektrum nächtlicher Beleuchtung verändert – mit Folgen für Mensch und Tier. Das schreibt eine Arbeitsgruppe um den Biologen Kevin Gaston von der University of Exeter. Fotos, die von der Raumstation ISS aufgenommen wurden, belegen: Die weiß strahlenden LEDs haben vor allem den Blauanteil des Laternenlichts erhöht. Deutschland ist davon aber vergleichsweise wenig betroffen.

Blaues Licht hemmt die Ausschüttung des schlaffördernden Hormons Melatonin. Daher könne die Umstellung auf LEDs den Biorhythmus von Tieren und Menschen durcheinanderbringen, geben Gaston und sein Team zu bedenken. Das Farbspektrum nächtlicher

Beleuchtung müsse darum regelmäßig überprüft werden. Bislang ist das nur eingeschränkt möglich, weil die Satellitensensoren, mit denen solche Untersuchungen üblicherweise erfolgen, lediglich die Intensität des Lichts registrieren, aber nicht dessen Farbe. Noch dazu sind sie kaum empfindlich für Wellenlängen im Blaubereich.

Gaston und seine Gruppe haben Fotos ausgewertet, die Astronauten von der ISS aus aufgenommen hatten. Sie wählten Bilder aus den Jahren 2012 und 2013, welche das nächtliche Europa zeigen, und verglichen sie mit Aufnahmen derselben Regionen aus den Jahren 2014 bis 2020. Die Grenze zwischen den beiden Abschnitten markiert die Marktreife von LEDs als Leuchtmittel für Straßenlaternen.

Im zweiten Zeitraum stieg der Grünanteil des Laternenlichts um 11 Prozent, der Blauanteil sogar um 25 Prozent. Der Grund: Orange-gelb leuchtende Natriumdampflampen wurden massenhaft durch LEDs ersetzt, die stärker im blauen Bereich des Spektrums emittieren. Hauptsächlich geschah das in Italien, Rumänien, Irland und Großbritannien, weniger dagegen in Deutschland und Österreich.

Schon frühere Studien hatten die negativen Folgen nächtlicher Beleuchtung für Fledermäuse, Insekten und andere nachtaktive Tiere belegt. Der Einsatz von LEDs droht die Lichtverschmutzung nun zu verschlimmern.

Science Advances 10.1126/sciadv.abl68, 2022

MEDIZIN

ERFOLGREICHE AMPUTATION VOR 31 000 JAHREN

► Knochen aus einer Karsthöhle auf Borneo erzählen eine verblüffende medizinische Erfolgsgeschichte. Vor etwa 31 000 Jahren amputierte dort jemand den Fuß eines Kinds derart gekonnt, dass es nach der Operation noch sechs bis neun Jahre lang lebte. Das berichtet ein Team um den Archäologen Tim Ryan Maloney von der Griffith University (Australien). Die Forscher und Forscherinnen haben fossile Überbleibsel des steinzeitlichen Patienten untersucht, gefunden in der Liang-Tebo-Grotte im Osten Borneos. Laut den Ergebnissen wurde der linke Fuß oberhalb des Knöchels mit einem glatten, schrägen Schnitt abgetrennt, worauf neues Gewebe den Knochenstumpf überwuchs.

Die Unterschiede zwischen beiden Beinen zeigen, dass nach der Amputation geraume Zeit bis zum Tod verging. Während sich die Knochen der gesunden Extremität normal entwickelten, wuchsen jene des durchtrennten Unterschenkels nicht weiter und wurden teils sogar abgebaut. Die bei ihrem Ableben etwa 20 Jahre alte Person, deren Geschlecht nicht bestimmbar ist, hatte ihren Fuß demnach als Kind verloren.

In der Steinzeit, die keine synthetischen Antibiotika und Schmerzmittel kannte, bargen Amputationen ein hohes Risiko, an Schock, Blutverlust oder einer Infektion zu sterben. Dass ein Kind den Eingriff vor zehntausenden Jahren überlebte, belegt: Es gab schon damals eine beachtliche medizinische Expertise einschließlich Techniken des Wundverschlusses. Womöglich setzten die Heilkundigen jener Zeit antibiotische Naturstoffe ein.

Bisher waren viele Fachleute davon ausgegangen, komplexe chirurgische Behandlungen wie Amputationen habe es erst in sesshaften Gesellschaften gegeben. Denn nomadisch lebenden Wildbeutern fordern sie nicht nur weit reichende medizinische Kenntnisse ab, sondern ebenso einen hohen logistischen Aufwand. Die operierte Person vor 31 000 Jahren musste von ihrer Gruppe dauerhaft gepflegt und betreut werden – selbst während saisonaler Wanderungen. Trotz ihrer Behinderung war sie wohl kein Außenseiter, wie ihre sorgfältig ausgeführte Bestattung in der mit Felsmalereien dekorierten Höhle vermuten lässt.

Nature 10.1038/s41586-022-05160-8, 2022

PRESSEBILD ZU MALONEY, T. R. ET AL.: SURGICAL AMPUTATION OF A LIMB 31,000 YEARS AGO IN BORNEO. NATURE 699, 2022, FIG. 3A



QUANTENGRAVITATION INSELHOPPING ÜBER DEN EREIGNISHORIZONT

Ein hartnäckiges Rätsel aus der theoretischen Physik, das Informationsparadoxon, lässt sich womöglich lösen – wenn das Innere von Schwarzen Löchern durch Wurmlöcher in der Raumzeit miteinander verbunden ist.

MICK HIGGINS / SCIENTIFIC AMERICAN



Ahmed Almheiri ist theoretischer Physiker an der New York University in Abu Dhabi. Er forscht an der Schnittstelle von Quanteninformation und Quantengravitation.

» spektrum.de/artikel/2066850

TEILCHEN AM LIMIT Wenn man genauer hinschaut, sind die Partikel, die in ein Schwarzes Loch gerissen werden, auf quantenmechanischer Ebene miteinander verbunden. Das hat weit reichende Folgen.

SERIE

Schwarze Löcher

Teil 1: Dezember 2022

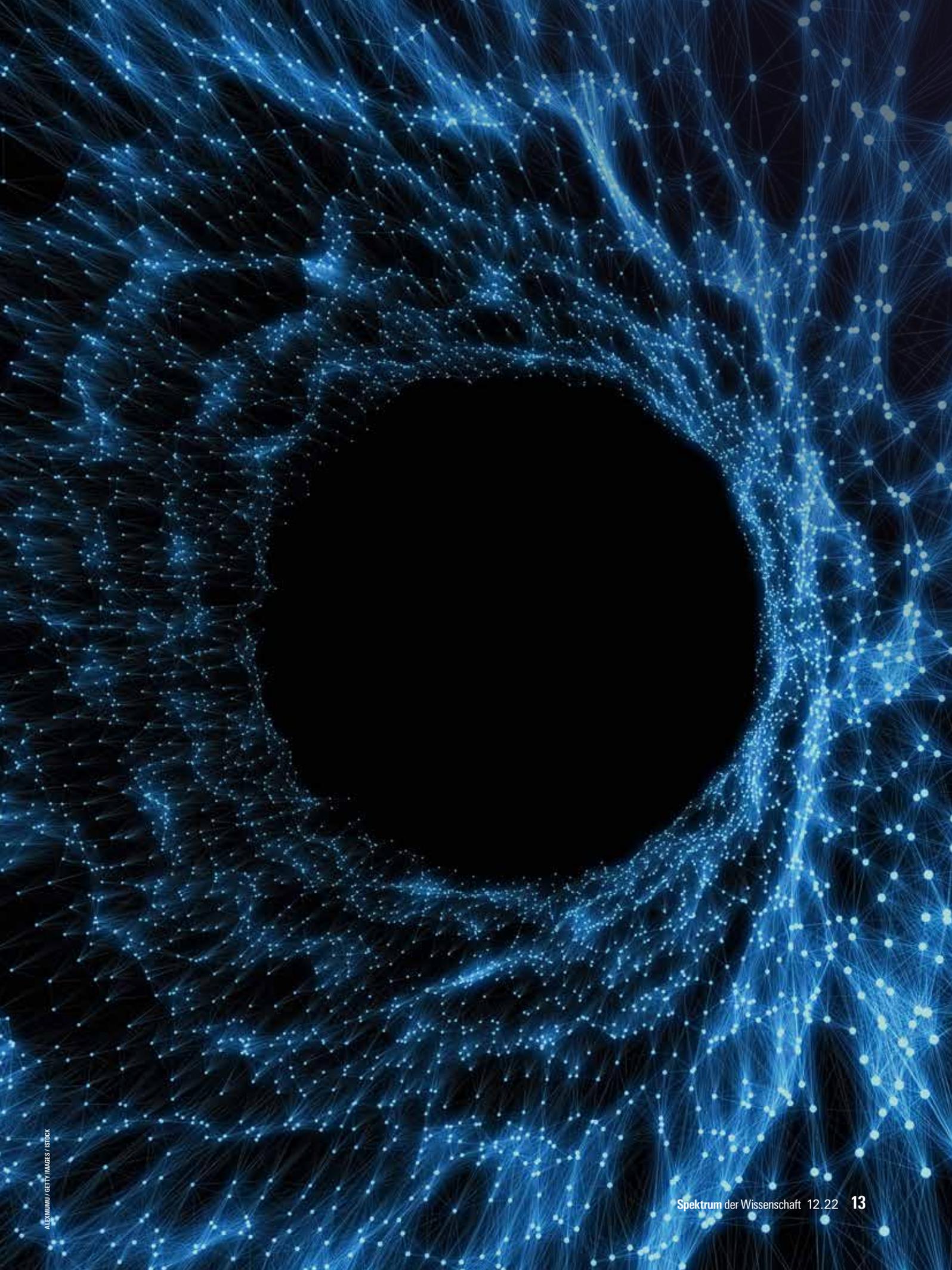
Inselhopping über den Ereignishorizont
Ahmed Almheiri

Teil 2: Januar 2023

Grenzen von Raum und Zeit
Edgar Shaghoulian

Teil 3: Februar 2023

Der dunkle Kern der Milchstraße
Seth Fletcher
Galaktische Getriebe
Thomas Lewton



1974 stürzte Stephen Hawking die theoretische Physik in eine Krise: Er legte dar, dass ein Schwarzes Loch Informationen vernichtet. Laut Hawkings Berechnungen kann es an Masse verlieren und so allmählich verschwinden. Das tut es, indem es Strahlung abgibt – und die enthält allem Anschein nach keinerlei Information über die Objekte, die zuvor hineingefallen sind. Die Entstehungsgeschichte des Schwarzen Lochs wäre unwiederbringlich gelöscht. Das allerdings verstößt gegen ein geheiligtes Prinzip der Quantenphysik, laut dem keine Information verloren gehen darf.

Das ist das so genannte Informationsparadoxon. Es erweist sich seit fünf Jahrzehnten als hartnäckiges Rätsel. 2019 kam dann aber langsam Licht ins Dunkel, auch durch Forschungsarbeiten, an denen ich beteiligt war. Der Lösungsansatz basiert auf einem neuen Verständnis der Raumzeit und wie sie mittels Quantenverschränkungen aufgespannt werden kann. Das führte mich zu der Vorstellung, ein Teil des Inneren eines Schwarzen Lochs könnte sich auf eine ganz bestimmte Weise nach außen kehren.

Um das zu verstehen, müssen wir die Natur der Schwarzen Löcher näher betrachten. Die Gebilde verkörpern geradezu die Endgültigkeit: Nichts scheint hoffnungsloser zu sein als der Versuch, wieder herauszukommen, wenn man einmal hineingestürzt ist. Schwarze Löcher entstehen, sobald genügend Materie auf einem ausreichend kleinen Bereich zusammenkommt. Das zerrt so stark an der Raumzeit, dass diese haltlos in sich zusammenfällt. Die sich aufschaukelnden Gezeitenkräfte werden im Lauf endlicher Zeit unendlich groß und entreißen eine ganze Region ihrer kosmischen Umgebung. Im Mittelpunkt sitzt eine Singularität, ein Punkt, an dem unsere mathematischen Begriffe für Raum und Zeit keinen Sinn mehr ergeben.

Innerhalb des kollabierenden Bereichs gibt es eine schmale Grenze. Sie trennt die Orte, von denen aus eine Flucht prinzipiell möglich ist, von den Punkten ohne Wiederkehr. Die Linie heißt Ereignishorizont. Von hier aus-

gesandtes Licht entgeht gerade noch dem Sturz in die Singularität. Da sich nichts schneller bewegen kann als Licht, bleibt jegliche Materie, die hinter den Ereignishorizont fällt, unwiederbringlich im Inneren des Schwarzen Lochs gefangen.

Aus theoretischer Sicht ist diese Einseitigkeit an sich kein Problem. Sie ist eine unzweifelhafte Vorhersage aus der allgemeinen Relativitätstheorie. Schwierig wird es erst, wenn die Quantenmechanik ins Spiel kommt.

Die Quantenphysik befreit Schwarze Löcher ein Stück weit von dem Image der unerbittlichen Gierschlunde, das ihnen häufig zugeschrieben wird. Mit der »Hawking-Strahlung« geben sie nämlich für jedes Teilchen, das sie sich einverleiben, einen gleich großen Betrag Strahlung ab. Das ist Energie, die das Wirken des Ereignishorizonts aus dem Vakuum herausquetscht.

Gewaltsame Trennung mit Folgen

Die Idee, etwas aus dem Nichts zu erzeugen, mag absurd klingen, aber in der Quantenmechanik muss man sich an allerlei Seltsamkeiten gewöhnen. Auf subatomaren Skalen verbirgt sich im leeren Raum ein brodelnder Ozean von »virtuellen« Teilchen, die fortlaufend paarweise entstehen und vergehen. Der Sog eines Schwarzen Lochs kann solche Partner jedoch voneinander trennen. Die beiden streben auf den zwei Seiten des Ereignishorizonts in entgegengesetzte Richtungen, wobei einer in die Singularität stürzt und der andere der Anziehungskraft in Form von Hawking-Strahlung entkommt. Der Prozess lässt das Schwarze Loch leichter und kleiner werden, während es mit den austretenden Teilchen Energie verliert.

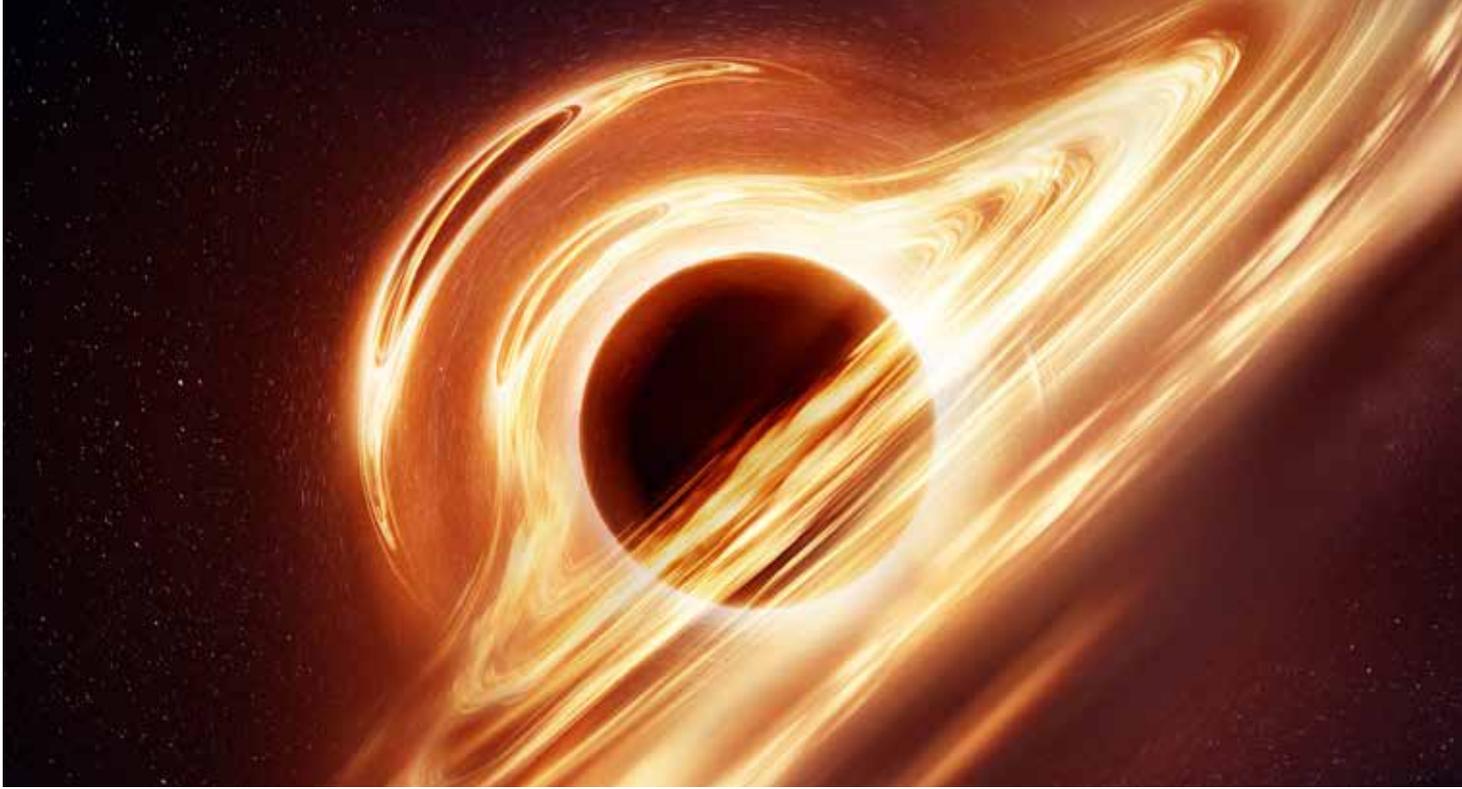
Der Vorgang läuft so langsam ab, dass man ihn nicht wirklich beobachten könnte. Im Prinzip verhält es sich, als würde das Schwarze Loch verbrennen. Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied zu einem klassischen Feuer. Dort prägt sich die quantenmechanische Information über das entflammte Material in das Muster des ausgestrahlten Lichts, in den Rauch und in die Asche ein. Der Inhalt eines verbrannten Buchs bleibt also erhalten, zumindest grundsätzlich. Nun könnte man annehmen, ein verdampfendes Schwarzes Loch würde ganz analog mit der Hawking-Strahlung die Information über alles, was hineingefallen ist, nach außen tragen. Leider ist es nicht so einfach.

Das Problem liegt bei der quantenmechanischen Beziehung zwischen den Teilchen auf beiden Seiten des Ereignishorizonts. Obwohl sie getrennt werden, halten sie eine besondere Verbindung aufrecht, die über Raum und Zeit hinausgeht, die so genannte Verschränkung. Dieses Phänomen ist wohl einer der seltsamsten Aspekte unseres Universums und zugleich einer seiner wesentlichsten. Das exotisch wirkende Konzept wurde erstmals von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen als Argument im Streit um die damals im Entstehen begriffene Quantentheorie angebracht. Diese musste ihrer Ansicht nach unvollständig sein, und der Beweis dafür sei die »spukhafte Fernwirkung«, wie Einstein den Effekt schimpfte.

Eine klassische Analogie für die Verschränkung sind die Würfe zweier Münzen, die immer das gleiche Ergebnis liefern. Die zwei Möglichkeiten, Kopf und Zahl, befinden

AUF EINEN BLICK MIT WURMLÖCHERN ZUM DURCHBRUCH

- 1 Schwarze Löcher können Strahlung abgeben, doch diese enthält keine Information über hineingestürzte Materie. Das führt zu Widersprüchen mit fundamentalen Annahmen der Quantenmechanik.
- 2 Lange galt das Problem als eines der größten in der theoretischen Physik auf dem Weg zu einer Vereinigung von Quanten- und Relativitätstheorie.
- 3 Nun gibt es einen Lösungsansatz. Er erfordert allerdings, das Grundprinzip der Lokalität zu opfern, laut dem sich voneinander getrennte Raumbereiche nicht gegenseitig beeinflussen können.



INS EXTREME VERZERRT Im Umfeld eines Schwarzen Lochs, hier eine Illustration, verbiegt die enorme Schwerkraft die Pfade von Licht und Materie durch die Raumzeit.

sich zunächst in einer Überlagerung. Im Quantenjargon bedeutet das, die Zustände existieren so lange gleichzeitig, bis man hinschaut und so eine definitive Aussage treffen kann. Die Wahrscheinlichkeit, das Paar in einer der beiden Ausrichtungen zu beobachten, beträgt 50 Prozent. Da die Münzen niemals in entgegengesetzter Orientierung zu liegen kommen, sagt das Messergebnis der einen die Situation der anderen mit absoluter Sicherheit voraus. Jeder Münzwurf für sich genommen ist völlig zufällig, aber die Ergebnisse der Partner sind perfekt korreliert.

Einstein, Podolsky und Rosen waren beunruhigt darüber, wie die beiden Münzen sich gegenseitig zu beeinflussen schienen, ohne dass sie in physischen Kontakt gelangen mussten. Sie könnten in verschiedenen Galaxien und dennoch im gleichen Maß verschränkt sein. Wie soll das Aufdecken einer Münze irgendetwas beim weit entfernten Gegenstück bewirken?

Die Kritiker hatten insofern Recht, als sie erkannten, wie bedeutsam die Verschränkung als Unterscheidungsmerkmal der Quantenmechanik gegenüber der klassischen Physik ist. Ein verbreiteter Irrtum hingegen lässt sich mit der Binsenweisheit »Korrelation impliziert keine Kausalität« zusammenfassen. Zwar sind die Schicksale verschränkter Teilchen untrennbar miteinander verbunden. Dennoch löst die Messung beim einen nichts beim anderen aus, was einer herkömmlichen Ursache-Wirkungs-Beziehung gleichkäme. Die Quantenmechanik lässt lediglich einen neuen, höheren Grad der Korrelation zu, als wir es aus dem Alltag gewohnt sind.

Da die Hawking-Strahlung aus der einen Hälfte einer Menge verschränkter Paare besteht, tritt sie in völlig zufälli-

gen Zuständen aus dem Schwarzen Loch aus. Würde es sich um Münzen handeln, beobachtete man mit gleicher Wahrscheinlichkeit Kopf oder Zahl. Daher können wir aus den Messungen der Strahlung nichts Sinnvolles über den Inhalt des Schwarzen Lochs in Erfahrung bringen. Nach dem vollständigen Verdampfen bleiben nur diese entkommenen Exemplare übrig. Ein schrumpfendes Schwarzes Loch scheint die Informationen in seinem Inneren also gründlich und nicht mehr rekonstruierbar zu eliminieren.

Der Mangel an Information – das heißt die Zufälligkeit – in der Hawking-Strahlung lässt sich bestimmen, wenn man sich den Grad der Verschränkung zwischen der Strahlung und dem Schwarzen Loch genauer anschaut. Die Zufälligkeit hat je nach Betrachtungsweise viele Namen, beispielsweise »Verschränkungsentropie«, und sie wächst mit jedem entstehenden Hawking-Teilchen. Sie erreicht ein Plateau mit einem großen Wert, sobald das Schwarze Loch verschwunden ist

Kosmischer Croupier

Der Verlauf unterscheidet sich von dem, was passiert, falls die Information erhalten bleibt, wie beim Beispiel eines brennenden Buchs. In einem solchen Fall steigt die Entropie zunächst zwar an, gipfelt dann aber in einem Höhepunkt und fällt am Ende des Prozesses auf null zurück. Die Gründe dafür werden nachvollziehbar, wenn man sich einen Satz von Spielkarten vor Augen führt.

Nehmen wir an, Sie erhalten nacheinander und verdeckt einzelne Karten von einem 52-Karten-Deck. Die Entropie der Karten in Ihrem Besitz ist ein Maß für Ihre Unkenntnis darüber, was Ihnen ausgeteilt wurde, genauer gesagt für die Anzahl der denkbaren Kartenkombinationen. Wenn Sie nur eine Karte erhalten haben, gibt es 52 Möglichkeiten dafür, welche vor Ihnen liegt. Je mehr Sie bekommen, desto höher wird die Entropie. Sie hat bei 26 Karten mit 500 Billionen verschiedenen Optionen ihr Maximum. Danach nimmt die Zahl wieder ab und beträgt bei 51 Karten

Wurmlöcher und das Informationsparadoxon

Ein halbes Jahrhundert lang blieb die Frage ungeklärt, was mit der Information über die Materie passiert, die in ein Schwarzes Loch fällt. Falls sie vernichtet würde, was theoretische Ansätze aus den 1970er Jahren nahegelegt haben, erzeugt das einen Widerspruch zu Grundannahmen der Quantenmechanik. Neuerdings gibt es allerdings Durchbrüche bei der Lösung des Problems.



1974 bewies Stephen Hawking, dass ein Schwarzes Loch Strahlung abgibt. Das entzieht ihm Energie und lässt es so schrumpfen, bis nichts mehr übrig ist.

Laut der Quantenphysik ist selbst der leere Raum ständig von virtuellen Teilchen erfüllt, die paarweise entstehen und sich wieder vernichten.



virtuelle Teilchen

Solche Paare, die in der Nähe der Grenze des Schwarzen Lochs – am Ereignishorizont – entstehen, werden auseinandergerissen.

Einer der Partner wird innerhalb des Ereignishorizonts gefangen und weiter in Richtung des Zentrums gezogen, während der andere nach außen entkommt und Energie mit sich führt.

Ereignishorizont

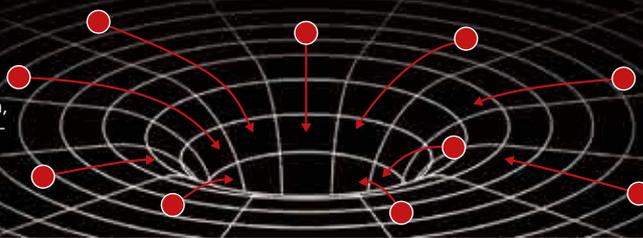
Schwarzes Loch

hineinfallende Strahlung

austretende Strahlung

Verzerrung der Raumzeit

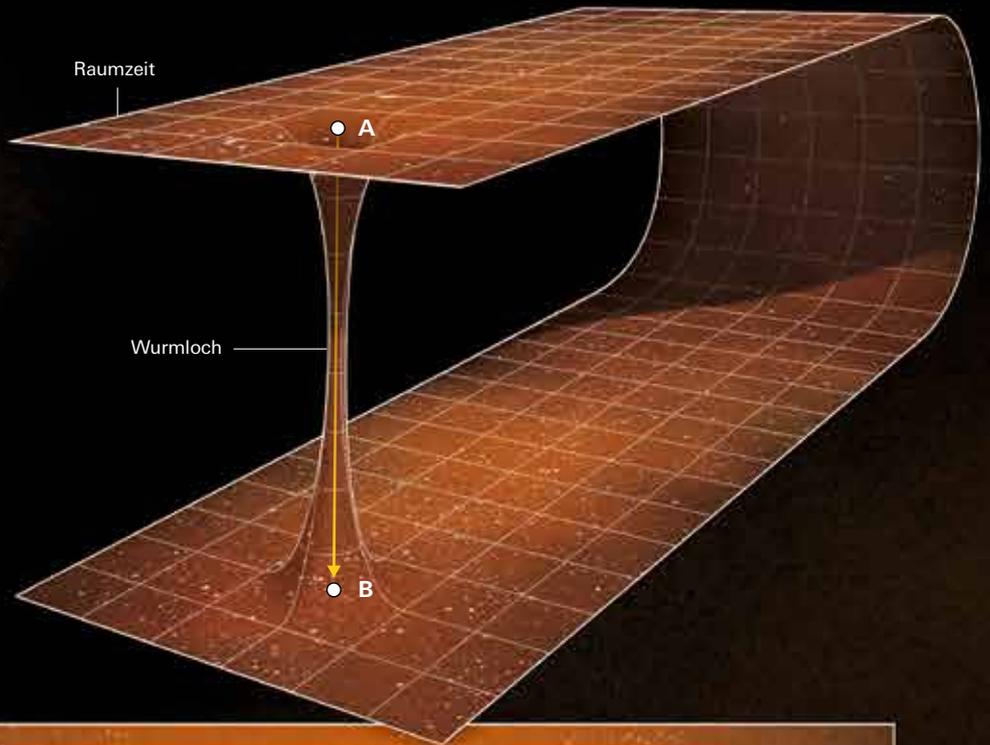
Die Teilchen entziehen dem Schwarzen Loch Energie. Es verliert so lange an Masse, bis es verschwunden ist. Doch wenn Schwarze Löcher zerstört werden, könnte das auch mit der quantenmechanischen Information über jedwede Materie passieren, die jemals hineingefallen ist.



○ Singularität

Das scheint einen Grundsatz der Quantenphysik zu verletzen, laut dem Information niemals verloren gehen darf. Es gab in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Versuche, das Paradoxon aufzulösen. Ein viel versprechender neuer Ansatz basiert auf Wurmlöchern.

Wurmlöcher sind theoretische Konstrukte, bei denen zwei Schwarze Löcher eine Abkürzung zwischen weit voneinander entfernten Regionen der Raumzeit aufbauen.



Das Innere eines Schwarzen Lochs könnte durch ein Wurmloch mit einem zweiten verbunden sein. Das ist zwar eine außerordentlich seltene Konstellation, doch die Wahrscheinlichkeit dafür erhöht sich möglicherweise durch die Quanteneffekte am Ereignishorizont.

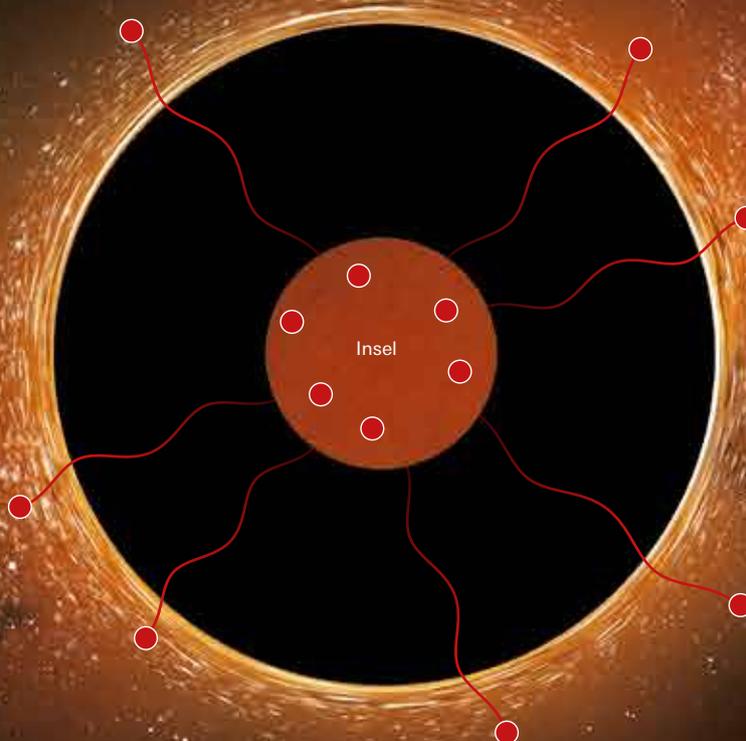


Alles, was grundsätzlich passieren kann, geschieht in der Quantenmechanik irgendwann auch. Ein Teilchen bewegt sich nicht einfach auf einem bestimmten Weg von A nach B.



Es nimmt sämtliche Pfade gleichzeitig.

Wenn sich Wurmlöcher im Inneren von Schwarzen Löchern befinden, wird Information vielleicht nicht zerstört. Vielmehr scheinen sich gewisse Bereiche, Inseln genannt, gleichermaßen auf der Innen- wie der Außenseite zu befinden. Sie werden so zum Bestandteil der entweichenden Strahlung und tragen Information heraus.



Selbst für Fachleute sind die neuen Erkenntnisse und deren Implikationen unerwartet. Wieder erweisen sich die Spielregeln des Kosmos als überraschend seltsam.

erneut 52. Sobald Sie alle Karten haben, wissen sie genau, was sich in Ihrem Besitz befindet – das gesamte Deck –, und die Entropie verschwindet. Dieser typische Verlauf aus Anstieg und Absinken nennt sich Page-Kurve (siehe »Die Page-Kurve«), benannt nach dem Theoretiker Don Page von der University of Alberta in Kanada, einem ehemaligen Doktoranden Hawkings. Der Zeitpunkt, an dem die Entropie ihren Höhepunkt erreicht, ist die Page-Zeit.

Es wäre ein wichtiger Schritt hin zur Lösung des Informationsparadoxons und zu einem besseren Verständnis der Quantengravitation, wenn es gelänge, die Page-Kurve für ein Schwarzes Loch zu erstellen. Das erwies sich allerdings lange als enorme Herausforderung für die theoretische Physik. Ein Teil der Schwierigkeiten bestand darin, dass es nicht ausreichte, Details des Verdampfungsprozesses geringfügig zu ändern. Das lieferte immer noch keine Page-Kurve und brachte die Entropie nicht wieder auf null. Wir brauchten offenbar eine drastische Neukonzeption der Struktur eines Schwarzen Lochs.

In einer Veröffentlichung vom Februar 2013 habe ich zusammen mit den theoretischen Physikern Donald Marolf, Joseph Polchinski und James Sully (unser Team wird oft kurz als AMPS bezeichnet) verschiedene Möglichkeiten dazu ausprobiert. Wir haben mit einer Reihe von Gedankenexperimenten versucht, unkonventionelle Bilder verdampfender Schwarzer Löcher zu skizzieren.

Dabei kamen wir zu dem Schluss, dass die Erhaltung der Information eines von zwei Dingen erfordert: Entweder muss es so genannte nichtlokale Phänomene geben, mit denen Information augenblicklich aus dem Inneren eines Schwarzen Lochs verschwinden und außerhalb des Ereignishorizonts auftauchen kann. Nichtlokalität entspricht einer tatsächlichen Fernwirkung, wie sie von Einstein ausgeschlossen wurde. Oder aber es findet beim Erreichen der Page-Zeit ein neuartiger Vorgang statt. Dieser müsste die Verschränkung zwischen den Teilchenpaaren jenseits des Ereignishorizonts aufheben, um eine weitere Zunahme der Entropie zu verhindern. Die erste Option einer nichtlokalen Physik erschien uns zu radikal. Darum haben wir uns die zweite näher angeschaut.

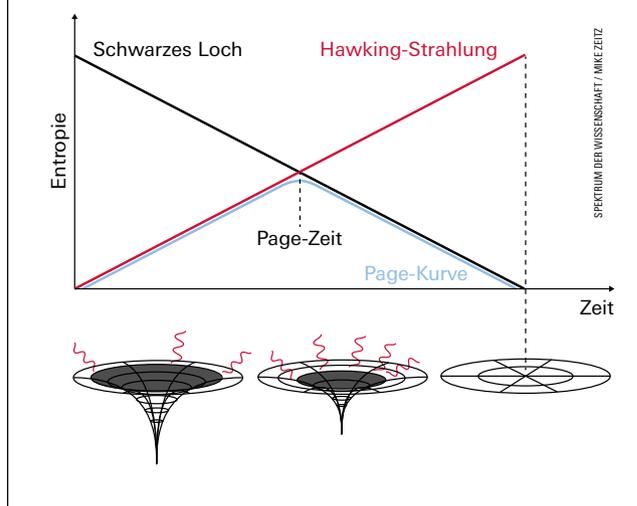
Ein Ende der Verschränkung kann zwar dabei helfen, die Information zu erhalten, aber sie führt zu einem anderen Paradoxon. Die Verschränkung über den Ereignishorizont hinweg ist ja eine Konsequenz der Eigenschaften des leeren Raums, in dem miteinander verknüpfte Teilchenpaare allgegenwärtig sind. Diese Verbindungen aufzubrechen erzeugt eine Mauer aus extrem energiereichen Teilchen, die unsere Gruppe als Feuerwand bezeichnet hat (siehe »Spektrum« September 2015, S. 34).

Eine Feuerwand am Ereignishorizont würde allerdings verhindern, dass irgendetwas in das Schwarze Loch eindringt. Stattdessen sollte die einfallende Materie direkt beim Aufprall verdampfen. Das Schwarze Loch verlöre damit sein Inneres, und die Raumzeit wäre nicht erst an der Singularität zu Ende, sondern bereits am Ereignishorizont. Diese Lösung des Informationsparadoxons würde alles auf den Kopf stellen, was wir über Schwarze Löcher wissen.

Schließlich erkannten wir jedoch: Sowohl das Feuerwand- als auch das Informationsparadoxon gingen letztlich

Die Page-Kurve

Ein Schwarzes Loch schrumpft, indem es Hawking-Strahlung abgibt. Dabei sinkt seine Entropie, ein Maß für seine möglichen quantenmechanischen Zustände. Gleichzeitig steigt mit der Menge der emittierten Strahlung deren Entropie – laut Hawkings ursprünglicher Berechnung immer weiter, bis das Schwarze Loch verschwunden ist. Stattdessen könnte allerdings ab dem Zeitpunkt, an dem beide Entropiewerte gleich sind (der Page-Zeit), Information aus dem Inneren des Schwarzen Lochs auf die Strahlung übertragen werden. Das erzeugt am Schluss ein eindeutiges Muster in der gesamten abgegebenen Strahlung, und die Entropie verschwindet.



darauf zurück, dass unsere Versuche für eine Verbindung von Quantenmechanik und der Physik Schwarzer Löcher zu zaghaft waren. Es reichte nicht aus, die Quantenmechanik nur auf die Materie in Schwarzen Löchern anzuwenden. Wir mussten darüber hinaus eine quantenmechanische Betrachtung für deren gesamte Raumzeit entwickeln.

Zwar wirkt sich die Quantenphysik unter normalen Umständen kaum auf die Raumzeit aus. Die subtilen Effekte könnten aber durch die starke Verschränkung im Verlauf des Verdampfens intensiviert werden und enorme Auswirkungen haben.

Bei einem Zugang zur Quantennatur der Raumzeit half uns die von Richard Feynman entwickelte Methode der so genannten Pfadintegrale. Die Technik basiert auf dem merkwürdigen Umstand, dass der Quantentheorie zufolge Teilchen, die sich von Punkt A nach Punkt B bewegen, nicht lediglich einen einzigen Weg beschreiten. Vielmehr nehmen sie gewissermaßen alle dazwischen liegenden Strecken gleichzeitig.

Das Pfadintegral beschreibt die Reise eines Teilchens als Quantenüberlagerung jedweder möglichen Routen. In ähnlicher Weise kann sich eine quantisierte Raumzeit in

einer Überlagerung verschiedener komplizierter Formen befinden, die sich auf unterschiedliche Arten entwickeln. Wenn etwa am Anfang und am Ende der Betrachtung zwei einzelne Schwarze Löcher stehen, besteht für die Quantenraumzeiten in ihrem Inneren eine gewisse Wahrscheinlichkeit, vorübergehend durch ein kurzlebiges Wurmloch überbrückt zu werden.

Üblicherweise ist die Chance dafür verschwindend gering. Wenn wir jedoch die Hawking-Strahlung bei der Berechnung des Pfadintegrals einbeziehen, dann steigt wegen der ausgeprägten Verschränkung zwischen der Strahlung und dem Inneren der Schwarzen Löcher die Wahrscheinlichkeit. Zu dieser Erkenntnis kam ich durch Arbeiten, die ich 2019 zusammen mit Thomas Hartman, Juan Maldacena, Edgar Shaghoulian und Amirhossein Tajdini durchführte. Gleichzeitig und unabhängig von uns gelangten die Theoretiker Geoffrey Penington, Stephen Shenker, Douglas Stanford und Zhenbin Yang gemeinsam zu ähnlichen Schlüssen.

Verbindungen durch Raum und Zeit stülpen das Innere nach außen

Welche Folgen hat nun die Verknüpfung der Schwarzen Löcher durch Wurm Löcher? Das Phänomen berührt die Frage, wie viel Verschränkungsentropie zwischen einem Schwarzen Loch und seiner Hawking-Strahlung besteht. Der Schlüssel zur Berechnung ist ein Replikat-Trick genannter Kniff: Man misst die Entropie in Gegenwart mehrerer Kopien des Systems.

Die physikalische Konsequenz der temporären Wurm Löcher liegt darin, dass sie das Innere der verschiedenen Schwarzen Löcher austauschen. Was sich zuvor in einem Exemplar befand, steckt hinterher in einem anderen, weit entfernten. Die hin- und hergewechselte Region im Schwarzen Loch heißt Insel und umfasst fast das gesamte Innere bis zum Ereignishorizont.

Diese Vertauschung liefert die Lösung des Informationsparadoxons. Wenn man sich eines der Schwarzen Löcher und seine Hawking-Strahlung anschaut, nimmt der Austausch der Insel alle Partnerteilchen mit, die mit der ausgesandten Hawking-Strahlung verschränkt sind. Dadurch verschwindet die Verschränkung zwischen dem Schwarzen Loch und seiner Strahlung.

Berücksichtigt man den Effekt der Wurm Löcher, gewinnt man eine neue Formel für die Verschränkungsentropie für ein einzelnes Schwarzes Loch. Hawkings ursprüngliche Berechnung beruht allein auf der Anzahl der außerhalb gelegenen Teilchen. Nun allerdings verhält sich die Insel mathematisch seltsamerweise so, als befände auch sie sich jenseits des Schwarzen Lochs und wäre ein Teil der Hawking-Strahlung. Daher fließt die Verschränkung zwischen der Insel und der Außenwelt nicht mehr in die Entropie ein.

Stattdessen ergibt sich die vorhergesagte Entropie fast ausschließlich aus der Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Tausch tatsächlich stattfindet. Sie ist gleich der Außenfläche der Insel – das entspricht grob der Fläche des Ereignishorizonts – geteilt durch Newtons Gravitationskonstante. Sie sinkt also, wenn das Schwarze Loch schrumpft.

Der letzte Schritt bei der Berechnung der Entropie besteht darin, das gemeinsame Minimum aus der neuen Formel und Hawkings ursprünglichem Ansatz zu ermitteln. Zunächst entspricht die Verschränkungsentropie dem, was sich laut Hawking ergibt. Sobald aber das Schwarze Loch kleiner wird, übernimmt unsere Formel den Staffelstab. So erhalten wir die gesuchte Page-Kurve.

Bemerkenswerterweise beseitigt das Ergebnis beide Paradoxien zugleich. Es lässt einerseits die Feuerwand verschwinden, indem es nichtlokale Vorgänge ermöglicht, die unsere AMPS-Gruppe noch abgelehnt hatte. Die Verschränkungen werden nicht mehr am Horizont getrennt, sondern wir müssen das Innere – die Insel – als einen Teil der Außenwelt behandeln. Andererseits offenbart die Formel, wie Schwarze Löcher die Page-Kurve erzeugen und Informationen erhalten bleiben.

