

Spektrum

der Wissenschaft

Die Einstein-Kachel

Erfolgreiches
Ende einer
jahrzehntelangen
Suche

SARS-COV-2 **Woher stammt das Coronavirus?**
ENERGIEWENDE **Der große Umbau der Stromnetze**
THERMODYNAMIK **Quantenregeln für die Unordnung**

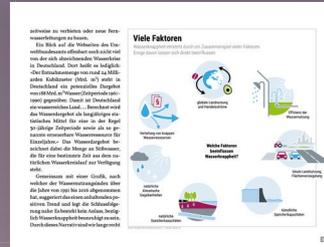
9,80 € (D/A/L) · 14,- sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



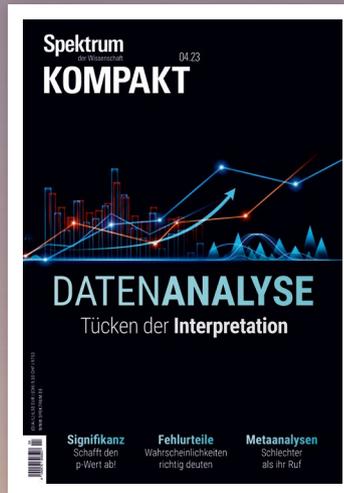
Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



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 400 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)

Eine ganz besondere Kachel

Im Frühling 2023 hatten wir leider einen Wasserschaden im Bad und mussten nach dem Trocknen renovieren. Letztlich einigten wir uns auf simple große und viereckige Fliesen, die verlegt wurden, ohne ein besonderes Muster zu bilden. Wir sind damit aber trotzdem sehr zufrieden. Dabei wäre aus mathematischer Sicht auch etwas völlig anderes möglich: Mit der 13-eckigen so genannten Einstein-Kachel lässt sich eine Ebene lückenlos bedecken, ohne dass sich das entstehende Muster jemals regelmäßig wiederholt.

Einem Handwerker müsste man wahrscheinlich viel Geld bezahlen, damit er die kompliziert zugeschnittenen Fliesen entsprechend verlegen würde, aber aus mathematischer Sicht ruft die neu gefundene Form Begeisterung hervor. Denn derartige Fliesenmuster gehören zu den schwierigsten Problemen des Fachs. Es ist also kein Wunder, dass es Jahrzehnte gedauert hat, bis der Durchbruch zur Einstein-Kachel gelang. Und vielleicht hat es dafür tatsächlich einen Laien wie David Smith gebraucht: Der pensionierte Druckanlagentechniker stieß im November 2022 auf die inzwischen berühmt gewordene Lösung und informierte danach den mathematikbegeisterten Informatiker Craig Kaplan von der University of Waterloo, der die weitere Bekanntgabe in der wissenschaftlichen Community ins Rollen brachte. Wie die Geschichte im Detail ihren Anfang nahm und was die Entdeckung für die Mathematik bedeutet, beschreibt meine Kollegin Manon Bischoff ab S. 12 in unserem Titelbeitrag.

Sehr viel praxisnäher als die Einstein-Kachel ist die Suche nach einem optimalen und robusten Stromnetz. In Deutschland stehen wir beispielsweise gegenwärtig immer wieder vor dem Problem, dass die vorhandenen Trassen nicht ausrei-

chen, um mittels Windenergie gewonnenen Strom aus dem Norden der Republik zu den großen industriellen Abnehmern im Süden zu transportieren. Stattdessen muss er Umwege über Osteuropa nehmen, billig exportiert werden – oder die Erzeugung wird gar heruntergefahren, um das Netz stabil zu halten. Gleichzeitig muss dann etwa in Baden-Württemberg teurer Strom aus der Schweiz importiert werden, weil es sonst hier zu einem Spannungsabfall käme.

Für die Energiewende ist der Ausbau entsprechender Netze daher unabdingbar. Wie ein derartiges Grid aussehen könnte, finden Sie ab S. 70 im Auftakt zu unserer dreiteiligen Serie über die Energiewende. In den folgenden Ausgaben finden Sie dann Beiträge zu den seit Monaten heiß diskutierten Wärmepumpen sowie zur Energie aus Biomasse, die ebenfalls regelmäßig in der Kritik steht.

Eine spannende Lektüre wünscht



Daniel Lingenhöhl

Chefredakteur

lingenhoehl@spektrum.de

In dieser Ausgabe

Daniel T. Ksepka

Der US-Wirbeltierpaläontologe stellt ab S. 40 die vermeintlich grobschlächtigen Dinosaurier als fürsorgliche Eltern dar.



Philip A. Rea

Der Biologe erzählt ab S. 56, wie ein Molekül durch eine Reihe von Zufällen zum mächtigen Unkrautvernichter aufstieg: Glyphosat.



Marc Timme (links), Benjamin Schäfer

Die beiden Forscher erklären, worauf man beim Ausbau des Stromnetzes achten muss (S. 70).



JULIA WISSWESSER

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

TITELTHEMA

12 **Der doppelte Einstein**

Nach jahrzehntelanger Suche überrascht ein Hobby-Mathematiker die Fachwelt.

Von Manon Bischoff

FORSCHUNG AKTUELL

22 **Krebszellen manipulieren Neurone**

Hirntumoren knüpfen Nervenverbindungen.

24 **KI als Wetterfrosch**

Lernende Modelle machen gute Prognosen.

28 **Euclid öffnet seine Augen**

Das Weltraumteleskop lieferte erste Testbilder.

SPRINGERS EINWÜRFE

31 **Oppenheimers gespaltene Geschichte**

Der Kinofilm schildert einen Fall in Ungnade.

WÄRMELEHRE

32 **Quantenregeln für die Unordnung**

SERIE: QUANTENZEIT (TEIL 2) Moderne Ansätze führen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik auf quantenmechanische Information zurück.

Von Philip Ball

39 IMPRESSUM

PALÄONTOLOGIE

40 **Kinderstube der Dinosaurier**

Immer mehr Funde stellen die Dinosaurier als fürsorgliche Eltern dar, die ihren Nachwuchs behüteten.

Von Daniel T. Ksepka

SCHLICHTING!

48 **Zeit stoppen durch Handauflegen**

Der Fluss in einer Sanduhr lässt sich manipulieren.