Naive Lösungen des Spannungsverhältnisses aus dem Informationsparadoxon hatten uns zuvor auf dramatische Veränderungen bei der Struktur Schwarzer Löcher schließen lassen. Nun erhalten wir durch die subtilen Effekte fluktuierender Wurm Löcher ein in sich konsistentes Bild. Darin behält ein Schwarzes Loch seine Eigenschaften, wie sie von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt werden, jedoch müssen wir eine implizite, aber folgenreiche Nichtlokalität hinnehmen. Dank ihr entkommt die Information einem Schwarzen Loch nicht, indem sie den unüberwindbaren Ereignishorizont nach außen überschreitet, sondern indem sie tiefer hineinfällt.

So faszinierend der Durchbruch sein mag: Wir haben gerade erst damit begonnen, die möglichen Konsequenzen zu untersuchen. Zwar stellt die Insel einen Zusammenhang mit der Hawking-Strahlung her, aber unsere Formel liefert keine Vorhersage für spezifische Messwerte der Strahlung. Immerhin wissen wir nun, dass Wurm Löcher die fehlende Zutat sind. Sie ermöglichen es der Gravitation, auf das Werkzeug der Verschränkung zuzugreifen und nichtlokale Effekte hervorzurufen. Das wirkt ähnlich beunruhigend, wie es die Verschränkung seinerzeit für Einstein war. Zugegeben, in gewisser Hinsicht lag er mit seiner spukhaften Fernwirkung wohl richtig. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema
finden Sie unter
[spektrum.de/t/schwarze-loecher](https://www.spektrum.de/t/schwarze-loecher)



ISTOCK / OORKA

QUELLEN

Almheiri, A. et al.: Black holes: Complementarity or firewalls? ArXiv, 1207.3123v4, 2013

Almheiri, A. et al.: Replica wormholes and the entropy of Hawking radiation. ArXiv 1911.12333, 2020

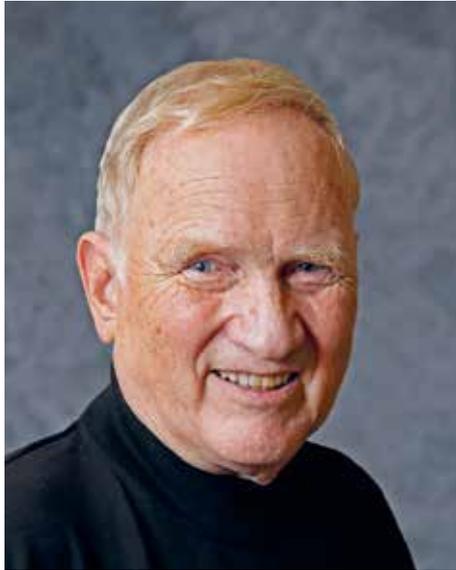
Penington, G. et al.: Replica wormholes and the black hole interior. ArXiv 1911.11977, 2020

NOBELPREIS FÜR PHYSIK PHYSIKER MIT FERNWIRKUNG

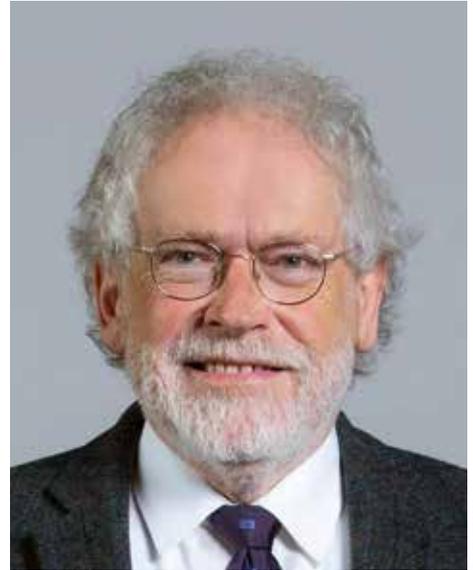
Die quantenmechanische Verschränkung ist stärker als alles, was wir intuitiv begreifen können. Das nachzuweisen gelang nur mittels ausgeklügelter Versuchsaufbauten und Messstrategien. Aus diesen theoretischen und instrumentellen Grundlagen erwuchs die moderne Quantenkommunikation.



JEAN-FRANÇOIS DARIS



PETER LYONS (COMMONS:WIKIMEDIA:ORG/WIKI/FILE:JOHNCLAUSER.JPG) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/PP-SA/4.0/LEGAL/CODE)



ELIX ZILBERBERG

Mit aufwändigen Experimenten an verschränkten Quantenzuständen beseitigten der Franzose Alain Aspect (links), der US-Amerikaner John F. Clauser (Mitte) und der Österreicher Anton Zeilinger seit den 1970er Jahren allmählich die letzten Zweifel an der Seltsamkeit der Quantenmechanik. Dafür erhalten sie den Nobelpreis für Physik 2022.

► Eigentlich wollte Anton Zeilinger in Ruhe an einem wissenschaftlichen Artikel arbeiten, erzählte der Quantenphysiker bei einer Pressekonferenz an der Universität Wien. Doch eine Anruferin habe sich von seiner Assistentin partout nicht abwimmeln lassen. »Sie will nicht sagen, wer sie ist und was sie von dir will – aber ihre Telefonnummer ist aus Schweden.« Da habe er das Gespräch dann eben doch angenommen. So erfuhr er, dass ihm zusammen mit dem Franzosen Alain Aspect und dem US-Amerikaner John F. Clauser der Nobelpreis für Physik des Jahres 2022 zugesprochen worden ist.

Die drei ausgezeichneten Forscher erhalten den wichtigsten Wissenschaftspreis der Welt »für Experimente mit verschränkten Photonen, den Nachweis der Verletzung der Bellschen

Ungleichungen und wegweisende Quanteninformationswissenschaft«. Mit ausgeklügelten Versuchen räumten sie im Lauf der vergangenen Jahrzehnte alle Zweifel daran aus, dass es zwischen quantenmechanischen Teilchen eine außergewöhnliche und unintuitive Art der Verknüpfung gibt.

Aber der Reihe nach. Albert Einstein war davon überzeugt, dass sich nichts schneller ausbreitet als Licht. Diese Erkenntnis ist die Grundlage seiner Relativitätstheorie. Deswegen beschränken sich alle Wirkungen stets auf ihre unmittelbare Umgebung. Und wann immer man etwas beeinflussen will, das weit entfernt ist, muss man warten, bis ein lichtschnelles Signal die Strecke zurückgelegt hat. Das ist das Prinzip der Lokalität. Außerdem sollten Teilchen stets in einem klar definierten Zustand sein, unabhängig

davon, ob man hinschaut oder nicht. Das ist der Gedanke des Realismus.

Beides wurde mit dem Aufkommen der Quantenmechanik in den 1920er Jahren tief erschüttert. Im Reich der Quanten wimmelt es nur so vor seltsamen Vorgängen. So verhalten sich die gleichen physikalischen Objekte je nach Versuchsaufbau mal wie punktförmige Teilchen und mal wie ausgedehnte Wellen. Schlimmer noch war für Einsteins Weltbild etwas, dessen Implikationen der Physiker als »spukhafte Fernwirkung« bezeichnete und das Ausdruck eines zentralen Aspekts der Quantenmechanik ist: die Verschränkung. Sie verknüpft die Eigenschaften zweier Teilchen untrennbar miteinander, die beliebig weit voneinander entfernt sein können. Erst wenn man eines der beiden vermisst, wird ihr Zustand festgelegt – und zwar



sofort, sowohl für das beobachtete als auch für das andere. Wie soll das ungeachtet der Entfernung funktionieren, also selbst für ein Teilchen, das sich womöglich am anderen Ende der Galaxis befindet?

Einstein und manchen Zeitgenossen war diese Vorstellung höchst suspekt. Sie vermuteten »verborgene Variablen«. Das sind Kenngrößen, die den beteiligten Teilchen von Anfang an mitgegeben werden, die deren Verhalten vorausbestimmen und lediglich von der Quantentheorie nicht erfasst werden. Damit wäre der lokale Realismus gewahrt und der Zufall der Quantenmechanik ein trügerisches, weil unvollständiges Bild der Welt. Andere Theoretiker widersprachen. Der österreichische Physiker und Nobelpreisträger von 1933, Erwin Schrödinger, nannte die Verschränkung »das charakteristische Merkmal der Quantenmechanik, das ihre gesamte Abkehr von den klassischen Denkansätzen erzwingt.«

1964 näherte sich der nordirische Physiker John Stewart Bell dem Streit um das Phänomen mit einem neuen Ansatz, der zunächst kaum beachtet wurde. Bei Bells Ungleichung geht es um statistische Untersuchungen an miteinander verbundenen Teilchenpaaren. Bell zeigte: Wenn es in einer Theorie lokale verborgene Variablen gibt, dann gilt die Ungleichung. Trifft Letztere nicht zu, dann muss man hinnehmen, dass die Quantenmechanik seltsam ist, und, je nach Betrachtungsweise, Lokalität oder Realismus aufgeben. Die nun ausgezeichneten Nobelpreisträger gehörten zu den Ersten, die erkannten, welches Werkzeug Bell ihnen damit an die Hand gegeben hatte. Nun war es möglich, die Fundamente der Quantenmechanik im Labor auf die Probe zu stellen.

Der US-Amerikaner John F. Clauser dachte sich in den frühen 1970er Jahren ein Experiment aus, mit dem sich Bells Ungleichung überprüfen ließ. Dazu übernahm er einen Apparat

von einem Kollegen und baute ihn aufwändig um. In dem Instrument senden angeregte Kalziumatome zwei miteinander verschränkte Lichtteilchen aus, die in entgegengesetzte Richtungen davonfliegen. Die Photonen besitzen eine Ausrichtung, Polarisation genannt, von der man vorerst nur weiß, dass sie bei beiden Teilchen parallel ist. Die genaue Orientierung ist unbekannt. Sie lässt sich feststellen, wenn man die Photonen an den jeweiligen Enden des Instruments durch einen Filter schickt. Clauser probierte systematisch verschiedene Winkel aus und maß, wie stark die beiden Photonen miteinander verbunden waren. Schließlich erhielt er eine Reihe von Datenpunkten, die perfekt zu dem passten, was die Quantenmechanik vorhersagte – aber mit der Bell-Ungleichung nicht zu vereinbaren waren. Das heißt, die Lichtteilchen mussten stärker miteinander verknüpft sein, als es eine lokale Theorie mit verborgenen Variablen zulassen würde.

QUANTENSCHLÜSSEL INS ALL Für ein Quanten-Videotelefonat am 29. September 2017 tauschte das Observatorium Lustbühel in Graz über einen Satelliten Lichtteilchen mit Bodenstationen in China aus.



Es gab Schlupflöcher bei dieser Interpretation. Das Fazit beruht streng genommen auf der Annahme, dass die Messungen an den beiden Enden unabhängig voneinander erfolgen, es also keine Möglichkeit gibt, sich abzusprechen. Doch das ist nicht garantiert, wenn man die Ausrichtung der Filter bei jedem Durchlauf vorab festlegt. Vielleicht stellt man dabei ja, und sei es unbewusst, alles genau so ein, dass besonders viele stark korrelierte Teilchen durchkommen. Eigentlich dürfte die Orientierung der Filter jeweils nur lokal festgelegt werden, während die Photonen bereits auf dem Weg sind. So wäre jede Einflussnahme ausgeschlossen.

Die Verschränkung ist nicht nur ein Kuriosum, sondern zudem eine wertvolle Ressource

Genau ein solches verfeinertes Experiment ersann der Franzose Alain Aspect 1976 und führte es 1982 gemeinsam mit Kollegen durch. Der Versuchsaufbau war leistungsfähiger und lieferte mehr Daten als Clausers, vor allem aber ließen sich die Filtereinstellungen im laufenden Experiment zufällig verändern. Das musste während des nur wenige Meter langen Wegs der Photonen durch den optischen Aufbau innerhalb von einigen Nanosekunden passieren. Die Bewältigung dieser technischen Herausforderung belohnte Aspect mit Daten, die kaum Zweifel daran ließen, dass die Quantenmechanik über alles hinausgeht, was wir auf der Basis unserer Alltagserfahrungen begreifen können.

Doch die unwirkliche Quantenverschränkung ist nicht nur ein Kuriosum, sondern zudem eine wertvolle Ressource. Dass die in den 1970er und

1980er Jahren gewonnenen Einsichten 2022 mit der höchsten wissenschaftlichen Auszeichnung gewürdigt wurden, ist wohl auch diesem Umstand geschuldet sowie den spektakulären Fortschritten, die der dritte Nobelpreisträger auf dem Gebiet machen konnte. Anton Zeilinger wurde ebenso wie Clauser und Aspect in den 1940er Jahren geboren und trug zur Untersuchung der Bell-Ungleichung bei. Darüber hinaus widmete sich der Österreicher einer weiteren Frage: Wie lässt sich die Verschränkung dazu nutzen, Informationen zu übertragen?

Zeilinger wollte experimentell herausfinden, ob sich ein unbekannter quantenmechanischer Zustand – wie die Polarisation eines Photons – von einem Teilchen auf ein anderes übertragen lässt. Theoretisch war das bereits 1992 vorhergesagt worden. Wenn sich zwei miteinander verschränkte Lichtteilchen wie in Clausers Experiment in verschiedene Richtungen bewegen, kann eins auf ein weiteres treffen. Stellt man es geschickt an, wäre das erste Teilchen mit diesem daraufhin genauso verschränkt wie zuvor mit seinem ursprünglichen Partner. Ein solches Experiment gelang Zeilinger 1997.

Diese Art der Kommunikationsübertragung wird heute als Quantenteleportation bezeichnet. Prompt wurde Zeilinger in der Nobelpreis-Presskonferenz darauf angesprochen, ob es wohl eines Tages gelänge, Menschen oder Dinge zu teleportieren. Zeilinger machte daraufhin klar: »Es ist nicht wie bei Star Trek.« Es gehe nicht darum, in den Laboren Gegenstände an einer Stelle verschwinden und an einer anderen wieder auftauchen zu lassen. Die Materie selbst, so Zeilinger, sei gar nicht wichtig. Das Entscheidende sei die von ihr transportierte Information und was mit ihr passiert.

Verschränkung lässt sich nicht kopieren. Geht sie auf ein neues Teilchen über, verschwindet sie stets beim vorigen. Sie ermöglicht abhörsichere Kommunikation, denn jedes Lauschen verändert den fragilen Quantenzustand. Die nobelpreiswürdigen Experimente haben so nicht nur die Absonderlichkeiten der Quantenme-

chanik offengelegt, sondern zugleich gezeigt, wie diese sich nutzen lassen: Institute, Unternehmen und Staaten auf der ganzen Welt arbeiten inzwischen an den Grundlagen kryptografischer Quantennetzwerke. Zwischen deren einzelnen Knoten gelingt der Transport von Verschränkung durch Quantenteleportation bereits. Zeilinger hat hier nicht nur Pionierarbeit geleistet, sondern forscht mit verschiedenen Arbeitsgruppen weiterhin intensiv. 2015 übermittelte er mit seinem Team Informationen über die Kanareninseln hinweg; 2017 überspannte die Verschränkung mit Hilfe eines chinesischen Satelliten sogar Kontinente.

Bevor die Entwicklungen tatsächlich zu einem Quanteninternet führen, wird sicher noch einige Zeit vergehen. Insofern betrachtet Anton Zeilinger seinen Preis als »Ansporn für junge Menschen«, so wie er von seinem Doktorvater Helmut Rauch inspiriert und motiviert worden sei.

Mike Zeitz ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Aspect, A. et al.: Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters* 49, 1982

Freedman, S. J., Clauser, J. F.: Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters* 28, 1972

Pan, J.-W. et al.: Experimental entanglement swapping: Entangling photons that never interacted. *Physical Review Letters* 80, 1998

LITERATURTIPPS

Zeilinger, A.: Quanten-Teleportation. *Spektrum der Wissenschaft* 6/2000, S. 30

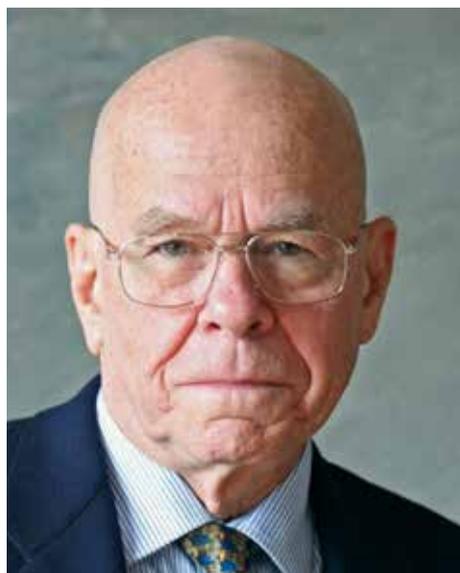
Der Nobelpreisträger von 2022 erläutert die Hintergründe seiner Experimente zur Übertragung von Verschränkung.

Zeilinger, A.: Die Wirklichkeit der Quanten. *Spektrum der Wissenschaft* 11/2008, S. 54

In der Ausgabe zum 30-jährigen »Spektrum«-Jubiläum schildert Anton Zeilinger die Bedeutung der Information in der Quantenwelt.

NOBELPREIS FÜR CHEMIE EIN BAUKASTEN FÜR REAKTIONEN

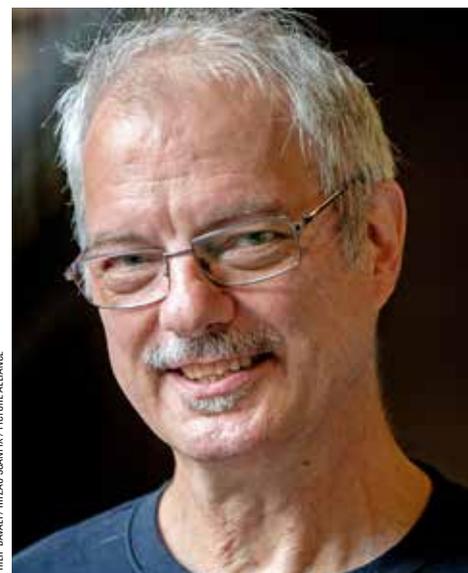
Barry Sharpless und Morten Meldal haben höchst effiziente Reaktionen ersonnen, um verschiedenste organische Moleküle möglichst einfach herzustellen. Carolyn Bertozzi nutzte lebende Zellen als Reaktoren und begründete damit die bioorthogonale Chemie.



ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY



LINDA A. DICERIO, STANFORD NEWS SERVICE



PHILIP DAVALLI, FRITZAU SCHNIPPY / PICTURE ALLIANCE

Der US-Amerikaner K. Barry Sharpless (links) am kalifornischen Scripps Research Institute bekommt bereits seinen zweiten Nobelpreis. Carolyn R. Bertozzi, ebenfalls aus den USA, forscht heute an der Stanford University in Kalifornien. Der Däne Morten Meldal ist Professor an der Universität in Kopenhagen.

Alles begann im Grunde damit, dass Barry Sharpless im Jahr 2001 etwas zu beanstanden hatte. Und zwar nicht, weil er in jenem Jahr seinen ersten Nobelpreis für Chemie erhalten hatte. Sondern weil es seinem Fachgebiet aus seiner Sicht an geeigneten Methoden mangelte. Es spricht für ihn, dass er sich nicht nur beklagte. Stattdessen legte er das Fundament für einen neuen, extrem effizienten Typ chemischer Reaktionen. Für deren Entwicklung und Umsetzung bekam er nun zusammen mit dem Dänen Morten Meldal und der US-Amerikanerin Carolyn R. Bertozzi seinen zweiten Nobelpreis für Chemie zugesprochen. Sharpless ist nach dem Chemiker Frederik Sanger der zweite, der die Auszeichnung zweimal erhalten hat.

Sharpless bemängelte, dass sich die organische Chemie bei der Herstellung von Molekülen am Vorbild der

Natur orientiere. Deren Syntheseprozess, bei der eine so genannte Carbonylgruppe als Molekülbaustein im Mittelpunkt steht, sei aber ungeeignet, um schnell neue Stoffe mit gewünschten Eigenschaften zu erzeugen. »Mit einigen Milliarden Jahren und einem Planeten hatte die Natur reichlich Zeit und Material zur Verfügung. Wir Chemiker sind allerdings nicht in dieser glücklichen Lage, nicht zuletzt, da wir an menschliche Daseinsdauern gebunden sind«, schrieb er zusammen mit seinen Kollegen M. G. Finn und Hartmuth C. Kolb in der Fachzeitschrift »Angewandte Chemie«. Mit dem Aufsatz prägten die drei den Begriff Click-Chemie für ihre neue Art von Reaktionen.

Hierbei hatten die Wissenschaftler ein ganz praktisches Problem im Blick: den enormen Aufwand, den die pharmazeutische Industrie betreiben muss,

um auf der Basis von Naturstoffen Medikamente mit den gewünschten Eigenschaften zu erzeugen. Lebewesen stellen unzählige Substanzen mit ganz bestimmten Funktionen her. Die aber haben meist eine komplexe chemische Struktur mit sehr langen Kohlenstoffketten; um sie im Labor nachzubauen, muss man sie erst mühselig Stück für Stück zusammensetzen.

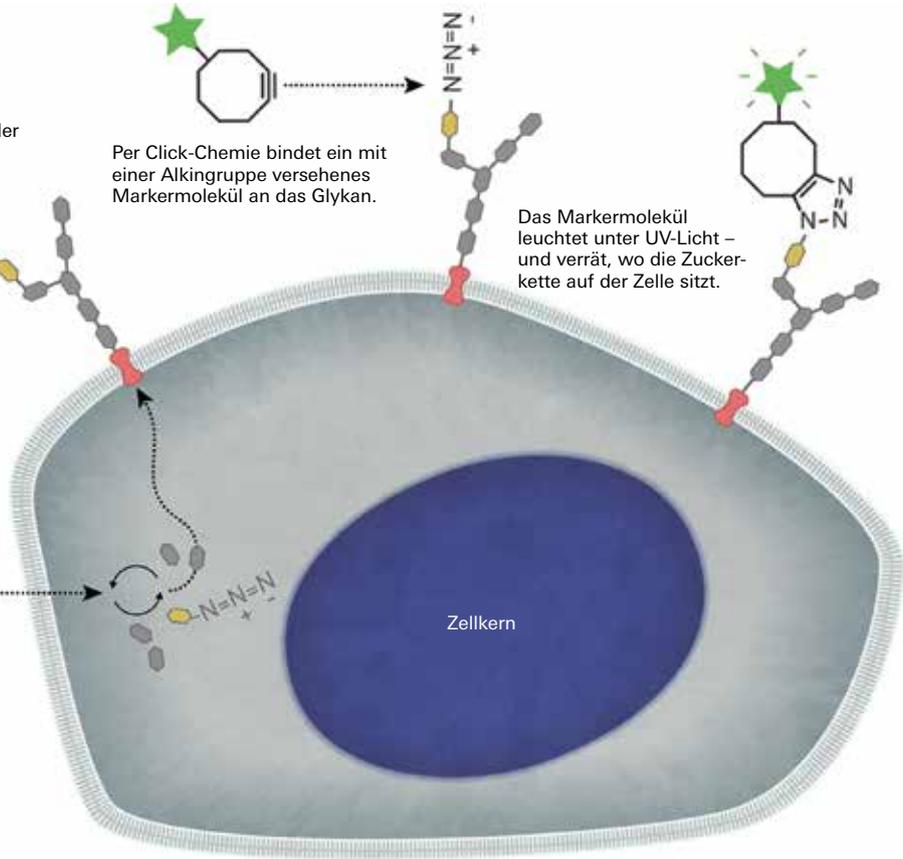
Sharpless hatte eine völlig andere Vorstellung davon, wie Chemie funktionieren sollte. Statt einer Rumpelkammer aus unzähligen Reaktionen schwebte ihm ein gut sortierter Werkzeugkasten mit einigen wenigen hocheffektiven Instrumenten vor. Mit diesen sollte sich ohne viel Aufwand eine große Bandbreite von Molekülen herstellen lassen, die man dann auf interessante Eigenschaften hin testen könnte. Neue medizinische Wirkstoffe

Die Zelle baute den veränderten Zucker in ein Glykan ein – eine verzweigte Zuckerkette, die an der Oberfläche der Zelle sitzt.

Per Click-Chemie bindet ein mit einer Alkylgruppe versehenes Markermolekül an das Glykan.

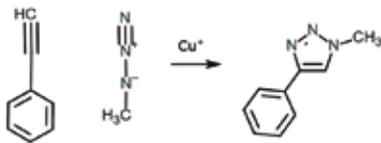
Das Markermolekül leuchtet unter UV-Licht – und verrät, wo die Zuckerkette auf der Zelle sitzt.

Bertozzi fütterte die Zellen mit einem Zuckerbaustein, an den eine Azidgruppe gekoppelt war.



ZUCKER FINDEN Carolyn

Bertozzi modifizierte die ursprüngliche Click-Reaktion (unten), um sie auch in Zellen einsetzen zu können. Auf diese Weise erschuf sie ein Instrument, um die schwer zu untersuchenden Zuckerstrukturen auf der Zelle zu beobachten.



sollten nicht mehr auf Molekülen aus der Natur basieren, sondern auf einer effizienten Chemie, die einfach und gezielt unzählige verschiedene Molekülstrukturen erzeugt – und damit auch unzählige neue Wirkungen.

Damit das gelingt, müssen die Reaktionen gleich mehrere außerordentlich harte Anforderungen erfüllen: Die beiden Reaktionspartner sollen leicht und dauerhaft »zusammenklicken«, dürfen aber gleichzeitig mit keinem anderen Molekül oder Molekülteil reagieren. Daneben müssten die Verfahren sowohl im Labor als auch im großtechnischen Maßstab mit wenig Aufwand funktionieren, so Sharpless. Das heißt, die ideale

Reaktion läuft unter möglichst einfachen Bedingungen ab, erzeugt wenig Nebenprodukte, und das Endprodukt lässt sich leicht abtrennen.

Damit forderte er kaum weniger als eine Umorientierung der bisherigen Chemie. Weg von Carbonylverbindungen, weg von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen, weg von kunstvoll optimierten Reaktionsbedingungen und weg von schlechten Ausbeuten und aufwändiger Trennung. In den Werkzeugkasten der Click-Chemie kommen nur perfekte Reaktionen.

Bald hatte der Wissenschaftler eine Reaktion im Blick, die tatsächlich »klick!« macht. Bei der 1,3-dipolaren Cycloaddition reagiert ein Azid – eine Kette aus drei Stickstoffatomen – in einem einzigen schnellen Schritt mit einer Doppel- oder Dreifachbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen und bildet einen stabilen Fünfring (siehe »Zucker finden«). Allerdings verläuft die Reaktion oft langsam und ergibt ein Gemisch zweier unterschiedlicher Produkte – entsprechend den beiden

Ausrichtungen, in denen die stabförmigen Moleküle während der Reaktion nebeneinanderliegen können.

Doch noch im gleichen Jahr interessierten sich Morten Meldal und sein Kollege Christian W. Tornøe in Kopenhagen für den als 1,2,3-Triazol bezeichneten Fünfring, der bei der 1,3-dipolaren Cycloaddition eines Azids an ein Alkin – also eine Dreifachbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen – entsteht. Dieser Molekülteil ist auch pharmazeutisch interessant, und die beiden Forscher versuchten, ihn an ein künstlich hergestelltes Peptid zu koppeln, ohne das empfindliche Eiweiß zu zerstören.

Die beiden stießen auf sehr ähnliche Anforderungen wie jene, die Sharpless an seine Click-Chemie stellte: Die Reaktion musste unter milden Bedingungen schnell und vollständig ablaufen. Dabei durften die beteiligten Moleküle auf keinen Fall mit den chemischen Gruppen des Peptids reagieren und keine Gemische aus ähnlichen Molekülen entstehen.

Tatsächlich stießen Meldal und Tornøe auf eine fast wundersame Lösung des Problems. »Bei der Analyse unserer Resultate stellten wir fest, dass etwas Seltsames vor sich geht«, sagt Meldal in einem Interview, das auf der Website der Nobelpreise veröffentlicht ist. Wenn sie nämlich Kupfer in seiner einfach oxidierten Form hinzugaben, schienen sich alle Nachteile der 1,3-dipolaren Cycloaddition zu verflüchtigen.

Die Umwandlung lief plötzlich sehr schnell ab, die beteiligten Chemikalien reagierten fast vollständig und – was niemand erwartet hatte – es entstand immer nur eine von zwei möglichen Versionen des Produkts. »Die Reaktionen, die wir im Labor sahen, hätten so eigentlich nach unserem Verständnis nicht ablaufen dürfen«, erklärt Meldal. Auch Sharpless stieß bald auf ein sehr ähnliches Verfahren. Auf einmal gab es sie, die perfekte Reaktion.

Mit dieser 1,3-dipolaren Cycloaddition von Aziden mit Alkinen existierte

Die Click-Reaktion wurde quasi über Nacht zu einer der wichtigsten Kupplungsreaktionen

plötzlich eine schnelle, einfache und zuverlässige Methode, chemische Bausteine aller Art miteinander zu verknüpfen. Sie erwies sich als so praktisch für viele Teilgebiete der Chemie, dass sie quasi über Nacht zu einer der wichtigsten chemischen Kupplungsreaktionen wurde. Tatsächlich nennt man sie bis heute die »Click-Reaktion«, obwohl es inzwischen einige weitere Reaktionen für den von Sharpless anvisierten Werkzeugkasten gibt.

Die Click-Chemie hat seither viel weitere Kreise gezogen, als Sharpless vermutlich geahnt hatte. Nicht zuletzt

machten viele ihrer Eigenschaften die 1,3-dipolare Cycloaddition für die Biologie und Biochemie interessant. Die Reaktionsbedingungen sind so mild, dass man sie prinzipiell nutzen könnte, um Markierungssubstanzen gezielt an Biomoleküle zu binden und damit Strukturen in lebenden Zellen sichtbar zu machen. Das einzige Hindernis: Kupfer ist giftig.

Um das Problem zu lösen, ging Carolyn R. Bertozzi zurück zu Experimenten, die Mitte des 20. Jahrhunderts mit verschiedenen Versionen der 1,3-dipolaren Cycloaddition durchgeführt worden waren. Dabei hatte sich herausgestellt, dass die Reaktion viel schneller und bereitwilliger ablief, wenn die Dreifachbindung zwischen den Kohlenstoffatomen nicht gerade, sondern etwas verbogen war: wenn sie nämlich zu einem Ring gehörte.

Die zusätzliche Ringspannung macht das Molekül deutlich reaktiver, so dass die Click-Reaktion auch ohne Kupfer abläuft. Wie Bertozzi heraus-



Ein Geschenk, das ankommt!

Mit einem **Spekturm**-Geschenkgutschein haben die Beschenkten freie Wahl: ob Abonnement, Einzelhefte oder Kalender, ob Print- oder Digitalprodukte. In unserem Onlineshop www.spektrum.de/shop bieten wir eine große Auswahl an.

Spektrum.de/aktion/gutscheine



find, war eine Dreifachbindung in einem Kohlenstoff-Achtring für ihre Zwecke reaktiv genug. Dabei entstehen zwar wieder zwei Versionen des Produkts, aber das war der Forscherin gleich – denn bei dieser Technik geht es nur ums Verbinden. Zellen, die mit azidhaltigen Zuckerbausteinen gefüttert werden, bauen diese bereitwillig in Biomoleküle ein. Bertozzi verband dann den Achtring mit einer Marker-substanz und ließ ihn mit dem Azid zusammenklicken, so dass die Marker-substanz die Verteilung des Biomoleküls in der Zelle anzeigte (siehe »Zucker finden«).

Die Click-Reaktion war allerdings nur ein Beispiel eines viel weiter reichenden Konzepts, das Carolyn Bertozzi schon zuvor angedacht hatte. Ihr Ziel war eine bioorthogonale Chemie, bei der chemische Reaktionen in der lebenden Zelle ablaufen, ohne sie zu stören oder von ihr beeinträchtigt zu werden. Schon bevor sie die Click-Reaktion für die Biologie nutzbar

machte, hatte sie ein ähnliches System entwickelt, das auf der so genannten Staudinger-Kupplung von Aziden und phosphorhaltigen Molekülen basiert. Ziel ihrer Bemühungen war es, die Methoden der klassischen chemischen Synthese innerhalb von einzelnen Zellen und ganzen Lebewesen einzusetzen, um gezielt bestimmte Moleküle zu markieren.

»Was uns auf die Idee zur bioorthogonalen Chemie gebracht hat, war unser Interesse daran, Moleküle auf der Zelloberfläche sichtbar zu machen«, sagt Bertozzi. Das Prinzip ähnelt der Click-Chemie, ist aber sogar noch schwieriger umzusetzen. Das zeigt das Beispiel der 1,3-dipolaren Cycloaddition gut: Kupfer ist im Labor kein Problem, in der Zelle dagegen tödlich. Um Click-Chemie in einer Zelle zu betreiben, muss man immer noch ein bisschen strenger sein.

Der Lohn der Mühe ist ein ganz neuer Blick auf Zellen – und gerade auf die bis heute rätselhafteste Klasse von

Um Click-Chemie in einer Zelle zu betreiben, muss man immer noch ein bisschen strenger sein

Biomolekülen. Das bestätigt auch Bertozzi: »Speziell ging es uns um die Glykane«, sagt sie. Das sind verzweigte Zuckermoleküle, die viele wichtige Funktionen im Körper haben, aber schwer zu untersuchen sind. Die bioorthogonale Chemie ermöglichte grundlegende Entdeckungen auf diesem Gebiet. So erkannte ein Team um die Forscherin 2019, dass ein großer Teil der RNA in Zellen Zuckermoleküle trägt. Welche Aufgaben diese als glycoRNA bezeichnete Stoff-

Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS



Im November erhalten Sie das **Spektrum-SPEZIAL PMT »Vom Quant zur Materie«** kostenfrei zum Download für Abonnentinnen und Abonnenten

Weitere Vorteile und Download:
[Spektrum.de/plus](https://www.spektrum.de/plus)

klasse hat, ist noch gänzlich rätselhaft – doch ohne Chemie, die sogar in Zellen funktioniert, wüssten wir nicht einmal von ihr.

In der organischen Chemie haben die präzisen, einfachen und zuverlässigen Verfahren der Click-Chemie – von denen es inzwischen einen ganzen Strauß gibt – sogar noch größere Bedeutung erlangt, von der Medikamentenforschung bis hin zur Materialwissenschaft. Natürlich nutzt man für die organische Synthese bis heute weiterhin Carbonylverbindungen,

aggressive Lösungsmittel und extreme Reaktionsbedingungen, und auch die Naturstoffe sind aus der Medikamentenforschung nicht verschwunden. Aber der vor zwei Jahrzehnten von Sharpless erdachte Werkzeugkasten hat sich seither gefüllt – und die perfekten Reaktionen stehen erst am Anfang ihrer Entwicklung. »Wir kratzen bislang nur an der Oberfläche der organischen Chemie«, sagt Meldal.

Der Chemiker **Lars Fischer** ist Journalist und Redakteur bei »Spektrum.de«.

QUELLEN

Dube, D.H., Bertozzi, C.R.: Metabolic oligosaccharide engineering as a tool for glycobiology. *Current Opinion in Chemical Biology* 7, 2003.

Kolb, H.C. et al.: Click chemistry: Diverse chemical function from a few good reactions. *Angewandte Chemie* 40, 2001

Tornøe, C.W. et al.: Peptidotriazoles on solid phase: [1,2,3]-triazoles by regio-specific copper(i)-catalyzed 1,3-dipolar cycloadditions of terminal alkynes to azides. *Journal of organic chemistry* 67, 2002

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN BEGRÜNDER DER PALÄOGENETIK

Dem Biologen Svante Pääbo ist es gelungen, das Erbgut längst ausgestorbener Frühmenschen zu rekonstruieren. Dabei zeigte sich unter anderem, dass wir erstaunlich viel mit dem Neandertaler gemein haben. Pääbo erhält dafür den diesjährigen Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.

► Kaum eine Frage beschäftigt uns Menschen so wie die, wer wir sind und woher wir kommen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler möchten das empirisch klären. Sie untersuchen Fossilien, prüfen Verwandtschaftsverhältnisse und nehmen molekularbiologische Analysen vor. Daraus versuchen sie abzuleiten, wann und wo der moderne Mensch (*Homo sapiens*) erstmals erschien und was ihn von anderen Mitgliedern der Gattung *Homo* unterscheidet.

Dass wir den Antworten heute ein ganzes Stück näher sind als noch vor wenigen Jahren, dazu hat der Paläogenetiker Svante Pääbo maßgeblich beigetragen. Ihm und seinen Forschungsteams gelang es, das Genom von Neandertalern zu entschlüsseln, Verwandten des modernen Menschen, die vor rund 30000 Jahren ausstarben. Damit hat er wichtige Einblicke in die Evolution des Menschen geliefert.

Als Pääbo in den 1980er Jahren begann, sich mit alter DNA zu beschäftigen, lag die (Wieder-)Entdeckung des Neandertalers mehr als

100 Jahre zurück. Um die Mitte des 19. Jahrhunderts waren die ersten Fossilien dieser Frühmenschenart zu Tage gekommen. Die Spezies schien so eng wie kaum eine andere mit dem modernen Menschen verwandt. Wie *Homo neanderthalensis* und *Homo sapiens* aber genau zueinander stehen, war in Fachkreisen jahrzehntelang umstritten. Immer wieder kam die Vermutung auf, der Neandertaler sei ein Vorfahre des heutigen Menschen gewesen – eine These, die heute im Wesentlichen als widerlegt gilt.

Seit Langem war klar, dass genetische Analysen helfen könnten, die Verwandtschaftsbeziehung zwischen modernen Menschen und Neandertalern zu erhellen. Doch wie sollte man an das dafür nötige Erbgut kommen? Das Genom einer Spezies untersuchen zu wollen, die seit zehntausenden Jahren ausgestorben ist, schien aussichtslos. Denn DNA-Moleküle zerfallen mit der Zeit in immer kürzere Fragmente. Jahrtausende später liegen, wenn überhaupt, nur noch Spuren von ihnen vor – die obendrein durch Fremd-DNA, etwa von Bakterien, verunreinigt sind.



DUNCAN HILL KOMMUNISWINMEDIA.ORG/
VIRTUALEPROFESSOR.SVANTE.PAABO.FORMERIS.JPG / CC BY-SA 4.0 (PUBLIKUMSRECHT) / LICENSING.BY.SA.4.0 (PUBLIC)

Svante Pääbo, 1955 in Stockholm geboren, promovierte 1986 an der Universität Uppsala. Nach Aufhalten an Universitäten in Zürich, Berkeley und München ging er 1997 an das Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, wo er bis heute die Abteilung für Evolutionäre Genetik leitet.



**HALLO NACHBAR
Neandertaler (im Bild
ein rekonstruierter
Schädel) lebten einst
Seite an Seite mit
unseren Vorfahren.**

FRANK VINKEN FÜR MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE / MAX-PLANCK-GESellschaft

Pääbo schreckte das nicht ab. Schon 1984 war ihm während seiner Promotion an der schwedischen Universität Uppsala eine kleine Sensation gelungen, indem er es erstmals schaffte, DNA aus einer 2400 Jahre alten ägyptischen Mumie zu isolieren. Weil er befürchtete, sein Doktorvater könne ihm diese Arbeiten verbieten, führte er sie heimlich nachts und an Wochenenden durch, wie er »Spektrum der Wissenschaft« erzählte (11/2008, S. 116). Spätestens als das Fachblatt »Nature« seine Studien 1985 auf die Titelseite brachte, wurde er als Wissenschaftler weltbekannt.

1987 schloss sich Pääbo der Arbeitsgruppe von Allan Wilson von der University of California in Berkeley an, die versuchte, DNA aus fossilem Gewebe zu gewinnen. Hier beschäftigte er sich unter anderem mit dem Erbgut ausgestorbener Tiere wie Mammuts und Höhlenbären. Besonders aber habe ihn schon immer der Neandertaler fasziniert, erklärte Pääbo im Gespräch mit »Spektrum der Wissenschaft«. Denn ein genetischer

Vergleich mit dem Frühmenschen biete die Chance zu ergründen, was den *Homo sapiens* auszeichnet und welche Erbgutveränderungen mit der Menschwerdung einhergingen.

Ab 1990 setzte der Genetiker seine Forschungsarbeiten an der Universität München fort. Hier beschloss er, sich zunächst auf das Erbgut der Mitochondrien zu konzentrieren – der »Kraftwerke« der Zelle. Da eine einzelne Körperzelle typischerweise hunderte oder tausende Mitochondrien enthält, liegen deutlich mehr Exemplare von deren DNA vor als von der DNA des

Pääbos Studien belegen enge Kontakte zwischen Neandertalern, Denisovanern und unseren Vorfahren

Zellkerns. Entsprechend wahrscheinlicher ist es, mitochondriale DNA in fossilen Überresten zu finden. 1997 gelang es Pääbo, solche Moleküle aus einem rund 40000 Jahre alten Neandertaler-Knochen zu isolieren. Damit hatte die Welt erstmals Zugriff auf ein Stück Erbgut dieses Frühmenschen. Vergleiche mit der mitochondrialen DNA von modernen Menschen und Schimpansen zeigten schon bald, dass der Neandertaler sich genetisch deutlich von beiden unterschied.

Das mitochondriale Genom ist freilich sehr viel kleiner als jenes im Zellkern: Es enthält nur rund ein Promille der Gene und etwa 200000-mal weniger Nukleotide. Analysen des Mitochondrien-Erbguts haben deshalb eine begrenzte Aussagekraft. Pääbo wandte sich daher der enormen Herausforderung zu, das komplette Neandertaler-Genom zu entschlüsseln. 1997 ging er nach Leipzig an das neu gegründete Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie. Dort entwickelten er und sein Team die Methoden, um DNA aus fossilen

Knochenüberresten zu isolieren und zu analysieren, weiter. Diese Arbeiten mündeten in die erste vollständige Sequenz eines Neandertal-Genoms, die er im Jahr 2010 publizierte.

Laut den Ergebnissen von Pääbo und seiner Arbeitsgruppe hat der letzte gemeinsame Vorfahre des *Homo sapiens* und des *Homo neanderthalensis* vor zirka 800 000 Jahren gelebt. Beide müssen sich in den Jahrtausenden, die sie gemeinsam auf der Erde weilten, miteinander fortgepflanzt haben. Denn bei modernen Menschen europäischer oder asiatischer Abstammung besteht das Erbgut zu ein bis vier Prozent aus Sequenzen vom Neandertaler. Mit heutigen Afrikanern allerdings hat der Frühmensch genetisch weniger gemein als mit Europäern und Asiaten. Daraus lässt sich schließen: Moderne Menschen und Neandertaler haben sich wohl vorrangig außerhalb Afrikas vermischt – vermutlich im Nahen Osten.

Auch die so genannten Denisova-Menschen haben Spuren im Erbgut

des *Homo sapiens* hinterlassen. Von diesen rätselhaften Homininen wurde 2008 ein Knochenfragment in der Denisowa-Höhle (sibirisches Altai-Gebirge) entdeckt, das gut erhaltene DNA enthielt. Pääbo und sein Team sequenzierten das Erbgut und wiesen nach: Beim Denisova-Menschen handelt es sich um eine neue, zuvor unbekannte Frühmenschenart. Die Spezies muss ebenfalls engen Kontakt zum modernen Menschen gehabt haben, wie aus den Daten hervorgeht. In einigen Regionen Südostasiens teilen die heutigen Bewohner bis zu sechs Prozent ihrer Gene mit den ausgestorbenen Denisovanern.

Swante Pääbo gilt längst als ein Begründer der Paläogenetik. »Seine Arbeiten haben unser Verständnis der Evolutionsgeschichte der modernen Menschen revolutioniert«, erklärt Martin Stratmann, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, in einer Pressemitteilung. Ähnlich äußert sich Chris Stringer vom Natural History Museum in London. Dass Pääbo den

Nobelpreis erhalte, sei eine großartige Nachricht, sagte der Paläoanthropologe gegenüber der Fachzeitschrift »Nature«.

Doch die Arbeiten des Genetikers werfen nicht nur ein Licht auf die Vergangenheit: Laut ihren Ergebnissen beeinflusst das Neandertaler-Erbe auch unsere Gegenwart. So scheinen manche Frühmenschen-Gene in unserem Genom einen Einfluss darauf zu haben, wie unser Immunsystem auf Krankheitserreger reagiert. In einem weiteren, unlängst erschienen Interview mit »Spektrum der Wissenschaft« berichtete der Paläogenetiker, Menschen mit einer bestimmten Neandertaler-Sequenz auf Chromosom 3 trügen ein höheres Risiko dafür, schwer an Covid-19 zu erkranken (5/2021, S. 30). Es bleibt spannend, welche Geheimnisse das rekonstruierte Erbgut in Zukunft noch offenbaren wird.

Daniela Mocker ist Wissenschaftsjournalistin und stellvertretende Redaktionsleiterin von »Spektrum.de«.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter); E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinkelmann, 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

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Janosch Deeg, Dr. Sebastian Vogel

Leser- und Bestellservice: Estefanny Espinosa de Rojas, Helga Emmerich, Sabine Häusser, 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 € 9,30 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 98,40; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 75,-; 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.

Ein Teil der Auflage beinhaltet eine Beilage des BDW Shops.

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom 1.1.2022.

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: © 2022 (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
Editor in Chief: Laura Helmuth
President: Kimberly Lau



Erhältlich im Zeitschriften- und Buchhandelsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



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

GEFÄNGNISSE BESSERN NICHT, SONDERN SCHADEN

1922

»Recht interessant ist der Bericht der Gefängnis-Untersuchungskommission, der die Verhältnisse der heutigen englischen Gefängnisse beleuchtet. Das Schweigegebot ist bei längerer Haft das Entmenschlichendste, was sich denken läßt. Wenn es voll durchzuführen wäre, würden 90% der Gefangenen ihren Verstand verlieren. Diese absurde Vorschrift ist für manche geistige Schädigung der Gefangenen verantwortlich. Die Selbstachtung wird dabei systematisch zerstört. Wenige Monate Gefangenschaft schädigen Gedächtnis, Konzentration und Willenskraft. Bei längerer Haft: frühzeitige Senilität, kindische Geisteschwäche, die die Aufnahme eines normalen [Lebens] hinfällig machen.« *Die Umschau 52, S. 824*

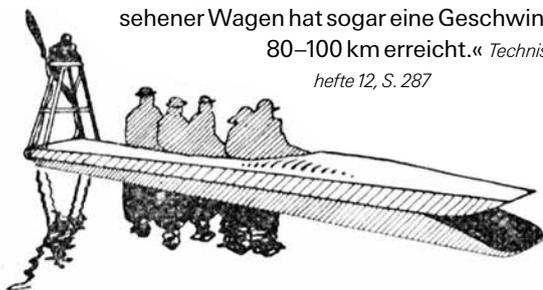
KRANKHEITSDÄMON BRINGT ZAHNWURM

»In Keilschrifttafeln sind uns die Gesetze des Hammurabis und die Reste der Bibliothek Assurbanipals erhalten geblieben, deren Bestände bis ins 2. und 3. Jahrtausend v. Chr. zurückgehen. So kamen auch die Kenntnisse der Zahnheilkunde der alten Mesopotamier auf uns. Es war nicht nur der Verlust ganzer Zahnkronen durch Verletzung aus den Gesetzen Hammurabis bekannt, sondern schon die Zahnkaries mit der Vorstellung des Zahnwurms als Erreger. Als Krankheitsursache nahm man den Zorn der Götter an, der die Zahnschmerzen erregte. Eine Hauptrolle spielen bei der Therapie die Beschwörungen der Krankheitsdämonen.« *Die Umschau 49, S. 776*

LUFTSCHRAUBE TREIBT FAHRZEUGE AN

»Ebenso wie man den Luftstrom zum Treiben von Windmühlen benutzt, kann er als treibende Kraft bei Wasser- und anderen Fahr-Zeugen dienen. Und da eine genügend große Schraube dieselbe Stärke wie zehn und noch mehr Pferdekraft liefert, wird diese Art der Fortbewegung die billigste sein. In Frankreich hat man einen sog. Wassergleiter bereits benutzt. Das Fahrzeug befördert fünf Personen mit einer Schnelligkeit von 20–25 km in der Stunde. Das Schiff wiegt nur 190 kg. Ein mit einer Luftschaube versehener Wagen hat sogar eine Geschwindigkeit von

80–100 km erreicht.« *Technische Monatshefte 12, S. 287*



Ein Wassergleiter mit Luftschaube befördert Fahrgäste.

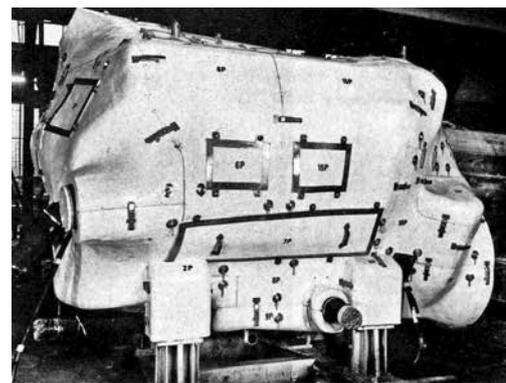
EINE VORHERSAGE, DIE GANZ ANDERS EINGETROFFEN IST

1972

»Der in der Erdatmosphäre befindliche Staub schirmt die Sonneneinstrahlung wirksamer ab als die von der Erdoberfläche zurückgeworfene Wärmestrahlung. Ein Teil des entstehenden Staubes wird in der Erdatmosphäre laufend zerstört. Unter der Annahme, daß die Abbauraten in der Erdatmosphäre konstant bleibt, wurde gefunden, daß eine Verachtfachung des zur Zeit durch die Zivilisation in die Lufthülle geblasenen Staubes ein Absinken der Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche von 3,5 Grad zur Folge haben könnte.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 12, S. 484*

MASCHINEN SCHALLDICHT VERSIEGELN

»Seit vielen Jahren hat es nicht an Versuchen gefehlt, die Arbeitsgeräusche schnell laufender Kolbenmaschinen zu verringern. [Es] bleibt [aber] nichts anderes übrig, als die ganze Maschine in einen ›schalldichten‹ Überzug einzuhüllen. [Neben]stehendes ›Ungetüm‹ ist ein wassergekühlter



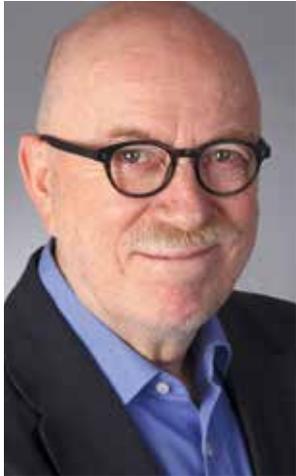
Die ummantelte Maschine.

1500-PS-Zweitakt-Dieselmotor mit dreimal sechs Zylindern für Minensuchboote der Royal Navy. Der Überzug hat eine innere Haut aus harzgebundenem Glasfasergewebe. Damit verbunden ist eine 50 mm dicke Schicht aus Schaumstoff, die von einem Mantel aus 1,6 mm Bleiblech abgedeckt wird. Die Schalldämpfung [erreichte] bei Versuchen 25 bis 30 dB.« *Die Umschau 24, S. 778*

ROBOTERSPRACHE AUS COMPUTERCHIP

»Der amerikanischen Firma Master Specialties Co. ist es gelungen, ein Gerät zu entwickeln, das über Lautsprecher bis zu siebenstellige, synthetisch erzeugte Zahlen ansagen kann. Verwendete man bisher für diesen Zweck Magnetband- oder Magnetplattenspeicher, so ist dieses Gerät mit Halbleiter-Festwertspeichern bestückt (es handelt sich um monolithische 16 000-bit-MOS-Speicher). Die Verständlichkeit der ausgegebenen Ziffern bzw. Zahlen soll sehr gut sein. Das Gerät wird von Telefongesellschaften benutzt, um in Telefonnetzen Leitungen zu identifizieren.«

Elektronik 12, S. 414



SPRINGER'S EINWÜRFE ENERGIEWENDE IN DER KRISE

Russlands Krieg treibt die Preise für Gas und Öl in ungeahnte Höhen. Welche Faktoren begünstigen die Wende zu nichtfossilen Quellen?

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

» spektrum.de/artikel/2066877

Angesichts dramatisch steigender Kosten für fossile Energieträger dürfen sich jene Staaten glücklich schätzen, die nicht komplett auf deren Kauf angewiesen sind. Sei es, weil sie wie Frankreich seit dem Ölpreisschock der 1970er Jahre auf Kernenergie setzen, wie die USA ihre eigenen Quellen per Fracking erschließen – oder weil sie die Wende zu erneuerbaren Energien vollenden.

Letzteres, so fest es internationale Vereinbarungen versprechen, bleibt ein frommer Wunsch. Die Wende erfordert eine aufwändige Infrastruktur und ist komplizierter als der Einkauf scheinbar unbegrenzter fossiler Energie auf dem Weltmarkt.

Müsste nicht die aktuelle Kostenexplosion den Abschied von der Treibhauswirtschaft beschleunigen? Warum wird erst recht weiter auf Gasimport und Kohleförderung gesetzt?

Das hat ein internationales Team um den Energiepolitikexperten Jonas Meckling von der University of California in Berkeley zu beantworten versucht. Die Fachleute für Umwelt- und Politikwissenschaft geben zwei Gründe an, weshalb Staaten so unterschiedlich mit der Energiewende zurechtkommen (*Science* 378, S. 31–33, 2022).

Einen Faktor nennen sie englisch »insulation«, was mit Isolation zu grob übersetzt wäre. Gemeint ist eine gewisse Abschottung und Autonomie wichtiger Umweltinstitutionen gegenüber der Tagespolitik. So haben Japan und Frankreich schon auf die Ölkrise der 1970er Jahre mit der Errichtung mächtiger Bürokratien reagiert, was der jeweiligen Regierung relativ freie Hand in Energiefragen verschaffte. In den föderal verfassten USA hat Kalifornien seine Energiewende einer unabhängigen Regierungsbehörde übertragen und ragt seither aus den übrigen Bundesstaaten durch fortschrittliche Umweltpolitik heraus.

Vor allem Schwellenländer profitieren von autonomen Entwicklungsbehörden. Ein Extremfall ist

China, das beim massiven Ausbau von Solaranlagen und Windparks kaum Rücksicht auf lokale Einsprüche zu nehmen braucht. Eine totale Isolation der Politik ist freilich riskant. Das abschreckendste historische Beispiel einer Kampagne ohne informationelle Rückkopplung bietet Chinas »Großer Sprung nach vorne« um 1960. Er endete mit Millionen Hungertoten – nicht zuletzt, weil die niederen Parteikader, von der übrigen Bevölkerung ganz zu schweigen, sich scheuten, die sich abzeichnende Katastrophe nach oben zu melden.

Einen zweiten Faktor, der die Energiewende fördert, nennen die Autoren der Studie »Kompensation«: Unternehmen und Konsumenten brauchen Entschädigungen für die Kosten und Mühen, die der Wandel mit sich bringt. Das funktioniert dort am besten, wo Gewerkschaften und Unternehmerverbände längst gewohnt sind, Ausgleichszahlungen auszuhandeln, und wo vom Staat erwartet wird, soziale Härten abzufedern. Deshalb ist es nach dem Befund der Studie kein Zufall, dass die skandinavischen Länder sowie die Niederlande und Deutschland nicht nur Wohlfahrtsstaaten sind, sondern auch Vorreiter bei Maßnahmen gegen den Klimawandel.

Aus demselben Grund bilden die USA und Australien Schlusslichter beim Übergang zu erneuerbaren Energien. Ein schwacher staatlicher Sektor und dürre Sozialleistungen gehen einher mit stagnierendem Wandel.

Außerdem hapert es dort nicht nur mit der Kompensation, sondern auch mit der Autonomie der Umweltpolitik. Sobald eine neue Regierung vorsichtige Ansätze zur Energiewende ausprobiert, zertrampelt die nächste das zarte Pflänzchen gleich wieder.

Nach den Kriterien der zitierten Studie hat Deutschland vergleichsweise gute Chancen, die Energiewende zügig voranzutreiben – und ausgezeichnete Gründe sowieso.



HANDGROSSER LURCH Auf dem
Trockenen wirkt der Furchenmolch
Necturus lewisi eher unbeholfen. Der
ungefähr 15 bis 30 Zentimeter lange
Olm verbringt sein ganzes Leben im
Wasser und frisst Insekten, die
zufällig vorbeischwimmen.

ZOOLOGIE GENETISCH AUFGEBLÄHT

Manche Amphibien besitzen ein riesiges Genom, durchsetzt von Erbgutschnipseln, die sich unkontrolliert vermehren. Diese genetische Last behindert die Tiere in ihrer Entwicklung – und dennoch blieben sie bislang in der Evolution erfolgreich.

Douglas Fox ist Biochemiker und arbeitet als Wissenschaftsjournalist im US-Bundesstaat Kalifornien. Seine Themenschwerpunkte liegen im Bereich Biologie, Geologie und Klimaforschung.



» spektrum.de/artikel/2066853

AUF EINEN BLICK DAS RIESENGENOM DER LURCHE

- 1** Etliche Schwanzlurche besitzen gigantische Genome. Bei der nordamerikanischen Spezies *Necturus lewisi* ist das Erbgut 38-mal umfangreicher als beim Menschen.
- 2** Ursache hierfür sind im DNA-Strang eingelagerte Transposons, welche die Entwicklung dieser Amphibien verzögern.
- 3** Dennoch schadet das aufgeblähte Genom den Tieren kaum. Vielmehr fanden sie eine Nische, in der sie sich mit einem trägen Dasein begnügen.

► *Necturus lewisi* fristet ein träges Dasein. Der handbis unterarm lange Furchenmolch verlässt nur selten sein Versteck unter Steinen oder Baumstämmen in den Flüssen von North Carolina. Auf der »Jagd« harret er unbeweglich am Flussgrund aus und wartet, bis ein Insekt vorbeischwimmt. Dann taumelt er vorwärts und verschlingt seine Beute – ein geistloser Reflex. Sein ganzes Leben verbringt er im Wasser als zu groß geratene Larve, die ihre Metamorphose nie vollenden durfte: Die schlaffen Beine erscheinen zu klein für den Körper, die Zehen sind nicht richtig ausgewachsen, der Oberkiefer fehlt, und aus dem Hals ragen aufgedunsene Larvenkiemen.

Betrachtet man das zur Amphibienfamilie der Olme gehörende Tier aus der Nähe, fällt eine weitere Besonderheit auf: Seine Zellen sind ungefähr 300-mal so groß wie die einer Eidechse, eines Vogels oder eines Säugetiers. Mit einer einfachen Lupe erkennt man in den durchsichtigen Kiemen einzelne Blutzellen, die durch die Kapillaren strömen.

Necturus lewisi und andere Schwanzlurche verkörpern ein altes Mysterium, das die Wissenschaft erst allmählich aufklärt. Hinter den seltsamen Eigenschaften des salamanderartigen Tiers steckt eine verborgene Last: Jede seiner Zellen enthält fast 40-mal mehr DNA als die des Menschen. Der Furchenmolch besitzt unter allen vierbeinigen Wirbeltieren der Welt das größte Genom. Lediglich Lungenfische halten hier einem Vergleich stand – und diese neigen ebenfalls zur Trägheit.

Die Genomgröße der meisten Säugetiere, Vögel, Reptilien und Fische liegt in einem relativ schmalen Bereich von einer halben Milliarde bis sechs Milliarden Bausteinen, den DNA-Basenpaaren (siehe »Kaleidoskop der Genome«). Diese bilden als Glieder einer langen Kette die Gene, die das Erbgut eines Individuums ausmachen. Bei Schwanzlurchen schwankt die Genomgröße jedoch beträchtlich zwischen 10 und 120 Milliarden Basenpaaren (10 bis 120 Gigabasen beziehungsweise 10 000 bis 120 000 Megabasen). Die Amphibien verfügen nicht über mehr Gene als andere Tiere; ihr Erbgut ist vielmehr durchsetzt von parasitischen DNA-Abschnitten, deren Vermehrung außer Kontrolle geraten ist. Praktisch ihr ganzes Leben wird von ihrem gewaltigen Genom beherrscht – es zwingt die Tiere zu einem Dasein auf der Kriechspur. Ausgestattet mit einem unterentwickelten Körper, einem schlichten Gehirn sowie einem papierdünnen Herz schleppen sie sich mitunter 100 Jahre lang durchs Leben.

Im Austausch gegen diese Last haben die Schwanzlurche mindestens eine verblüffende Fähigkeit erworben: die Regeneration. Ihnen können nicht nur Gliedmaßen nachwachsen, sondern auch bis zu einem Viertel des Gehirns – was fürs Überleben höchst praktisch ist.

Höher entwickelt = mehr Gene?

Das Rätsel der Riesengenome stellte sich erstmals Mitte des vergangenen Jahrhunderts, als Biologen die DNA als Erb molekül identifiziert hatten. Ein für jede Spezies einzigartiges Genom enthält Tausende von Genen, in denen die Bauanleitungen für Proteine niedergeschrieben sind, die ein Lebewesen braucht. Anfangs vermutete man, höher entwickelte Arten mit kompliziertem Körperbau wie Primaten

müssten auch mehr Gene und damit ein größeres Erbgut besitzen.

Diese Vorstellung wurde jedoch schon 1951 durch Alfred Mirsky und Hans Ris vom Rockefeller Institute for Medical Research über den Haufen geworfen. Als sie die DNA-Menge bei mehreren Tierarten ermittelten, mussten sie zu ihrem Erstaunen feststellen, dass die Zellen von Afrikanischen Lungenfischen (*Protopterus*) und Aalmolchen (*Amphiuma*) einige Dutzend Mal mehr DNA enthalten als die von Menschen, Ratten, Vögeln oder Reptilien. Bei der Untersuchung weiterer Tiergruppen kristallisierten sich Schwanzlurche und Lungenfische als Sonderfälle heraus.

Parasiten im Erbgut

Im Lauf der nächsten zwei Jahrzehnte verschaffte man sich ein genaueres Bild von den Riesengenomen. Shigeki Mizuno und Herbert Macgregor von der University of Leicester untersuchten mehrere nordamerikanische Arten aus der Familie der Lungenlosen Salamander (Plethodontidae). Die einzelnen Spezies sahen nahezu gleich aus, aber ihre DNA-Menge schwankte beträchtlich.

Die DNA-Kette ist bei allen höheren Lebewesen zu wurstförmigen Strukturen aufgewunden, den Chromosomen. Bei Spezies mit größerem Genom erscheinen sie ebenfalls vergrößert, wie ein aufgeblasener Ballon. Die zusätzliche DNA verteilt sich offenbar über die ganze Länge der Chromosomen.

Mizuno und Macgregor hatten keine Ahnung, worum es sich bei dem zusätzlichen Material handelt. In den 1980er Jahren stellte sich dann heraus, dass bei zahlreichen Tiergruppen parasitisches Erbgut in den Zellen schlummert: kurze, als Transposons bezeichnete DNA-Abschnitte, die sich wie Viren verhalten. Diese »springenden Gene« sind in der Lage, sich selbst zu kopieren und diese Duplikate dann mitunter wahllos an anderen Stellen im Genom einzubauen.

Die Erforschung der Riesengenome verlief in den darauf folgenden Jahrzehnten nur schleppend. Während es nach und nach gelang, das Genom von Fliegen, Würmern und Menschen vollständig zu sequenzieren, machten die meisten Genetiker um Schwanzlurche einen Bogen, erschien doch deren schiereres DNA-Volumen kaum handhabbar. Erst 2012 kam die Arbeitsgruppe der Evolutionsbiologin Rachel Mueller von der Colorado State University einen entscheidenden Schritt weiter.

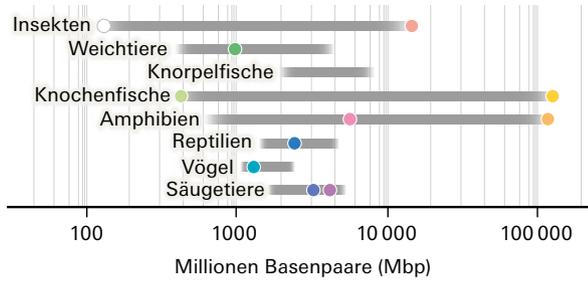
Mit der Methode der Hochdurchsatzsequenzierung hatten Mueller und ihre Kollegen hunderttausende DNA-Zufallsfragmente von sechs Plethodontidae-Arten sowie von dem zu den Riesensalamandern gehörenden Schlammteufel (*Cryptobranchus alleganiensis*) analysiert. Die Ergebnisse bestätigten zunächst, was man bereits vermutet hatte: Das Erbgut der Salamander ist durch Transposons übermäßig aufgebläht. Häufig stießen die Forscher sowohl bei den Salamandern als auch beim Schlammteufel auf die gleichen DNA-Schnipsel, was vermuten lässt, dass sich das parasitische Erbgut schon vor mehr als 200 Millionen Jahren beim letzten gemeinsamen Vorfahren aller heutigen Salamander unkontrolliert vermehrt hatte.

Kaleidoskop der Genome

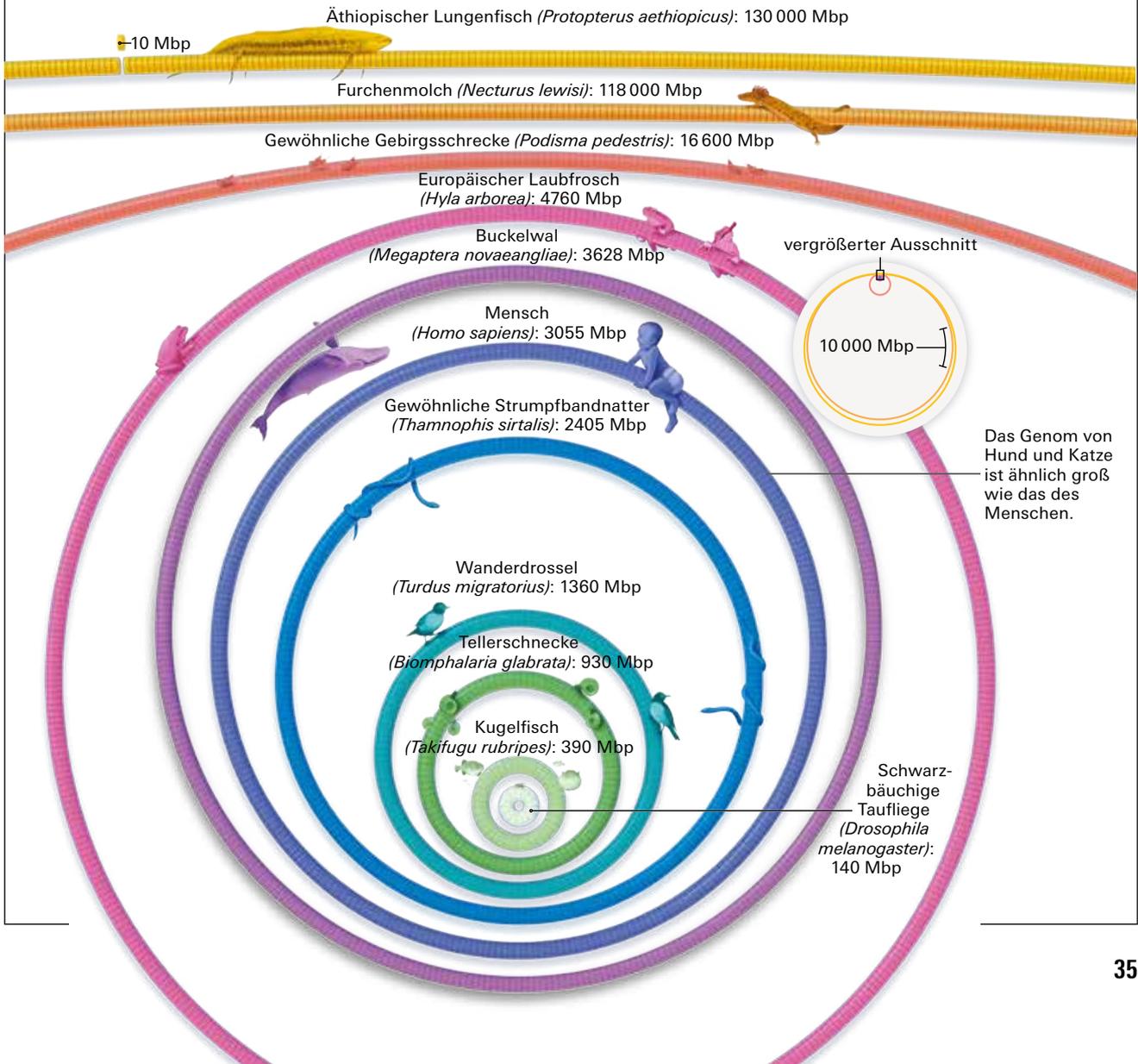
Insekten und Weichtiere besitzen Genome von sehr unterschiedlichem Ausmaß, bei Wirbeltieren liegt die Spannweite noch höher (obere Grafik). Besonders stark schwankt die Größe bei Knochenfischen und Amphibien, am geringsten bei Reptilien, Vögeln und Säugern. Als Maß für die Genomgröße dient die Anzahl der Basenpaare, der chemischen Bausteine des Erbgutstrangs DNA.

Der Äthiopische Lungenfisch (*Protopterus aethiopicus*) hält den Rekord für das größte Genom aller Tiere, dicht gefolgt vom Furchenmolch *Necturus lewisi* (farbige Ringe unten). Das Erbgut des Menschen (blauer Ring) hat eine durchschnittliche Größe und ist 43-mal kleiner als das des Lungenfischs sowie 22-mal so groß wie ein Taufliengenom.

Bandbreite der Genomgrößen verschiedener Tiergruppen
(farbige Punkte entsprechen den unten gezeigten Genomen)



Genomgrößen ausgesuchter Tierarten (Ringdurchmesser maßstabsgetreu)





ANDREW HETHERINGTON

EINSAMER SCHWIMMER Der Lebensraum von *Necturus lewisi* beschränkt sich auf die beiden Flusssysteme Neuse River und Palmico River in der Küstenregion des US-Bundesstaats North Carolina. Daher rührt sein englischer Name »Neuse River waterdog«.

Aber wie kam es zu dieser explosionsartigen Anreicherung? Von dieser Frage ist Mueller seither fasziniert. »Es war nicht so, dass nur ein Transposon verrücktgespielt hätte«, sagt sie, »sondern es kam zu einem umfassenden Eindringen ins Erbgut.« Offenbar hatten sich plötzlich Dutzende der Sequenzen gleichzeitig vervielfältigt.

Warum das so war, hat Mueller bisher nicht herausgefunden, aber ein anderes Rätsel konnte sie lösen. Selbst wenn Transposons sich im Genom eines Wirts vermehren, werden sie in der Regel im Lauf der Zeit durch Zufallsmutationen wieder beseitigt. Diese Dezimierung findet bei allen biologischen Arten ständig statt. Wie Muellers Arbeitsgruppe jedoch nachwies, werden die eingebauten DNA-Stücke bei Schwanzlurchen vermutlich um ein Mehrfaches langsamer ausgemerzt als bei anderen Organismen. Wegen des geringeren Tempos verschiebt sich das Gleichgewicht: Die Menge der Transposons bleibt nicht konstant, sondern sie reichern sich an, so dass sich das Erbgut der Tiere über längere Zeiträume immer weiter aufbläht.

Die überschüssige DNA veränderte tief greifend den Körperbau. Bei Arten mit dem größten Genom erkennt man solche anatomischen Verzerrungen auf den ersten Blick. So macht das riesige Genom Schwanzlurche häufig zu überdi-

mensionalen Babys. Von ungefähr 770 bekannten Arten haben etwa 40 die Fähigkeit verloren, sich von der im Wasser lebenden Larve zum ausgewachsenen Landtier zu entwickeln. Solche Spezies verfügen in der Regel über ein größeres Genom als diejenigen mit Metamorphose. Sie bleiben wie *Necturus lewisi* während ihres ganzen Lebens mit Larvenkiemen und schwachen Gliedmaßen auf das Wasser angewiesen.

Etlichen von ihnen fehlen auch Zehen, weil sich ihre Gliedmaßen nie vollständig entwickeln. Statt eines normalerweise fünfgliedrigen Hinterfußes hat *Necturus lewisi* lediglich vier Zehen. Manche Aalmolcharten besitzen drei oder zwei, mitunter auch nur einen einzigen. Und die im Südosten der Vereinigten Staaten heimischen Armmolche (Sirenidae) verzichten auf Hinterbeine sogar ganz.

Selbst landlebende Schwanzlurche, die voll entwickelt aussehen, behalten larvale Eigenschaften wie nicht verwachsene Schädelknochen oder ein unverknöchertes Fußskelett. Ende des vergangenen Jahrhunderts durchgeführte Studien offenbarten, dass viele dieser Arten sogar ein larvales Gehirn besitzen.

Erste Erkenntnisse hierzu gewann damals der Amphibienexperte David Wake von der University of California in Berkeley zusammen mit dem Zoologen Gerhard Roth von der Universität Bremen. Die beiden verglichen den Hirnaufbau bei mehreren Plethodontidae-Spezies mit dem bei verschiedenen Froscharten.

Wake und Roth entnahmen den Tieren das Gehirn und tränkten es mit Zedernöl, woraufhin es durchsichtig wurde, so dass die Biologen es unter dem Mikroskop unter-

suchen konnten. Dabei entdeckten sie, dass die Hirnstrukturen bei den Salamandern meist viel einfacher gebaut erschienen als bei Fröschen, die ja ebenfalls zu den Amphibien gehören. Die Nervenzellen sahen »embryonal« aus, wie Wake es formulierte: größer, runder und weniger differenziert.

Vor allem fiel die Vereinfachung des Sehsystems auf. Der Sehnerv bestand bei den Salamandern aus nicht mehr als 75 000 Nervenfasern; bei Fröschen waren es bis zu 470 000. Außerdem war bei den Salamandern ein viel kleinerer Teil der Neurone von einer Myelinscheide umgeben, die für einen schnelleren Signaltransport zum Gehirn sorgt. Und im Mittelhirndach (Tectum), das die vom Sehnerv kommenden Bilder verarbeitet, lagen die Neurone bei Salamandern eher chaotisch verstreut – wie im Gehirn von Embryonen oder Larven –, während sie bei Fröschen geordnete Schichten bildeten. Des Weiteren konnten Wake und Roth zeigen, dass sich Arten mit besonders großem Genom meist auch durch ein einfacheres Sehsystem auszeichnen.

Bei alldem erkannte Roth eine übergeordnete Gesetzmäßigkeit. Im Salamandergehirn fehlten just jene Bereiche, die normalerweise erst in späteren Entwicklungsstadien entstehen. Es sah so aus, als ob dem Gehirn der Lurche die Zeit zur Reifung gefehlt hätte. Das passte zu einer Beobachtung, die ein anderer Wissenschaftler kurz zuvor gemacht hatte.

Stanley Sessions, wie Gerhard Roth ein früherer Mitarbeiter von Wake und inzwischen emeritierter Professor am Hartwick College, interessierte sich für die ungewöhnliche Fähigkeit der Amphibien, verletzte Gliedmaßen zu ersetzen. 1987 amputierte er bei 27 Plethodontidae-Arten, deren Genomgröße zwischen 13 und 74 Gigabasen lag, die Hinterbeine und beobachtete, wie schnell diese nachwuchsen. Ergebnis des Experiments: Die Regeneration verläuft bei Tieren mit umfangreichem Genom langsamer. Ihre unreifen Zellen brauchen länger, um sich zu differenzieren und spezialisiertes Gewebe wie Muskeln oder Knochen zu bilden.

Verzögerte Entwicklung

Die Studien von Wake, Roth und Sessions lieferten auch eine Erklärung dafür, warum Schwanzlurche mit besonders großem Genom Zehen, Hinterbeine und sogar die Fähigkeit zur Metamorphose eingebüßt haben. Ihr riesiges Erbgut hat viele Aspekte der Entwicklung verlangsamt und verkürzt. Zunächst hatte man angenommen, die Verzögerung sei einfach darauf zurückzuführen, dass die Zellen zum Kopieren eines großen Genoms mehr Zeit benötigen und sich daher langsamer teilen. Doch 2018 brachte ein wichtiger Durchbruch der Genomforschung eine entscheidende Erkenntnis.

Damals hatten Forscher um Siegfried Schloissnig vom Heidelberger Institut für Theoretische Studien das erste vollständige Genom eines Schwanzlurchs veröffentlicht: des Axolotl (*Ambystoma mexicanum*). Das Tier kann fast so lang werden wie ein menschlicher Unterarm, besitzt aber bleistift dünne Beine, aufgeplusterte Kiemen sowie weitere larvale Merkmale. Sein Erbgut erscheint allerdings mit »nur« 32 Gigabasen im Vergleich zu den 118 Gigabasen von *Necturus lewisi* eher klein. Wie sich in der Studie zeigte, liegen die

Die Nervenzellen sahen »embryonal« aus: runder und weniger differenziert

Transposons nicht einfach verstreut zwischen den Genen; vielmehr kommen sie häufig auch *innerhalb* der Erbfaktoren in Abschnitten vor, die man als Introns bezeichnet.

Aus diesem kleinen Detail ergeben sich gewaltige Folgen. Sobald ein Gen eingeschaltet wird, muss seine gesamte DNA einschließlich der Introns in eine RNA-Kette umgeschrieben werden. Anschließend werden die Introns herausgeschnitten; erst dann kann die RNA als Matrize zur Herstellung der Proteine dienen, die ihrerseits die Entwicklung der Zelle steuern. Axolotl-Introns sind wegen der vielen eingelagerten Transposons bis zu 13-mal so lang wie die des Menschen. Entsprechend länger dauert der Aufbau der RNA-Kette. Bis die Bauanleitungen für die Zellproteine ihre Wirkung entfalten, vergeht mehr Zeit – und zwar nach Sessions' Worten so viel, dass die Lurche »nie ganz erwachsen werden«.

Die langsame Entwicklung ist nicht der einzige Faktor, durch den die Riesengenome den Körperbau verzerren. Eine andere Wirkung fiel in der Wissenschaft durch Zufall schon vor mehr als 150 Jahren auf. Die Bedeutung erkennen wir erst jetzt.

Im 19. Jahrhundert betrieb der britische Stabsarzt George Gulliver (1804–1882) auf seinen Reisen um die Welt eine Liebhaberei. An jedem Aufenthaltsort sammelte er ein wenig Blut von einheimischen Tieren, betrachtete die Proben unter dem Mikroskop und vermaß die roten Blutkörperchen. Unter seinen Objekten waren mexikanische Hirsche, nordamerikanische Krokodile, indische Pythons, Dornhaie, Zitteraale, Gürteltiere und hunderte andere. Die mit Abstand größten Zellen fand Gulliver beim Dreizehen-Aalmolch (*Amphiuma tridactylum*), einem aalähnlichen Wesen mit winzigen Beinchen. Seine roten Blutkörperchen waren verglichen mit denen des Menschen um das 300-Fache größer. Dicht hinter dem Aalmolch landeten mit nicht ganz so voluminösen Zellen drei weitere Schwanzlurche sowie ein Lungenfisch.

Heute wissen wir, dass Zell- und Genomgröße Hand in Hand gehen: je mehr DNA, desto umfangreicher die Zelle. Ausladende Zellen wirken sich erheblich auf den Körperbau eines Tiers aus. Einige Amphibien weisen daher eine entsprechende Körpergröße auf: Der Chinesische Riesensalamander (*Andrias davidianus*) wird bis zu 1,80 Meter lang, manche *Amphiuma*-Arten bringen es auf 1,10 Meter. *Necturus lewisi* misst knapp 28 Zentimeter und ist damit immer noch doppelt so lang wie die meisten anderen Schwanzlurche.

Größere Zellen führen auch zu einem einfacheren Körperbau. Angenommen, Sie möchten zwei Spielzeugautos bauen: eines aus filigranen Legosteinen, das andere mit

dicken Duplo-Blöcken. Sind die Autos gleich groß, wirkt das aus den größeren Steinen zusammengesetzte schlichter und klobiger. Genauso verhält es sich beim Körperbau der Schwanzlurche.

Das klassische Beispiel dafür entdeckte James Hanken, der heute an der Harvard University forscht, in den 1980er Jahren. Hanken studierte die Extremitätenanatomie bei den kleinsten Salamandern der Welt: Manche Arten der Gattung *Thorius*, die in verborgenen Winkeln mexikanischer Bergwälder hausen, sind so winzig, dass sie auf einer Münze Platz finden. Wie Hanken nun feststellte, sind bei einigen von ihnen die ursprünglich acht Handwurzelknochen miteinander verschmolzen. Noch erstaunlicher war, dass diese Knochen auch innerhalb einer einzigen Spezies unterschiedlich angeordnet sein können. Manche Individuen besitzen nur vier Handgelenksknochen, bei anderen sind es bis zu sieben. In einigen Fällen unterschied sich die Struktur sogar im rechten und linken Handgelenk.

Eine solche Variabilität erschien Hanken außergewöhnlich. Seine Erklärung: Da *Thorius* so klein ist und so große Zellen besitzt, sind von diesen buchstäblich nicht genügend vorhanden, wenn sich im Embryo die Handwurzelknochen bilden.

Rachel Mueller und ihr Doktorand Michael Itgen waren fasziniert von Hankens Erkenntnis, dass voluminösere Zellen zu einem einfacheren Körperbau führen. Aber spielt das für die Tiere wirklich eine Rolle? Im Rahmen eines 2019 begonnenen Projekts untersuchten die Forscher bei neun Waldsalamanderarten (*Plethodon*), deren Genom 29 bis 67 Gigabasen umfasst, wie sich die unterschiedliche Zellgröße auf den Aufbau des Herzens auswirkt.

Statt zwei Herzkammern wie Säugetiere besitzen Amphibien nur eine. Als Itgen die Herzen seiner Versuchstiere unter dem Mikroskop betrachtete, stellte er erstaunt fest, wie unterschiedlich sie aussahen. Exemplare mit dem sparsamsten Erbgut besaßen eine muskulöse, dickwandige Herzkammer mit einem nur kleinen Hohlraum für das Blut. Mit zunehmender Genomgröße erschien die Kammer eher ausgebeult und war von dünneren Muskelwänden umgeben. Bei der Spezies mit dem umfangreichsten Genom glich sie einem leeren Beutel, umschlossen von einer lediglich eine Zellschicht dicken Muskelhülle.

Der Anblick des hohlen Herzens war eine Offenbarung. »Ich kann mir nicht vorstellen, wie dieses Ding funktionieren soll«, erzählt Itgen, der seine Befunde 2022 veröffentlichte. Er vermag nur zu spekulieren, warum umfangreichere Genome zu einem Herzen mit größerem Hohlraum führen. Eventuell

brauche die Herzkammer bei Arten mit größerem Erbgut mehr Platz, um die voluminöseren Zellen und das dickflüssigere Blut aufzunehmen, vermutet er. Möglicherweise besteht das Herz aber auch aus weniger Muskelgewebe, weil sich die Zellen während der Entwicklung nicht schnell genug teilen können.

Für die unzulängliche Konstruktion zahlen die Tiere jedenfalls einen hohen Preis. Der Herzphysiologe Adam Chicco von der Colorado State University sieht Parallelen zwischen den tütenartigen Herzkammern der Salamander und Patienten mit schwerer Herzinsuffizienz: wenige, dünn ausgestreckte Muskelzellen, die kaum in der Lage sind, Blut zu pumpen.

Wären die Salamander Menschen, sie stünden an der Schwelle zum Tod. »Ein großes Genom macht alles kostspielig«, erklärte mir David Wake. Und doch hätten die Lurche schon 200 Millionen Jahre überlebt. »Es muss also irgendeinen Vorteil geben.«

2020 konnte ich zweimal mit Wake sprechen; er starb im April 2021. Nach jahrzehntelangem Rätseln hatte er zusammen mit Stanley Sessions schließlich eine Theorie entwickelt, wie Schwanzlurche und Lungenfische von ihren übergroßen Genomen profitieren könnten. Die Ursprungsidee entstand bei einem kühnen Experiment.

Ein neues Gehirn

Sessions hatte mehrere Grünliche Wassermolche (*Notophthalmus viridescens*) betäubt, die dünne Schädeldecke aufgeklappt und mit dem Riechareal fast ein Viertel des Gehirns entfernt. Dass ein Salamander ein abgetrenntes Bein ersetzen kann, war bekannt; Sessions wollte nun die Grenzen der Regenerationsfähigkeit austesten. Und siehe da: »Innerhalb von sechs Wochen regenerierte sich das Gehirn«, erzählt er.

Das Experiment bewies, dass Amphibien auch Teile des Körpers neu bilden können, die sie in freier Wildbahn normalerweise nicht verlieren. Diese Vorstellung widerspricht einem grundlegenden Evolutionsprinzip, wonach sich neue Fähigkeiten bei umweltbedingten Belastungen durchsetzen. Vielleicht, so vermutet Sessions, entwickelte sich die Regenerationsfähigkeit nur teilweise auf Grund solcher Umweltfaktoren, und das Riesengenom hätte sie dann als letztlich nützliche Nebenwirkung verstärkt.

Inzwischen ist Sessions überzeugt, dass ausgewachsene Schwanzlurche wegen der langsamen Entwicklung, die von den in Introns liegenden Transposons verursacht wird, noch voll unreifer Zellen stecken, die sich zu neuem Gewebe differenzieren können. »Ein Salamander ist eigentlich eine wandelnde Tasche voller Stammzellen«, sagt der Zoologe, der seine zusammen mit Wake vertretene These im Juni 2021 kurz nach dem Tod seines Kollegen veröffentlichte.

Die Idee klingt nach Ansicht von Jeremiah Smith, der an der University von Kentucky das Axolotl-Genom erforscht, plausibel. Allerdings sei die Geschichte vielleicht nicht ganz so einfach; die Entwicklung von Lebewesen könne sich auf vielen Wegen verlangsamen, wenn es sich als vorteilhaft erweist. Da aber Transposons im Erbgut der Schwanzlurche so zahlreich aufträten, erscheine es logisch, ihnen eine gewisse Rolle zuzuschreiben. »Die Evolution arbeitet mit dem Material, das sie hat«, betont Smith.