MEDIZIN

50 **Woher stammt Sars-CoV-2?**

Studien zufolge könnte der Covid-19-Erreger von Wildtieren auf Menschen übersprungen sein.

Von Tanya Lewis

TITELBILD:
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

55 IM BILD

LANDWIRTSCHAFT

56 **Wie Glyphosat die Welt eroberte**

Der Unkrautvernichter wurde zufällig entdeckt. Seine Wirkweise verstand man erst Jahre später.

Von Philip A. Rea

FREISTETTERS FORMELWELT

65 **Die Physik von Lichtschwertern**

Überraschungen bei Licht-Licht-Wechselwirkungen.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

66 **Was zittert denn da?**

Robert Brown machte im 19. Jahrhundert eine Entdeckung, die man erst 80 Jahre später verstand.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

ENERGIEWENDE

70 **Stromversorgung für die Zukunft**

SERIE: ENERGIEWENDE (TEIL 1) Neue Stromleitungen können manchmal das Stromnetz überlasten.

Von Marc Timme und Benjamin Schäfer

78 LESERBRIEFE

80 FUTUR III

82 VORSCHAU

Weitere Beiträge

Im PDF der Digitalausgabe sowie unter spektrum.de/aktion/zusatzinhalte finden Sie die folgenden zusätzlichen Artikel:

TITELTHEMA II

Überraschung in hohen Dimensionen

REZENSIONEN

12 Der doppelte Einstein

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



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

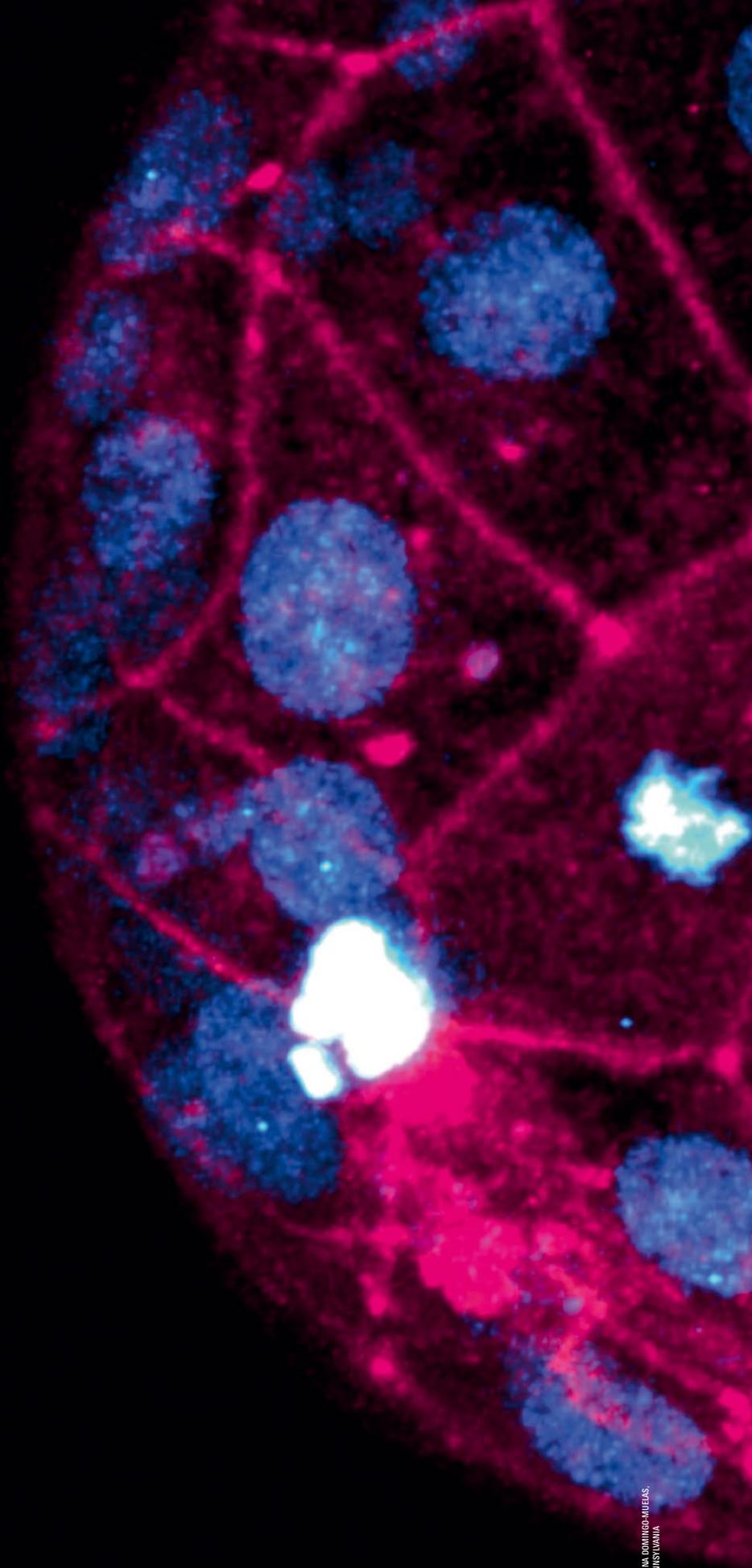
Auf »Spektrum.de« berichtet unsere Redaktion täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