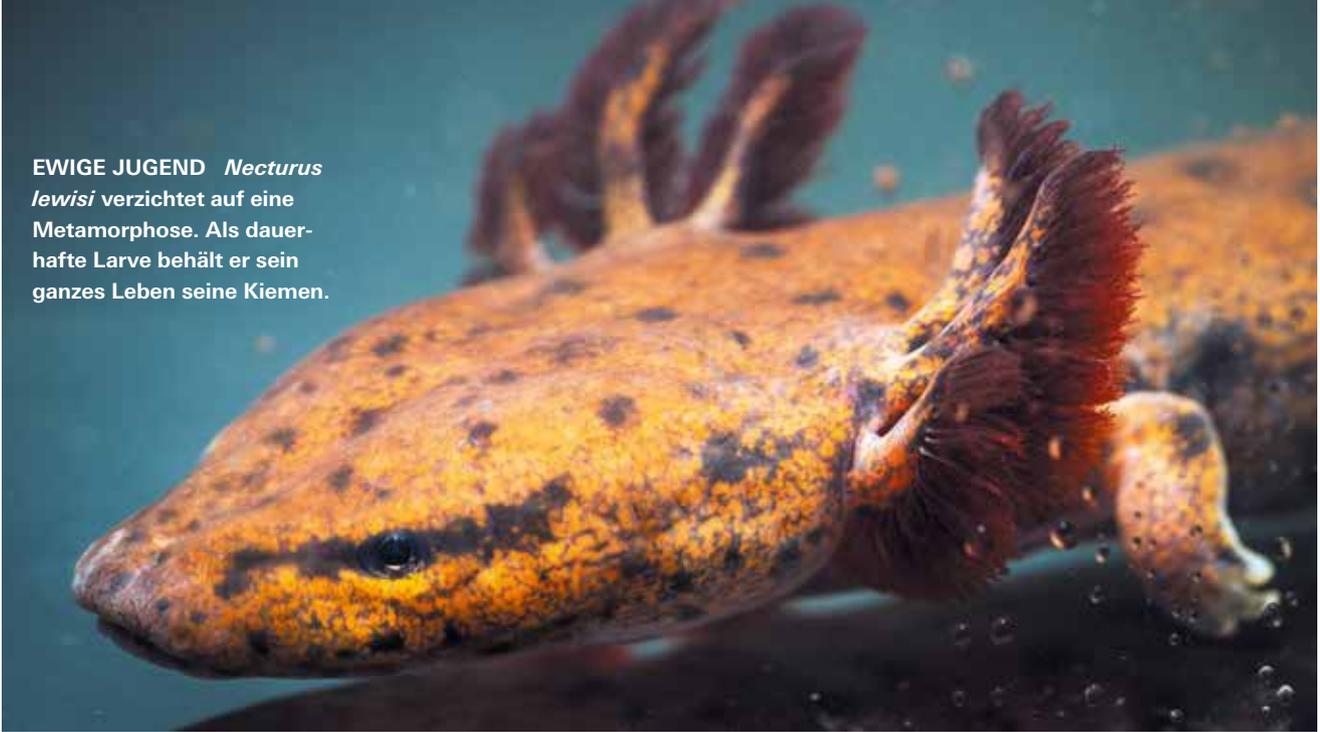


FLASHMOVIE / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema
finden Sie unter
[spektrum.de/t/die-genome-der-arten](https://www.spektrum.de/t/die-genome-der-arten)

EWIGE JUGEND *Necturus lewisi* verzichtet auf eine Metamorphose. Als dauerhafte Larve behält er sein ganzes Leben seine Kiemen.



ANDREW HETHERINGTON

Falls die Hypothese stimmt, hätte sie weit reichende Konsequenzen. Die Wissenschaft beschäftigt sich schon seit Jahrzehnten mit der Regeneration bei Amphibien, weil man nach Wegen sucht, auch menschliches Gewebe nachwachsen zu lassen. Wenn die Regeneration aber zahlreiche Gene mit langen Introns erfordert, dürfte das Ziel schwieriger zu erreichen sein.

Darüber hinaus verdeutlicht die Theorie von Wake und Sessions, inwieweit parasitische Gene die gesamte Biologie der Schwanzlurche umprogrammiert haben. Bei langlebigen Arten, zu denen auch wir Menschen gehören, werden die verbliebenen Stammzellen nach Abschluss der Entwicklung zum Schweigen verdammt – dadurch sinkt das Risiko für eine unkontrollierte Zellteilung und Krebs. Die Stammzellen der Lurche sind wesentlich zahlreicher und unterliegen weitaus geringeren Beschränkungen.

Möglicherweise erklärt die Theorie von Wake und Session nicht vollständig, warum Amphibien ein großes Genom verkraften können. Zwar mag es praktisch erscheinen, wenn verloren gegangene Körperteile wieder nachwachsen können – die Tiere müssen aber mit ihren eingeschränkten Organen tagtäglich klarkommen. Dieser Widerspruch führte zu einer faszinierenden Idee, die sich Mitte 2021 in einem Gespräch zwischen Mueller, Itgen und Hanken herauskristallisierte.

Die drei hatten über die Frage diskutiert, wie das Herz mit seinem großen Hohlraum das Leben der Schwanzlurche beeinflussen könnte. »Ich hatte die Extremposition eingenommen«, erzählt Hanken. Vielleicht, so meinte er, wirke sich das hohle Herz überhaupt nicht aus.

Diese Vermutung erschien Mueller und Itgen nicht so abwegig, wie sie zunächst klingt. Schwanzlurche wachsen und bewegen sich langsam. Unter allen Wirbeltieren zeigen sie mit Abstand die niedrigste Stoffwechselrate und den geringsten Sauerstoffbedarf. Die von Itgen und Mueller untersuchten Plethodontidae verzichten sogar – wie der deutsche Name Lungenlose Salamander verrät – auf ein Atmungsorgan. Eventuell kommen die Tiere nach Ansicht von

Itgen mit ihrem unvollkommenen Herzen zurecht, »weil die funktionellen Anforderungen so gering sind«.

Dafür sprechen auch Sessions' Regenerationsexperimente: Als er bei einem Dutzend Grünlichen Wassermolchen nahezu das halbe Herz entfernte, schoss das Blut heraus, das Organ hörte auf zu schlagen – doch die Tiere überlebten und bildeten eine neue Herzkammer! Offensichtlich sind sie nicht so sehr auf die Blutpumpe angewiesen wie ein Säugetier.

Träge, aber mit schneller Zunge

Ihr seltsames Skelett scheint manche Salamander ebenfalls wenig zu beeinträchtigen. Nach James Hankens Überzeugung verträgt die Gattung *Thorius* ihre unvollständigen Handwurzelknochen, weil auf die Gelenke des winzigen Organismus nur geringfügige Kräfte einwirken. Des Weiteren kann *Thorius* auf fein abgestimmte Gliedmaßen verzichten, da er seine Beute nicht jagt. Vielmehr sitzt er einfach herum und wartet, bis zufällig ein Insekt vorbeikommt.

Gerhard Roth fügt noch einen weiteren Gedanken hinzu: Um lediglich auf Beute zu harren, genügt ein schlichtes Sehsystem. Das Extrembeispiel stellen die südamerikanischen Schleuderzungensalamander (*Bolitoglossini*) dar. Mit bis zu 83 Gigabasen verfügen einige ihrer Arten über die größten Genome aller Landwirbeltiere. Außerdem zeigen sie das am stärksten abgespeckte Gehirn, das Roth und Wake jemals bei einem Salamander gesehen haben. Die Tiere büßten 50 bis 90 Prozent ihrer Sehneurone ein, so dass sie nicht zwischen einem vorbeikriechenden Insekt und einer vorüberrollenden Metallkugel unterscheiden können. Dafür besitzen sie etwas anderes: eine der schnellsten Zungen der Welt, mit der sie – laut Wake »wie mit einem gespannten Gewehr« – binnen weniger Millisekunden ein Insekt erlegen können.

Wer eine solche Zunge hat und einfach nur lange herum-sitzen kann, muss nicht besonders gut sehen. Damit bleibt dem Körperbau eine Menge Notwendigkeiten erspart. Ein bescheidenes Gehirn, ein hohles Herz und verkümmerte Handwurzelknochen – »das alles spielt keine Rolle«, sagt Mueller. »Es ist ganz schön raffiniert.«

Seit man weiß, dass Schwanzlurche und Lungenfische weit mehr DNA besitzen als der Mensch, wurde in der Wissenschaft immer wieder diskutiert, welche Aufgaben dieses zusätzliche Genmaterial haben könnte. Anfangs hieß es mitunter, die DNA diene neben ihrem Informationsgehalt auch als Gerüst, das über die Größe eines Zellkerns bestimmt. Die Idee gilt inzwischen als überholt. Die heutigen Ansichten erscheinen vielschichtiger.

Bei Transposons handelt es sich nach Meinung des Genetikers Ting Wang von der Washington University in St. Louis tatsächlich um DNA-Schrott, der jedoch, verteilt über das gesamte Genom, zum Rohstoff der Evolution avancierte. Manchmal übernimmt er echte Funktionen. Wenn ein DNA-Schnipsel in der Nähe eines Gens landet, könnte er beispielsweise dafür sorgen, dass dieser Erbfaktor stärker ausgeprägt wird. Ein solches Transposon entdeckte Wang 2021 bei Mäuseembryonen: Entfernt man es, sterben viele Embryonen ab. Auch für die Struktur sind Transposons von Bedeutung, indem sie unser Erbgut in Funktionsabschnitte unterteilen. »Man kann sie nicht mehr von uns trennen«, betont Wang. »Sie sind ein Teil von uns.«

Und sie können uns schädigen. Als Wangs Arbeitsgruppe 2019 fast 8000 menschliche Tumoren analysierte, offenbarte sich, dass Transposons bei der Hälfte davon wichtige Onkogene einschalteten, die dann das explosive Wachstum der Krebszellen vorantrieben.

Das alles legt nahe, dass Transposons zwar manchmal von ihrem Wirt eingespannt werden, von sich aus aber

keinen Zweck erfüllen. »Nicht alles dient der Anpassung«, meint der Biologe Ryan Gregory von der kanadischen University of Guelph. DNA existiert um ihrer selbst willen. Ihre Evolution zielt weniger auf das Überleben ihres Wirts als vielmehr auf sich selbst.

Während der Wirt darum kämpft, sich in seiner Nische in der Welt zu behaupten, spielt sich in seinen Zellen ein ebenso dramatischer Kampf ab. Transposons konkurrieren darum, die Genomlandschaft zu bevölkern und der Verfolgung durch die Abwehrmechanismen des Wirtsorganismus zu entgehen. »Mittlerweile betrachten wir das Genom eher als ökologische Gemeinschaft mit den transponierbaren Elementen als Arten«, erklärt Rachel Mueller.

Da die Transposons sich vermehren, besteht ganz allgemein der Trend zu vergrößerten Genomen. Wie der Krempel in einer Garage sammelt sich die DNA an und füllt allen verfügbaren Platz aus. Der Druck der natürlichen Selektion bestraft jedoch den Wirt, wenn sein Erbgut zu groß wird. Deswegen behält es bei den meisten Arten ein gewisses Maß bei. Diese Größe, so erklärt Gregory, unterliege bestimmten Gesetzmäßigkeiten. Welche DNA-Belastung eine Spezies verträgt, hängt von ihrer Entwicklungsgeschwindigkeit, ihrem Stoffwechselumsatz sowie ihrer Lebensweise ab.

Vögel können es sich mit ihrem aktiven Stoffwechsel und ihrem energieaufwändigen Flug einfach nicht erlauben, viel sperrige DNA mit sich herumzuschleppen. Ihre Genome sind mit ein bis zwei Gigabasen kleiner als die der meisten Säugetiere. Bei denen gehören 19 der 20 kleinsten Genome



**STERNE UND
WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2023

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen zeigen beispielsweise den Jupiter mit seinem Mond Europa, das kuriose Sterntrio GW Orionis, den Effekt einer Gravitationslinse, kollidierende Galaxien und weitere Himmelsregionen und -objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/aktion/hue

E-Mail: service@spektrum.de



zu Fledermäusen, die vor ähnlichen Herausforderungen stehen wie Vögel.

Wir Menschen liegen mit drei Gigabasen bei den Säugern ungefähr in der Mitte. Darin spiegeln sich vermutlich mehrere konkurrierende Faktoren wider. Wir entwickeln uns langsam – bis wir erwachsen sind, vergehen fast 20 Jahre. Demnach sollten wir in der Lage sein, eine beträchtliche Menge überschüssige DNA anzureichern. Dennoch steht unsere Genomgröße wahrscheinlich auf Messers Schneide, denn sie wird von einem anderen wichtigen Faktor in Schach gehalten: von der Leistungsfähigkeit des Gehirns. Nach Ansicht der Neurobiologin Suzanaerculano-Houzel von der Vanderbilt University verdanken Menschen und andere Primaten ihre hohe Intelligenz der Tatsache, dass die Nervenzellen relativ klein sind und dadurch mehr davon Platz in unserer Großhirnrinde finden. Falls diese Theorie stimmt, würde uns ein größeres Genom zu weniger Neuronen verdammen – und damit zu weniger Hirnschmalz.

Transposons verwandeln sich zu »Ökosystemingenieuren« der Genomlandschaft

Vertreter der Froschlurche, der Schwesterordnung der Schwanzlurche, besitzen mit bis zu 13 Gigabasen ebenfalls oft relativ große Genome. Andererseits verfügt der Frosch *Platyplectrum ornatum*, dessen Genom 2021 veröffentlicht wurde, mit nur 1,06 Gigabasen über ähnlich wenig DNA wie ein Kolibri. Er lebt in australischen Wüsten und legt seinen Laich in Pfützen, die sich nach den seltenen Regenfällen bilden. Den Kaulquappen bleiben nur wenige Tage, in denen ihnen Beine wachsen müssen, bevor ihre Kinderstube austrocknet. Sie können es sich schlicht nicht leisten, in ihrem Genom zu viel Schrott zu horten. Entsprechend haben wuchernde Wildkräuter wie Disteln oder Löwenzahn ein kleineres Genom als die langsamer sprießenden Pflanzen, die von ihnen verdrängt werden.

Im Gegensatz zu den übrigen Tieren entwickelte sich offenbar bei den Schwanzlurchen allmählich ein aufgeblähtes Genom. Deren Vorfahr begab sich nach der Vorstellung von Gregory und Mueller vor 200 Millionen Jahren auf die Schleichspur des Lebens mit geringem Energiebedarf und träger Entwicklung. Deshalb schadete es ihm nicht unmittelbar, als sich Transposons in seinem Erbgut anreicherten. Die zunehmende Genomgröße trieb die Tiere weiter in die Nischen, in denen sich die Strategie eines gemächlichen, bescheidenen Daseins auszahlt.

2020 publizierten Gregory und seine Kollegen die Vermutung, dass dieser Prozess irgendwann einen Kipppunkt erreichte: Die Transposons verwandelten sich von bloßen Bewohnern der Genomlandschaft zu wahren »Ökosystemingenieuren«. Sobald ein Transposon irgendwo eine neue Kopie seiner selbst einbaut, besteht stets die Gefahr, ein Gen zu zerstören und dem Wirt zu schaden – was auch für es selbst schlecht wäre. Wenn das neu eingebaute DNA-Stück seinen Wirt beispielsweise unfruchtbar macht, gelangt es nicht in die nächste Generation. Als sich die Transposons aber weiter vermehrten, stellten sie schon durch ihre Anwesenheit immer mehr »Lebensraum« im Genom bereit, in die sich neue DNA-Schipsel einbauen

konnten, ohne auf Gene zu treffen. »Das Ganze funktioniert als Rückkopplungsschleife«, erläutert Gregory. »Je mehr Transposons da sind, desto mehr ungefährliche Einbaustellen gibt es.«

So kam es, dass der Furchenmolch *Necturus lewisi* heute 118 Gigabasen an DNA mit sich herumschleppt. Die eng verwandte Spezies *Necturus punctatus* liegt mit 117 Gigabasen knapp dahinter.

Beim Anblick eines Furchenmolchs mag man ein wenig Mitleid empfinden. Mit seiner trägen Entwicklung ist er nicht nur unfähig zur Metamorphose, sondern sie verhindert auch, dass sich Gliedmaßen beim ausgewachsenen Exemplar regenerieren können – eine bittere Ironie. Da er trockenes Land nicht überqueren kann, bleibt *Necturus lewisi* isoliert in zwei kleinen Flusssystemen von North Carolina. Durch Landwirtschaft und Bebauung verschlechterte sich die Wasserqualität. Im Juni 2021 stufte die US-Regierung die Spezies angesichts der schrumpfenden Population als gefährdet ein. Wenngleich die Ordnung der Schwanzlurche schon 200 Millionen Jahre überlebte, ist man leicht versucht zu glauben, das riesige Genom verurteile diese eine Art zum Untergang.

Sessions ist davon nicht überzeugt. Die Kreaturen mit ihrem Riesengenom haben immer wieder eines bewiesen: Wenn es um das Überleben des Geeigneten geht, bezieht sich unsere Vorstellung von »Eignung« einseitig auf Stärke und Beweglichkeit. Parasitische Gene haben die Entwicklung des Furchenmolchs verlangsamt, seine Zellen aufgebläht und seine Anatomie verzerrt. Wegen dieser eigenartigen Umstände hat sich das Tier auf einen bizarren Nebenweg der Evolution begeben, auf dem Eignung ganz anders definiert ist. Herz und Gehirn werden plötzlich nebensächlich. Seine Abstammungslinie blieb erhalten, während Brände, Überschwemmungen und Asteroiden zahlreiche Spezies – ob behaart, gefiedert oder geschuppt – hinwegfegte. »Lurche«, sagt Sessions, »sind hart im Nehmen.« ◀

QUELLEN

Itgen, M.W. et al.: Genome size drives morphological evolution in organ-specific ways. *Evolution* 76, 2022

Kremer, S.C. et al.: Transposable element persistence via potential genome-level ecosystem engineering. *BMC Genomics* 21, 2020

Roth, G. et al.: Genome size, secondary simplification, and the evolution of the brain in salamanders. *Brain, Behavior and Evolution* 50, 1997

Sessions S.K., Wake, D.B.: Forever young: Linking regeneration and genome size in salamanders. *Developmental Dynamics* 250, 2021

Sun, C., Mueller, R.L.: Hellbender genome sequences shed light on genomic expansion at the base of crown salamanders. *Genome Biology and Evolution* 6, 2014

LITERATURTIPP

Wilcox, C.: Das Geheimnis der parasitischen Riesenblumen. *Spektrum der Wissenschaft* 8/2022, S. 32–37

Wie Transposons bei Blütenpflanzen mitmischen

LEBENSMITTEL GESUND ESSEN, OHNE DIE UMWELT ZU ZERSTÖREN

**Das weltweite Bevölkerungswachstum erfordert eine Ernährungs-
umstellung: Auf den Speisezettel müssen weniger tierische Produkte,
sonst droht ein ökologischer Kollaps. Doch Menschen in
einkommensschwachen Regionen können sich das oft nicht leisten.**



Gayathri Vaidyanathan arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Bangalore, Indien.

» spektrum.de/artikel/2066856

► An der Küste bei Kilifi, nördlich von Mombasa in Kenia, gibt es viele Fischerdörfer. In den Gewässern tummeln sich Papageienfische, Oktopoden und andere essbare Meereslebewesen. Trotz dieses natürlichen Reichtums verzehren die Kinder, die dort leben, kaum Fisch. Sie ernähren sich fast nur von Ugali, einem Getreidebrei aus Maismehl und anderen pflanzlichen Produkten. Beinahe die Hälfte von ihnen leidet unter Wachstumsstörungen – ein doppelt so hoher Anteil wie im Rest des Landes.

Warum bekommen die Kinder keine marinen Erzeugnisse zu essen, obwohl ihre Eltern beruflich Fischfang betrei-

ben? Lora Iannotti, Expertin für öffentliche Gesundheit an der Washington University, tat sich mit einem kenianischen Team zusammen, um die Dorfbewohner das zu fragen. Immerhin könnte der Verzehr von Meerestieren die kindlichen Wachstumsstörungen verhindern. Die Antwort der Eltern war so logisch wie erschreckend: Es sei für sie aus finanziellen Gründen sinnvoller, den Fang zu verkaufen.

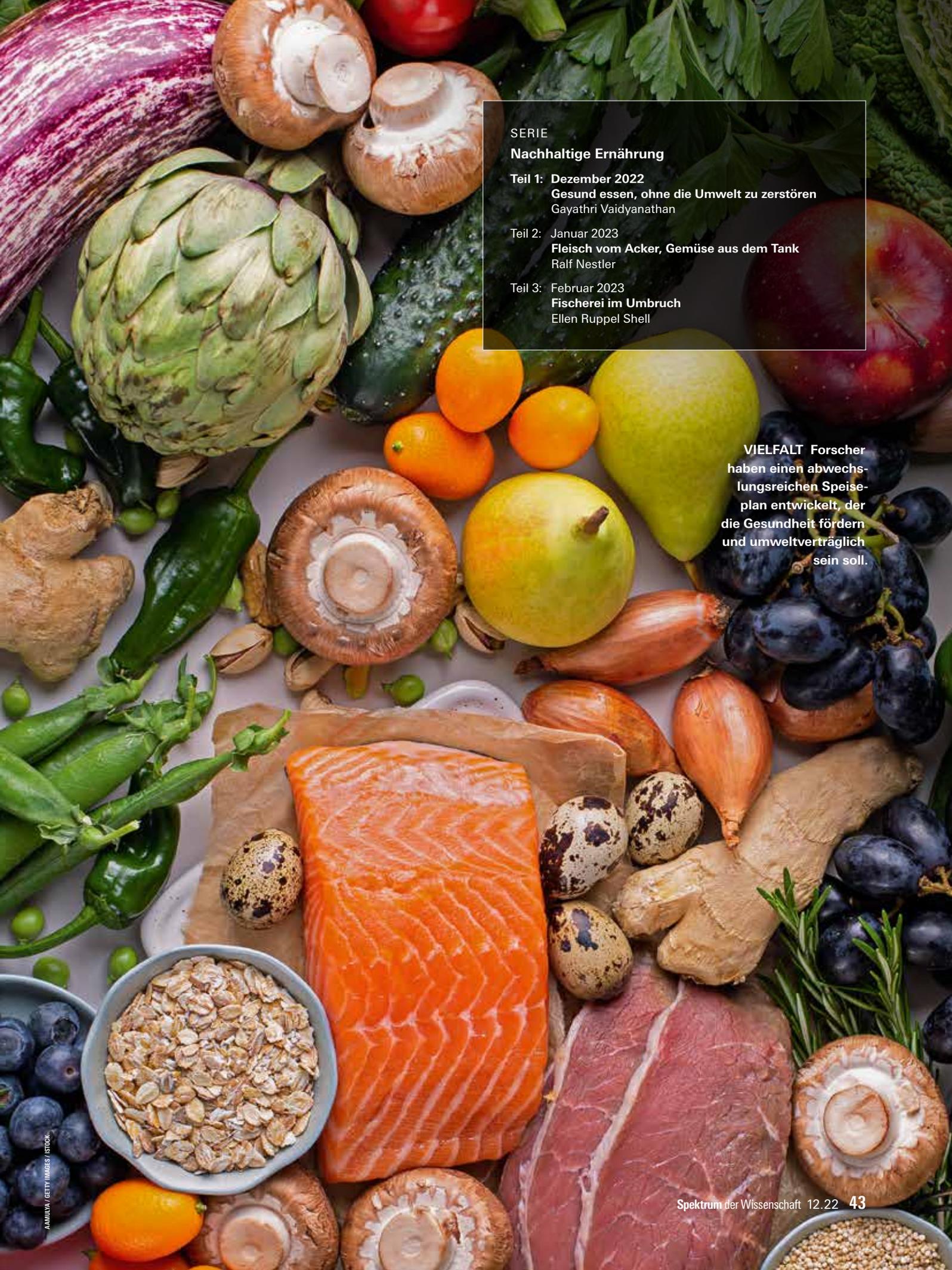
Iannotti und ihre Forschungsgruppe nahmen das zum Anlass, ein Experiment durchzuführen. Sie geben den Fischern modifizierte Reusen mit kleinen Öffnungen, durch die Jungfische entkommen. Dies soll den Nachwuchs der überfischten Bestände schützen, eine Erholung der Populationen ermöglichen und so letztlich das Einkommen der Fischerfamilien erhöhen. Mitarbeiter des Gesundheitswesens ermutigen die Eltern jedes zweiten Haushalts, ihren Kindern mehr Fischgerichte zuzubereiten – bevorzugt unter Nutzung reichlich vorhandener und schnell wachsender lokaler Arten wie dem Weißpunkt-Kaninchenfisch (*Siganus canaliculatus*). Die Forscherinnen und Forscher möchten herausfinden, ob Heranwachsende aus so betreuten Familien besser ernährt sind und größer werden.

Das Experiment helfe zu verstehen, »welche Meereserzeugnisse sowohl mit einer gesunden Ernährung als auch mit einem intakten Ökosystem vereinbar sind«, sagt Iannotti. Der daraus abgeleitete Speiseplan soll den kulturellen Gewohnheiten vor Ort entsprechen sowie finanziell erschwinglich sein.

Die Situation an der Küste bei Kilifi steht exemplarisch für eine Frage, die immer drängender nach einer Antwort verlangt: Welche Lebensmittel können sowohl die Weltbevölkerung ernähren als auch den Planeten vor dem ökologischen Kollaps bewahren? Mehr als zwei Milliarden Menschen sind übergewichtig oder fettleibig, der Großteil davon in der westlichen Welt. Gleichzeitig bekommen mindestens 800 Millionen Menschen nicht genügend Kalorien oder Nährstoffe – vor allem in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen. Ungesunde Ernährungsweisen trugen im Jahr 2017 weltweit zu einer höheren Zahl an Todesfällen bei als jeder andere vermeidbare Risikofaktor einschließlich des

AUF EINEN BLICK PLANET AM LIMIT

- 1** Die wachsende Weltbevölkerung benötigt immer mehr Lebensmittel. Das erfordert einen deutlichen Anstieg landwirtschaftlicher Erträge.
- 2** Schon jetzt werden die natürlichen Ressourcen weltweit übernutzt, um die Menschheit zu ernähren. In Zukunft wird sich das noch verschärfen.
- 3** Die künftige Versorgung zu sichern, gelingt nur, wenn sich die Essgewohnheiten ändern. Der Anteil tierischer Lebensmittel muss drastisch sinken.



SERIE

Nachhaltige Ernährung

Teil 1: Dezember 2022

Gesund essen, ohne die Umwelt zu zerstören
Gayathri Vaidyanathan

Teil 2: Januar 2023

Fleisch vom Acker, Gemüse aus dem Tank
Ralf Nestler

Teil 3: Februar 2023

Fischerei im Umbruch
Ellen Ruppel Shell

VIELFALT Forscher haben einen abwechslungsreichen Speiseplan entwickelt, der die Gesundheit fördern und umweltverträglich sein soll.

Rauchens. Besserung ist nicht in Sicht: Da die Weltbevölkerung weiter wächst und immer mehr Menschen sich so verpflegen wie in der westlichen Welt üblich, steigt der Bedarf an tierischen Erzeugnissen rapide an. Laut der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) müsste die Produktion von Fleisch, Milchprodukten und Eiern bis 2050 um 44 Prozent zulegen, um die künftige Nachfrage zu befriedigen.

Das wird nicht nur gewaltige Gesundheits-, sondern ebenso massive Umweltprobleme nach sich ziehen. Das derzeitige industrialisierte Lebensmittelsystem verursacht etwa ein Viertel der weltweiten Treibhausgasemissionen. Es ist global für 70 Prozent des Süßwasserverbrauchs und 40 Prozent der Landnutzung verantwortlich – und beruht auf dem massenhaften Einsatz von Düngemitteln, die den natürlichen Stickstoff- und Phosphorkreislauf stören und Binnen- wie Küstengewässer verschmutzen.

Im Jahr 2019 veröffentlichte eine internationale Arbeitsgruppe aus 37 Ernährungswissenschaftlern, Ökologen und anderen Experten, die EAT-Lancet Commission on Food, Planet, Health, einen viel beachteten Bericht. Darin forderte sie einen weltweiten Umbau der Lebensmittelversorgung mit dem Ziel, die menschliche Gesundheit und die natürliche Umwelt so gut wie möglich zu erhalten. Den Empfehlungen des Teams zufolge sollen Menschen sich »flexibel« ernähren, das heißt, an den meisten Tagen hauptsächlich pflanzliche Produkte und nur gelegentlich kleine Mengen Fleisch oder Fisch verzehren.

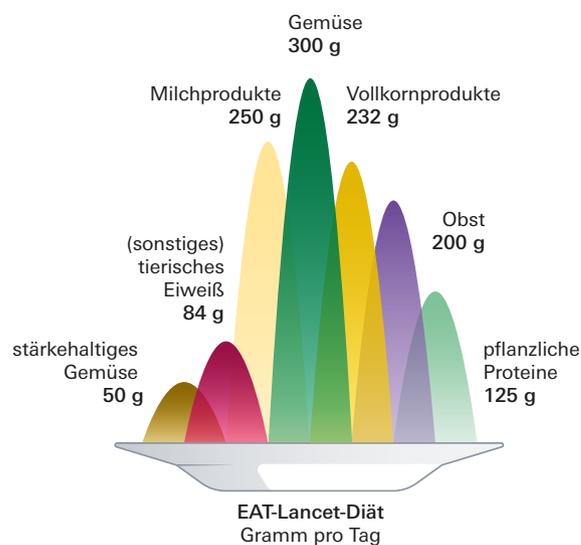
Deutlich verringerter Fußabdruck

Der Bericht stieß auf große Resonanz und förderte das Bewusstsein für nachhaltige Ernährung, zog aber auch die Kritik auf sich, dass seine Empfehlungen nicht durchweg umsetzbar seien. Einige Arbeitsgruppen testen jetzt lokal angepasste Konzepte der Lebensmittelversorgung, die ökologisch und wirtschaftlich tragbar sein und zugleich die Nährstoffversorgung sichern sollen. »Wir müssen Fortschritte machen auf dem Weg hin zu einem Speiseplan, der einen drastisch verringerten ökologischen Fußabdruck hat, oder wir werden in wenigen Jahrzehnten einen globalen Zusammenbruch der Biodiversität erleben«, sagt Sam Myers, Direktor der Planetary Health Alliance. Dieser globale Zusammenschluss von Forschungseinrichtungen, Regierungsvertretern und Nichtregierungsorganisationen mit Sitz in Boston untersucht die gesundheitlichen Auswirkungen von Umweltveränderungen.

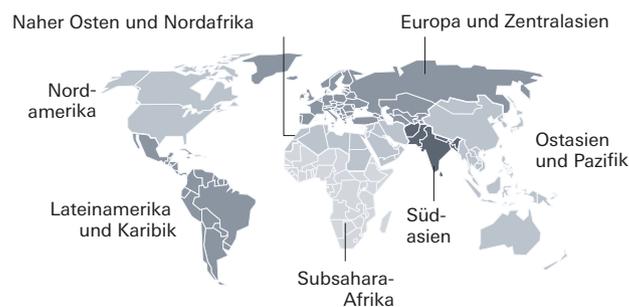
Momentan setzt die Lebensmittelproduktion so viele Treibhausgase frei, dass sie allein bereits einen globalen Temperaturanstieg von mehr als 1,5 Grad Celsius verursachen würde – selbst wenn alle anderen Emissionen bei null lägen. Ein großer Teil dieses Ausstoßes (30 bis 50 Prozent) stammt aus der Viehhaltung, denn sie wandelt Biomasse und Wasser sehr ineffizient in Nahrung für den Menschen um. Im Jahr 2014 untersuchten die Ökologen David Tilman von der University of Minnesota und Michael Clark von der University of Oxford, wie das voraussichtlich weitergehen wird. Ihr Ergebnis: Urbanisierung und Bevölkerungswachstum zwischen 2010 und 2050 dürften die lebensmittelbedingten Emissionen weltweit um 80 Prozent steigen lassen.

Eine gesunde, aber teure Kost

Ernährungswissenschaftler und andere Experten haben eine Diät entwickelt, die das Wohlbefinden fördert, Krankheiten vermeidet und sich nachhaltig bereitstellen lässt. Sie verglichen deren Zusammensetzung mit dem üblichen Speiseplan in verschiedenen Weltregionen (siehe gestrichelte Linien und schattierte Flächen). Laut weiterführenden Studien ist diese Ernährungsweise in vielen Regionen allerdings unerschwinglich teuer.



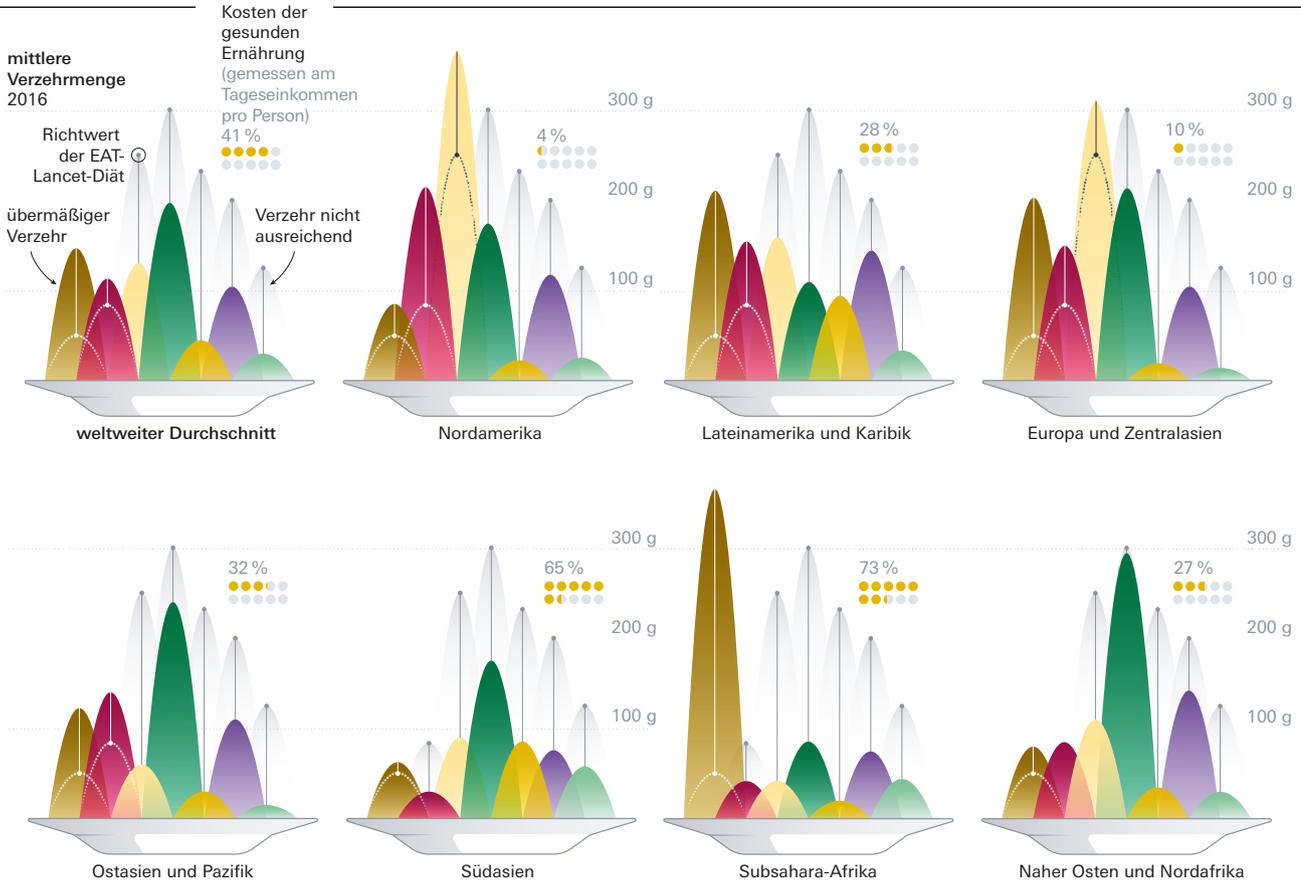
Aufschlüsselung der Regionen



JASEK BEZUGSZEICHENFÜR NATURE, AUFNAHME VON NÄHRMISSTANDEN NACH WILLETT, W. ET AL., FOOD IN THE ANTHROPOCENE: THE EAT-LANCET COMMISSION ON HEALTHY DIETS FROM SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS, LANCET 393, 2019; KOSTEN DER GESUNDE ERNÄHRUNG NACH HIRVONEN, K. ET AL., AFFORDABILITY OF THE EAT-LANCET REFERENCE DIET: A GLOBAL ANALYSIS, LANCET GLOBAL HEALTH 8, 2020; VANDANATHAN, G., WHAT HUMANITY SHOULD EAT TO STAY HEALTHY AND SAVE THE PLANET, NATURE 600, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Würden die Menschen ihre Diät deutlich stärker auf pflanzliche Erzeugnisse umstellen und die Treibhausgasemissionen sämtlicher anderen Sektoren gestoppt, hätte die Welt eine 50-prozentige Chance, das Klimaziel von 1,5 Grad zu erreichen. Das geht aus den Studien der beiden Forscher und ihrer Teams hervor. Und wenn nicht nur die Ernährung selbst, sondern auch noch weitere Faktoren verändert würden – etwa Maßnahmen, um die Lebensmittelverschwendung einzudämmen –, stiege die Chance, dieses Ziel zu erreichen, auf 67 Prozent.

JASIEK, KREJCI, STRONKOWSKA, ABERNATHY, VON MANNING, WILSON, WILLET, WU, ET AL. FOOD IN THE ANTHROPOCENE: THE EAT-LANCET COMMISSION ON HEALTHY DIETS FROM SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS. NATURE 528, 2017. DOI: 10.1038/nature20472. WILLET, WU, ET AL. THE STATE OF FOOD SECURITY AND NUTRITION IN THE WORLD: AN UPDATE TO ENHANCE RESILIENCE AND TRANSFORM FOOD SYSTEMS. LANCET GLOBAL HEALTH 8, 2020. DOI: 10.1016/S2468-2667(20)30311-4. WILLET, WU, ET AL. THE STATE OF FOOD SECURITY AND NUTRITION IN THE WORLD: AN UPDATE TO ENHANCE RESILIENCE AND TRANSFORM FOOD SYSTEMS. LANCET GLOBAL HEALTH 8, 2020. DOI: 10.1016/S2468-2667(20)30311-4. WILLET, WU, ET AL. THE STATE OF FOOD SECURITY AND NUTRITION IN THE WORLD: AN UPDATE TO ENHANCE RESILIENCE AND TRANSFORM FOOD SYSTEMS. LANCET GLOBAL HEALTH 8, 2020. DOI: 10.1016/S2468-2667(20)30311-4.

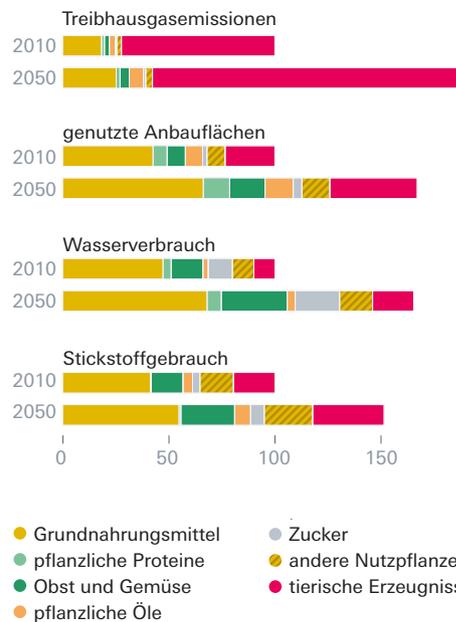


Solche Erkenntnisse hört man in der Fleisch verarbeitenden Industrie nicht gern. Als das US-Landwirtschaftsministerium im Jahr 2015 turnusgemäß seine Ernährungsrichtlinien überarbeitete, überlegten die Verantwortlichen kurz, Umweltaspekte als relevanten Faktor mit aufzunehmen. Forscher und Forscherinnen aus einschlägigen Fachdisziplinen hatten darum gebeten. Die Idee wurde verworfen – und zwar wohl auf Druck der Industrie, wie der Lebensmittelexperte Timothy Griffin von der Tufts University in Boston annimmt, der an der Aktualisierung der Richtlinien mitwirkte. Nichtsdestoweniger war das Thema damit in den Fokus gerückt.

Die EAT-Lancet-Gruppe trug wichtige Argumente zur Debatte bei. Sie legte Umweltgrenzwerte einer gesunden Vollwertkost fest, die dem aktuellen Kenntnisstand der Fachliteratur entsprechen. In diesen Grenzwerten sind Kohlenstoffemissionen, der Verlust biologischer Vielfalt und die Nutzung von Süßwasser, Land, Stickstoff und Phosphor berücksichtigt. Solche Limits dauerhaft zu überschreiten, kann den Planeten für Menschen unbewohnbar machen, wie ein Team um den Ökologen Will Steffen von der Australian National University im Jahr 2015 darlegte.

Das Ergebnis all dieser Überlegungen ist ein vielfältig zusammengesetzter, hauptsächlich pflanzlicher Speiseplan (siehe »Eine gesunde, aber teure Kost«). Er gesteht einer 30-jährigen Person 2500 Kilokalorien pro Tag zu – und maximal 100 Gramm rotes Fleisch wöchentlich. Das ist

WACHSENDE UMWELTSCHÄDEN Das prognostizierte Bevölkerungs- und Einkommenswachstum zwischen 2010 und 2050 wird dafür sorgen, dass die Umweltbelastungen infolge der Nahrungsmittelproduktion um 50 bis 90 Prozent steigen.



NATURE. NACH SPRINGMAN, M. ET AL. OPTIONS FOR KEEPING THE FOOD SYSTEM WITHIN ENVIRONMENTAL LIMITS. NATURE 528, 2018. DOI: 10.1038/nature20472. WILLET, WU, ET AL. THE STATE OF FOOD SECURITY AND NUTRITION IN THE WORLD: AN UPDATE TO ENHANCE RESILIENCE AND TRANSFORM FOOD SYSTEMS. LANCET GLOBAL HEALTH 8, 2020. DOI: 10.1016/S2468-2667(20)30311-4.

weniger als ein Viertel dessen, was ein durchschnittlicher US-Amerikaner zu sich nimmt. Industriell stark prozessierte Lebensmittel wie Softdrinks, Tiefkühlgerichte und Formfleisch spart der Plan großteils aus.