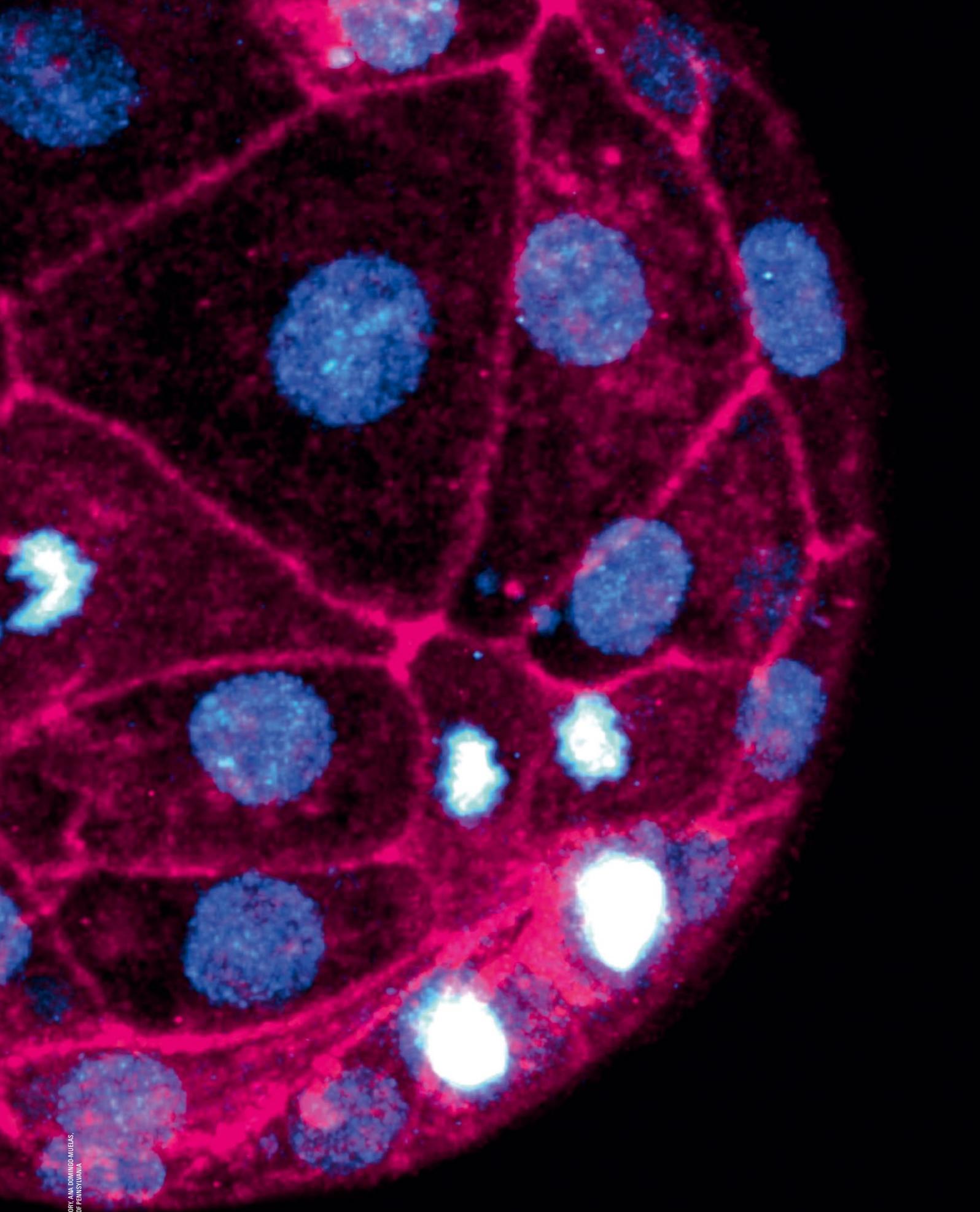
Menschliche Embryonen in Rekordauflösung

Wissenschaftler um Ana Domingo-Muelas von der University of Pennsylvania haben die bisher detailreichsten Bilder früher menschlicher Embryonen aufgenommen. Sie markierten die Zellhaufen mit zwei Fluoreszenzfarbstoffen – einem, der die DNA sichtbar macht (blau), und einem weiteren, der das Zellskelett anfärbt (pink) – und bildeten sie anschließend mit Laser-Scanning-Mikroskopen ab. Eine Klinik für künstliche Befruchtung hatte die Embryonen für die Forschung gespendet.

Die Bilder, die mit der neuen Methode entstehen, bestechen durch nie zuvor gesehene Klarheit. Sie zeigen lebende Embryonen im frühen Entwicklungsstadium, die aus jeweils 60 bis 100 Zellen bestehen. Jede einzelne davon ist deutlich erkennbar. Man kann sogar in Echtzeit verfolgen, wie sich die Zellen teilen, wie sich ihre Chromosomen trennen und welche Erbgutdefekte dabei auftreten. So beobachteten die Forscher, dass Zellen in der äußeren Schicht des Embryos einen Teil ihrer DNA verlieren, während sie sich vervielfältigen. Derlei Prozesse genauer zu verstehen, könnte dazu beitragen, Schwangerschaftskomplikationen und Entwicklungsdefekte zu vermeiden, die aus Chromosomen-Anomalien folgen.

Cell 10.1016/j.cell.2023.06.003, 2023





ROBIN M. SKOBY / ANA DOMINGO-MOLENAS,
UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA

PALÄO BIOLOGIE

Im tödlichen Zweikampf erstarrt

Ein spektakuläres Fossil aus der frühen Kreidezeit dokumentiert, wie vor 125 Millionen Jahren ein Säugetier einen Dinosaurier angriff. Offenbar starben die beiden Tiere, während sie im Zweikampf ineinander verkrallt waren.

Die versteinerten Dinoknochen stammen von einem *Psittacosaurus lujiatunensis*. Er war ein Vogelbeckensaurier, Pflanzenfresser und etwa so groß wie ein stattlicher Hund. Vertreter seiner Gattung gehörten zu den frühesten gehörnten Dinosauriern und lebten auf dem Gebiet des heutigen Asiens.

Bei den Säugerknochen handelt es sich um Überbleibsel eines *Repenomamus robustus* – eines Tiers, das heutigen Dachsen ähnelte. Es zählt zu den größten Säugern der Kreidezeit. Dass es gelegentlich Dinosaurier jagte, wissen Fachleute schon aus früheren Untersuchungen.

Das Fossil hat die Skelette beider Tiere nahezu vollständig bewahrt. Es ist in der Lagerstätte Lujiatun im nordwestlichen China zu Tage gekommen. Dort starben vor langer Zeit sehr viele Tiere auf einen Schlag, als sie von SchlammLawinen und vulkanischem Auswurf verschüttet wurden. Das erklärt den guten Erhaltungszustand der Knochen.