Eine solche Diät würde jedes Jahr das Leben von etwa elf Millionen Menschen retten, schätzt die EAT-Lancet-Gruppe. »Es ist möglich, zehn Milliarden Menschen gesund zu ernähren, ohne die planetaren Ökosysteme zu zerstören«, betont Timothy Lang, Experte für Ernährungspolitik an der City University of London. »Ob es den Vertretern der Fleisch- und Milchindustrie gefällt oder nicht, sie stehen vor umwälzenden Veränderungen. Ein grundlegender Wandel des Essverhaltens ist unausweichlich.«

Wider den Raubbau an der Natur

Viele Wissenschaftler sind davon überzeugt, dass sich die Bürgerinnen und Bürger wohlhabender Staaten an der EAT-Lancet-Diät orientieren sollten. Diese verzehren im Mittel 2,6-mal mehr Fleisch als Bewohner einkommensschwacher Länder und ernähren sich eindeutig nicht nachhaltig. Fraglich erscheint indes, ob die Diät für arme Menschen nahrhaft genug ist. Der Wissenschaftsberater Ty Beal von der Global Alliance for Improved Nutrition hat die EAT-Lancet-Diät analysiert. Ihm zufolge deckt sie bei über 25-Jährigen nur 78 Prozent des Zink- und 86 Prozent des Kalziumbedarfs – und lediglich 55 Prozent des Eisenbedarfs von Frauen im gebärfähigen Alter.

Trotz dieser Kritik hat die Debatte aufgezeigt, wie wichtig Umweltbelange sind. »Bis zum Bericht der EAT-Lancet-Gruppe war den politischen Entscheidungsträgern anscheinend nicht klar, dass der Faktor Nachhaltigkeit berücksichtigt gehört, wenn man über die künftige Ernährung der Weltbevölkerung diskutiert«, sagt die Agrarökologin Anne Elise Stratton von der Freien Universität Amsterdam. Und Marco Springmann, Ernährungswissenschaftler an der University of Oxford und früheres Mitglied des EAT-Lancet-Teams, betont, der empfohlene Speiseplan sei nicht auf alle Menschen weltweit in derselben Weise anzuwenden.

Seit Veröffentlichung des EAT-Lancet-Berichts gehen Fachleute für öffentliche Gesundheit der Frage nach, wie sich eine nachhaltige Lebensmittelversorgung an die Belange unterschiedlicher Personen in verschiedenen Weltregionen anpassen lässt. Ernährungsrichtlinien finden oft keine Beachtung; daher suchen Wissenschaftler nach neuen Ansätzen, um die Menschen zu einer gesunden, ökologisch verträglichen Lebensweise zu bewegen.

Eine schwedische Forschungsgruppe um die Ernährungswissenschaftlerin Patricia Eustachio Colombo vom Karolinska-Institut in Stockholm testet derzeit den Erfolg nachhaltiger Schulspeisung. Das Team knüpft damit an eine soziale Bewegung an, die in den skandinavischen Ländern unter dem Namen »New Nordic Diet« (neue nordische Ernährung) entstanden ist. Sie setzt sich für den Verzehr von traditionellen, nachhaltig erzeugten Lebensmitteln wie saisonalem Gemüse und Fleisch aus Freilandhaltung ein.

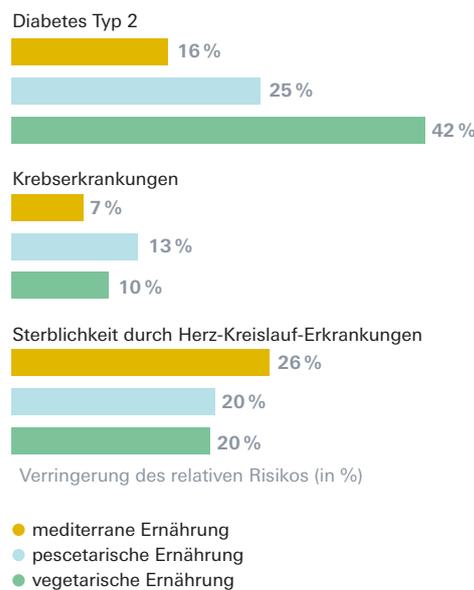
Eustachio Colombo und ihr Team analysierten per Computeralgorithmus die Verpflegung an einer Grundschule mit rund 2000 Schülern und Schülerinnen. Der Algorithmus schlug Maßnahmen vor, wie sich das Schulesen bei glei-

chem Kaloriengehalt nahrhafter und ökologisch verträglicher gestalten lässt, etwa durch einen reduzierten Fleischgehalt in Eintöpfen und einen höheren Anteil von Bohnen und Gemüse. Zwar erhielten die Kinder und ihre Eltern die Information, das Mittagessen sei jetzt anders zubereitet, bekamen aber keine Details dazu mitgeteilt, schildert Eustachio Colombo. Die meisten Schüler bemerkten keinen Unterschied zu vorher, aßen unverändert viel und gaben auch nicht mehr Essen in den Abfall. Die Forschungsgruppe wiederholt den Versuch nun mit 2800 Kindern.

»Schulspeisung bietet nahezu einzigartige Gelegenheiten, um ökologisch nachhaltige Ernährungsgewohnheiten zu fördern. Was uns aus der Kindheit vertraut ist, behalten wir oft bis ins hohe Alter bei«, beschreibt Eustachio Colombo die Idee hinter dem Experiment. Der Speiseplan, den ihr Team an der Grundschule getestet hat, unterscheidet sich deutlich von der EAT-Lancet-Diät, sagt sie. Er verursache geringere Kosten und setze mehr auf stärkehaltige Lebensmittel wie Kartoffeln, die in Schweden zu den Grundnahrungsmitteln zählen. Zudem sei er nahrhafter und entspreche besser den kulturellen Gepflogenheiten in Skandinavien. »Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, die EAT-Lancet-Diät an lokale Gegebenheiten anzupassen.«

Andernorts erproben Wissenschaftler und Gastronomen, wie eine ökologisch tragfähige Diät in einkommensschwachen Gegenden ankommt. In Baltimore, Maryland, haben sich ein Catering-Unternehmen und ein Restaurant zusammengeschlossen, die beide während der Covid-Pandemie

WENIGER KRANKHEITEN DANK ANGEPASTER ERNÄHRUNG Eine nachhaltige Ernährung könnte der EAT-Lancet-Expertengruppe zufolge etwa elf Millionen Menschenleben pro Jahr retten. Viele Untersuchungen belegen, dass eine fett-, fleisch- und zuckerreduzierte Kost das Risiko diverser Krankheiten senkt. Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Vergleich mit der globalen Durchschnittsdiät und sind einer systematischen Übersichtsarbeit von 2014 entnommen.



NATURE NACH TILMAN, D. & CLARK, M.: GLOBAL DIETS LINK ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY AND HUMAN HEALTH. NATURE 515, 2014; VADIVANATHAN, G.: WHAT HUMANITY SHOULD EAT TO STAY HEALTHY AND SAVE THE PLANET. NATURE 600, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

schließen mussten. Sie sammeln Spenden, um kostenlose Gerichte, die sich an der EAT-Lancet-Diät orientieren, an Familien in »Nahrungsmittelwüsten« zu verteilen. So nennt man Gegenden, in denen es kaum Zugang zu erschwinglichen, nahrhaften Lebensmitteln gibt. Eine solche Mahlzeit besteht beispielsweise aus Lachsküchlein mit saisonalem Gemüse, Couscous und cremigem Pesto.

Forscher der Johns Hopkins University in Baltimore haben eine Umfrage unter 500 Menschen durchgeführt, die entsprechenden Familien angehören. 242 antworteten, von denen 225 angaben, das nachhaltige Essen zu mögen – das sind 93 Prozent. Doch die Sache hat einen Haken: Jedes durch Spenden finanzierte nachhaltige Gericht kostet zehn US-Dollar und somit das Fünffache des Betrags, den das US-Nahrungsmittelhilfeprogramm erstattet. »Es liegt auf der Hand, dass sich der ökologische Fußabdruck verringern lässt, wenn man die Ernährungsgewohnheiten ändert – aber dem stehen kulturelle und wirtschaftliche Barrieren entgegen«, sagt Timothy Griffin.

Für Forscher, die Möglichkeiten einer nachhaltigen Lebensmittelversorgung in Ländern niedrigen oder mittleren Durchschnittseinkommens untersuchen, ist es schwer herauszufinden, was die Menschen tatsächlich essen. »Das kommt einer Blackbox gleich«, meint Purnima Menon vom International Food Policy Research Institute in Neu-Delhi, die Ernährungsgewohnheiten in Indien untersucht. Erhebungen darüber, was die dortigen Einwohnerinnen und Einwohner verzehren, seien mindestens zehn Jahre alt. Es bestehe aber dringender Bedarf an solchen Daten, da Indien im Welthungerindex auf Platz 101 von 116 steht und die weltweit meisten unterernährten Kinder hat.

Mehr Anbaufläche oder höhere Erträge

Abhishek Chaudhary ist Lebensmittelexperte am Indian Institute of Technology Kanpur und gehörte dem EAT-Lancet-Team an. Er und sein Kollege Vaibhav Krishna von der ETH Zürich haben eine Software und lokale Daten zu Landnutzung, Schadstofffreisetzung und Wasser-, Phosphor- sowie Stickstoffverbrauch genutzt, um Ernährungspläne für alle indischen Bundesstaaten zu erstellen. Der Algorithmus entwickelte Diäten, die den Nährstoffbedarf decken, lebensmittelbedingte Emissionen um 35 Prozent senken und Umweltressourcen so weit wie möglich schonen. Um die hierfür nötige Menge an Nutzpflanzen anzubauen, wären jedoch entweder 35 Prozent mehr Anbaufläche erforderlich, was sich in dem überbevölkerten Land nicht umsetzen lässt, oder deutlich höhere Erträge. Und die Lebensmittelpreise würden um 50 Prozent steigen.

Gesundes, nachhaltiges Essen belastet den Geldbeutel auch andernorts. Die vom EAT-Lancet-Team empfohlene Vielfalt des Speiseplans – Nüsse, Fisch, Eier, Milchprodukte und mehr – ist für Millionen Menschen unerschwinglich, betont Lora Iannotti. Eine Durchschnittsperson so zu ernähren, hätte bei den Lebensmittelpreisen des Jahres 2011 im globalen Mittel 2,84 US-Dollar täglich gekostet. Das würde die finanziellen Möglichkeiten von mindestens anderthalb Milliarden Menschen übersteigen, fand eine Forschungsgruppe um William Masters von der Tufts University im Jahr 2020 heraus.

Und es gibt weitere Hürden, etwa die empfohlenen Einschränkungen des Fleischkonsums. Wo Nährstoffmangel herrscht und die vom EAT-Lancet-Team präferierten pflanzlichen Lebensmittel nicht verfügbar sind, liefern tierische Erzeugnisse einen bedeutenden Anteil der benötigten Nährstoffe. Landwirtschaftliche Kleinbetriebe in einkommensschwachen Regionen setzen auch deshalb auf Viehzucht, weil sich das Vieh in Notzeiten verkaufen lässt und somit einer Versicherung gleichkommt, wie der Generaldirektor des International Livestock Research Institute in Nairobi Jimmy Smith zu bedenken gibt.

In armen Ländern ist es wichtiger, genug zu essen zu haben, als die Umwelt zu erhalten. Die Ernährungs- und

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/klimakonferenz](https://www.spektrum.de/t/klimakonferenz)



EWAN BOOTMAN / NURPHOTO / PICTURE ALLIANCE

Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen hat deshalb einen Ausschuss eingerichtet, der die EAT-Lancet-Empfehlungen prüfen soll. Das Ziel lautet, die Gegebenheiten in verschiedenen Weltregionen besser zu berücksichtigen und mehr Augenmerk auf die Versorgungssicherheit sowie die Nachhaltigkeit der Viehzucht zu legen. Der neue Bericht wird voraussichtlich im Jahr 2024 erscheinen.

Der beste Weg, Bewohner einkommensschwacher Regionen nachhaltig zu ernähren, dürfte über eine eng Zusammenarbeit mit den dortigen Gemeinden und Landwirten führen – wie in dem oben geschilderten Experiment bei Kilifi praktiziert. Nötig sind lokal angepasste Maßnahmen, um die Menschen zu einem ökologisch verträglicheren Lebensstil zu bewegen. Nur in Abstimmung mit der ortsansässigen Bevölkerung lassen sich ökologisch tragfähige Lösungen finden, die umsetzbar sind. ◀

QUELLEN

Clark, M. et al.: Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science* 370, 2020

GBD 2017 Diet Collaborators: Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet* 393, 2019

Springmann, M. et al.: Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: A global modelling analysis with country-level detail. *Lancet Planet Health* 2, 2018

Steffen, W. et al.: Sustainability. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 2015

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 600, S. 22–25, 2021

Wissen verschenken und Freude bereiten – mit einem Geschenkabonnement!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

Print 12 Ausgaben, € 98,40
Digital 12 Ausgaben, € 63,-
Print + Digital € 104,40



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

Print 12 Ausgaben, € 85,20
Digital 12 Ausgaben, € 63,-
Print + Digital € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

Print 12 Ausgaben, € 98,40
Digital 12 Ausgaben, € 63,-
Print + Digital € 104,40



Das Magazin für alle, die auf sich Acht geben und gesund leben wollen

Print 6 Ausgaben, € 32,40
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 38,40



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

Print 4 Ausgaben, € 32,-
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 36,-



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

Print 4 Ausgaben, € 32,-
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 36,-



Spannende Berichte aus Geschichte und Archäologie

Print 6 Ausgaben, € 32,40
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 38,40



Das Magazin für den modernen, selbstbestimmten Menschen

Print 6 Ausgaben, € 32,40
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 38,40

Ein ganzes Jahr Lesevergnügen

... und weitere gute Gründe,
ein Abo zu verschenken

1. Bestellen Sie für sich oder einen lieben Menschen die passende Lektüre – gedruckt oder digital.
2. Auch Sie profitieren von einer Bestellung, denn Sie erhalten dafür ein Geschenk zur Wahl.
3. Pünktlich zu dem von Ihnen gewünschten Termin verschicken wir die erste Ausgabe zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Shopgutschein
€ 10,-

Einlösbar
in unserem
Spektrum-
Shop



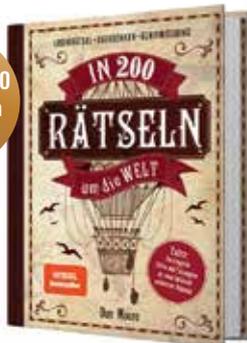
Astrokalender

Der Astrokalender mit faszinierenden Bildern und den wichtigsten Himmelsereignissen im Jahr 2023



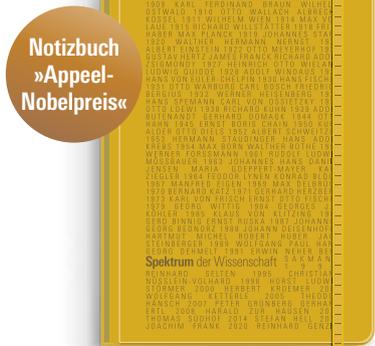
Taschenmesser
»Rally«

Klein, aber oho!
Das Taschenmesser
»Rally« von Victorinox
passt in wirklich
jede Hosentasche



Buch »In 200
Rätseln um
die Welt«

Rätselspaß im
Geiste Jules
Verne's und
der Viktoriani-
schen Zeit



Notizbuch
»Appeel-
Nobelpreis«

Dieses praktische
Notizbuch besteht
zu einem großen Teil
aus wiederverwertem
Apfeltrester



Baumspende:
10 Setzlinge

... für das Wiederauf-
forstungsprogramm
»Heidelberger Wäld-
chen« in Brasilien

Jetzt bestellen:

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

www.spektrum.de/geschenk

KATALYSE DER FLUCH DES PALLADIUMS

Immer wieder versuchen Fachleute, Katalysatoren für die organische Chemie ohne das teure Element Palladium zu entwerfen – und scheitern. Warum, zeigt die Geschichte einer kürzlich zurückgezogenen Studie.



Die Wissenschaftsjournalistin **Ariana Remmel** arbeitet für das Magazin »Chemical & Engineering News« und lebt in Arkansas, USA.

» spektrum.de/artikel/2066865

AUF EINEN BLICK UNERSETZLICH UND UNAUSWEICHLICH

- 1** Palladiumhaltige Katalysatoren sind mächtige Werkzeuge im Baukasten der organischen Chemie. Sie sind besonders nützlich, um neue Bindungen zwischen Kohlenstoffatomen herzustellen.
- 2** Da das Element teuer und giftig ist, arbeiten Forschungsteams daran, palladiumfreie Alternativen zu finden.
- 3** Auf der Suche danach scheitern sie wiederholt – denn das Edelmetall schleicht sich über Umwege in die Reaktionen und vereitelt bisher fast jeden Versuch, ihm zu entkommen.





ALLESKÖNNER So offensichtlich wie hier zeigt sich Palladium im Labor selten. Winzigste Spuren des Edelmetalls können Ergebnisse verfälschen und haben schon manche chemische Arbeitsgruppe in die Irre geführt.

► Kaum ein Ort auf der Erde ist noch nicht mit Palladium in Berührung gekommen. Das silbrig weiße Metall stellt einen wichtigen Bestandteil der Katalysatoren in den 1,4 Milliarden Autos auf der Welt dar, und so gelangen Palladiumpartikel über die Abgase in die Atmosphäre. Bergbau und weitere Quellen tragen ebenfalls zu dieser Verschmutzung bei. Infolgedessen findet man bereits Spuren des Edelmetalls an einigen der entlegensten Orte der Erde, von der Antarktis bis zur Spitze des grönländischen Eisschildes.

Auch für die Herstellung von Medikamenten ist Palladium praktisch unverzichtbar. Denn Katalysatoren, die Palladiumatome in ihrem Kern tragen, sind unübertroffene Meister darin, Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen zu knüpfen. Solch eine Art von chemischer Reaktion ist der Schlüssel zum Aufbau komplexer organischer Moleküle, insbesondere einiger, die in Medikamenten zum Einsatz kommen. »Jedes Arzneimittel, das wir herstellen, enthält an einer Stelle einen palladiumkatalysierten Schritt«, sagt Per-Ola Norrby, Forscher beim Pharmakonzern AstraZeneca im schwedischen Göteborg. Solche palladiumkatalysierten Reaktionen sind so wichtig, dass ihre Entdecker im Jahr 2010 gemeinsam einen Nobelpreis erhielten.

Doch trotz seiner Vielseitigkeit versuchen Chemiker, auf Palladium zu verzichten. Das Metall ist teurer als Gold, und palladiumhaltige Moleküle können für Menschen und Tiere extrem giftig sein. So müssen Chemikalienhersteller alle Palladiumspuren aus ihren Produkten abtrennen und den gefährlichen Abfall akribisch entsorgen, was zusätzliche Kosten verursacht.

Jeder bislang angekündigte Palladiumersatz stellte sich im Nachhinein als Irrtum heraus

Thomas Fuchß, Medizinalchemiker beim Life-Sciences-Unternehmen Merck in Darmstadt, nennt ein Beispiel: Um drei Kilogramm eines bestimmten Wirkstoffmoleküls herzustellen, benötigt das Unternehmen Ausgangsstoffe für 250 000 US-Dollar. Allein der Palladiumkatalysator kostet dabei 100 000 Dollar, dessen Abtrennung aus dem Produkt weitere 30 000 Dollar.

Die Suche nach weniger toxischen Alternativen könnte helfen, die Umweltbelastung durch Palladiumabfälle zu verringern und die chemische Industrie dazu zu bewegen, umweltverträglichere Reaktionen zu ersinnen, sagt Tianning Diao, die an der New York University zur Organometallkatalyse forscht. Die Hoffnung ist, Palladium entweder durch gängigere Metalle wie Eisen und Nickel zu ersetzen oder völlig metallfreie Katalysatoren zu entwickeln, die das Problem ganz umgehen.

In den letzten zwei Jahrzehnten haben Fachleute mehrfach über die Entdeckung palladiumfreier Katalysatoren berichtet. Doch jeder angekündigte Durchbruch erwies sich nachträglich als Irrtum.

Im Januar 2021 schien dann eine verblüffende Studie den Traum vom palladiumfreien Katalysator endlich in greifbare Nähe zu rücken. Forscher in China berichteten, dass eine »Kohlenstoffkupplungsreaktion«, eine der häufigsten Reaktionen zum Aufbau von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen in der Arzneimittelindustrie, ohne Palla-

dium oder ein anderes Metall katalysiert werden konnte. Sollten sich die Ergebnisse bestätigen, würde die Reaktion unser Wissen über den Aufbau von Kohlenstoffbindungen grundlegend verändern, meint Norrby.

Die chemische Community war sofort begeistert – und skeptisch. Forscherinnen und Forscher in aller Welt versuchten, die außergewöhnlichen Ergebnisse in ihren eigenen Labors zu überprüfen. Innerhalb von zwei Monaten veröffentlichten drei Teams Preprints (Publikationen vor der Begutachtung durch Fachkollegen), in denen sie behaupteten, dass in Wirklichkeit Palladiumverunreinigungen die Kupplungsreaktion katalysierten.

Und die Kritiker sollten Recht behalten (siehe »Kupplungsreaktionen«). Die Entdeckung, die keine war, und die Frage, wie es zu diesem Fehler kam, hat anschließend die Diskussion in einigen Kreisen der analytischen und pharmazeutischen Chemie beherrscht. Die Geschichte dient als abschreckendes Beispiel dafür, wie unglaublich schwierig es ist, Reaktionen und Labore frei von Palladiumverunreinigungen zu halten.

Als er die neue Veröffentlichung sah, erzählt der britische Chemiker Nicholas Leadbeater, war sein erster Gedanke: »Jetzt geht es wieder los.« Im Jahr 2003 verfolgte er am King's College London eine Strategie, Kohlenstoff-Kupplungsreaktionen palladiumfrei zu Wege zu bringen. Sein Team wollte gängige Reaktionen mit einer Kombination aus Kupferverbindungen und Mikrowellenbestrahlung katalysieren. Als sie jedoch einen Kontrollversuch ohne Metalle durchführten, funktionierten die Reaktionen trotzdem. Weil das so bemerkenswert war, setzten Leadbeater und seine Kollegen alles daran, sicherzustellen, dass sich kein Palladium unbemerkt in die Reaktion eingeschlichen hatte.

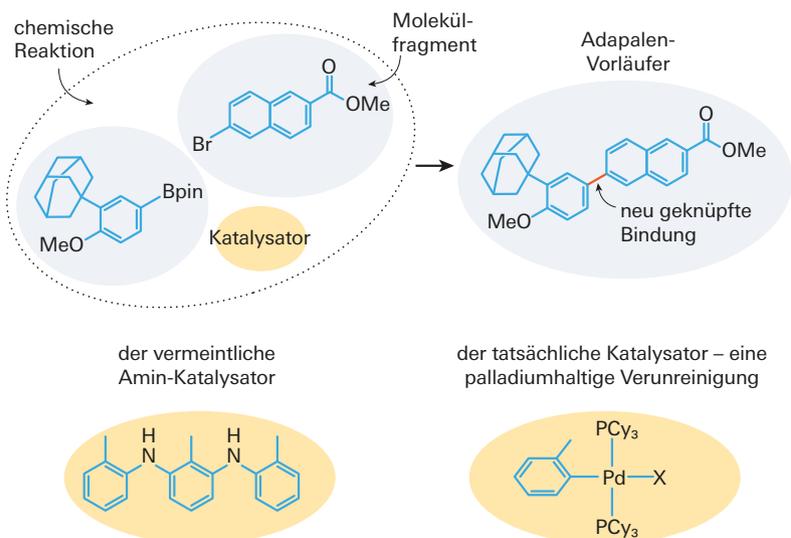
Die Arbeiten des Teams wurden begeistert aufgenommen; die Entdeckung würde der zentrale Punkt seiner Karriere sein, war sich Leadbeater sicher. Dann wechselte er mit seiner Forschungsgruppe an die University of Connecticut – und alles geriet aus den Fugen. »Wir konnten die Reaktion nicht mehr zum Laufen bringen, egal was wir versuchten«, berichtet er.

Nach monatelanger Detektivarbeit fand Leadbeater den Übeltäter: Ein gängiges Reagenz, welches das Team bei einem britischen Chemielieferanten gekauft hatte, war mit winzigen Palladiumspuren verunreinigt – etwa 50 Teilen pro Milliarde (ppb, parts per billion). Dasselbe Produkt eines Anbieters aus den USA enthielt solche Spuren hingegen nicht. »Das wenige Palladium genügte, um die Reaktion zu katalysieren«, sagt er. Leadbeater hat seine ursprüngliche Arbeit nie zurückgezogen. Stattdessen veröffentlichte sein Team eine Analyse, nach der die metallfreie Reaktion zwar eine kleine Menge des gewünschten Moleküls liefern konnte, aber letztlich die Palladiumkontamination für die zuvor gemeldeten Ergebnisse verantwortlich war.

Das gleiche Problem trat 2008 auf, als Robert Franzén von der Technischen Universität Tampere in Finnland und seine Arbeitsgruppe über eine eisenkatalysierte Version einer anderen Kohlenstoff-Kupplungsreaktion berichteten. Ein Forschungsteam unter der Leitung von Robin Bedford von der University of Bristol (UK) stellte fest, dass Palladiumverunreinigungen die tatsächlichen Katalysatoren

Kupplungsreaktionen

Beim Herstellen von Medikamenten verknüpft man häufig zwei Molekülfragmente, indem man zwei Kohlenstoffatome miteinander verbindet. Diese Kupplung funktioniert normalerweise über einen palladiumhaltigen Katalysator. Einen neuen Weg ohne das teure Metall schien eine Forschungsgruppe 2021 gefunden zu haben. Doch wie sich herausstellte, katalysierten tatsächlich winzige Palladiumverunreinigungen die Umwandlung. Hier sieht man einen Ausschnitt aus der Synthese von Adapalen, einem Mittel gegen Akne (Bpin = Bis(pinacolato)diboryl, Cy = Cyclohexyl, Me = Methyl, X = Br/Cl).



NATURE: MACH YU L. ET AL., THE AMINE-CATALYZED SUZUKI-MUYAIBAYASHI COUPLING OF ARYL HALIDES AND ARYLBORONIC ACIDS. NATURE CATALYSIS 4, 2021. FIG. 1. UND MACH ANANTHAY, M., IDENTIFYING PALLADIUM OUTFITS IN AMINE CATALYSIS. NATURE CATALYSIS 4, 2021. FIG. 1F. REMMEL, A., WHY CHEMISTS CAN'T QUIT PALLADIUM. NATURE 606, 2022. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

waren, und veröffentlichte eine »warnende Geschichte« über die Risiken falsch positiver Ergebnisse. Daraufhin zog das finnische Team seine Arbeit zurück. Palladiumverunreinigungen behinderten anfangs sogar den Fortschritt der letztlich erfolgreichen Entwicklung einer nickelkatalysierten Reaktion, erzählt Norrby.

Die chemische Fachliteratur ist voll von solchen Palladiumkontroversen, sagen die Fachleute: Einige wurden endgültig entkräftet, während bei anderen der Verdacht noch immer nicht ausgeräumt ist. »Das Forschungsfeld ist zu einem Minenfeld geworden«, sagt Leadbeater.

Vielseitiger Heiratsvermittler

Medizinisch wirksame Verbindungen sind oft große, komplexe Moleküle, die Stück für Stück zusammengebaut werden müssen. Mit Kohlenstoff-Kupplungsreaktionen verknüpft man dabei kleinere Fragmente. Doch weil viel Energie benötigt wird, um die Bindungen zwischen den Kupplungspartnern auszubilden und aufzubrechen, laufen die Reaktionen ohne Katalysator langsam oder überhaupt nicht, sagt Diao. Palladiumkatalysatoren eignen sich besonders gut, um solche energetischen Barrieren zu überwinden. Durch die einzigartige elektronische Struktur des Metalls, so die Forscherin, kann es eine große Vielfalt von Molekülfragmenten aneinander vermitteln.

Aber Palladiumverbindungen werden inzwischen so häufig verwendet, dass Reste davon überall hingelangen. Selbst Kratzer in den rotierenden Magnetrührstäben, die routinemäßig zum Mischen von Flüssigkeiten in Chemielaboren verwendet werden, können Spuren von Palladium einschließen. Bereits die genügen mitunter, um so manche Reaktion in Gang zu setzen, wie eine Studie aus dem Jahr 2019 unter der Leitung von Valentine Ananikov von der Russischen Akademie der Wissenschaften in Moskau herausfand. Diese »Phantomkatalyse« erwecke den An-

schein, eine Reaktion laufe ohne Katalysator ab, sagt Ananikov, und warnt: »Man muss extrem vorsichtig sein, denn Palladium kann durch kontaminierte Laborgeräte sowie durch Verunreinigungen in Chemikalien und Lösungsmitteln in die Reaktion gelangen.«

Chemiker, die Erfahrung im Umgang mit unerwünschtem Palladium haben, befolgen strenge Protokolle, um seine Verbreitung zu begrenzen. Gergely Tolnai und Zoltán Novák, synthetische organische Chemiker an der Eötvös-Loránd-Universität in Budapest, beschränken die Verwendung von Palladium auf einen bestimmten Quadranten ihres Forschungslabors. Tolnais Team kennzeichnet sogar seine Spatel für die ausschließliche Verwendung mit bestimmten Metallen, um eine mögliche Kreuzkontamination zu vermeiden. In Bedfords Labor ist es den Forscherinnen und Forschern untersagt, Glasgeräte gemeinsam zu benutzen, und wenn eine Palladiumkontamination zu befürchten ist, verwendet das Team neue Rührstäbe. Sogar als ultra-rein verkaufte kommerzielle Reagenzien werden vor dem Einsatz behandelt, um jegliches verbleibende Palladium zu entfernen. Die Forscher analysieren auch das endgültige Reaktionsgemisch auf Verunreinigungen, falls ein unbekannter Stoff auf dem Weg dorthin Kontaminationen eingebracht hat. »Wir sind ein wenig argwöhnisch gegenüber allem, was mit Palladium zu tun hat«, gibt Tolnai zu.

Die Chemiker in China, die 2021 von einer palladiumfreien Reaktion berichteten, behaupteten, ihr Katalysator für die Kohlenstoffkupplung enthalte keine Metalle. Stattdessen handle es sich um ein organisches Molekül mit stickstoffhaltigen Strukturen, so genannten Aminen. Der Haken an der Sache: Sie hatten ihren Aminkatalysator mit Hilfe von Palladium hergestellt.

Das Team unter der Leitung von Hua-Jian Xu von der Technischen Universität Hefei und Hai-Zhu Yu von der Anhui-Universität in Hefei wusste, dass das Palladium, das



STRIKTE TRENNUNG Um Verunreinigungen mit Fremdmetallen zu vermeiden, dürfen diese Spatel jeweils nur für ein spezifische Metall verwendet werden.

bei der Synthese zurückblieb, ihre späteren Experimente beeinträchtigen könnte. Daher betrieben sie einen großen Aufwand, um genau das zu verhindern.

Zunächst reinigten sie ihren Aminkatalysator von dem Metall durch eine spezielle Chromatografie. Sie beruht auf dem Prinzip, dass sich Moleküle mit unterschiedlicher Polarität (eine Eigenschaft, die mit der Verteilung der elektrischen Ladung zusammenhängt) unterschiedlich rasch durch ein Kieselgel bewegen. So sollte der Katalysator von den verbliebenen Metallkomplexen getrennt werden.

Danach mischten sie den gereinigten Katalysator mit einem »Scavenger-Komplex«, einer Art Aufräummolekül, das sich mit den verbliebenen Palladiumspuren verbinden und diese so entfernen sollte.

Schließlich tauchten sie eine Probe des Katalysators in eine Salpetersäurelösung, um die Verbindung in kleinere Bestandteile zu zerlegen. Dadurch würden alle verbliebenen Palladiumatome freigesetzt, die bis dahin in organischen Komplexen gebunden waren. Diese säureaufgeschlossenen Teile konnten dann mittels Massenspektrometrie auf die Anwesenheit von Palladium hin untersucht werden. Die Technik ist der Goldstandard für den Nachweis von Metallverunreinigungen, wie weitere Forscher erklären.

Bei den Experimenten kam heraus, dass weniger als 1 ppb Palladium oder andere potenziell reaktive Metalle im Katalysator oder in der Reaktionsmischung vorhanden waren. Selbst wenn die Gruppe absichtlich Palladium zu ihren Reaktionen hinzufügte, bildete sich das Produkt nicht ohne den Aminkatalysator, so Xu im Februar 2021 in einem Blogbeitrag, in dem er Fragen zu seiner Arbeit beantwortete (der Beitrag wurde später gelöscht). Ebenfalls schrieb er, dass das Team mehr als drei Jahre damit verbracht hatte, die Ergebnisse zu reproduzieren und zu validieren, bevor es seine Arbeit in der Fachzeitschrift »Nature Catalysis« veröffentlichte.

All das waren vernünftige Vorsichtsmaßnahmen, sagt Bedford. Als er und seine Kollegen versuchten, die Arbeit nach den in der Veröffentlichung beschriebenen Methoden zu wiederholen, waren die Ergebnisse durchweg reproduzierbar – bis der angeblich entscheidende Aminkatalysator ohne Palladium hergestellt wurde. Dann funktionierte die Reaktion nicht mehr.

Schon wenige Wochen nach der Veröffentlichung begannen die ersten Versuche, den Bericht unabhängig zu überprüfen. Als der Artikel über Twitter in der Forschungsgemeinschaft zirkulierte, wurden Chemikerinnen und Chemiker schnell auf die potenziellen Komplikationen aufmerksam, welche die Synthese des Aminkatalysators mit sich brachte. Aus den Twitter-Threads begannen sich wissenschaftliche Kooperationen zu entwickeln, und bald erschienen Preprint-Manuskripte, in denen die Arbeit kritisiert wurde.

Dreimal getestet, dreimal entwischt

Im Februar 2021 berichteten Tolnai und Novák, der eigentliche Antreiber für die Reaktion seien Spuren von Palladiumverunreinigungen, die nach der Herstellung des Aminkatalysators übrig geblieben waren. Im März 2021 beschrieben Bedford und seine Kollegen die genaue Art des beteiligten Palladiums: Es handle sich um eine Verbindung, die bereits als hochaktiver Katalysator bekannt war.

Was das Team um Xu und Yu nicht wusste: Das bei der Synthese des Aminkatalysators verbliebene Palladium bildete einen Metallkomplex, der es schaffte, sich ihren Reinigungsbemühungen zu entziehen. Dieser Komplex ist ähnlich polar wie der Katalysator selbst, so dass sich die beiden in dem von den Forschern verwendeten Chromatografieprotokoll nicht voneinander trennten. Xu, Yu und ihre Kollegen wählten außerdem einen Scavenger-Komplex, der sich nicht gut an die spezielle Verbindung heftet. Das Goldstandard-Spektrometrierfahren übersah schließlich das übrig gebliebene Palladium, weil die Behandlung mit Salpetersäure nicht ausreichte, um die Komplexe aufzubrechen, und so zeigte das Instrument kein klares Palladiumsignal an. Laut Novák können nur kon-

zentriertere Säuren bei hohen Temperaturen den Palladiumeindringling aufspalten.

Im April 2021 veröffentlichte ein Team um Kazunori Koide, einen organischen Chemiker an der University of Pittsburgh in Pennsylvania, eine dritte Reihe von Ergebnissen zu der vermeintlich palladiumfreien Reaktion. Dazu verwendeten die Fachleute ein selbst erstelltes Nachweis-system. Es beinhaltet einen molekularen Sensor, der fluoresziert, wenn er mit gelöstem Palladium reagiert. Die Analyse bestätigte, dass Palladiumverunreinigungen vorhanden waren. Koide entwickelt mit Mitarbeitern der Merck Research Laboratories in Rahway, New Jersey, die Plattform jetzt weiter zu einer Alternative zur Massenspektrometrie, um damit Palladiumverfälschungen aufzuspüren.

»Nature Catalysis« nahm im März 2021 Stellung zur Arbeit von Xu und Yu. Offiziell abgeschlossen wurde der Fall jedoch erst nach weiteren neun Monaten, als Xu und seine Kollegen die Arbeit am 8. Dezember 2021 zurückzogen. Zur gleichen Zeit veröffentlichte die Fachzeitschrift die mittlerweile von Experten begutachteten Berichte der Teams von Tolnai und Novák, Bedford und Koide. Wie alle Beteiligten in einem begleitenden Leitartikel erklärten, wollten sie der Überprüfung der ursprünglichen Behauptung genügend Zeit einräumen. Daher erfolgte der Widerruf erst, als sich alle einig waren, dass die anfänglichen Schlussfolgerungen Fehler enthielten.

Xu und Yu beantworteten keine Fragen, gaben aber per E-Mail eine Erklärung ab. Das zur Herstellung des Amins verwendete Palladium sei die Hauptursache für die »Fehleinschätzung« gewesen, räumte Xu darin ein und fügte hinzu: »Dieses Ereignis und viele frühere Berichte zeigen auch, dass die Herausforderung einer nicht durch Palladium katalysierten klassischen Kupplungsreaktion in der Tat sehr schwierig ist.«

In gewisser Weise hatten die Forscher angesichts der in der Arbeit beschriebenen Vorsichtsmaßnahmen einfach Pech, sagt Bedford. Und bei einer Studie, die Methoden aus verschiedenen Disziplinen wie der organischen Synthese, der Reaktionskinetik sowie der analytischen Chemie verwendete, benötigten die Kritiker tief greifende Kenntnisse aus vielen Fachbereichen, um der Sache auf den Grund zu gehen, urteilen Tolnai und Novák. Letzterer erhielt den Hinweis auf die Probleme mit der spektrometrischen Analyse nur, weil er die Arbeit beim Frühstück mit seiner Frau Zsuzsanna Czégény las, die als analytische Chemikerin am Institut für Material- und Umweltchemie in Budapest forscht. Sie ist zwar keine Spezialistin auf dem Gebiet der Metallspektroskopie, erkannte aber dennoch die Probleme bei der Probenaufbereitung, die Novák und seine Kollegen später in ihrer Arbeit nachwiesen.

Die sofortige Diskussion auf Twitter, die umgehende Veröffentlichung von Vorabdrucken und die rasche Äußerung der Besorgnis durch »Nature Catalysis« haben gezeigt, wie schnell die chemische Community Behauptungen über Palladiumfreiheit überprüfen kann. Nur ein einziger Artikel, veröffentlicht im Oktober 2021 in der Zeitschrift »Chemical Science«, zitierte die Ergebnisse von Xu und Yu, bevor sie zurückgezogen wurden. Wenig später mussten die Autoren ihr Paper ebenfalls zurückziehen – und hatten eine Menge

Zeit und Geld in ein Projekt investiert, das zum Scheitern verurteilt war.

Die meisten Fachleute lassen sich nicht entmutigen und suchen weiter nach alternativen Wegen, um organische Moleküle ohne Hilfe von Palladium herzustellen. Immer wieder finden sie Reaktionen, die durch spezielle eisen- oder nickelhaltige Verbindungen katalysiert werden. Bislang haben solche vereinzelt Beispiele aber den Sprung von der Laborreaktion in die riesigen Produktionsverfahren der Chemikalienhersteller nicht geschafft.

Optimismus – und Warten auf das nächste Scheitern

Aber auch wenn die Chemie in absehbarer Zeit nicht ganz auf Palladium verzichten kann, so könnte die Suche nach alternativen Katalysatoren doch neue Wege zum Aufbau von Molekülen aufzeigen, sagt Diao. Sie hofft, dass Forscherinnen und Forscher durch solche Arbeiten besser verstehen, wie Katalysatoren durch Elektronenverschiebungen schwierig zu knüpfende Bindungen herstellen – und dass man basierend darauf letztlich möglicherweise »neue, revolutionäre chemische Verfahren« ohne das Edelmetall entdeckt.

Sie hat sich mit ihrem Labor auf die Entwicklung von Nickelkatalysatoren konzentriert, um Palladium in einigen Reaktionen zu ersetzen. Als Nächstes hat Diao die Grenzen der organischen Synthese im Visier, etwa Photokatalysatoren, die Lichtenergie zum Antrieb von Reaktionen nutzen. »Meiner Meinung nach liegt das größte Potenzial für Nickel in genau den Reaktionen, die Palladium nicht zu Wege bringen kann«, sagt sie.

Hat die Disziplin nun nachhaltig aus dem jüngsten gescheiterten Versuch gelernt? Um das zu beurteilen, sei es wahrscheinlich zu früh, sagen die Fachleute. Und Koide ergänzt: »Es würde mich nicht überraschen, wenn es in zehn Jahren wieder passiert.« ◀

QUELLEN

Arvela, R.K. et al.: A reassessment of the transition-metal free Suzuki-type coupling methodology. *Journal of Organic Chemistry* 70, 2005.

Avanthay, M. et al.: Identifying palladium culprits in amine catalysis. *Nature Catalysis* 4, 2021

Novák, Z. et al.: Revisiting the amine-catalysed cross-coupling. *Nature Catalysis* 4, 2021

Pentsak, E.O. et al.: Phantom reactivity in organic and catalytic reactions as a consequence of microscale destruction and contamination-trapping effects of magnetic stir bars. *ACS Catalysis* 9, 2019

Vinod, J.K. et al.: Fluorometric study on the amine-catalysed Suzuki–Miyaura coupling. *Nature Catalysis* 4, 2021

Xu, L. et al.: Retracted article: The amine-catalysed Suzuki–Miyaura-type coupling of aryl halides and arylboronic acids. *Nature Catalysis* 4, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 606, S. 448–451, 2022

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

KRISTALLE FÜR WARMER HÄNDE

Wenn Sie an frostigen Tagen Ihre Hände mit einem Taschenwärmer aufheizen, sprießen zwischen Ihren Fingern unzählige winzige Kristallbäumchen. In einem Experiment können Sie den faszinierenden Vorgang mit eigenen Augen unter dem Mikroskop bestaunen.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» spektrum.de/artikel/2066880

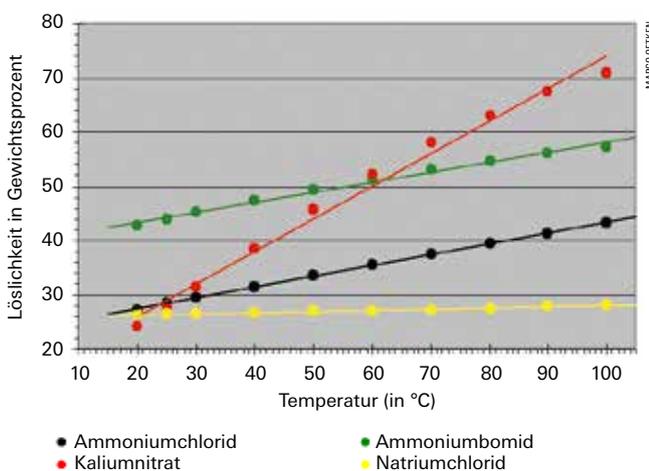
An frostigen Wintertagen reichen selbst die dicksten Handschuhe oft nicht aus, die Hände warm zu halten. Manche greifen dann zu einem so genannten wiederverwendbaren Taschenwärmer, um die eisigen Fingerspitzen kurzfristig wieder aufzutauen. Üblicherweise handelt es sich dabei um einen flexiblen, stabilen Kunststoffbeutel, der mit einem Gemisch aus Wasser und einem hydratisierten Salz gefüllt ist, meist Natriumacetat-Trihydrat ($\text{NaCH}_3\text{COO} \times 3\text{H}_2\text{O}$). Dessen Löslichkeit hängt stark von der Temperatur ab. Bei Raumtemperatur ist sie gering. Wird der Beutel dagegen in einem Wasserbad erhitzt, so löst sich das Salz vollständig im Wasser auf. Wenn er

danach wieder abkühlt, geschieht etwas Unerwartetes: Das Natriumacetat bleibt trotz der Temperaturniedrigung gelöst und kristallisiert nicht aus.