Mit angewinkelten Beinen liegt der *Psittacosaurus lujiatunensis* auf dem Bauch. Auf ihm sitzt das nach rechts verdrehte Skelett des *Repenomamus robustus*. Der Säuger drückte zum Todeszeitpunkt offenbar den Kiefer und ein Bein des Dinosauriers nieder und hatte sich in dessen Seite verbissen. Sehr wahrscheinlich habe hier gerade ein aktiver Angriff stattgefunden, interpretiert ein Forschungsteam um Jordan Mallon vom staatlichen Naturkundemuseum Kanadas den Fund. Dass der Dino schon vorher tot gewesen war und der Säuger sich als Aasfresser an seinem Kadaver zu schaffen machte, halten die Experten



EINGEFRORENER KAMPF Dieses kreidezeitliche Fossil aus der chinesischen Provinz Liaoning hat die ineinander verkrallten Skelette eines Dinosauriers sowie eines Säugers bewahrt. Der Saurier liegt bäuchlings unten, der Säuger sitzt obenauf (links).

für unwahrscheinlich. Dagegen spreche, dass die Körperhaltung beider Tiere klar auf einen Zweikampf hindeute – und dass die Dinoknochen keine Bissspuren aufwiesen, wie sie bei einem herumliegenden Kadaver zu erwarten wären.

Anscheinend waren Dinosaurier nicht ganz die unangefochtenen Herrscher des Erdmittelalters und die damaligen Säugetiere nicht so harmlos, wie dies oft dargestellt wird. Zumindest die kleineren Dinos hatten Angriffe von Säugern sehr wohl zu fürchten, belegt das Fossil aus der Kreidezeit.

Scientific Reports 10.1038/s41598-023-37545-8, 2023

PHYSIK

Kleinster Lichtfleck der Welt

Fachleute gingen lange davon aus, dass ein Lichtfleck nicht kleiner sein könne als die von der Wellenlänge abhängige Beugungsgrenze. Doch spezielle Mikroskopie-Techniken überwand dieses Limit in den 1990er Jahren, und inzwischen lässt sich Licht mit Hilfe von Nanostruktu-

ren auf Areale eingrenzen, die 100-fach kleiner sind als die Strahlungswellenlänge. Nun hat eine Arbeitsgruppe um Limin Tong von der Zhejiang University in China einen nur 0,3 Nanometer schmalen Lichtfleck erzeugt – das ist etwas mehr als der Durchmesser eines einzelnen Wassermoleküls und weniger als ein Tausendstel der Wellenlänge des verwendeten Lichts. Damit hat das Team den bisherigen Rekord um mehr als das Zehnfache unterboten.

Wie die Wissenschaftler berichten, ist das Licht bei ihrer Methode zwischen zwei Nanodrähten gefangen. Diese bestehen aus Einkristallen des Halbleiters Kadmiumselenid, haben einen sechseckigen Querschnitt und sind auf atomarer Größenordnung glatt. Dadurch lassen sie sich trotz ihres Durchmessers von 140 Nanometern so präzise nebeneinander positionieren, dass zwischen ihnen ein Spalt von lediglich einem Nanometer Breite frei bleibt.

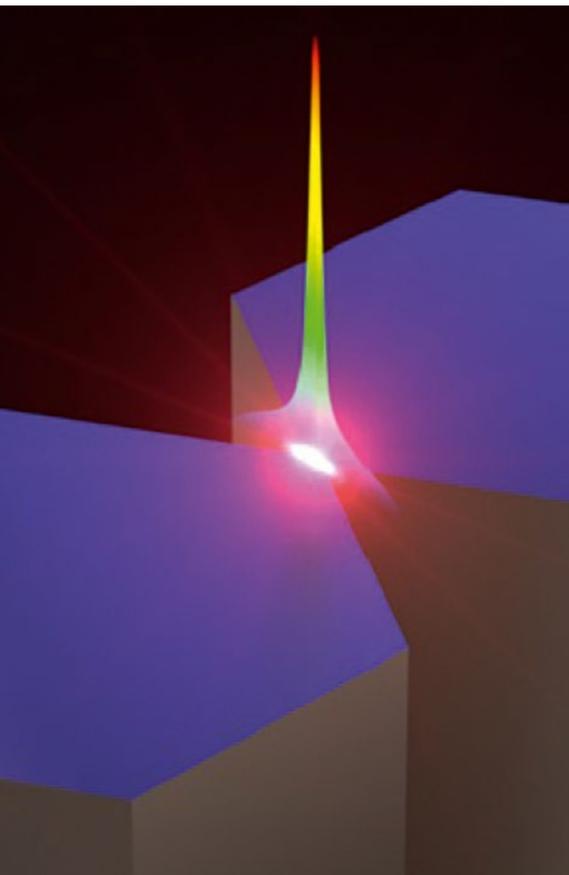
Beide Nanodrähte wirken ähnlich wie Glasfasern und leiten Laserlicht in ihrem Inneren weiter. Die elektrischen und magnetischen Felder des Lichts bilden dabei verschiedene Schwingungsmodi aus. Weil die Drähte so nah beieinanderliegen, wechselwirken die Modi miteinander

und bringen hierbei gemeinsame Zustände hervor.

Einer der Schwingungsmodi erzeugt ein Lichtfeld nicht in den Drähten, sondern zwischen ihnen. Wenn dieses Licht den schmalen Zwischenraum verlässt, ist es auf ein sehr kleines Areal begrenzt und besitzt zudem eine hohe Intensität. Das Lichtfeld sei so stark eingeeengt, dass es selektiv mit einzelnen Atomen oder chemischen Bindungen wechselwirken könne, schreibt das Team. Das helfe sowohl in der Grundlagenforschung als auch beim Entwickeln hochauflösender oder extrem empfindlicher Analyseverfahren.

Advanced Photonics 10.1117/1.AP.5.4.046003, 2023

AUF DEN PUNKT GEBRACHT
Zwischen zwei sechseckigen Halbleiterdrähten haben Physiker einen winzigen Lichtfleck erzeugt. Er ist fast so klein wie ein Wassermolekül (Illustration).



GEOWISSENSCHAFTEN

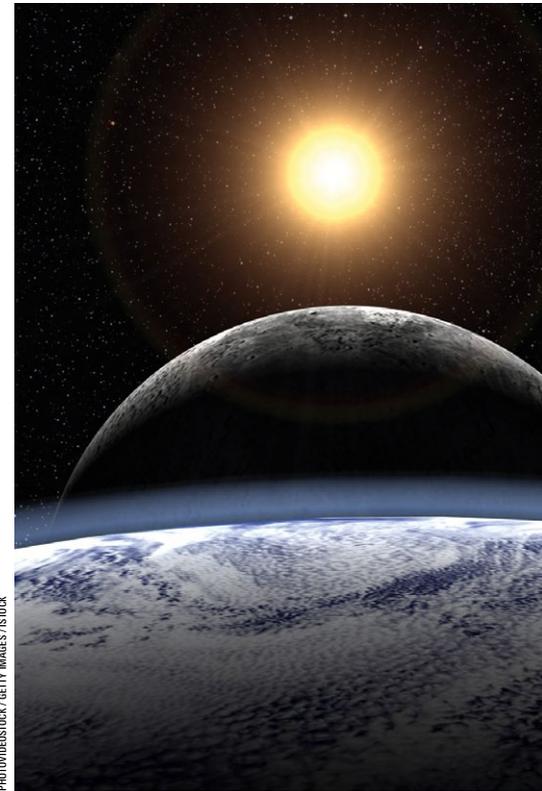
Sonnenstrahlung hielt Tageslänge konstant

Der Tag hat 24 Stunden: Das klingt selbstverständlich, ist es aber nicht. In früheren Erdzeitaltern unterschied sich die Tageslänge erheblich vom heutigen Wert. Eine Forschungsgruppe um Norman Murray von der University of Toronto berichtet nun, die Sonnenstrahlung habe während langer Phasen der Erdgeschichte für eine konstante Tageslänge von rund 20 Stunden gesorgt.

Vor 4,5 Milliarden Jahren benötigte die Erde weniger als zehn Stunden, um sich einmal um sich selbst zu drehen. Dann kollidierte sie mit einem etwa marsgroßen Himmelskörper. Aus den dabei entstehenden Trümmern formte sich der Mond. Seither zieht er mit seinen Gravitationskräften an der Erde und verformt sie, was ihre Rotation allmählich abbremst. Infolgedessen nimmt die Tageslänge zu – derzeit um 1,7 Millisekunden pro Jahrhundert.

Auch die Sonne beeinflusst die irdische Tageslänge, vor allem über thermische Effekte. Das Sonnenlicht trifft auf die Erdatmosphäre und erwärmt sie. Dabei entstehen Gezeitenwellen, die durch die Atmosphäre wandern und den Planeten umrunden. Wenn ihre Umlaufzeit in einem ganzzahligen Verhältnis zur Rotationsdauer der Erde steht, treten Resonanzeffekte auf, welche die Erddrehung beschleunigen.

In dem Zeitraum zwischen zwei Milliarden und 600 Millionen Jahren vor heute glich die von der Sonne verursachte Rotationsbeschleunigung den bremsenden Einfluss des Mondes aus, wie das Team um Murray herausfand. Folglich behielt unser Heimatplanet in jener Phase seine Drehgeschwindigkeit weitgehend bei, und die Tageslänge blieb relativ konstant bei rund 19,5 Stunden. Wäre dieser stabilisierende Effekt nicht eingetreten und hätte die Tageslänge stattdessen immer weiter zugenommen, würden heute von Mitternacht



PHOTO/ISTOCK/GETTY IMAGES/ISTOCK

WECHSELSPIEL Sonne, Mond und Erde stehen in einem komplexen Abhängigkeitsverhältnis. Offenbar hat die Einstrahlung der Sonne sehr lange die Dauer der irdischen Tage konstant gehalten.

zu Mitternacht etwa 60 statt 24 Stunden vergehen, rechnen die Wissenschaftler vor.

In dem damaligen erdgeschichtlichen Abschnitt hätten die Verhältnisse gerade gepasst für einen solchen Resonanzeffekt, erklären Murray & Co. Die Zeit, welche die atmosphärischen Gezeitenwellen für einen Erdumlauf benötigten (etwa zehn Stunden), habe in einem ganzzahligen Verhältnis zur damaligen Tageslänge von rund 20 Stunden gestanden. Heute hingegen ist die Umlaufzeit atmosphärischer Gezeitenwellen nicht mehr mit der Tageslänge von 24 Stunden synchronisiert, weshalb der bremsende Einfluss des Mondes überwiegt.

Science Advances 10.1126/sciadv.add2499, 2023

ARCHÄOLOGIE

Familienstrukturen in der Jungsteinzeit

► Im 6. Jahrtausend v. Chr. erreichten die ersten Bauern Westeuropa. Wie lebten diese Menschen, und wie sahen ihre Familien aus? Einen Einblick darein haben nun Gen- und Isotopenanalysen geliefert. Aus den Überresten von mehreren dutzend Toten, die zwischen 4850 und 4500 v. Chr. auf dem Gräberfeld Gurgy »Les Noisats« in Mittelfrankreich bestattet wurden, hat eine Forschungsgruppe zwei Familienstammbäume rekonstruiert, die jeweils mehrere Generationen umfassen.

Wie das Team um Maité Rivollat von der Universität Gent und Wolfgang Haak vom MPI für evolutionäre Anthropologie in Leipzig berichtet, erbrachten die DNA- und Isotopenuntersuchungen zahlreiche neue Erkenntnisse. Demnach blieben die Männer jener steinzeitlichen Familien

zeitlebens an ihrem Heimatort und heirateten dort, während die Frauen den Wohnort wechselten und sich anderen Familien anschlossen – offenbar ein gegenseitiger Frauenaustausch zwischen den damaligen Gemeinschaften.

Aus den Ergebnissen der Genanalysen puzzelten die Fachleute zwei Stammbäume zusammen. Einer davon, dem 20 Frauen und 44 Männer angehören, erstreckt sich über sieben Generationen. Der andere umfasst sieben Frauen und fünf Männer aus fünf Generationen.

Es zeigte sich, dass von keiner erwachsenen Mutter die Eltern auf dem Gräberfeld bestattet liegen. Darüber hinaus waren die beigesetzten Frauen nur selten mit anderen Angehörigen eines Stammbaums verwandt – und es lassen sich keine erwachsenen Töchter von ihnen auf dem Gräberfeld finden. Dies deutet nach Ansicht der Forscherinnen und Forscher darauf hin, dass die damaligen Frauen zwecks Familiengründung ihre jeweiligen Geburtsorte verließen, um zum Wohnsitz des männlichen Partners zu wandern.