Wir haben es hier mit einer so genannten unterkühlten (und übersättigten) Salzlösung zu tun. Dieses Phänomen tritt auf, wenn keine Kristallisationskeime (etwa Partikel, die selbst eine kristalline Struktur aufweisen) in der Lösung vorhanden sind, an denen sich erste Kristalle bilden können und so die »Kettenreaktion« einer Kristallisation auslösen.

Knickt man allerdings das in dem Beutel befindliche Metallblättchen, breitet sich in der Lösung eine Schallwelle aus. Diese führt auf der Ebene der kleinsten Teilchen (Ionen) zu Verdichtungen, welche das gelöste Salz schlagartig kristallisieren lassen. Dabei wird die Gitterenergie des sich bildenden Kristalls freigesetzt und als Wärme an die Umgebung abgegeben. Um den Taschenwärmer wiederzuverwenden, muss man ihn lediglich im Wasserbad so lange erhitzen, bis sich das kristallisierte Salz vollständig gelöst hat. Schon ist er wieder einsatzbereit.

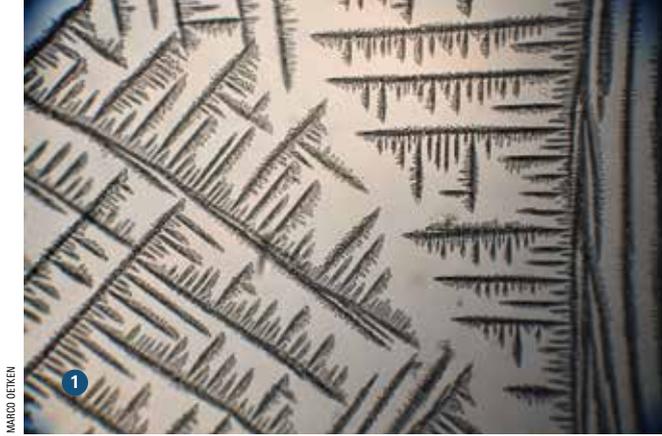
LÖSLICHKEITSDIAGRAMM Die Löslichkeit von Salzen in Wasser nimmt meist mit der Temperatur deutlich zu – außer bei Kochsalz (Natriumchlorid).



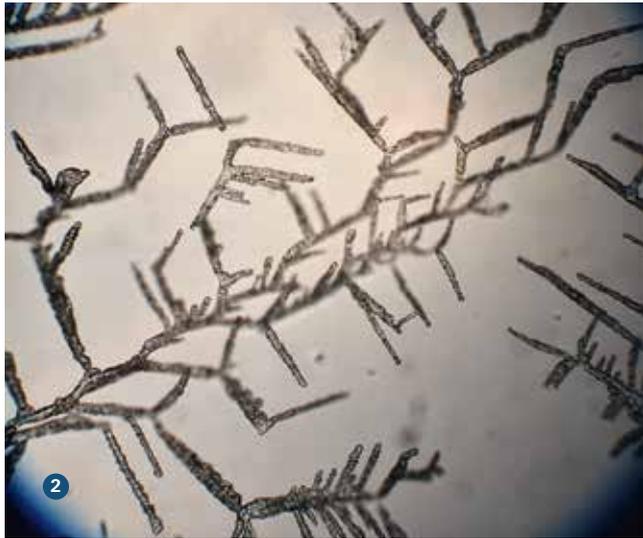
Miniatur-Salzbäumchen in Sekundenschnelle

Die sekundenschnelle Kristallisation von manchen übersättigten Salzlösungen lässt sich eindrucksvoll beobachten, wenn sie im Mikrometermaßstab auf einem Objektträger abläuft. Bereits unter einem normalen Lichtmikroskop ist zu erkennen, wie die Kristalle in Form ästhetisch reizvoller Salzbäumchen zwischen Deckglas und Objektträger wachsen.

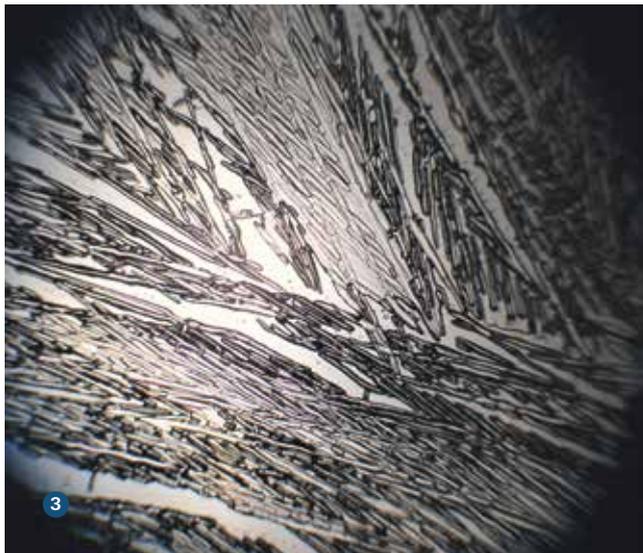
Enthält eine Lösung die Menge Salz, die sie maximal aufnehmen kann, heißt sie gesättigt, und die entsprechende Konzentration wird als Sättigungskonzentration bezeichnet. Generell kristallisiert ein Salz nur dann aus einer



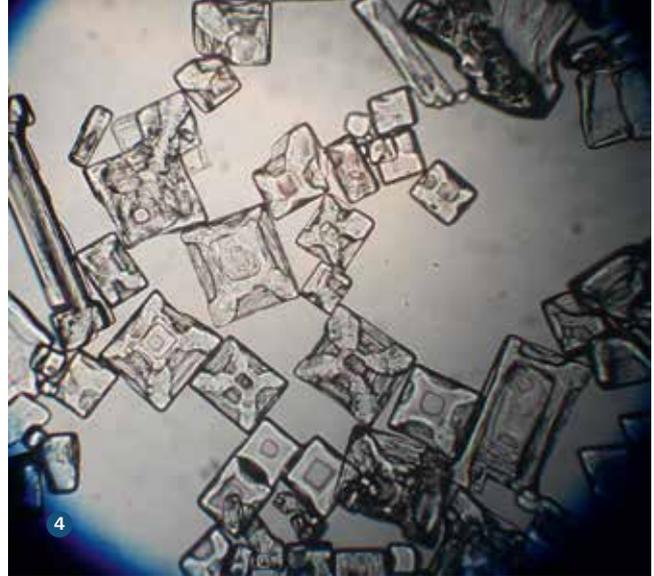
MARCO OETIKEN



MARCO OETIKEN



MARCO OETIKEN



MARCO OETIKEN



MARCO OETIKEN

VIELFÄLTIGE KRISTALLFORMEN Jeweils in 40-facher Vergrößerung: Ammoniumchlorid-Kristalle aus ① einer bei 40°C und ② einer bei 30°C gesättigten Lösung, ③ Ammoniumnitrat-Kristalle aus einer bei 50°C gesättigten Lösung, ④ Kaliumbromid-Kristalle aus einer bei 50° gesättigten Lösung und ⑤ Kaliumnitrat-Kristalle aus einer bei 35°C gesättigten Lösung.

wässrigen Lösung aus, wenn es seine Sättigungskonzentration überschreitet. Bei der gewöhnlichen Kristallzucht erreicht man das beispielsweise dadurch, dass das Lösungsmittel allmählich verdunstet. Als Folge davon steigt die Konzentration der in der Lösung zurückbleibenden Ionen, bis sie schließlich den kritischen Wert erreicht und die Kristallisation beginnt.

Mit der Verdunstungsmethode lassen sich insbesondere regelmäßig geformte, symmetrische Kristalle für Forschungs- und Anwendungszwecke gewinnen. Auch bei der hobbymäßig betriebenen Kristallzucht, zum Beispiel

mit Experimentierkästen, kommt sie gewöhnlich zum Einsatz. Hierfür werden normalerweise kleine Impfkristalle in eine gesättigte Lösung getaucht. Herrscht eine konstante, niedrige Temperatur, verdunstet das Lösungsmittel so allmählich, dass die Sättigungskonzentration zu jedem Zeitpunkt immer nur geringfügig überschritten wird. Die Kristalle wachsen daher sehr langsam und gleichmäßig über einen Zeitraum von Tagen oder sogar Wochen. So entstehen große, regelmäßig geformte Exemplare.

Die Verdunstung des Lösungsmittels ist aber nicht die einzige Möglichkeit, die Konzentration zu erhöhen. In vielen Fällen gelingt das auch, indem man die Salzlösung abkühlen lässt. Die Löslichkeit der meisten Salze nimmt nämlich mit sinkender Temperatur ab (siehe »Löslichkeitsdiagramm«) und bleibt nur in seltenen Fällen wie beim Kochsalz fast unverändert.



BILDERRAHMEN Am Rand des Deckglases scheidet sich oft eine Kruste aus Salz ab.

Dies lässt sich mit dem Prinzip des kleinsten Zwangs von Le Chatelier erklären. Eine Temperaturerhöhung stellt einen Zwang dar, dem das System ausweicht, indem es ihm einen Wärme verbrauchenden (endothermen) Vorgang wie das Lösen eines Salzes entgegensetzt. Bei den meisten Salzen erfordert nämlich das Aufbrechen der Bindungen im Kristall mehr Energie, als bei der Bildung der Hydrathülle der so gebildeten Ionen im Wasser frei wird. Kühlt dagegen eine gesättigte Salzlösung ab, begünstigt das gemäß dem Prinzip von Le Chatelier einen Wärme produzierenden (exothermen) Vorgang, also die Umkehrung der Auflösung: die Kristallisation.

Kristallisation wie im Zeitraffer

Beim raschen Erkalten von warmen, gesättigten Salzlösungen wird die Sättigungskonzentration allerdings viel schneller überschritten als beim langsamen Verdunsten. Aus diesem Grund läuft auch die Kristallisation wesentlich schneller ab. Statt großer, regelmäßiger Kristalle bilden sich deshalb meist eindrucksvolle dendritische, baum- oder farnartige Strukturen. Dieser faszinierende Vorgang lässt sich sehr schön unter einem gewöhnlichen Lichtmikroskop beobachten – oder bei entsprechender Vergrößerung auch mit einer Handykamera. Für das betreffende Experiment eignen sich besonders Salze wie Kaliumnitrat oder Ammoniumchlorid (Salmiak), deren Löslichkeit stark temperaturabhängig ist.

Stellen Sie zunächst eine warme, gesättigte Lösung des jeweils untersuchten Salzes her (die exakten Versuchsbe-

schreibungen stehen in der Experimentieranleitung, die online zu finden ist, siehe unten). Pipettieren Sie ein bis zwei Tropfen davon auf einen Objektträger und legen Sie ein Deckglas darüber. Unter dem Mikroskop können Sie nun die Kristallbildung in der sich auf Raumtemperatur abkühlenden Lösung beobachten. Aber Sie sollten sich beeilen. Jede Sekunde zählt, da einige Salze sehr rasch auskristallisieren, so dass der Vorgang eventuell schon abgeschlossen ist, bevor Sie den Objektträger unter dem Mikroskop platziert haben. Hilfreich kann es daher sein, diesen kurz vor dem Auftropfen der Salzlösung für wenige Sekunden auf der Platte eines Heizrührers aufzuwärmen (Achtung, Verbrennungsgefahr!).

Beim Betrachten des Objektträgers fällt oft als Erstes auf, dass sich eine feinkristalline Salzküste an den Rändern bildet, die sich in der Folge verbreitern kann (siehe »Bilderrahmen«). Interessanter ist jedoch, was sich innerhalb dieser Kruste abspielt. Dort beginnen je nach den Versuchsbedingungen oft schon nach sehr kurzer Zeit Kristalle zu wachsen – gelegentlich spontan mitten in der Lösung, in der Regel aber an den Rändern des Deckglases. Dessen Kanten sowie kleine Staubkörner oder Kratzer auf der Oberfläche des Objektträgers fungieren hierbei als Wachstumskeime oder -kanten, an denen sich die Salzionen anlagern können (vergleichbar mit dem Knick-Metallblättchen im Taschenwärmer). Von hier breiten sich die Kristalle dann großflächig zwischen Objektträger und Deckglas aus. Je nach Salz und Übersättigungsgrad beziehungsweise Sättigungstemperatur der Lösung entstehen ganz unterschiedliche Muster, die allesamt durch ihre Regelmäßigkeit, filigranen Strukturen und hohe Wachstumsgeschwindigkeit beeindrucken (siehe »Vielfältige Kristallformen«).

Dieses simple Experiment entführt den Betrachter auf reizvolle und kurzweilige Weise in die mikroskopische Welt des dendritischen Wachstums von Kristallen. Falls Sie also an einem eisigen Dezembertag der Kälte mit einem Taschenwärmer Paroli bieten, stellen Sie sich vor, wie in diesem Moment trotz der winterlichen Temperaturen unzählige winzige Bäume zwischen Ihren Fingern sprießen! ◀

QUELLEN

Chernov, A. A.: Modern Crystallography III: Crystal Growth. Springer, 1984

Höltkemeier, D., Oetken, M.: Diffusionsgesteuerte Wachstumsprozesse – Didaktische und methodische Überlegungen zur Implementierung diffusionsgesteuerter Wachstumsphänomene in den Chemieunterricht. CHEMKON 10, 2003

Witten, T. A., Sander, L. M.: Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon. Physical Review Letters 47, 1981

Witten, T. A., Sander, L. M.: Diffusion-limited aggregation. Physical Review B 27, 1983

WEBTIPP

www.spektrum.de/artikel/2066880

Experimentieranleitung



FREISTETTERS FORMELWELT IST GLEICH IMMER GLEICH GLEICH?

Das Gleichheitszeichen spielt eine zentrale Rolle in der Mathematik. Aber wann sind zwei Dinge wirklich identisch?

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

► spektrum.de/artikel/2066883

So gut wie alle mathematischen Disziplinen bauen auf der so genannten Zermelo-Fraenkel-Mengenlehre auf. Dabei handelt es sich um einen Satz von Axiomen, die beschreiben, was wir unter einer »Menge« verstehen, und ihre Eigenschaften festlegen. Dazu gehört auch das Extensionalitätsaxiom, das sich so formulieren lässt:

$$\forall A, B : (A = B \Leftrightarrow \forall C : (C \in A \Leftrightarrow C \in B))$$

Der abstrakte Ausdruck besagt, dass zwei Mengen A und B genau dann gleich sind, wenn sie dieselben Elemente enthalten. Klingt ja irgendwie auch logisch; wie sollte man sonst Gleichheit definieren?

Aber die Angelegenheit wird komplizierter, wenn man einen anderen Blick darauf wirft. Sind zum Beispiel die zwei Funktionen $f(x) = 2x + 4$ und $g(x) = 2(x + 2)$ gleich? Für einen beliebigen Zahlenwert von x liefern beide Abbildungen ein identisches Ergebnis. Die äußere Form der Gleichungen ist aber definitiv verschieden.

Die Frage, wie man Gleichheit interpretiert, ist relevanter, als man angesichts der abstrakten mathematischen Logik denken könnte. Denn die unterscheidet sich durchaus von der menschlichen Logik. Für uns macht es einen Unterschied, in welcher Form etwas präsentiert wird, selbst wenn das, was beschrieben wird, dasselbe ist.

Noch konkreter wird das Problem, sobald man die Mathematik verlässt. Man könnte beispielsweise zwei Modelle betrachten, welche die Auswirkungen von Schutzmaßnahmen angesichts einer Pandemie beschreiben. Das erste gibt an, dass die Maßnahmen 40 von 100 Menschen schützen. Modell 2 liefert das Resultat, dass 60 von 100 Personen trotz aller Vorkehrungen erkranken können. Oder wenn man es boulevardesk formuliert: Im ersten Fall werden 40 Prozent gerettet; im zweiten müssen 60 Prozent dran glauben. Welches Modell ist besser?

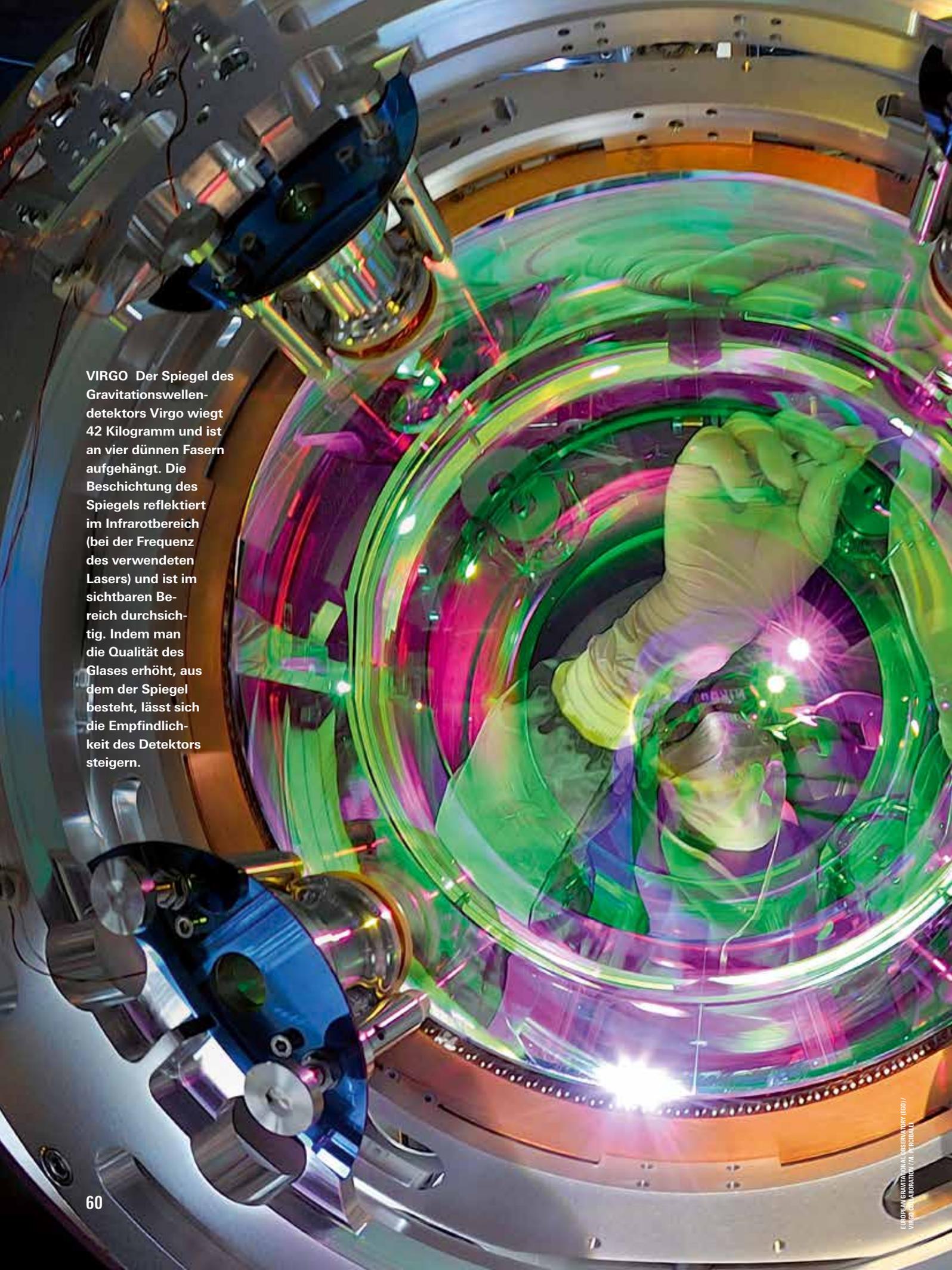
In diesem vereinfachten Beispiel lässt sich schnell erkennen, dass es keinen Unterschied gibt. So wie die beiden vorigen Funktionen stellen auch die zwei Modelle nur verschiedene Wege dar, um ein und dasselbe Resultat zu beschreiben. Das Framing ist aber ein anderes: einmal positiv und einmal negativ. In der reinen Mathematik spielt das keine Rolle. Wenn die

Wissenschaft in der echten Welt mit ebenso realen menschlichen Entscheidungen in Kontakt kommt,

kann die Präsentation jedoch sehr relevant sein. Das wurde unter anderem 1998 in einer Studie untersucht, in der Probanden den Geschmack von Hackfleisch bewerten sollten. In allen Fällen bekamen die Testpersonen das gleiche Fleisch, einmal wurde es allerdings mit dem Label »25 Prozent Fett« versehen und einmal mit »75 Prozent mager« – was rein mathematisch natürlich keinen Unterschied macht. Dennoch empfanden die Leute den Geschmack des »mageren« Produkts als besser und weniger fettig.

Versuchen Sie es selbst: Wem würden Sie tendenziell lieber Fördergelder geben? Einem Forschungsteam, dessen Experimente zu 60 Prozent erfolgreich sind? Oder einem, das eine Misserfolgsrate von 40 Prozent aufweist? Es bedarf einer bewussten Anstrengung, hinter das Framing auf die nackten Fakten zu blicken – unsere menschliche Psychologie steht einer objektiven Beurteilung oft im Weg.

Aus mathematischer Sicht ist die Frage nach der Gleichheit eindeutig geklärt. Wir Menschen lassen uns aber täuschen. Diese Möglichkeit der Manipulation wird in der Politik, der Werbung und vielen anderen Bereichen unseres alltäglichen Lebens gern genutzt. Die Mathematik mag abstrakt erscheinen – doch wenn es darum geht, durch die Vernebelungstaktiken von Propaganda und Reklame zu blicken, schadet es nicht, ein wenig Ahnung von Formeln zu haben.



VIRGO Der Spiegel des Gravitationswellendetektors Virgo wiegt 42 Kilogramm und ist an vier dünnen Fasern aufgehängt. Die Beschichtung des Spiegels reflektiert im Infrarotbereich (bei der Frequenz des verwendeten Lasers) und ist im sichtbaren Bereich durchsichtig. Indem man die Qualität des Glases erhöht, aus dem der Spiegel besteht, lässt sich die Empfindlichkeit des Detektors steigern.

PHYSIK AUF DER SUCHE NACH DEM IDEALEN GLAS

Die Menschheit weiß seit Jahrtausenden, wie man Glas herstellt. Dennoch sind die physikalischen Eigenschaften des Materials bis heute nicht vollständig geklärt. Uralte Funde sowie neue Herstellungs- und Simulationsmethoden sollen nun dabei helfen, die letzten Geheimnisse zu lüften.

Ludovic Berthier ist Forschungsdirektor des CNRS an der Université de Montpellier. Camille Scalliet ist theoretische Physikerin an der University of Cambridge.



► spektrum.de/artikel/2066868

AUF EINEN BLICK DIE PERFEKTE UNORDNUNG

- 1** Schon vor Jahrzehnten haben Berechnungen ergeben, dass Glas unter gewissen Umständen einen ganz besonderen Zustand ungeordneter Teilchen aufweisen könnte.
- 2** Beobachten konnte man ein solches »ideales Glas« noch nicht. Denn um es herzustellen, müsste man das Material über mehrere Millionen Jahre abkühlen lassen.
- 3** Nun haben Fachleute eine neue Methode entwickelt, die das Problem umgehen könnte: Durch die hauchdünne Abscheidung von Molekülen stellen sie ultra-stabile Materialien her, die idealem Glas stark ähneln.

► Riesige Interferometer spüren in den USA, Italien und Japan winzige Schwingungen der Raumzeit auf. Die aus kilometerlangen Hohlräumen bestehenden Geräte detektieren kleinste Längenunterschiede, die kürzer sind als der Durchmesser eines Atomkerns. Um eine solche Präzision zu erreichen, muss man alle möglichen Störquellen eliminieren. Eine wichtige Rolle spielen die Spiegel, die das Laserlicht in den Hohlräumen reflektieren. Indem die Forscherinnen und Forscher Glas höchster Qualität verwenden, wollen sie die Messgenauigkeit der Geräte weiter verbessern.

Auch in vielen anderen technologischen Bereichen ist hochwertiges Glas erforderlich. Zum Beispiel enthalten einige Quantencomputer glasartige Komponenten in ihren Schaltkreisen. Bei diesen Rechnern kann schon die kleinste Störung die empfindlichen Quantenzustände zerstören. Deshalb spielt bei solchen hochmodernen Technologien die Glasherstellung eine entscheidende Rolle.

Die Geschichte des Materials reicht sehr weit zurück. Die ältesten Spuren von gefertigtem Glas wurden in Mesopotamien gefunden und stammen aus dem 5. Jahrtausend v. Chr. Heute ist der Stoff allgegenwärtig, sowohl in Alltagsgegenständen wie bei der Herstellung von Kunstwerken wie den berühmten Murano-Gläsern. Man findet es in der Architektur, der Pharmaindustrie oder in Internetkabeln. Die besonderen physikalischen Eigenschaften (Transparenz, Homogenität, Steifigkeit, Festigkeit und Haltbarkeit) machen es zu einem wichtigen Material, das sich für unterschiedlichste Anwendungen eignet. Zwar wurden die Herstellungsmethoden im Lauf der Jahrhunderte fortlaufend verbessert, trotzdem stellt sich die Frage, ob man die Qualität von Glas noch weiter optimieren kann, um den wachsenden technologischen Anforderungen gerecht zu

werden. Anders ausgedrückt: Gibt es ein »ideales« Glas, das die begehrten Eigenschaften des Materials in höchstem Maß aufweist und jene Mängel beseitigt, welche die Anwendungen derzeit noch einschränken? So erstaunlich es klingen mag, könnte das tatsächlich der Fall sein.

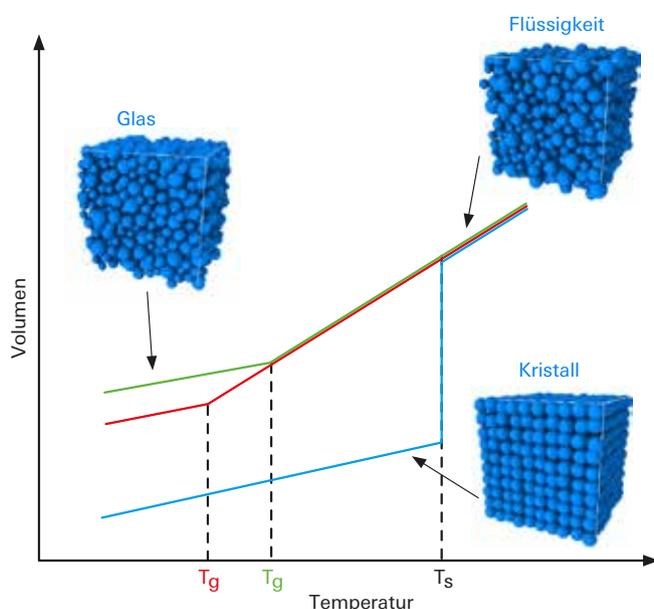
Das ideale Glas ist ein hypothetischer Materiezustand, den der US-amerikanische Chemiker Walter Kauzmann (1916–2009) bereits 1948 vermutete. Es sind zwar noch nicht alle Details geklärt, aber seine außergewöhnlichen Fähigkeiten könnten den anspruchsvollen Anforderungen riesiger Interferometer und Quantencomputer genügen. Allerdings weiß man bis heute – mehr als 70 Jahre nach der Vermutung – nicht, ob es das ideale Glas überhaupt gibt. Weder ließ es sich bisher direkt beobachten noch konnte man es durch realistische Computermodelle nachweisen. Außerdem wirft es weitere Fragen auf: Falls es existiert, wie lässt es sich herstellen?

Dieses grundlegende Problem der klassischen Physik bringt Theoretiker, Experimentatoren und Modellierer zusammen. Dank gemeinsamer Anstrengungen haben die Forschungsteams in den letzten zehn Jahren erhebliche Fortschritte gemacht: sowohl beim allgemeinen Verständnis von Glasmaterialien als auch bei der Suche nach dem idealen Zustand. Inzwischen scheint die Verwirklichung fast in Reichweite.

Der Grund, warum Glas so viele Fragen aufwirft, sind seine Eigenschaften: Es handelt sich um einen festen Stoff, dessen elementare Bestandteile allerdings chaotisch angeordnet sind. Man spricht von einem amorphen Material, da es sich radikal von gewöhnlichen Festkörpern unterscheidet: In Letzteren befinden sich die Moleküle an den Knotenpunkten eines Gitters, das eine vollständig geordnete periodische Struktur bildet.

Phasendiagramm von Gläsern und Kristallen

Wenn man eine Flüssigkeit abkühlt, kann sie bei der Erstarrungstemperatur T_s kristallisieren. Die Teilchen ordnen sich dann in einem regelmäßigen Gitter an. Ändern sich die Eigenschaften des Materials dabei schlagartig, spricht man von einem Phasenübergang erster Ordnung (blaue Kurve). In manchen Fällen kristallisiert die Flüssigkeit jedoch überhaupt nicht. Die Viskosität steigt mit sinkender Temperatur schnell an, wodurch die Teilchen in ihrer ungeordneten Position erstarren: Es entsteht ein Glas. Der Übergang findet bei einer Temperatur statt, die von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängt (T_g grün oder rot). Zwischen T_s und T_g wird die Flüssigkeit als unterkühlt bezeichnet. Dieser Zustand ist metastabil, eine kleine Störung kann eine schnelle Kristallisation auslösen.



LUDWIG BEFHNER

Der zweite wesentliche Unterschied zu solchen Festkörpern besteht darin, dass Glas in der Regel durch einen so genannten Glasübergang entsteht, der bisher nur unzureichend verstanden ist. Kühlt man eine Flüssigkeit immer weiter ab, ordnen sich üblicherweise die frei beweglichen Moleküle, sobald sie den Gefrierpunkt passieren, sehr plötzlich in einem geordneten Kristall an. Unter bestimmten Bedingungen behalten die Teilchen jedoch ihren ungeordneten flüssigen Zustand bei. Beim Abkühlen wird die Substanz aber so zähflüssig, dass sich die Moleküle kaum noch bewegen und das Material schließlich fest erscheint: Das ist der Glasübergang. Glasbläser setzen diesen Prozess in Gang, indem sie geschmolzenes Siliziumdioxid aus einem mehr als 1500 Grad Celsius heißen Ofen nehmen. Bei Raumtemperatur geht der Stoff allmählich von einem flüssigen, beliebig formbaren Zustand in einen festen über, den die Künstler unterdessen in die angestrebte Gestalt bringen.

Wo wird das Glas brechen?

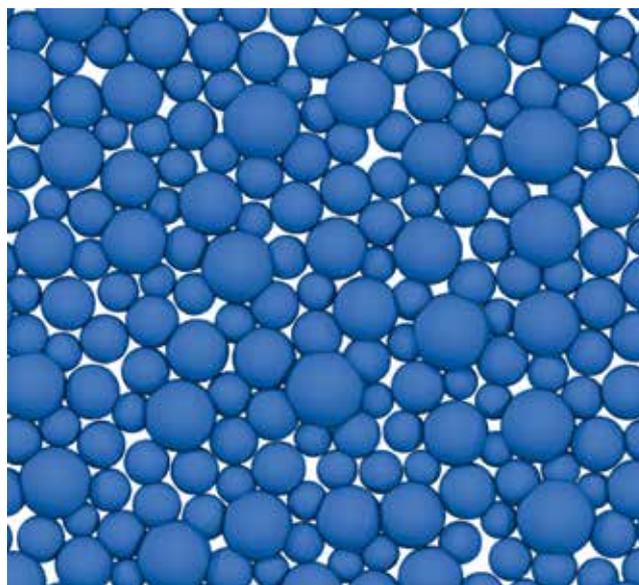
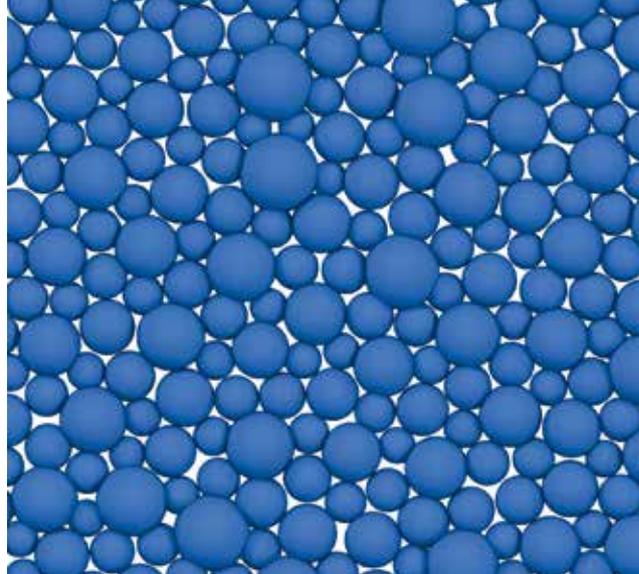
Die Übergangstemperatur markiert also keinen grundlegenden Phasenwechsel wie der Gefrierpunkt, sondern lässt sich nur näherungsweise definieren: indem man die Abkühlungsgeschwindigkeit mit der Beweglichkeit der Moleküle vergleicht, die immer langsamer werden. Glas besitzt also die Unordnung einer Flüssigkeit, aber die Steifigkeit eines Festkörpers.

Während wir das Verhalten von Kristallen ziemlich gut verstehen, ist noch nicht klar, wie die makroskopischen Merkmale von Glas aus dessen mikroskopischer Struktur hervorgehen. Der ungeordnete Zustand stellt die größte Hürde dar, um die Eigenschaften der amorphen Phase nachzuvollziehen.

Zum Beispiel enthält das Gitter eines Festkörpers oft Unvollkommenheiten wie Lücken. Setzt man den Kristall einer mechanischen Belastung aus, wird er sich bevorzugt an diesen Fehlstellen verformen – oder gar brechen. Aber wie kann man einen Defekt in Glas erkennen, dessen Struktur völlig ungeordnet erscheint?

Die periodische Ordnung von kristallinen Festkörpern ermöglicht es außerdem, physikalische Eigenschaften wie die spezifische Wärme abzuleiten. Bei Glas müsste man dafür die Position jedes einzelnen Atoms kennen – eine nicht zu bewältigende Aufgabe. Denn typische Materialien bestehen aus Abermilliarden von Teilchen, die miteinander wechselwirken. Eine weitere Schwierigkeit: Die Anzahl der möglichen Anordnungen ist extrem groß, während perfekte Kristalle einzigartig sind. All das macht es sehr schwer, das Verhalten von Glas vorherzusagen.

Als Kauzmann 1948 die Hypothese des idealen Glases aufstellte, hatte er einen Weg gefunden, die verwirrenden Strukturen besser zu verstehen. Für verschiedene Glas bildende Flüssigkeiten untersuchte er damals die so genannte Konfigurationsentropie. Diese ist eine Art Maß dafür, wie komplex Gläser sind, und entspricht dem Logarithmus der Anzahl aller möglichen Teilchenanordnungen. Bei Hitze ist das Fluid kaum eingeschränkt: Extrem viele Anordnungen sind zugänglich; die Entropie ist dementsprechend groß. Sinkt die Temperatur, lassen sich weniger



LUDOVIC BERTHIER UND CAMILLE SCALLET

ABGEKÜHLTES GLAS Die zwei Gläser wurden mit Abkühlzeiten simuliert, die sich um zwölf Größenordnungen unterscheiden (oben lang, unten kurz). Die Unterschiede in der Anzahl von Fehlstellen lassen sich mit dem bloßen Auge kaum erkennen. Das liegt daran, dass die Teilchen ungeordnet sind. Dennoch kann man mit statistischen Hilfsmitteln zeigen, dass sich ihre Konfigurationsentropien unterscheiden.

Zustände mit niedriger Energie und völliger Unordnung erreichen – die Entropie nimmt ab.

Als Kauzmann die verfügbaren experimentellen Daten zusammenstellte, bemerkte er etwas Interessantes: Wenn er die Konfigurationsentropie der Flüssigkeiten extrapolierte, schien sie bei extrem niedrigen Temperaturen irgendwann auf null zu fallen. Um das im Labor zu prüfen, müsste man ein glasartiges Material so lange in einem flüssigen Zustand (in dem die Moleküle beweglich sind) halten, bis man diese »Kauzmann-Temperatur« erreicht. Das ließ sich allerdings bis heute nicht durchführen, weshalb die Vorhersage theoretischer Natur blieb. Kauzmanns Beobachtung legt jedoch nahe, dass die Entropie bei dieser Temperatur verschwindet. Wenn das stimmt, dann würde nur eine



AUTHOR: GETTY IMAGES / ISTOCK

BERNSTEIN Das gelbliche Material ist ein aus Baumharz entstandenes Glas. In dieser Probe, die im Baltikum gefunden wurde, befinden sich prähistorische Fliegen. Für Physiker bietet Bernstein eine einzigartige Gelegenheit, altes Glas zu untersuchen, dessen Struktur sich über geologische Zeitskalen hinweg neu organisiert hat.

einzig mögliche ungeordnete Konfiguration existieren: das ideale Glas, ein »perfekter ungeordneter« Zustand.

Diese Vermutung hat sich in dem Fach allerdings nur langsam durchgesetzt. Erst zehn Jahre später schlugen der Chemiker Julian Gibbs und der Physiker Edmund DiMarzio einen stark vereinfachten theoretischen Ansatz vor, der die Existenz eines idealen Glases aus einem Computermodell vorhersagte. Mitte der 1980er Jahre gelang den Festkörperphysikern Theodore Kirkpatrick, Dave Thirumalai und Peter Wolynes schließlich ein entscheidender Durchbruch: Sie stellten eine Verbindung zwischen der Glasphysik und so genannten Spingläsern her, die sich damals rechnerisch besser untersuchen ließen. Dabei handelt es sich um Legierungen mit Fehlstellen, die einen magnetischen Spin (eine Art Drehimpuls) besitzen. 2021 erhielt Giorgio Parisi den Nobelpreis für Physik für seine Forschungen auf diesem Gebiet. Gemeinsam mit seinen Kolleginnen und Kollegen hatte er neuartige mathematische Werkzeuge entwickelt, die Eigenschaften ungeordneter Materialien wie Spingläser mit extrem vielen möglichen Konfigurationen (so genannte komplexe Systeme) genau bestimmen. In einer genialen Eingebung erkannten Wolynes und sein Team, dass manche Spingläser einen Phasenübergang zu einem glasartigen Zustand besitzen, der dem zu idealem Glas entsprechen könnte – nur eben für Spins.

In der Physik sind derartige vereinheitlichende Konzepte äußerst beliebt. Allerdings muss man beweisen, dass sie sich auch wirklich von einem System auf das andere übertragen lassen. Bis das in diesem Fall gelingt, wird vermutlich noch viel Zeit vergehen, da man neue mathematische Techniken miteinander kombinieren muss.

Andere Fachleute, darunter unsere Forschungsgruppe, haben in den letzten zehn Jahren durch einen vollkommen anderen Ansatz bedeutende Fortschritte erzielt: durch die Modellierung molekularer Gläser in einem hochdimensionalen Raum. Wenn die Anzahl der Dimensionen groß wird,

lassen sich bestimmte physikalische Größen exakt berechnen. Natürlich handelt es sich dabei nicht um ein realistisches Modell, aber es hilft, gewisse Mechanismen zu verstehen.

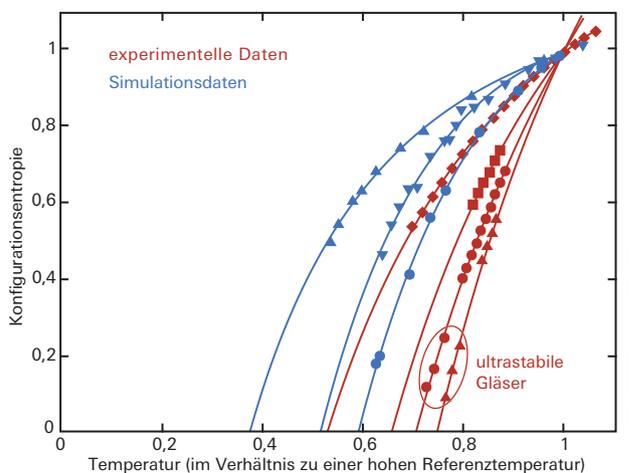
Warum hochdimensionale Umgebungen die Aufgabe erleichtern, lässt sich leicht nachvollziehen: In einem eindimensionalen Raum hat ein Atom zwei Nachbarn; in höheren Dimensionen nimmt die Anzahl der benachbarten Partikel schnell zu – deshalb kann man die umgebenden Kräfte über alle Teilchen mitteln. Das ist als so genannte Molekularfeldmethode (englisch: mean field) bekannt. Sie ermöglicht es, statistische Werkzeuge zu verwenden, um die Wechselwirkungen der Atome genau zu beschreiben. Die Molekularfeldtheorie findet auch in vielen anderen Bereichen der theoretischen Physik Anwendungen.

Antworten im Hochdimensionalen

Der Ansatz bestätigt den von Kauzmann vorhergesagten Phasenübergang zu idealem Glas. Man kann damit sogar die Art des Übergangs bestimmen und eine Verbindung zu experimentellen Messungen herstellen. So wissen wir genau, wie sich die flüssige und die glasartige Phase in hohen Dimensionen organisieren. Die Untersuchungen legen nahe, dass das ideale Glas tatsächlich einer Anordnung von Teilchen ohne offensichtliche Struktur entspricht. Diese Unordnung ist »perfekt«, denn jedes Molekül nimmt (obwohl der Zustand ungeordnet ist) einen ganz bestimmten Platz ein – anders als bei gewöhnlichen Flüssigkeiten.

In hohen Dimensionen ist das Problem also gelöst, selbst wenn man die vielen physikalischen Konsequenzen

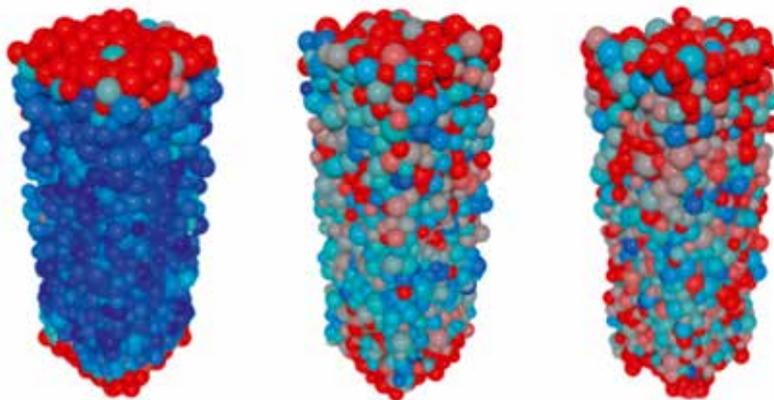
ENTROPIE VON GLAS Als Walter Kauzmann verschiedene Glas bildende Flüssigkeiten bei sinkender Temperatur untersuchte, begann er zu vermuten, dass deren Konfigurationsentropie ab einer bestimmten Temperatur auf null abfällt. Das würde bedeuten, dass die Teilchen im Glas eine ideale Anordnung annehmen. Die jüngsten Untersuchungen von ultrastabilen Materialien sowie computergestützte Simulationen bestärken diesen Verdacht – auch wenn ein ideales Glas noch nie beobachtet wurde.