Laut Genanalysen waren einige Frauen untereinander entfernt verwandt. Vermutlich stammten sie aus derselben auswärtigen Gemeinschaft, mit der die Familien von Gurgy möglicherweise eine Art Austauschbündnis pflegten. In Gurgy angekommen, scheinen die Frauen monogame Ehen eingegangen zu sein: Laut den Daten hatten weder sie noch die Männer verschiedene Partnerinnen beziehungsweise Partner. Unter den untersuchten Toten fanden sich zahlreiche Geschwister, aber keine Halbgeschwister.

Ob die sozialen Sitten von Gurgy ebenso in anderen neolithischen Gemeinschaften Westeuropas gepflegt wurden, ist unklar. Der Friedhof von Gurgy »Les Noisats« wirkt, verglichen mit monumentalen Grabanlagen jener Zeit, deutlich schlichter gestaltet. Dort scheint eher die »einfache Bevölkerung« bestattet worden zu sein.

Nature 10.1038/s41586-023-06350-8, 2023



CHEMIE

Kristallstruktur zuverlässig vorhergesagt

► Welche Eigenschaften ein Material besitzt, hängt stark von seinem inneren Aufbau ab: Dieser bestimmt etwa, ob die Substanz elektrischen Strom leitet, durchsichtig ist oder Wärme weitergibt. Ein Team um Matthew Rosseinsky und Paul Spirakis von der University of Liverpool hat jetzt ein Verfahren vorgestellt, um die Struktur kristalliner Stoffe allein aus ihrer chemischen Formel abzuleiten. Das könnte die Suche nach neuen Werkstoffen vereinfachen.

Kristalle sind streng geordnete Materialien. Das Muster, in dem ihre Bausteine angeordnet sind – das können Atome, Ionen oder Moleküle sein –, wiederholt sich periodisch in alle Raumrichtungen. Kennt man den Aufbau der kleinsten sich wiederholenden Einheit, der so genannten Elementarzelle, kennt man die Struktur des gesamten Kristalls. Doch es gibt unzählige Möglichkeiten, wie eine solche Basiseinheit beschaffen sein kann: In chemischen Datenbanken sind heute mehr als 200000 einschlägige Strukturen hinterlegt.

Der Aufbau einer Elementarzelle hängt davon ab, wie viele Bausteine sie besitzt, wie groß diese sind, welche elektrische Ladungen sie tragen und welche Kräfte sie aufeinander ausüben. Theoretisch sollte es möglich sein, aus der chemischen Zusammensetzung eines Stoffs auf seine Kristallstruktur zu schließen.

HEMI KOSKIMEN / GETTY IMAGES / ISTOCK

GRAB IN GURGY Neben einem jungsteinzeitlichen Frauenskelett liegen die Knochen eines Mannes (links unten). Der Pfeil zeigt nach Norden.



STÉPHANE ROTHIER, UNIVERSITY OF BORDEAUX

OPTIMUM-GARANTIE Es gibt zahllose Möglichkeiten, wie sich die Bausteine eines Kristalls (hier: Zirkon) anordnen können. Ein neues Computerverfahren ermittelt die stabilste Anordnung anhand der chemischen Zusammensetzung.

Und zwar, indem man berechnet, bei welcher Bausteinanordnung der Kristall einen Zustand minimaler Energie erreicht. Es gibt dafür schon Computermodelle, doch diese konnten bisher nicht sicher ausschließen, dass es neben bereits gefundenen Energieminima weitere, noch günstigere Anordnungen gibt.

Die Gruppe um Rosseinsky und Spirakis hat eine Methode entwickelt, die es erlaubt, unter zahlreichen lokalen Energieminima das globale Optimum zu finden. Das Verfahren ermittelt zunächst die Energien für einzelne Atomkonfigurationen. Sie dienen als Gitterpunkte in einem Koordinatensystem, in dem jedem Energiewert eine Teilchenkonfiguration zugeordnet ist. So erhält man eine »energetische Landkarte« mit Höhen und Tiefen.

Anschließend erkundet der Algorithmus diese Landkarte, indem er für jede »Abzweigung« berechnet, wie wahrscheinlich es ist, dort ein lokales Minimum zu finden – ob es sich also lohnt, auf dem eingeschlagenen Pfad weiterzugehen. Ist das nicht der Fall, bricht der Computer ab und der gesamte Bereich hinter der Abzweigung wird bei der weiteren Suche ausgeklammert. Ist hingegen ein Bereich minimaler Energie gefunden, »zoomt« der Algorithmus dort hinein und ermittelt die genauen Werte des lokalen Optimums.

Um ihr Verfahren zu testen, berechneten die Autoren die Strukturen bekannter Kristalle, etwa der kompliziert aufgebauten Minerale Spinell und Granat. Die korrekte Spinell-Struktur errechnete der Algorithmus in rund einer Stunde; die des Granats in einer Sekunde.

Nature 10.1038/s41586-023-06071-y, 2023

BIOLOGIE

Evolution trotz minimalen Erbguts

▶ Leben findet immer einen Weg: Dieser Schluss lässt sich aus der sechsjährigen Studie eines Forschungsteams um Roy Moger-Reischer von der Indiana University Bloomington ziehen. Die Fachleute haben untersucht, ob auch so genannte Minimalzellen, die nur absolut lebensnotwendige Gene besitzen, zur Evolution befähigt sind. Die Antwort lautet: Ja.

Das Team züchtete aus der Bakterienspezies *Mycoplasma mycoides*, die in Wiederkäuern lebt, eine synthetische Mikrobenvariante namens JCVI-syn3B. Diese besitzt nur 493 Gene und weist damit das kleinste bekannte Genom eines sich selbst vervielfältigenden Organismus auf. Zum Vergleich: Das den Menschen besiedelnde Darmbakterium *Escherichia coli* hat mehr als 4000 Gene, viele Tiere und Pflanzen sogar mehr als 20000. Moger-Reischer & Co. überließen die Minimalgenom-Zellen in einer Laborumgebung für 300 Tage sich selbst, was etwa 2000 Bakteriengenerationen oder rund 40000 Jahren menschlicher Evolution entspricht.