LUDOVIC BERTHER UND CAMILLE SCALLET

Ultrastabile Gläser

Dank einer ausgeklügelten Herstellungstechnik, bei der Moleküle auf ein Substrat abgeschieden werden, weisen ultrastabile Materialien die Eigenschaften von sehr langsam abgekühltem Glas auf. Der Autor Ludovic Berthier und seine Kollegen haben zur Modellierung dieser Stoffe eine numerische Simulation entwickelt, die auf einem Monte-Carlo-Algorithmus beruht. Letzterer tauscht die Position verschiedener Moleküle im Material zufällig aus. Der Prozess ermöglicht es, verschiedene Anordnungen und die



damit verbundenen Energien schnell zu berechnen. Die Forscher konnten zeigen, dass die Teilchen an der Oberfläche leichter diffundieren als jene im Innern, wodurch bei den dünnen Filmen ein stabiler Gleichgewichtszu-

stand entsteht. Die drei Bilder sind Ergebnisse von Simulationen, die für unterschiedliche Temperaturen durchgeführt wurden: die niedrigste links, die höchste rechts. Je rötter eine Kugel, desto beweglicher ist sie.

LUDOVIC BERTHIER, BERTHIER, L. ET AL.: ORIGIN OF ULTRASTABILITY IN VAPOR-DEPOSITED GLASSES. PHYSICAL REVIEW LETTERS 119, 2017

noch untersuchen muss. Die theoretische Herausforderung besteht nun darin, herauszufinden, ob diese Vorhersagen auch für Gläser in unserer dreidimensionalen Welt gelten. Aktuell können wir das nicht beantworten – es liegt viel Arbeit vor uns. Deshalb sind andere Ansätze unerlässlich, etwa numerische Simulationen oder Experimente.

Experimentell stellt sich die Frage, wie man Gläser herstellen kann, die idealem Glas zumindest nahekommen. Die mikroskopische Struktur von Glas entspricht der Anordnung der Atome, die es bei der Übergangstemperatur besaß – zu dem Zeitpunkt, als die Teilchen ihre Fähigkeit verloren, sich neu zu organisieren. Den idealen Zustand erhält man also, indem man die Glasübergangstemperatur auf die von Kauzmann identifizierte Temperatur senkt. Die Übergangstemperatur hängt von der Abkühlungsgeschwindigkeit ab: je langsamer Letztere, desto niedriger fällt Erstere aus. Tatsächlich lässt sich beobachten, dass langsames Abkühlen dichtere und widerstandsfähigere Gläser hervorbringt.

Weil jedoch die Viskosität der Flüssigkeit mit sinkender Temperatur stark zunimmt, müsste man den Abkühlvorgang extrem in die Länge ziehen, um sich dem idealen Zustand zu nähern. Wie sich herausstellt, ist das Vorhaben nicht umsetzbar. Bereitet man ein Glas innerhalb eines Tags statt in einer Minute zu (was einer Verlangsamung um den Faktor 1440 entspricht), senkt man die Übergangstemperatur nur geringfügig. Aus technischen Gründen ist es zudem schwierig, noch langsamer vorzugehen. Daher scheidet diese Möglichkeit aus, um ideales Glas herzustellen.

Eine andere Idee besteht darin, Glas nach der Entstehung sehr lange altern zu lassen, in der Hoffnung, dass sich die Teilchen über die Zeit in Richtung des idealen Zustands reorganisieren. Auch hier wären allerdings unglaublich lange Wartezeiten erforderlich.

Glücklicherweise liefert die Natur Beispiele für sehr alte Gläser, die über Millionen Jahre gealtert sind: etwa Bern-

stein, der aus Polymeren besteht und sich über eine geologische Zeitskala entwickelt hat. 2014 untersuchten Miguel Ramos von der Universidad Autónoma de Madrid und seine Kollegen Bernsteinproben, die etwa 110 Millionen Jahre alt sind. Sie fanden heraus, dass die Dichte der Materialien im Lauf der Zeit stark zugenommen haben. Das deutet darauf hin, dass sich die Struktur wirklich weiterentwickelt und dabei einem idealen Glas angenähert hat. Andere Eigenschaften wie die spezifische Wärme bei niedrigen Temperaturen unterschieden sich jedoch kaum von denen jungen Bernsteins. Das wirft die Frage auf, was die wesentlichen Unterschiede zwischen sehr altem Glas und ihrem jungen Pendant sind. Weitere Arbeiten sind notwendig, um den Alterungsprozess besser zu verstehen.

Ultradünne Filme ahmen uralten Bernstein nach

Es gibt aber noch einen dritten Ansatz, der viel versprechend scheint. Er besteht darin, Glas durch eine Technik herzustellen, die sich von der gewöhnlichen Kühlung grundlegend unterscheidet. 2007 stellte die Gruppe des Chemikers Mark Ediger von der University of Madison-Wisconsin glasartige Schichten her, indem sie Moleküle auf einem Substrat ablagerte. Die Forscher stellen fest, dass die entstehenden Filme bei bestimmten Temperaturen und langsamen Abscheidungsraten unerwartete Eigenschaften aufweisen. Es wirkt, als wären die in nur wenigen Stunden synthetisierten glasartigen Strukturen durch eine Abkühlung von mehreren tausend oder sogar Millionen von Jahren Dauer entstanden. Das Analogon des geologischen Bernsteins lässt sich somit in weniger als einem Tag erzeugen.

Der Grund: Die Moleküle an der Oberfläche eines Stoffs sind viel beweglicher als jene, die von mehreren Schichten bedeckt sind. Diese Mobilität ermöglicht es dem Glas, schnell eine optimale Konfiguration zu finden. Ediger und seine Kolleginnen und Kollegen konnten 2007 belegen,

dass die glasartigen Filme dichter, stabiler und widerstandsfähiger sind – und zudem eine geringere Konfigurationsentropie aufweisen als Glas, das sich durch das langsame Abkühlen einer Flüssigkeit gebildet hat. Daher nennen Fachleute die so gewonnenen Stoffe »ultrastabil«. Neueren Messungen zufolge könnten die ultrastabilen Filme eine Übergangstemperatur haben, die sich um nur wenige Grad von der geheimnisvollen Kauzmann-Temperatur unterscheidet, und damit sehr nahe an der Grenze zum idealen Glas liegen.

Seit 2007 haben mehrere Arbeiten gezeigt, dass ultrastabile Materialien für zahlreiche technische Anwendungen nützlich sind. So enthalten die Oled-Displays von Samsung-Smartphones einige Bestandteile aus Glas, das durch Dampfabscheidung synthetisiert wurde. 2017 wies ein Team der Universität Barcelona nach, dass die von Ediger entdeckte Technik die Helligkeit und die Lebensdauer von Oled-Bildschirmen um mehr als 15 Prozent erhöht. Ihre höhere Leistung weist darauf hin, dass die Gläser eine bessere ungeordnete Konfiguration besitzen.

Experimentell ist es immer noch schwierig, direkte Beweise für einen Phasenübergang zu idealem Glas zu finden. Die Synthese ultrastabiler amorpher Filme liefert jedoch überzeugende indirekte Hinweise darauf. So werden die glasartigen flachen Strukturen sofort wieder flüssig, wenn man sie erwärmt. Der Übergang ähnelt damit dem eines erhitzten Festkörpers (etwa von Eis bei Plustemperaturen). Das stützt die Annahme, dass die ultrastabile Glasphase einen eigenständigen amorphen Materiezustand darstellt – und nicht einfach eine Flüssigkeit mit extrem langsamer Dynamik.

Um sich abzusichern, können Physikerinnen und Physiker auf ein weiteres Werkzeug zurückgreifen: computergestützte Simulationen. In diesem Bereich wurden in den letzten Jahren ebenfalls bedeutende Fortschritte erzielt. Der Ansatz hat den Vorteil, dass sich jeder Parameter perfekt kontrollieren lässt. Zudem kann man die Stoffe auf atomarer Ebene betrachten, während man gleichzeitig das makroskopische Verhalten der Materialien untersucht.

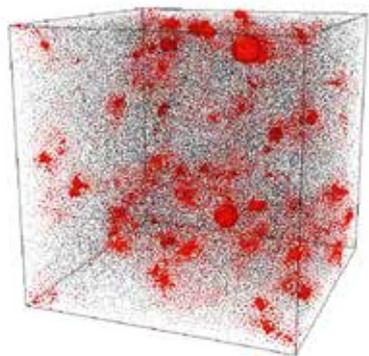
Die spezifische Wärme von Glas

Der Wärmetransport ist eine grundlegende Materialeigenschaft. Im Allgemeinen hängt er von der »spezifischen Wärme« ab. Ein großer Wert dafür bedeutet, dass viel Energie auf Kosten eines geringen Temperaturanstiegs gespeichert werden kann. Die spezifische Wärme ist direkt mit der Dissipation verbunden, bei der Energie in Wärme umgewandelt wird und dann nicht mehr zur Verfügung steht. Diese Effekte haben technische Konsequenzen, die insbesondere für Quantencomputer wichtig sind.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts haben Peter Debye und Albert Einstein eine Theorie der spezifischen Wärme in periodischen Kristallen formuliert. Sie beruht auf der Quantisierung der harmonischen Anregungen des Kristallgitters. Bei niedrigen Temperaturen um etwa ein Kelvin (zirka minus 272 Grad Celsius) hängt die spezifische Wärme demnach von der dritten Potenz der Temperatur ab.

In Gläsern herrscht hingegen ein linearer Zusammenhang. Bei niedrigen Temperaturen hat Glas eine größere spezifische Wärme als ein

kristalliner Festkörper, was darauf hindeutet, dass es in Glas unterschiedliche Anregungen gibt, die noch nicht richtig verstanden sind. In den 1970er Jahren schlugen Phil Anderson und seine Kollegen ein



WANG, L. ET AL. LOW-FREQUENCY VIBRATIONAL MODES OF STABLE GLASSES. NATURE COMMUNICATIONS 10, 2018, FIG. 4A (DOI:ORG/DOI.10.1038/S41467-018-07819-1) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/SBY/4.0/LEGALCODE)

Modell vor, welches das Verhalten auf lokalisierte Defekte zurückführt, deren Quantenverhalten die Beobachtungen erklären würde.

Experimente mit ultrastabilen amorphen Filmen von Miguel Ramos von der Universidad Autónoma de Madrid und Frances Hellman von der University of California in Berkeley deuten darauf hin, dass die Anzahl solcher Fehlstellen bei ultrastabilen Gläsern

abnimmt. 2020 untermauerten die Autoren dieses Artikels, Camille Scalliet und Ludovic Berthier, zusammen mit ihren Kollegen die Ergebnisse durch computergestützte Simulationen, in denen sie zum ersten Mal die Defekte auf molekularer Ebene identifizieren konnten (rot in der Abbildung). Indem sie die Stabilität der modellierten Gläser systematisch variierten, konnten sie eine drastische Abnahme an Fehlstellen bei zunehmend stabilen Gläsern beobachten. All diese Ergebnisse legen nahe, dass die spezifische Wärme in quasiidealen Gläsern so gering werden kann wie in einem perfekten Kristall. Folglich fällt die Energiedissipation in solchen Materialien viel kleiner aus als in gewöhnlichem Glas.

Allerdings zeigen Miguel Ramos' Messungen in geologischem Bernstein, dessen Struktur sich im Lauf der Millionen Jahre vermutlich stabilisiert hat, dass die Energiedissipation im Vergleich zu jungem Bernstein nicht wesentlich geringer ausfällt. Warum das so ist, weiß man noch nicht. Somit bleibt Bernstein ein Rätsel, das es zu lösen gilt.

Ideales Glas ist ein ungeordnetes Material, das keinerlei Fehler aufweist: die perfekte Unordnung!

Bis 2016 steckten die Simulationstechniken für den Glasübergang in einer Sackgasse. Die Rechenzeiten waren so beträchtlich, dass die erreichbaren Abkühlungsgeschwindigkeiten etwa 100 Millionen Mal schneller waren als in Laborversuchen. Dadurch waren die simulierten Gläser weitaus weniger stabil als jene in klassischen Experimenten – die ihrerseits bereits weit vom idealen Glas entfernt waren. Das ließ kaum Hoffnung für den numerischen Ansatz.

Simulationen liefern neue Hinweise

Doch in jenem Jahr änderte sich die Situation grundlegend. An der Université de Montpellier haben wir damals einen neuen Monte-Carlo-Algorithmus eingeführt, der auf einer gewissen Zufälligkeit bei seiner Ausführung beruht. Dieser Ansatz schließt die Lücke zwischen Simulationen und Experimenten und ermöglicht es, Modellgläser am Computer zu untersuchen. Noch besser: Indem wir das Programm weiter optimiert haben, waren wir in der Lage, Gläser zu modellieren, die erheblich stabiler und dichter sind als experimentell hergestellte Materialien. Dabei sparen wir teilweise mehr als zwölf Größenordnungen an Rechenzeit ein – bei zweidimensionalen Strukturen sind es sogar 40 Größenordnungen. Die in der Simulation gefertigten Gläser sind also mit den ultrastabilen Filmen vergleichbar, welche die Forschungsgruppe um Ediger herstellt.

Insbesondere wird es durch den numerischen Fortschritt möglich, zu überprüfen, ob die Molekularfeldtheorie ebenfalls in drei Dimensionen gilt. Seit 2016 haben zahlreiche Computersimulationen das physikalische Verhalten von Flüssigkeiten bei Temperaturen erforscht, die zuvor rechnerisch nie zugänglich waren. Dabei scheinen mehrere Studien zu bestätigen, dass der Molekularfeldansatz dreidimensionale Modellgläser korrekt beschreibt. Kühlt man die Fluide bis möglichst nahe an den idealen Glasübergang ab, stimmen alle theoretisch vorhergesagten Eigenschaften gut mit den Messwerten der simulierten Systeme überein. Unsere Computermodelle legen nahe, dass die Konfigurationsentropie bei einer Glasübergangstemperatur verschwindet. Der Übergang weist die gleichen Merkmale auf wie ein Phasenübergang erster Ordnung – also einer, der wie die Kristallisation von Wasser bei null Grad Celsius abrupt abläuft.

Diese jüngsten Entwicklungen werfen ein neues Licht auf die physikalischen Eigenschaften von Glas. Um diese zu untersuchen, kann man beispielsweise die Qualität des

hergestellten Materials variieren. Und wie sich herausstellt, unterscheiden sich die Merkmale ultrastabiler Stoffe (die dem idealen Glas ähneln) und jene gewöhnlicher Gläser. Wir verstehen nun, dass sich die thermischen, thermodynamischen und mechanischen Eigenschaften durch eine kleine Ansammlung von Fehlstellen erklären lassen. Die Existenz solcher Defekte ist jedoch schwer nachzuweisen, da die mikroskopische Struktur von Glas homogen und ungeordnet ist. Es bleibt schwierig, die richtigen Werkzeuge zu finden, um sie auf einfache Weise zu erkennen. Dennoch verdeutlichen computergestützte Simulationen, dass sich Glas bei langsamer Druckausübung nur an einigen wenigen Stellen verformt. Je mehr man sich dem idealen Zustand nähert, desto kleiner wird die Anzahl der Bruchstellen. Das legt nahe, dass ideales Glas, wie von der Molekularfeldtheorie vorhergesagt, ein ungeordnetes Material ist, das keinerlei Fehler aufweist: die perfekte Unordnung!

Einen weiteren Vorteil dieser Stoffe wies ein Team um die Physikerin Frances Hellman von der University of California in Berkeley im Jahr 2014 nach: Jene Fehlstellen, welche für Dissipation sorgen, also dass Energie innerhalb des Glases in Wärme umgewandelt wird und damit »verloren« geht, treten in ultrastabilen Materialien wesentlich seltener auf als in gewöhnlichen gekühlten Gläsern. Ähnliche Ergebnisse haben Ramos und seine Mitarbeiter erzielt. Unsere 2020 veröffentlichte computergestützte Studie untermauert die experimentellen Resultate und legt nahe, dass es im idealen Glas praktisch keine Dissipation gibt. Das Team um Hellman arbeitet nun an ultrastabilen Glasbeschichtungen, die sich für das LIGO-Interferometer nutzen lassen. Solche Materialien mit stark reduzierter Dissipation könnten auch einige der Probleme in zukünftigen Quantencomputern lösen. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/kristalle-minerale-und-gesteine](https://www.spektrum.de/t/kristalle-minerale-und-gesteine)



S. E. / STOCK.ADOBE.COM

QUELLEN

Berthier, L. et al.: Configurational entropy of glass-forming liquids. *Journal of Chemical Physics* 150, 2019

Ninarelo, A. et al.: Models and algorithms for the next generation of glass transition studies. *Physical Review X* 7, 2017

Parisi, G. et al.: Theory of simple glasses: Exact solutions in infinite dimensions. Cambridge University Press, 2020

Scalliet, C. et al.: Depletion of two-level systems in ultrastable computer-generated glasses. *Physical Review Letters* 124, 2020

Swallen, S.F. et al.: Organic glasses with exceptional thermodynamic and kinetic stability. *Science* 315, 2007

SYMBOLISCHE REGRESSION NATURGESETZE AUS DEM COMPUTER

Große Mengen von Messdaten zu verschiedenen Variablen sind kaum mehr überschaubar und erschweren die Suche nach mathematischen Zusammenhängen. Eine neue Klasse von Algorithmen übernimmt die systematische Suche.



Charlie Wood ist Redakteur für Physik beim »Quanta Magazine«.

» spektrum.de/artikel/2066871

▶ 2017 haben Roger Guimerà und Marta Sales-Pardo von der Universität Rovira i Virgili im spanischen Tarragona einen Auslöser für die Teilung von Zellen entdeckt. Wie sie letztlich darauf gekommen waren, wollten sie zunächst allerdings nicht verkünden. Denn die beiden hatten den entscheidenden Zusammenhang nicht selbst in ihren Daten gefunden. Vielmehr hatte ihnen die Antwort eine bis dato unveröffentlichte Erfindung geliefert. Bei dieser handelt es sich gewissermaßen um einen digitalen Assistenten, den Guimerà und Sales-Pardo als Maschinenwissenschaftler bezeichnen. Als die zwei ihr Ergebnis zu Papier brachten, dachte Guimerà: »Wir können nicht einfach schreiben, dass wir einen Algorithmus gefüttert und von ihm die Antwort erhalten haben. Kein Gutachter wird das akzeptieren.«

Auf der Suche nach Faktoren, die das Signal zur Zellteilung geben, hatten sich die beiden mit einem ehemaligen Klassenkameraden zusammengetan, dem Biophysiker Xavier Trepas vom Institute for Bioengineering of Catalonia in Barcelona. Traditionell herrschte die Ansicht vor, dass eine Zelle sich teilt, sobald sie eine bestimmte Größe erreicht hat. Trepas hingegen vermutete, dahinter könnte noch mehr stecken. Seine Arbeitsgruppe ist darauf spezialisiert, die winzigen Abdrücke zu entschlüsseln, die Zellen auf einer weichen Oberfläche hinterlassen, wenn sie um ihre Position im Verbund wetteifern. Das Team hatte einen umfangreichen Datensatz angehäuft, der Formen, Kräfte und ein Dutzend anderer zellulärer Merkmale dokumen-

tierte. Alle Optionen zu testen, wie genau einige der Eigenschaften möglicherweise die Zellteilung beeinflussen, wäre jedoch eine Lebensaufgabe gewesen.

Stattdessen gab Trepas die Daten an Guimerà und Sales-Pardo weiter, die sie vom Maschinenwissenschaftler analysieren ließen. Innerhalb von Minuten lieferte dieser eine präzise Formel, die den Zeitpunkt der Zellteilung zehnmal genauer vorhersagen konnte als hergebrachte Gleichungen, die nur das Volumen oder ein anderes einzelnes Merkmal berücksichtigten. Ausschlaggebend ist gemäß dem Ergebnis des Maschinenwissenschaftlers die Größe der Zelle multipliziert mit der Stärke, mit der sie von ihren Nachbarn zusammengedrückt wird. »Der Algorithmus war in der Lage, etwas zu erkennen, was uns bis dahin verborgen war«, resümiert Trepas.

Guimerà und Sales-Pardo führten daraufhin eine eigene Untersuchung durch – wenn man so will, um die Spuren ihres digitalen Gehilfen zu verwischen, der bisher ja noch nicht der Fachwelt vorgestellt worden war. Sie testeten manuell Hunderte von Variablenpaaren, »unabhängig von ihrer physikalischen oder biologischen Bedeutung«, wie sie später schrieben. Auf die Weise konnten sie das Ergebnis ihres Maschinenwissenschaftlers rekonstruieren und veröffentlichten es 2018 in der Fachzeitschrift »Nature Cell Biology«.



WEIT VERZWEIGT Auf der Suche nach der optimalen Gleichung untersuchen Programme allerlei Kombinationen von Rechenoperationen, die unterschiedliche Parameter verknüpfen.

Inzwischen ist die ungewöhnliche Herangehensweise zu einer akzeptierten wissenschaftlichen Methode gereift, der »symbolischen Regression«. Sie funktioniert anders als die bekannten Algorithmen der künstlichen Intelligenz (KI) mit ihren neuronalen Netzen. Diese lesen zum Beispiel tausende Pixel eines Fotos ein, lassen sie durch ein Labyrinth von Millionen von Knotenpunkten sickern und identifizieren dann mittels undurchschaubarer Gewichtungen der einzelnen Beiträge auf dem Bild einen Hund. Die symbolische Regression ermittelt in ähnlicher Weise Beziehungen in komplizierten Datensätzen, aber sie gibt die Ergebnisse in einem Format aus, das Menschen verstehen können: als mathematische Gleichungen. Im Prinzip ähneln die Algorithmen der Kurvenanpassung bei den üblichen Programmen zur Tabellenkalkulation. Statt allerdings nur nach Geraden oder Parabeln zu suchen, die zu einer Wolke von Punkten in einem Diagramm passen, fahnden sie nach Milliarden von Formeln aller Art. Auf die Weise fand der Maschinenwissenschaftler eine analytische Antwort auf die Frage, warum sich Zellen teilen, während ein neuronales Netz nur orakeln könnte, zu welchem Zeitpunkt sie es tun.

Solche Ansätze werden bereits seit Jahrzehnten entwickelt. Waren die Datensätze ordentlich genug aufbereitet, so dass gewisse Muster hervortraten, gelang es den Programmen, bekannte Gesetze wiederzuentdecken. Doch erst in den letzten Jahren reiften die Algorithmen ausreichend heran, um neue Zusammenhänge bei realen Messungen aufzuspüren. So finden sie Antworten auf völlig verschiedene Fragestellungen. Der US-Robotikforscher Hod Lipson von der Columbia University in New York hat 2009 die Entwicklung der symbolischen Regression mit in Gang gebracht. Heute stellt er fest: »Zweifelsfrei bewegt sich das ganze Feld vorwärts.«

Gelegentlich enthüllen sich bedeutende Zusammenhänge durch reines Nachdenken. Häufiger jedoch entstehen Theorien im Lauf geduldiger Auswertungen. Beispiele dafür finden sich in der Geschichte der Wissenschaft genügend. Nach dem Tod des Astronomen Tycho Brahe 1601 gingen dessen Aufzeichnungen mit Himmelsbeobachtungen an

seinen Assistenten Johannes Kepler. Kepler stellte nach vier Jahren anhand der Notizen fest, dass der Mars den Himmel auf einer elliptischen Bahn durchwandert. Dem, was heute als 1. keplersches Gesetz bekannt ist, ließ er zwei weitere Beziehungen folgen, die er ebenfalls mittels mühsamer Berechnungen entdeckte. Jene Regelmäßigkeiten führten Isaac Newton rund ein halbes Jahrhundert später zum universellen Gravitationsgesetz.

Die symbolische Regression soll das zeitraubende Herumprobieren beschleunigen. Dazu durchforstet sie die unzähligen Möglichkeiten der Verknüpfung von Variablen mittels grundlegender mathematischer Operationen und findet diejenige Gleichung, die das Verhalten eines Systems am besten vorhersagt.

Von der Wiederentdeckung altvertrauter Gesetze bis zum Aufspüren völlig neuer

Ein erstes derartiges Programm hieß BACON und wurde in den späten 1970er Jahren von Patrick Langley entwickelt, einem Kognitionswissenschaftler und KI-Forscher, der damals an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh arbeitete. BACON ging etwa von den Umlaufzeiten und den Entfernungen verschiedener Planeten aus. Dann kombinierte es die Daten systematisch: Periode geteilt durch Entfernung, Periode zum Quadrat mal Entfernung und so weiter. Es hörte erst auf, wenn es eine Gleichung gefunden hatte, die stets einen konstanten Wert ergab. Dann hatte das Programm zwei zueinander proportionale Größen identifiziert. Hier wäre das die Periode zum Quadrat geteilt durch die dritte Potenz der großen Bahnhalbachse, was dem 3. keplerschen Gesetz entspricht.

Trotz der Wiederentdeckung von Keplers Gesetz und weiterem Lehrbuchwissen blieb BACON in einer Ära begrenzter Rechenleistung kaum mehr als eine Spielerei. Denn die Ergebnisse mussten immer noch von Hand analysiert werden oder mit einer Software, die nur in einfachen Datensätzen und innerhalb einer bestimmten Klasse von Gleichungen fündig wurde. Das Konzept eines Algorithmus, der eigenständig das richtige Modell zur Beschreibung einer beliebigen Datengrundlage findet, nahm erst mit der Idee von Lipson und seinem Kollegen Michael Schmidt Fahrt auf. Gemeinsam entwickelten sie 2009 »Eureqa«.

Ihr Hauptziel war ein System, das umfangreiche Datensammlungen mit einer Vielzahl von Variablen auf eine Formel reduzieren kann. Sie sollte die wenigen wirklich wichtigen Messgrößen enthalten. »Die Gleichung könnte am Ende aus vier Variablen bestehen, aber man weiß im Voraus nicht, welche«, erläutert Lipson. »Man wirft alles hinein, was man hat. Vielleicht spielt das Wetter eine Rolle. Vielleicht ist die Anzahl der Zahnärzte pro Quadratkilometer wichtig.«

Eine zentrale Herausforderung beim Umgang mit solch einer Unmenge von Variablen besteht darin, einen effizienten Weg zu finden, immer wieder neue Gleichungen zu erraten. Es braucht einerseits genug Flexibilität, mögliche Sackgassen auszuprobieren, andererseits die Fähigkeit, dort herauszukommen. Wenn der Algorithmus zum Beispiel von einer Geraden zu einer Parabel und dann zu einer wellenartigen Kurvenanpassung übergeht, wird er womöglich zunächst schlechter darin, möglichst viele Datenpunkte zu treffen,

AUF EINEN BLICK FORMELN ERRATEN MIT DATEN

- 1 Verschiedenste Gleichungen beschreiben Vorgänge etwa in der Physik oder Biologie. Sie verknüpfen Messgrößen und Naturkonstanten auf mitunter komplizierte mathematische Weise.
- 2 Bei umfangreichen Datensätzen ist es oft schwierig, neue Zusammenhänge zu entdecken und unbekannte Gesetze zu finden. Doch inzwischen können spezielle Programme die Suche automatisieren.
- 3 Die Herleitungen basieren auf systematischem Ausprobieren. Dabei bleiben die Lösungen für Menschen analytisch nachvollziehbar.

bevor ihm das wieder besser gelingt. Zur Überwindung dieser und anderer Herausforderungen dienen so genannte genetische Algorithmen. Sie führen gewissermaßen zufällige Mutationen in Gleichungen ein und überprüfen, wie gut sich die veränderten Terme beim Umgang mit den Daten schlagen (siehe »Maschinenwissenschaftler bei der Arbeit«). Im Lauf vieler Versuche erweisen sich die ursprüng-

lich kaum vorteilhaften Abwandlungen entweder als deutlich funktionssteigernd oder sie verkümmern.

Lipson und Schmidt brachten die Technik voran und erhöhten den darwinistischen Druck, indem sie mit »Eureqa« sozusagen ein Kopf-an-Kopf-Rennen veranstalteten. Auf der einen Seite züchteten sie Gleichungen. Auf der anderen wählten sie aus den Datenpunkten diejenigen aus, die den Gleichungen am meisten abverlangten. »Für ein Wetttrüsten braucht man zwei Parteien, die sich weiterentwickeln, nicht nur eine«, so Lipson. Der Eureqa-Algorithmus verarbeitet Datensätze mit mehr als einem Dutzend Variablen. Dabei kann er recht komplizierte Zusammenhänge rekonstruieren und etwa die chaotische Bewegung eines Doppelpendels auswerten.

Als Sales-Pardo zum ersten Mal mit Eureqa herumspielte, war sie verblüfft. »Das erschien mir wie Magie«, erinnert sie sich. Schon bald erstellte sie gemeinsam mit Guimerà Modelle für deren Forschung. Einerseits waren die beiden von der Leistungsfähigkeit des Programms beeindruckt, andererseits von dessen Inkonsistenz frustriert. Der Algorithmus entwickelte zwar Gleichungen mit guter Vorhersagekraft, aber mitunter schoss er über das Ziel hinaus und landete bei einer viel zu komplizierten Formel. Geringfügige Änderungen bei den Daten erbrachten manchmal völlig andere Ergebnisse. Schließlich machten sich Sales-Pardo und Guimerà daran, einen Maschinenwissenschaftler von Grund auf neu zu entwickeln.

Das Problem mit genetischen Algorithmen bestand ihrer Meinung nach darin, dass sie zu sehr von den Vorgaben abhängen. Denn das Programm benötigt ein Gleichgewicht zwischen Einfachheit und Genauigkeit. Je mehr Terme man hinzufügt, umso präziser trifft man alle Punkte in einem Datensatz. Doch manche Ausreißer sollten besser ignoriert werden. Man könnte eine kürzere Formel als Ziel ausloben und die Genauigkeit dadurch quantifizieren, wie nahe die Kurve den einzelnen Punkten des Datensatzes kommt. Aber das sind nur zwei willkürliche Kriterien aus einer Fülle von Optionen.

Wie gut bündelt das Ergebnis die Daten?

Das Team um Sales-Pardo und Guimerà griff auf Fachwissen in den Bereichen Physik und Statistik zurück und begann, den Evolutionsprozess neu zu beschreiben. Ein Schritt bestand darin, allerlei Formeln von der Onlineenzyklopädie Wikipedia herunterzuladen und die Typen zu identifizieren, die am häufigsten vorkommen. Das hilft dem Algorithmus dabei, möglichst naheliegende Varianten zu finden. Mittels einer Methode, die über Zufallsstichproben jeden Fleck einer mathematischen Landschaft erforscht, erzeugt das Programm dann Variationen der Gleichungen.

Nach und nach werden die so hervorgegangenen Gleichungen danach bewertet, wie gut sie einen Datensatz zusammenfassen. Eine zufällige Ansammlung von Punkten ist zum Beispiel überhaupt nicht komprimierbar; man muss die Position jedes Punktes kennen. Wenn aber 1000 Punkte entlang einer Gerade liegen, lassen sie sich gut bündeln, und man benötigt zu ihrer Beschreibung nur noch zwei Zahlen, nämlich Steigung und Höhe. Es stellte sich heraus: Der Grad der Kompression bietet eine einzigartige und

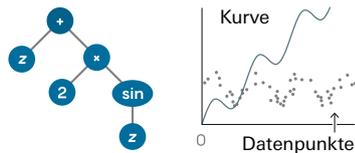
Maschinenwissenschaftler bei der Arbeit

Leistungsstarke Algorithmen finden inzwischen Gleichungen, mit denen sich Zusammenhänge in physikalischen Datensätzen beschreiben lassen. Typischerweise ziehen die Programme dazu verschiedene Terme heran, die sie Millionen Mal abändern und miteinander verknüpfen, um die beste Formel zu finden.

Gleichungsbaum

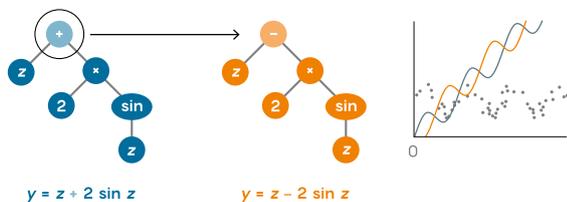
$$y = z + 2 \sin z$$

lässt sich als Baum und als Kurve darstellen.



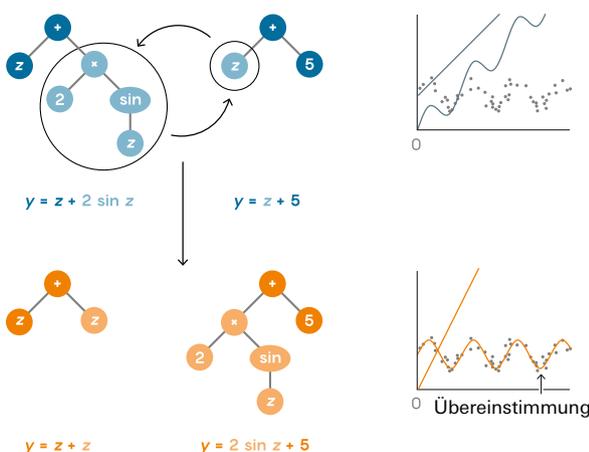
Mutation

Der Algorithmus mutiert an einem Knoten des Baums.



Kreuzung

Der Austausch von Pfaden bringt neue Gleichungen hervor.



widerspruchsfreie Möglichkeit, die in Frage kommenden Formeln zu vergleichen. »Es lässt sich beweisen, dass das richtige Modell jenes ist, das die Daten am stärksten komprimiert«, sagt Guimerà. Nach jahrelanger Entwicklungsarbeit veröffentlichte das Team 2020 ihren »Bayes-Maschinenwissenschaftler« im Fachjournal »Science Advances«. Der Name geht zurück auf das so genannte Bayes-Theorem, eine mathematische Methode zur Schätzung von Wahrscheinlichkeiten.

Diese Art von Algorithmen dürfte in der biologischen Forschung mit ihren zunehmenden Datenfluten eine wichtige Rolle einnehmen. Darüber hinaus wurde der Bayes-Maschinenwissenschaftler auch schon eingesetzt, um die Vorhersage des Energieverbrauchs eines Lands zu verbessern oder die Robustheit eines Netzwerks zu modellieren.

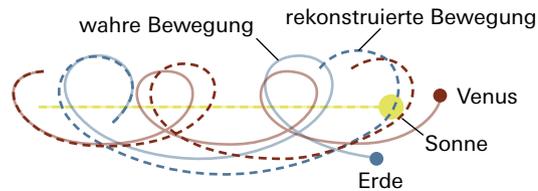
In der Physik helfen solcherlei Maschinenwissenschaftler ebenfalls, etwa bei Systemen, die mehrere Größenordnungen überspannen. Normalerweise verwendet man einen Satz von Gleichungen für Atome und einen völlig anderen für Billardkugeln. Aber so eine strikte Trennung funktioniert nicht mehr in Disziplinen wie der Klimawissenschaft, wo sich kleine und lokal begrenzte Ereignisse auf großflächige Strömungsmuster auswirken.

Mit solchen Problemen beschäftigt sich Laure Zanna von der New York University. Bei der Modellierung von Turbulenzen im Ozean hat sie es mit zwei Extremen zu tun. Supercomputer können entweder stadtgroße Wirbel oder interkontinentale Strömungen berechnen, aber nicht beide Größenordnungen gleichzeitig. Die Aufgabe besteht also darin, den Programmen beizubringen, ein globales Bild zu erstellen, das die Auswirkungen kleinerer Wirbel einschließt, ohne jeden davon direkt simulieren zu müssen.

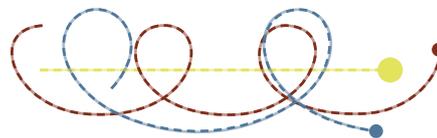
Zunächst probierte es Zanna mit künstlichen neuronalen Netzen. Sie versuchte, mit diesen die Effekte von hochauflösenden Simulationen zu erfassen und damit entsprechend gröbere Modellierungen zu füttern. »Es klappte erstaunlich gut«, berichtet sie. »Aber ich bin Klimaphysikerin, und da fällt es schwer, sich auf Tausende von Parametern einzulassen und sich einfach mit dem Ergebnis zufriedenzugeben.« Vielmehr möchte sie verstehen, wie das Klima letztlich auf eine Hand voll physikalischer Einflussgrößen wie Druck und Temperatur zurückgeht.

Sie stieß auf einen Algorithmus von drei angewandten Mathematikern an der University of Washington: Steven Brunton, Joshua Proctor und Nathan Kutz. Ihr Programm verfolgt einen Ansatz namens spärliche Regression. Anders als bei der symbolischen Regression gibt es hier keinen ausufernden evolutionären Wettkampf zwischen mutierenden Gleichungen. Die spärliche Regression beginnt vielmehr mit einer überschaubaren Bibliothek von rund 1000 einfachen Funktionen wie Quadrat oder Sinus. Dann sucht der Algorithmus nach einer Kombination von Termen mit der genauesten Vorhersage. Dazu löscht er sukzessive die am wenigsten nützlichen, bis nur noch einige übrig sind. Das Verfahren ist extrem schnell und kann mehr Daten handhaben als die symbolische Regression. Gleichwohl ist der Spielraum reduziert, da die endgültige Gleichung aus einem vorab festgelegten Fundus gebildet wird.

Neuronales Netz allein



Neuronales Netz plus symbolische Regression mit Massenbestimmung



NEWTON NEU ENTDECKT Speist man ein neuronales Netz mit Positionsdaten von Himmelskörpern des Sonnensystems, lernt es, die zukünftigen Bewegungen vorzusagen. Diese weichen allerdings bald stark von den realen ab. Im Zusammenspiel mit symbolischer Regression leitet der Algorithmus jedoch Formeln zusammen mit Massen der Planeten ab, die gut zur Realität passen.

Zanna erstellte einen spärlichen Regressionsalgorithmus von Grund auf neu, um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie er arbeitet. Anschließend wandte sie eine modifizierte Version auf Modellierungen von Meeresströmungen an. Dazu speiste sie hochauflösende Simulationen kleinerer Ozeanwirbel ein und ließ den Algorithmus nach einer Gleichung für die Situation auf einer größeren Skala suchen. Das Programm lieferte schließlich eine prägnante Formel, die auch die Wirbelstärke und die Dehnungs- und Scherungseigenschaften des Mediums berücksichtigt. Die Gleichung fügte Zanna in ihr Modell einer großräumigen Strömung ein, woraufhin sich diese viel realitätsgetreuer als zuvor verhielt.

Das Beste aus beiden Welten

Andere Forschungsgruppen verbessern die Maschinenwissenschaftler, indem sie deren Stärken mit denjenigen neuronaler Netze kombinieren. Astrophysiker Miles Cranmer von der Princeton University hat einen Open-Source-Algorithmus für symbolische Regression entwickelt, der Eureka ähnelt. »PySR« erschafft gewissermaßen verschiedene Gleichungspopulationen auf digitalen Inseln und lässt dann diejenigen Formeln, die am besten zu den Daten passen, auf benachbarte Eilande übersetzen und mit den dortigen Bewohnern konkurrieren. In Kooperation mit Forschungsinstituten aus New York sowie dem britischen KI-Unternehmen DeepMind entwickelte Cranmer ein hybrides Schema. Bei diesem wird zunächst ein neuronales Netz für eine bestimmte Aufgabe trainiert. Im Anschluss sucht PySR eine Gleichung, die das Verhalten des neuronalen Netzes beschreibt.

Um die Machbarkeit des Verfahrens zu demonstrieren, wandte die Gruppe das Verfahren im Juni 2020 auf eine Simulation zur Verteilung Dunkler Materie im Weltall an. Das

Programm fand eine Formel für die Dichte im Zentrum einer Wolke aus Dunkler Materie basierend auf den Eigenschaften benachbarter Strukturen. Sie passte besser als das von Menschen entwickelte Modell. Im Februar 2022 fütterten sie ihr Programm außerdem mit den real gemessenen Positionen von 31 Himmelskörpern des Sonnensystems aus einem Zeitraum von 30 Jahren. Der Algorithmus leitete daraus das newtonsche Gravitationsgesetz ab und ermittelte darüber hinaus die Massen der Planeten und Monde (siehe »Newton neu entdeckt«). Andere Teams haben 2021 mit PySR Gleichungen gefunden, die beschreiben, wie sich Galaxien im Zentrum von Wolken aus Dunkler Materie formen oder wie Teilchenkollisionen ablaufen.

Ein weiteres bemerkenswertes Beispiel für die Kombination von KI und symbolischer Regression ist »AI Feynman«, ein von Max Tegmark und Silviu-Marian Udrescu vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge entwickeltes Programm. 100 wichtige Gleichungen aus den Vorlesungen, die der spätere Nobelpreisträger Richard Feynman in den 1960er Jahren zu verschiedenen Themengebieten hielt, konnte AI Feynman auf Basis zugehöriger Datensätze herleiten.

Nathan Kutz hält eine große Vielfalt unterschiedlicher Ansätze für zentral: »Wir brauchen wirklich sämtliche Techniken. Es gibt nicht die eine für alles.« Er glaubt, wir stünden an der Schwelle zur »GoPro-Physik«. Er meint damit, fortan müsse man lediglich eine Kamera auf ein physikalisches Ereignis richten und würde eine Gleichung bekommen, die das Wesentliche des Geschehens erfasst. Derzeitige Algorithmen benötigen allerdings immer noch Menschen, die sie mit einer Liste potenziell relevanter Variablen wie Koordinaten und Winkeln füttern.

Hod Lipson hat bereits einen Schritt in Richtung GoPro-Physik gewagt. In einer Veröffentlichung vom Dezember 2021 beschrieb sein Team ein Verfahren, bei dem es ein tiefes neuronales Netzwerk darauf trainierte, kurze Filmsequenzen anzusehen und anschließend den weiteren Verlauf des Videos vorherzusagen. Dann reduzierten die Forscher die Anzahl der Variablen, die dem Programm zur Verfügung standen, und probierten so aus, wie viele Parameter es mindestens braucht, um sowohl einfache Systeme wie ein Pendel als auch komplizierte Vorgänge wie das Flackern eines Feuers noch erfolgreich zu modellieren.

Trotz solcher beeindruckenden Erfolge sind Maschinenwissenschaftler keineswegs im Begriff, etablierte KI-Algorithmen zu verdrängen. Diese brillieren besonders in hochkomplexen Systemen. Niemand erwartet von der symbolischen Regression Gleichungen zum Erkennen von Katzen oder Hunden. Doch wenn es um kreisende Planeten, wirbelnde Flüssigkeiten oder sich teilende Zellen geht, liefern wenige Gleichungen mit einer Hand voll Terme mitunter verblüffend genaue Beschreibungen der Realität. Cranmer und seine Kollegen vermuten, dass die elementaren mathematischen Operationen deshalb so gut abschneiden, weil sie für grundlegende geometrische Vorgänge stehen. Sie wären somit eine natürliche Sprache zur Beschreibung der Realität. Die Addition verschiebt ein Objekt auf einer Zahlenreihe. Die Multiplikation verwandelt eine Fläche in ein dreidimensionales Volumen. Deswegen erscheint es sinn-

voll, beim Erraten von Gleichungen zunächst auf einfache Zusammenhänge zu setzen.