Wenn das Erbgut auf einen minimalen Umfang reduziert ist, sollte man erwarten, dass nahezu jede Mutation nachteilig wirkt. Denn die Zelle hat dann kaum die Möglichkeit, funktional beeinträchtigte Gene durch andere zu kompensieren, so dass die allermeisten zufälligen Veränderungen des Erbguts den Ausfall einer oder mehrerer Zellfunktionen nach sich ziehen sollten.

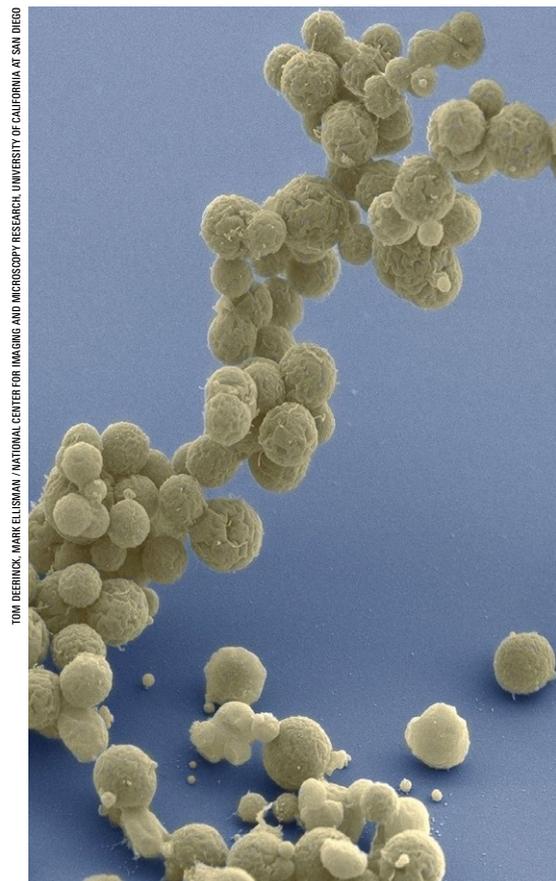
Überraschenderweise beobachteten die Wissenschaftler das Gegenteil davon: Sie stellten fest, dass JCVI-syn3B eine außergewöhnlich hohe Mutationsrate aufwies. Im Vergleich zum ursprünglichen *M.-mycoides*-Stamm entwickelte sich die synthetische Variante um 39 Prozent schneller. Dabei gewann sie evolutionäre Fitness zurück, die sie infolge ihrer

vorherigen genetischen Verarmung verloren hatte: Zusammengebracht mit »frischen« (nicht evolvierten) Minimalzellen des Typs JCVI-syn3B verdrängte sie diese.

Anders als die Zellen des ursprünglichen *M.-mycoides*-Stamms nahmen die synthetischen Zellen während des 300-tägigen Evolutions-experiments aber kaum an Größe zu. Das Forschungsteam vermutet, dies liege möglicherweise daran, dass bei dem genetischen Kahlschlag gut die Hälfte der Zytoskelett-Proteine entfernt wurden. Wahrscheinlich fiel es den Zellen dadurch schwer, ihr Volumen zu vergrößern.

Nature 10.1038/s41586-023-06288-x, 2023

MINIMALE WINZLINGE Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Clusters von synthetischen Minimalzellen (15000-fach vergrößert). Die Zellen enthalten jeweils weniger als 500 Gene.



TOM DEBRINCK, MARKELLISMAN / NATIONAL CENTER FOR IMAGING AND MICROSCOPY RESEARCH, UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT SAN DIEGO

Der doppelte Einstein

Viele hatten die Hoffnung auf eine Einstein-Kachel aufgegeben: eine einzelne Fliese, die eine Ebene lückenlos bedecken kann, ohne dass sich ein periodisches Muster ergibt. Doch nun hat ein Hobby-Mathematiker die Fachwelt mit seinen Entdeckungen überrascht.

► spektrum.de/artikel/2169828



Manon Bischoff ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

PUZZLETEIL Diese einem Gespenst ähnelnde Kachel gilt als »Einstein« – und ist der zweite derartige spektakuläre Fund innerhalb von wenigen Monaten.

AUF EINEN BLICK

Erfolg nach jahrzehntelanger Suche

- 1** Fachleute haben jahrzehntelang eine Kachel gesucht, die eine Ebene lückenlos und aperiodisch bedeckt. Im März 2023 wurde schließlich ein pensionierter Druckanlagentechniker fündig.
- 2** Allerdings waren nicht alle mit dem Ergebnis zufrieden. Denn um die Ebene zu pflastern, muss man die Fliese an bestimmten Stellen spiegeln.
- 3** Zwei Monate später präsentierte David Smith eine neue Form, die kein gespiegeltes Bild braucht. Nun hat die Suche ein Ende – doch es sind noch längst nicht alle Fragen beantwortet.

Das Ende einer langen mathematischen Suche beginnt mit einem Hut – oder einem T-Shirt, je nachdem, was man in die Form mit 13 Ecken hineininterpretiert. Dabei handelt es sich aber nicht wirklich um ein Kleidungsstück, sondern um eine Fliese. Mit dieser lässt sich eine unendlich große Ebene lückenlos bedecken. Das Besondere an der Fliese ist, dass das entstehende Muster niemals periodisch ist, unabhängig davon, wie man die Kacheln zusammenfügt. Als der pensionierte Druckanlagentechniker David Smith im November 2022 die Hut-Kachel fand, hatten einige Fachleute bereits die Hoffnung aufgegeben, dass eine solche Fliese überhaupt existiert.

Als Smith den mathematikbegeisterten Informatiker Craig Kaplan von der University of Waterloo auf die Hut-Form aufmerksam machte, erkannte dieser schnell das Potenzial: Zusammen mit dem Softwareentwickler Joseph Samuel Myers und dem Mathematiker Chaim Goodman-Strauss vom National Museum of Mathematics in New York konnte er im Frühjahr 2023 beweisen, dass die Fliese tatsächlich eine Ebene lückenlos und ohne regelmäßige Wiederholung pflastert. Smith schien endlich den Heiligen Gral der Parkettierungen gefunden zu haben, ein »Einstein« – dessen Name sich von »ein Stein« ableitet und nichts mit dem berühmten Physik-Nobelpreisträger zu tun hat.