Das ist jedoch keine Erfolgsgarantie. Guimerà und Sales-Pardo haben ihren Bayes-Maschinenwissenschaftler ursprünglich entwickelt, weil Eureqa für ähnliche Eingaben manchmal völlig unterschiedliche Gleichungen fand. Zu ihrer Enttäuschung mussten sie feststellen, dass auch ihr Algorithmus für einen bestimmten Datensatz zuweilen voneinander abweichende Modelle lieferte.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Der Grund dafür, so wiesen die beiden im April 2022 nach, ist in den Daten selbst verborgen. Mit Hilfe ihres Maschinenwissenschaftlers fanden sie anhand verschiedener Datensätze heraus, dass diese in zwei Kategorien fallen: sauber und verrauscht. Bei Ersteren ließ sich immer eine optimale Gleichung für die Zusammenhänge finden. Aber oberhalb einer bestimmten Schwelle für zufällige Störungen war das nicht mehr möglich. Durch hinreichend verrauschte Datenpunkte lassen sich beliebige Verlaufskurven legen. Mit dem Beweis, dass der Algorithmus stets die beste Gleichung findet, ist immerhin klar: Im Fall seines Versagens kann auch niemand sonst – ob Mensch oder Maschine – erfolgreich sein. Das sei eine grundlegende Einschränkung bei dem Beschreiben von Datensätzen durch Gleichungen, betont Guimerà. »Diese Erkenntnis haben wir dem Maschinenwissenschaftler zu verdanken.« ◀

QUELLEN

Brunton, S. L. et al.: Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. PNAS 113, 2016

Cranmer, M. et al.: Discovering symbolic models from deep learning with inductive biases. ArXiv, 2006.11287

Guimerà, R. et al.: A Bayesian machine scientist to aid in the solution of challenging scientific problems. Science Advances 6, 2020

Lemos, P. et al.: Rediscovering orbital mechanics with machine learning. ArXiv, 2202.02306

Schmidt, M., Lipson, H.: Distilling free-form natural laws from experimental data. Science 324, 2009



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Powerful »Machine Scientist« Distill the Laws of Physics From Raw Data« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

KOMBINATORIK EIN UNGEWÖHNLICHER WEG

Bis zum Ende seines Studiums interessierte sich June Huh nicht für Mathematik – bis er ihre Schönheit entdeckte. Mehr als drei Stunden täglich kann er sich nicht auf seine Arbeit konzentrieren. Das hat ihn nicht gehindert, 2022 die höchste Auszeichnung seines Fachs zu erhalten.



Jordana Cepelewicz ist Wissenschaftsjournalistin in New York.

► spektrum.de/artikel/2066874



PUNKTE UND STRICHE In der Graphentheorie geht es um Netzwerke: eine Menge von Punkten, die durch Kanten miteinander verbunden sind. June Huh hat Erstaunliches über diese Gebilde herausgefunden.

AUF EINEN BLICK GEOMETRIE OHNE RAUM

- 1** Anders als viele seiner Kollegen entdeckte June Huh seine Faszination für Mathematik recht spät: Eine zufällige Begegnung am Ende seines Physikstudiums motivierte ihn dazu, das Fach zu wechseln.
- 2** Trotz seines holprigen Einstiegs machte er schnell erstaunliche Entdeckungen: Unter anderem fand er geometrische Zusammenhänge in Bereichen, die gar keinen geometrischen Raum zulassen.
- 3** Seine Erkenntnisse im Gebiet der Kombinatorik haben ihm 2022 die Fields-Medaille eingebracht, eine der höchsten Ehrungen der Mathematik.

Jeden Nachmittag macht June Huh einen langen Spaziergang durch die Princeton University. An diesem Tag Mitte Mai 2022 bahnt er sich seinen Weg durch die Wälder rund um das nahe gelegene Institute for Advanced Study. »Nur damit Sie es wissen«, sagt er, während er an einer Weggabelung stehen bleibt, »ich habe keine Ahnung, wo wir sind.« Wir setzen unseren Ausflug dennoch fort. Immer wieder hält er inne, um auf Tiere hinzuweisen, die sich unter Blättern oder hinter Bäumen verstecken. In den nächsten zwei Stunden sichtet Huh ein Froschpaar, einen Rotkappen-Waldsänger, eine Schildkröte von der Größe eines Fingerhuts und einen Fuchs. Sie alle beobachtet er aufmerksam. »Ich bin gut darin, Dinge zu finden«, erklärt er.

Damit trifft er den Nagel auf den Kopf. Denn für seine Fähigkeit, verschiedene Gebiete der Mathematik zu erkunden und dabei genau die richtigen Objekte auszumachen, wurde der 39-Jährige im Sommer 2022 mit der Fields-Medaille geehrt, einer der höchsten Auszeichnungen des Fachs. Die von ihm identifizierten Strukturen bringen die zwei Bereiche der Geometrie und Kombinatorik auf völlig neue Weise zusammen. Seit seinem Studium hat Huh mehrere bedeutende Probleme gelöst, wobei er jedes Mal unerwartete Pfade in der abstrakten Disziplin einschlug.

Auch sein Werdegang zeichnet sich durch viele Umwege – und einige Zufälle – aus. Denn Huh hatte niemals vorgehabt, Mathematiker zu werden. Das Fach war ihm egal. In der Mittelstufe wollte er sogar die Schule abbrechen, um als Dichter seinen Lebensunterhalt zu verdienen. Erst eine Begegnung gegen Ende seiner Studienzeit ließ ihn erkennen, dass Mathematik das enthält, wonach er die ganze Zeit gesucht hatte.

Die mangelnde Geradlinigkeit hat sich inzwischen als prägend für Huhs Arbeit herausgestellt. Seinen Kollegen zufolge sucht er in allem, was er tut, nach einer tieferen Bedeutung. »Er macht schöne Dinge. Als ich herausfand, dass er sich früher mit Poesie beschäftigt hat, ergab das für mich Sinn«, so der Mathematiker Federico Ardila-Mantilla von der San Francisco State University.

Im Frühjahr 2019 verbrachte er mehrere Monate einfach nur damit, Bücher zu lesen

Und nicht nur das unterscheidet ihn von vielen seiner Kollegen. An einem gewöhnlichen Tag arbeitet Huh etwa drei Stunden lang konzentriert. Vielleicht denkt er über ein Matheproblem nach, bereitet sich auf eine Vorlesung vor oder plant Arzttermine für seine beiden Söhne. »Danach bin ich erschöpft«, sagt er. »Etwas Wertvolles, Sinnvolles, Kreatives zu tun« – oder eine Aufgabe, die er nicht unbedingt machen will, wie Terminplanung – koste ihn viel Energie. Üblicherweise kann er nicht kontrollieren, worauf er sich in seinem dreistündigen Zeitfenster konzentriert. Im Frühjahr 2019 hat er beispielsweise mehrere Monate nur damit verbracht, Bücher zu lesen.

Er verspürte den Drang, die Werke, die er aus seiner Jugend kannte (darunter die »Selbstbetrachtungen« des römischen Kaisers Mark Aurel sowie einige Romane von Hermann Hesse) wieder aufzugreifen – und so tat er es. »Ich habe in der Zeit nicht gearbeitet«, sagt Huh. »Das ist

ein echtes Problem.« Inzwischen hat er sich mit seiner Eigenart abgefunden. »Früher habe ich versucht, dagegen anzukämpfen. Aber dann habe ich gelernt, den Versuchungen nachzugeben.« Er konnte sich noch nie zu etwas zwingen oder ein klar abgestecktes Ziel verfolgen – selbst bei Dingen, die ihm Spaß bereiten. Besonders schwierig sei es für ihn, seine Aufmerksamkeit von einer Sache zu einer anderen zu lenken. »Ich glaube, Absicht und Willenskraft werden stark überbewertet«, sagt er.

Das war schon in seiner Jugend so. Huh wurde 1983 in Kalifornien geboren, wo seine Eltern gerade ihr Studium abschlossen. Als Huh ein Jahr alt war, zog die Familie zurück nach Südkorea, dort unterrichtete sein Vater Statistik, seine Mutter lehrte Russisch und Literatur. Die Schule bereitete Huh keinerlei Spaß. Er liebte es zwar, zu lernen, konnte sich im Klassenraum aber nicht konzentrieren. Stattdessen zog er es vor, auf eigene Faust zu lesen. In der Grundschule verschlang er beispielsweise alle zehn Bände einer Enzyklopädie über Lebewesen. Einen weiteren Zeitvertreib bot ein Berg in der Nähe seines Wohnorts, den er gern erkundete.

ÄSTHETIK Jahrelang suchte June Huh nach Schönheit in der Welt. Die Poesie konnte ihm nicht geben, was er suchte, doch in der Mathematik wurde er fündig.



Nach einem schlechten Mathetest lehnte Huh es ab, sich mit dem Fach zu beschäftigen. Als das seinem matheaffinen Vater auffiel, versuchte er, seinen Sohn mit einem Übungsbuch zu unterrichten. Aber statt die Rechenaufgaben zu lösen, schrieb June Huh bloß die Lösungen von der Rückseite des Werks ab. Als sein Vater das bemerkte und die Seiten herausriss, ging Huh in eine örtliche Buchhandlung und kopierte die Antworten von dort. »An diesem Punkt hat er aufgegeben«, erinnert sich Huh.

Als er 16 Jahre alt war, wollte er sich voll und ganz seinen Gedichten widmen. Er schrieb über die Natur und seine eigenen Erfahrungen. Er plante, sein Meisterwerk zu vollenden, bevor er zur Universität gehen musste. »Daraus ist nichts geworden«, sagt er lachend. Später erkannte er auch, warum: Er wollte jemand sein, der große Gedichte verfasst, aber er hatte keinen Spaß daran, sie tatsächlich zu schreiben.

Als Huh 2002 an die Nationale Universität von Seoul kam, fühlte er sich abgehängt. Er liebäugelte kurz mit dem Gedanken, Wissenschaftsjournalist zu werden, und entschied sich, Astronomie und Physik als Hauptfächer zu belegen. Häufig schwänzte er den Unterricht und musste deshalb mehrere Kurse wiederholen. »Ich war verloren«, sagt er. »Ich wusste nicht, was ich machen wollte. Ich wusste nicht, worin ich gut war.« Wie sich später herausstellte, liegt sein Talent in der Mathematik – doch das fand er nur zufällig heraus.

Es dauerte sechs Jahre, bis Huh seinen Abschluss machte. In seinem letzten Jahr besuchte er einen Kurs bei dem berühmten japanischen Mathematiker Heisuke Hironaka, der damals eine Gastprofessur an der südkoreanischen Universität antrat. Der Mittsiebziger war in der Fachwelt äußerst renommiert, unter anderem hatte er 1970 die Fields-Medaille erhalten. Hironaka war charismatisch, und Huh geriet schnell in seinen Bann.

Mathematische Forschung in Echtzeit

Aber es war nicht nur der Charme des Professors, der Huh sofort faszinierte, es war ebenso die Mathematik selbst. Der Kurs sollte eigentlich in die algebraische Geometrie einführen, die sich mit Lösungen bestimmter Gleichungen und ihren geometrischen Eigenschaften beschäftigt. Stattdessen sprach Hironaka über seine eigene Forschung auf einem Teil dieses Gebiets, der so genannten Singularitätstheorie. »Im Grunde hielt er einen Vortrag über das, worüber er am Tag zuvor nachdachte«, sagt Huh. Er stellte ausgewählte Probleme und Beweise vor, die nicht immer korrekt waren. Der Kurs mit anfangs 200 Teilnehmern schrumpfte schnell; einige Wochen später waren nur noch fünf Studenten übrig, darunter Huh.

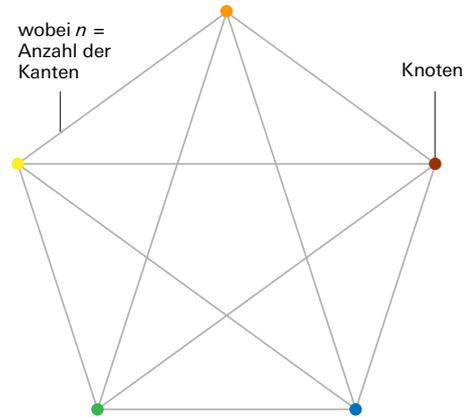
Zum ersten Mal erlebte er, wie mathematische Forschung in Echtzeit ablief. Hironakas Vorlesungen waren nicht so ausgefeilt wie andere Veranstaltungen, wo alles stromlinienförmig war und die Antworten bereits feststanden. Huh liebte die Spannung, den Versuch, etwas zu tun, von dem niemand wirklich wusste, wie es geht – und die Freiheit, die mit dem Nichtwissen einherging, die Überraschungen, die möglich wurden. Der Student entdeckte, dass diese Art von Mathematik ihm das geben konnte, was

Farben zählen

Als Doktorand hat der Mathematiker June Huh bewiesen, dass chromatische Polynome, die mit Graphen zusammenhängen, bestimmte Eigenschaften erfüllen.

Chromatische Polynome

Wie viele Möglichkeiten gibt es, einen Graphen so einzufärben, dass verbundene Punkte unterschiedlich koloriert sind? Das chromatische Polynom liefert die Antwort in Abhängigkeit der Anzahl n der Farben.



Das chromatische Polynom dieses Graphen lautet:

$$C = n^5 - 10n^4 + 35n^3 - 50n^2 + 24n$$

wobei n = Anzahl der Kanten

Mit weniger als fünf Farben lässt sich der Graph nicht färben und die Gleichung ergibt null.

Zum Beispiel für $n = 3$: ...

$$(3)^5 - 10(3)^4 + 35(3)^3 - 50(3)^2 + 24(3) = 0$$

Mit fünf Farben lässt sich der Graph auf 120 verschiedene Weisen kolorieren:

$$(5)^5 - 10(5)^4 + 35(5)^3 - 50(5)^2 + 24(5) = 120$$

Was June Huh bewiesen hat:

Die Beträge der Koeffizienten eines chromatischen Polynoms bilden eine Folge:

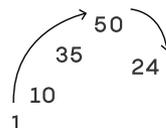
$$1n^5 - 10n^4 + 35n^3 - 50n^2 + 24n$$

$$\begin{array}{cccccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 1 & 10 & 35 & 50 & 24 \end{array}$$

Die Folge ist:

unimodal

Sie steigt erst an und fällt dann ab

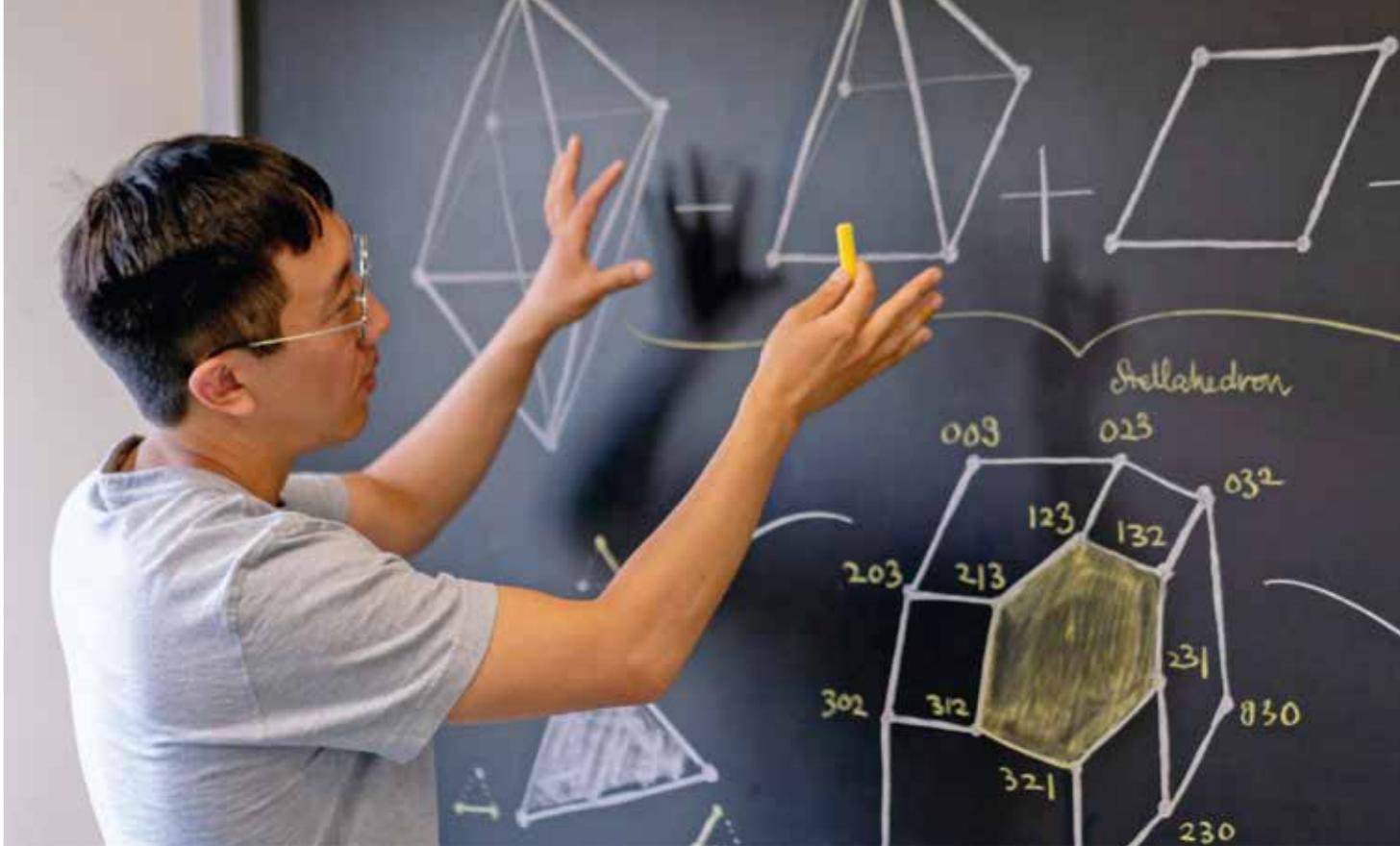


logarithmisch konkav:

Für drei aufeinander folgende Zahlen x, y, z gilt: ...

$$y^2 \geq xz$$

$$35^2 \geq 10 \times 50$$



MATROIDE June Huhs Arbeit beschäftigt sich unter anderem mit Matroiden – abstrakten Objekten, die sich teilweise aus geometrischen Figuren erzeugen lassen.

die Poesie nie vermochte: die Fähigkeit, nach Schönheit in der Welt um ihn herum zu suchen. Im Gegensatz zu seiner Zeit als Möchtegerndichter motivierte ihn nun nicht mehr der Wunsch nach Anerkennung. Er wollte einfach nur Mathe machen.

Hironaka, der das vielleicht erkannte, nahm Huh unter seine Fittiche. In den Semesterferien folgte Huh dem Professor nach Japan, wohnte mit ihm in Tokio und Kyoto, trug seine Tasche, teilte die Mahlzeiten mit ihm und diskutierte über Mathematik. Hironaka empfahl seinem Schützling, sich für eine Promotion in den USA zu bewerben. Huh schrieb etwa ein Dutzend Universitäten an, doch wegen seiner mittelmäßigen akademischen Ergebnisse wurde er von allen bis auf eine abgelehnt. 2009 begann er seine Doktorarbeit an der University of Illinois in Urbana-Champaign.

Trotz der vielen Herausforderungen – das Leben in einem neuen Land sowie die Trennung von seiner Partnerin Kim, die in Seoul blieb, um dort ebenfalls in Mathematik zu promovieren – schätzte Huh seine Erfahrungen an der Graduiertenschule in der Ferne. Denn so konnte er sich ganz dem Fach widmen, und er genoss die Freiheit der Forschung, die ihn von Anfang an angezogen hatte.

Während seiner Promotion stach er schnell heraus: Er bewies eine Hypothese der Graphentheorie, die Mathematiker seit vier Jahrzehnten beschäftigt hatte. Das als »Read-Vermutung« bekannte Problem hat mit Polynomen (Gleichungen wie $n^4 + 5n^3 + 6n^2 + 3n + 1$) zu tun, die mit Netzwerken zusammenhängen. Angenommen, Sie möchten die

Knoten eines Graphen so kolorieren, dass keine zwei benachbarten Punkte gleichfarbig sind. Wenn man eine bestimmte Anzahl von Farben zur Verfügung hat, gibt es viele Möglichkeiten, das Netzwerk bunt zu gestalten. Die Gesamtzahl lässt sich mit einer Gleichung berechnen, die als chromatisches Polynom bezeichnet wird.

Dabei gehorchen die Koeffizienten (jene Zahlen, die vor den Variablen im Polynom stehen) unabhängig vom Graphen immer bestimmten Mustern. Sie sind stets unimodal, das heißt, die Zahlenwerte steigen erst an und fallen dann wieder ab. Das kann man am vorigen Beispiel $n^4 + 5n^3 + 6n^2 + 3n + 1$ erkennen: Die Beträge der Koeffizienten (1, 5, 6, 3, 1) bilden eine unimodale Folge. Außerdem sind die Werte »logarithmisch konkav«: Für drei beliebige aufeinander folgende Zahlen ist das Quadrat der mittleren mindestens so groß wie das Produkt der seitlichen Werte. Im obigen Polynom gilt etwa für die Folge 5, 6, 3 folgendes: $6^2 \geq 5 \cdot 3$.

Ein Unbekannter liefert eine unerwartete Lösung

Obwohl alle untersuchten chromatischen Polynome diese zwei Eigenschaften besitzen, hatten Mathematiker große Mühe, zu beweisen, dass es sich um eine allgemein gültige Regel handelt. Doch dann, scheinbar aus dem Nichts, tauchte Huh auf und löste das Problem – ganz nebenbei.

Als Masterstudent hatte Huh die in der algebraischen Geometrie wichtigsten Studienobjekte kennen gelernt: algebraische Varietäten. Das sind geometrische Formen, die durch bestimmte Gleichungen definiert sind. Interessanterweise hängen einige der Varietäten mit Zahlenfolgen zusammen, die bekanntermaßen logarithmisch konkav sind. Das alles wusste Huh nur, weil er den Vorlesungen von Hironaka aufmerksam gelauscht hatte. Der damalige Doktorand kam schließlich auf die Idee, eine algebraische Varietät zu konstruieren, deren zugehörige Folge den Koeffi-

zienten eines chromatischen Polynoms entspricht, das wiederum mit bestimmten Graphen zusammenhängt. So konnte er beweisen, dass chromatische Polynome immer logarithmisch konkav und unimodal sind.

Seine Lösung verblüffte die mathematische Fachwelt. Die renommierte University of Michigan, die ursprünglich Huhs Bewerbung abgelehnt hatte, überredete ihn, bei ihr fertig zu promovieren. Seine Leistung war nicht nur deshalb beeindruckend, weil er die jahrzehntealte Vermutung von Read gelöst hatte. Er hatte gezeigt, dass sich hinter den kombinatorischen Eigenschaften von Netzwerken etwas viel Tieferes – und Geometrisches – verbarg.

Zudem waren seine Kollegen von seinem Auftreten beeindruckt. Seine Vorträge auf Konferenzen waren zugänglich und konkret; im Gespräch dachte er sowohl tiefgründig als auch breit gefächert über die Konzepte, mit denen er arbeitete, nach. »Er war unglaublich reif für einen Doktoranden«, erinnert sich der Mathematiker Matthew Baker vom Georgia Institute of Technology. Laut Mircea Mustață, Huhs Doktorvater an der University of Michigan, brauchte er fast keine Betreuung. Im Gegensatz zu den meisten anderen Kommilitonen hatte er bereits ein festes Programm im Kopf und sogar Ideen, wie er es verfolgen wollte. »Er war mehr wie ein Kollege«, sagt Mustață. Nach diesem ersten Durchbruch ließ der nächste Erfolg nicht lange auf sich warten. Denn Graphen sind ein Spezialfall allgemeinerer Strukturen, so genannter Matroide. Netzwerke stellen dar, wie Daten (Knoten) zusammenhängen – ganz ähnlich ist es mit Matroiden. Dazu kann man sich Punkte in einer zweidimensionalen Ebene vorstellen. Wenn drei oder mehr von ihnen auf einer Geraden liegen, dann sind sie »linear abhängig«. Matroide erfassen Begriffe wie Abhängigkeit und Unabhängigkeit in allen möglichen Kontexten – von Graphen über Vektorräume bis hin zu algebraischen Körpern.

So wie man Netzwerken chromatische Polynome zuordnen kann, gibt es »charakteristische« Polynome, die mit Matroiden verbunden sind. Es wurde vermutet, dass deren Koeffizienten ebenfalls logarithmisch konkav sind. Allerdings lassen sich die Techniken, die Huh zum Nachweis von Reads Vermutung verwendet hatte, nur auf eine sehr kleine Klasse von Matroiden anwenden.

Gemeinsam mit dem Mathematiker Eric Katz von der Ohio State University gelang es Huh, diese Klasse zu erweitern. Die Forscher folgten dabei einer Art Rezept. Wie in Huhs erster Arbeit bestand die Strategie darin, eine algebraische Varietät aus dem Matroid zu konstruieren. Dann mussten sie jedoch einen Schritt weiter gehen und daraus einen so genannten Kohomologiering bilden. Diese Objekte codieren die wesentlichen Merkmale eines geometrischen Raums, in dem Fall der Varietät. Die Eigenschaften des Kohomologierings ermöglichten es, zu beweisen, dass die zugehörigen charakteristischen Polynome logarithmisch konkav sind.

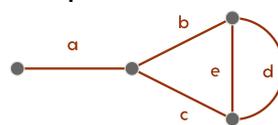
Es gab nur ein Problem: Die meisten Matroide haben keine geometrische Grundlage. Das heißt, man kann ihnen keine algebraische Varietät zuordnen. Doch Huh und Katz fanden zusammen mit ihrem Kollegen Karim Adiprasito von der Universität Kopenhagen einen Weg, den Schlenker über

die Varietäten zu überspringen und den Kohomologiering direkt aus einem Matroiden abzuleiten. Das war äußerst erstaunlich: »Man braucht gar keinen Raum, um Geometrie zu machen«, so Huh. Anschließend zeigten die drei Mathematiker mit einer Reihe neuer Methoden, dass sich der Kohomologiering trotzdem so verhält, als ob er aus einer algebraischen Varietät hervorginge – auch wenn das nicht der Fall ist. Auf diese Weise bewiesen sie, dass alle charakteristischen Polynome von Matroiden logarithmisch konkav

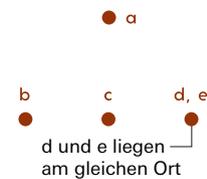
Was ist ein Matroid?

Matroide sind Strukturen, die das abstrakte Konzept von Abhängigkeit und Unabhängigkeit darstellen. Das spielt in vielen Bereichen eine wichtige Rolle, etwa für Graphen und Punktmengen.

Graph



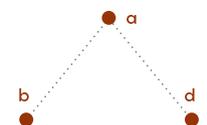
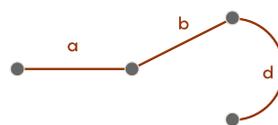
Punkte in einer Ebene



Unabhängigkeit

Unabhängige Mengen von Kanten bilden keine Schleife

In einer unabhängigen Punktmenge liegen nicht mehr als zwei Punkte auf derselben Geraden

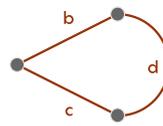


Die Untermenge {a,b,d} ist unabhängig

Abhängigkeit

Abhängige Mengen von Kanten bilden eine Schleife

Wenn drei oder mehr Punkte auf einer Geraden liegen, ist die Menge dieser Punkte abhängig



Die Untermenge {b,c,d} ist abhängig

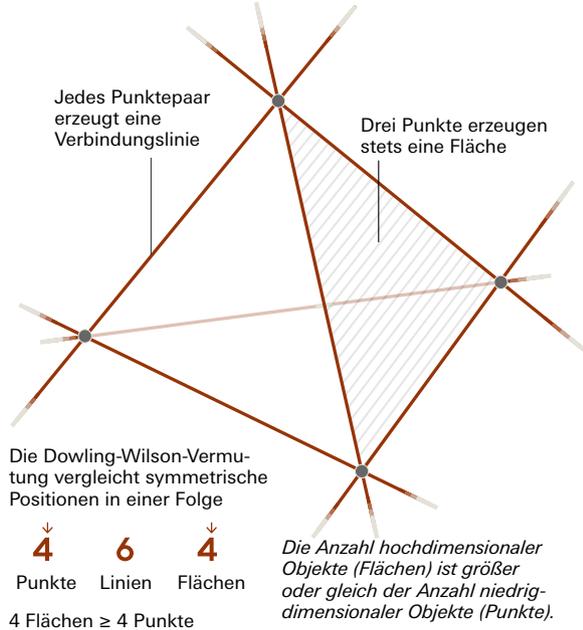
Diese Fälle erzeugen das gleiche Matroid

Wenn gewisse Bedingungen erfüllt sind, besteht das Matroid aus den Elementen der Menge {a,b,c,d,e} und einer Sammlung aller unabhängigen Untermengen.

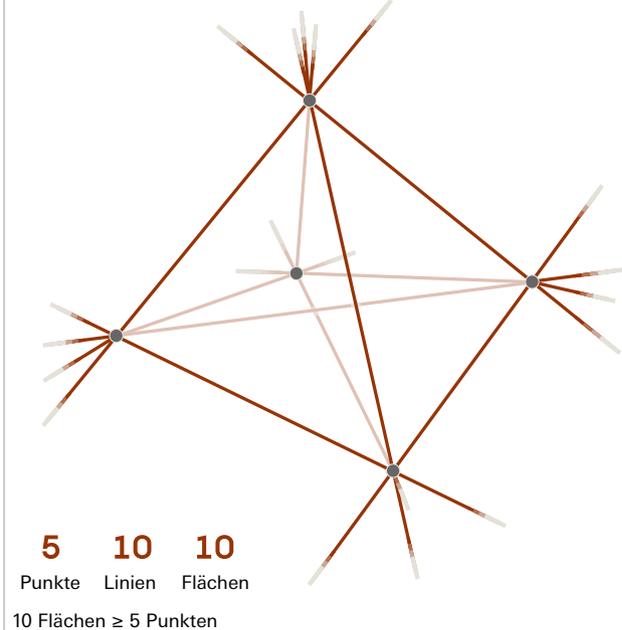
Die Dowling-Wilson-Vermutung

Die Dowling-Wilson-Vermutung handelt von den Eigenschaften willkürlich im Raum verteilter Punkte.

vier Punkte im dreidimensionalen Raum



fünf Punkte im dreidimensionalen Raum



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

sind – und lösten damit das verallgemeinerte Read-Problem, das als Rota-Vermutung bekannt ist.

Trotz all der Präzision, die die Arbeit erfordert, ist die Konstruktion eines geeigneten Kohomologierings mit viel Rätselraten verbunden. Das war ein Aspekt, der Huh besonders gefiel. »Es gibt keinen Leitsatz, kein klar definiertes Ziel«, sagt er. »Die Arbeit hat mich dazu veranlasst, das Konzept der Geometrie grundlegend zu überdenken.« Das führte ihn zu einer Reihe anderer Aufgaben, bei denen er diese Idee weiter verfolgte. Dadurch konnte er eine noch breitere Palette von Methoden entwickeln, um geometrische Techniken in völlig neuen Zusammenhängen anzuwenden.

Huh spricht langsam, hält oft inne und wählt seine Worte sorgfältig. Er hat eine ruhige, fast meditative Art. Bei seiner Arbeit geht er ebenso bedächtig vor. Sein Kollege Botong Wang von der University of Wisconsin, Madison, war überrascht, als er Huh das erste Mal traf. »Ich habe in Mathematikwettbewerben die Erfahrung gemacht, dass man schnell sein muss«, sagt er. »Aber June ist das Gegenteil davon. Wenn man fünf Minuten lang mit ihm über ein Rechenproblem spricht, könnte man meinen, er würde keine Prüfung bestehen. Er ist sehr langsam.« So langsam, dass Wang zunächst dachte, sie würden zu viel Zeit mit einfachen Problemen verschwenden, die sie bereits verstanden. Zum Beispiel als Graham Denham von der Western University in Ontario zusammen mit Ardila-Mantilla und Huh einen 50-seitigen Beweis für ein Problem fertig gestellt hatte, das eng mit der Rota-Vermutung zusammen-

hängt. Anstatt ihr Ergebnis direkt zu veröffentlichen, meinte Huh, sie sollten sich mehr Zeit nehmen, um einen besseren Ansatz zu finden. Er war überzeugt, dass es eine schönere Erklärung gäbe und dass man die Dinge nicht überstürzen sollte. Sie brauchten zwei weitere Jahre dafür. »Zum Glück haben wir alle eine Festanstellung«, sagt Ardila-Mantilla. Denham und er sind sich jedoch einig, dass sich der zusätzliche Aufwand gelohnt hat.

Diese Neigung zur Perfektion gilt nicht nur für Huhs mathematische Arbeit. 2013 beschloss er, Kochen zu lernen. Als absoluter Anfänger nahm er sich vor, jeden Tag das gleiche Gericht zuzubereiten (Pasta mit Öl), bis es perfekt war. Sechs Monate lang hat er genau das getan. Laut seiner Frau Kim ist es bis heute das Einzige, das er kochen kann.

Routine und ein Streben nach Perfektion

Huhs ganzes Leben ist auf Routine aufgebaut. »Fast alle meine Tage sind gleich«, sagt er. Er hat Probleme mit dem Einschlafen und wacht in der Regel gegen drei Uhr morgens auf. Dann geht er ins Fitnessstudio, frühstückt mit seiner Frau und seinen beiden Söhnen und bringt seinen Ältesten zur Schule, bevor er in das Büro in Princeton fährt.

Sein Arbeitsplatz ist spärlich bestückt, praktisch leer. Es gibt einen großen Schreibtisch, eine Couch zum Schlafen – Huh macht normalerweise später am Morgen ein Nickerchen – und eine Yogamatte, die ebenfalls zum Hinlegen dient. Keine Bücher, nur ein paar Stapel Papiere, die ordentlich in einem Regal an einer Wand stehen. Jeden Tag macht

er nach dem Mittagessen einen langen Spaziergang und kehrt dann in sein Büro zurück, um noch ein wenig zu arbeiten (es sei denn, er hat sein Drei-Stunden-Pensum bereits erfüllt), bevor er nach Hause geht. Den Rest des Abends verbringt er mit seiner Familie.

Alles, was von dieser Routine abweicht, ist für Huh sehr anstrengend. Als er während seiner Doktorarbeit nach Michigan zog, konnte er sich kaum etwas anderem als der Mathematik widmen. Allerdings war er für den kalten Winter im Norden der USA nicht gerüstet – er hatte nur wenige Habseligkeiten und brauchte eine dickere Decke. Eine Fahrt zu einem großen Einkaufszentrum zu planen, kam ihm jedoch extrem kompliziert vor. »Das überstieg einfach meine Grenzen«, erinnert er sich. »Ich wollte meine Energie nicht darauf verschwenden, herauszufinden, wie ich von hier nach dort komme.« Stattdessen ging er zu einer nahe gelegenen Drogerie, kaufte zehn kleine Quadrate aus Stoff und tackerte sie zu einer Decke zusammen.

In seiner Arbeit machen sich die wiederkehrenden Abläufe bezahlt. Immer wieder kommt er auf Fragen über logarithmische Konkavität oder ähnliche Konzepte zurück. So konnte er mit Wang im Jahr 2017 die so genannte Dowling-Wilson-Vermutung beweisen. Dabei geht es um willkürlich verteilte Punkte, wobei jedes Punktpaar durch eine Linie verbunden ist. Wenn etwa vier Punkte in der Ebene liegen, kann man sie durch sechs Striche paarweise verbinden. Die Mathematiker Paul Erdős und Nicolaas Govert de Bruijn haben bereits 1948 gezeigt, dass es immer mindestens genauso viele Linien wie Punkte gibt (es sei denn, alle Punkte liegen auf einer Geraden).

Die Dowling-Wilson-Vermutung verallgemeinert diese Idee. Doch statt um Punkte in einer Ebene geht es um Punkte in einem hochdimensionalen Raum. Außerdem beschränkt man sich nicht nur auf die Anzahl aller Linien, die Punktpaare verbinden, sondern betrachtet auch die Ebenen, die von drei Punkten aufgespannt werden, ebenso wie die dreidimensionalen Unterräume, die sich aus vier Punkten ergeben, und so weiter. Man kann die so entstehende Zahlenfolge untersuchen: Anzahl der Punkte, der Linien, der Ebenen und der jeweiligen Unterräume. Dabei lässt sich eine gewisse Symmetrie zwischen dem ersten und dem letzten, dem zweiten und dem vorletzten Wert und so weiter erkennen. Wie sich herausstellt, ist in diesen Paaren die zum jeweils höherdimensionalen Raum gehörende Zahl mindestens genauso groß wie jene, die dem niedrigerdimensionalen Konstrukt entspricht. Huh und Wang konnten zeigen, dass die Folge tatsächlich unimodal ist. Nun bleibt noch herauszufinden, ob sie zudem logarithmisch konkav ist.

Für ihren Beweis haben die zwei Mathematiker Methoden genutzt, die Huh während seiner Arbeit an der Rota-Vermutung entwickelt hatte. Wieder beschäftigten sie sich mit Matroiden, algebraischen Varietäten und Kohomologieringen. Doch in diesem Fall arbeiteten sie mit einer ganz speziellen Art von geometrischen Räumen, die so genannte Singularitäten enthalten. Das sind isolierte Punkte, die den Eigenschaften der übrigen Struktur widersprechen: zum Beispiel, wenn eine glatte Kurve einen Knick hat. Solche Singularitäten erschweren die Arbeit ungemein. So wird es

etwa kompliziert, bestimmte Merkmale ihrer Kohomologiering zu beweisen.

Während der fünf Jahre, in denen sich die beiden Forscher mit der Aufgabe beschäftigten, suchte Huh nach einer Möglichkeit, endgültig mit der Geometrie zu brechen. Ein großer Teil seiner bisherigen Arbeit bestand darin, die passende Kohomologie zu konstruieren, die ein bestimmtes Problem erforderte. War das gelungen, musste man allerdings noch beweisen, dass die Kohomologie gewisse Eigenschaften erfüllt – was ebenfalls mehrere Jahre dauern kann. 2020 hat Huh zusammen mit seinem Kollegen Petter Brändén von der Königlichen Technischen Hochschule in Stockholm eine neue Theorie entwickelt, um diese langwierige Prozedur zu umgehen. Mit ihrem Ansatz konnten sie zudem die »starke Mason-Vermutung« lösen, die von der Anzahl unabhängiger Mengen in Matroiden handelt.

Andere Mathematiker haben das Ergebnis inzwischen verwendet, um die Rota-Vermutung auf einfachere Weise zu beweisen. Zudem öffnen die Techniken die Tür zu völlig neuen Problemen – und könnten erklären, warum all die untersuchten Systeme mit logarithmisch konkaven Folgen zusammenhängen. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/topologie](https://www.spektrum.de/t/topologie)



MATJAZ SLJANIC / GETTY IMAGES / ISTOCK

QUELLEN

- Ardila, F. et al.:** Lagrangian geometry of matroids. ArXiv 2004.13116, 2020
- Braden, T. et al.:** Singular Hodge theory for combinatorial geometries. ArXiv 2010.06088, 2020
- Brändén, P., Huh, J.:** Lorentzian polynomials. Annals of Mathematics 192, 2020
- Huh, J., Wang, B.:** Enumeration of points, lines, planes, etc. Acta Mathematica 218, 2017
- Huh, J., Katz, E.:** Log-concavity of characteristic polynomials and the Bergman fan of matroids. Mathematische Annalen 354, 2012
- Huh, J.:** Milnor numbers of projective hypersurfaces and the chromatic polynomial of graphs. Journal of the American Mathematical Society 25, 2012



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »He Dropped Out to Become a Poet. Now He's Won a Fields Medal« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

VORSCHAU



AGSANDREW / STOCK.ADRIVE.COM

EINE NEUE BASIS FÜR DIE MATHEMATIK

Das Fach Mathematik auf eine andere Grundlage stellen: Nichts Geringeres haben sich die beiden jungen Ausnahmewissenschaftler Peter Scholze und Dustin Clausen vorgenommen. Mit ihrem revolutionären Ansatz verdrängen sie einen allgegenwärtigen Grundbaustein, der fast alle Bereiche des Fachs durchdringt, durch »verdichtete Mengen« – und begeistern damit die Fachwelt. Dafür müssen sie aber praktisch alle bisherigen Konzepte von Grund auf neu aufziehen.



YUMMY PIC / GETTY IMAGES / ISTOCK

FLEISCH VOM ACKER

Die Massentierhaltung hat einen untragbaren ökologischen Fußabdruck und ist zudem ethisch problematisch. Immer stärker wächst die Nachfrage nach Fleisch- und Milchalternativen. Forschungsteams rund um den Globus arbeiten an Ersatzprodukten, etwa auf Basis pflanzlicher Proteine.



MARK ROSS STUDIO / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2022

SELTSAME BLITZE AUS DEM KOSMOS

Immer wieder ereignen sich rätselhafte Ausbrüche von Radiostrahlung am Himmel. Das Phänomen ist noch nicht lange bekannt, doch inzwischen läuft die Ursachenforschung mit spezialisierten Teleskopen auf Hochtouren.



VENTURISID / GETTY IMAGES / ISTOCK

STREIT UM JERUSALEM

Vergangenheit und Gegenwart liegen in Jerusalem eng beieinander. Für die Archäologie ist das ein Problem: Denn jahrtausendealte Funde sollen Bibelgeschichten und das Existenzrecht Israels bezeugen.

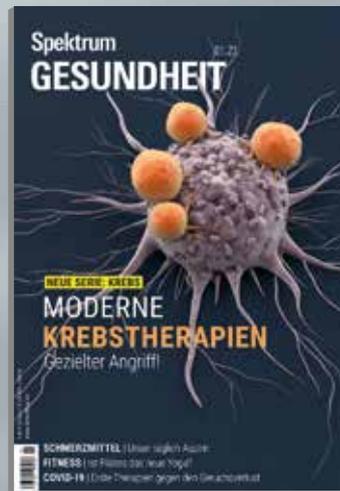
NEWSLETTER

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

Unsere Neuerscheinungen

Ob Naturwissenschaften, Raumfahrt oder Psychologie:
Mit unseren Magazinen behalten Sie stets den Überblick
über den aktuellen Stand der Forschung



Informationen und eine Bestellmöglichkeit
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:
service@spektrum.de | Tel. 06221 9126-743
[Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen](https://www.spektrum.de/aktion/neuerscheinungen)

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

[Spektrum.de/aktion/wocheabo](https://www.spektrum.de/aktion/wocheabo)