Eine solche Kachel hatten Mathematikerinnen und Mathematiker seit Jahrzehnten gesucht, darunter namhafte Größen wie der Physik-Nobelpreisträger Sir Roger Penrose. »Ich glaubte an ein Einstein. Aber die Hut-Kachel sieht völlig anders aus als das, wonach ich suchte«, sagte der inzwischen 91-jährige Penrose auf dem »Hatfest«, einer Konferenz, die zu Ehren der Hut-Fliese im Juli 2023 in Oxford veranstaltet wurde. Nach und nach hatten alle die Suche erfolglos aufgegeben und sich anderen Projekten gewidmet. Selbst Goodman-Strauss, Koautor der aktuellen Arbeiten, gibt zu, dass er vor einigen Jahren darauf gewettet hatte, einen Einstein könne es nicht geben. »Mich hat vor allem die Einfachheit der Form überrascht«, sagt der Mathematiker Michaël Rao von der École normale supérieure in Lyon über die 13-eckige Hut-Kachel.

Einen Wermutstropfen gibt es aber. Um die Ebene lückenlos zu bedecken, muss man Spiegelungen des 13-Ecks zulassen. Für Fliesenleger ist das nicht wirklich praktisch; und auch Mathematiker haben so ihre Probleme damit.

Denn eigentlich sind bei Parkettierungen nur Drehungen und Verschiebungen einer Kachel erlaubt. »Die große Frage war, ob ein Einstein existiert, den man nicht spiegeln muss«, erklärt Rao. Eine solche Form bezeichnen manche als »Vampir-Kachel«, da sie wie die mythische Nachtgestalt kein Spiegelbild besitzt.

Der »Hut« passt nicht ganz – also präsentiert Smith das »Gespenst«

Smith machte sich wieder auf die Suche. Er ging dabei ähnlich vor wie bei der Hut-Kachel. »Ich halte nach Vielecken Ausschau, die interessante Kachelmuster ergeben, auch periodische«, sagt der Frührentner, der mit seinen langen Haaren, dem charakteristischen Bandana und Netzhandschuhen einem Rockstar ähnelt. Wenn er auf viel versprechende Ergebnisse stößt, schneidet er mehrere Papierschnipsel entsprechend zurecht und bedeckt dann seinen Fußboden damit. Auf diese Weise fand er nicht nur die hutförmige Kachel, sondern vier Monate später auch das »Spectre«, das Gespenst – die lang ersehnte Vampir-Fliese. Im Bereich der Parkettierungen ist es nicht unüblich, dass mathematische Laien große Entdeckungen machen. »Es hätte mich überrascht, wenn ein Mathematiker den Einstein gefunden hätte«, kommentierte die Geometerin Marjorie Senechal auf dem Hatfest. »Man muss bereit sein, wild herumzuprobieren und zu spielen.«

Im Mai 2023 haben Smith und die Forscher Myers, Kaplan und Goodman-Strauss die Spectre-Kachel in einer noch nicht begutachteten Arbeit vorgestellt. Damit haben sie nun das jahrzehntealte Rätsel offenbar endgültig beantwortet: Ein Einstein existiert. Es ist möglich, eine Ebene auf zwangsweise nichtperiodische Art mit nur einer einzigen Kachel zu bedecken.

Wer schon einmal durch die Gänge der Alhambra im spanischen Granada geschritten ist, hat sicher noch die

»HUT« Auch wenn viele der Meinung sind, dass die Form eher einem T-Shirt ähnelt, haben sich die Wissenschaftler entschieden, die Kachel »Hat« zu nennen – vor allem weil es in einem Fachaufsatz einfacher zu notieren sei.

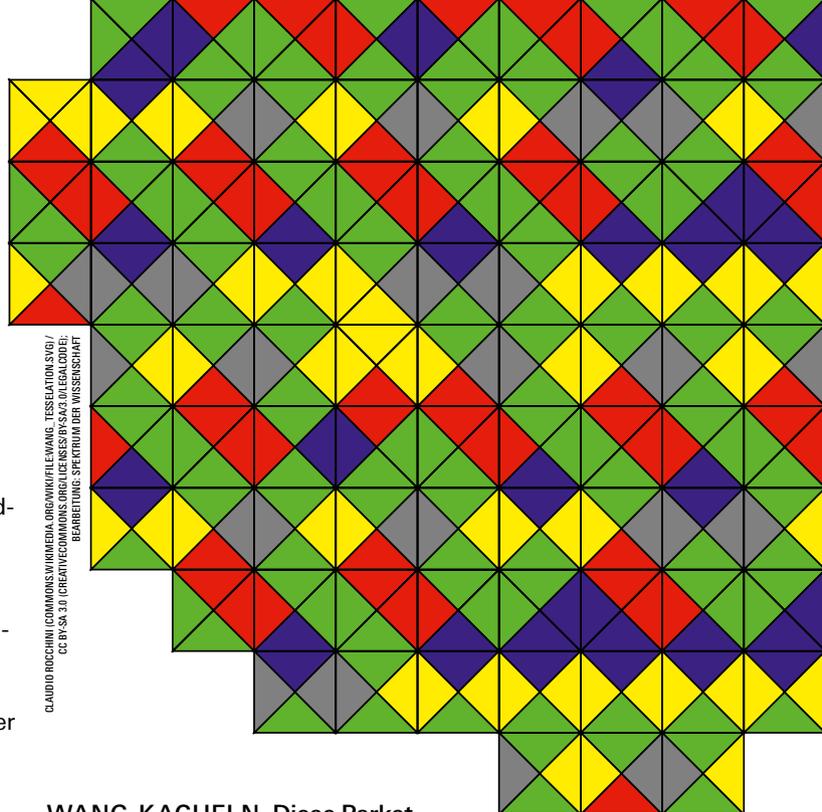
atemberaubenden, etwa 1000 Jahre alten Fliesenmosaikwerke vor Augen. Überreste solcher Parkettierungen finden sich sogar in Bauwerken, die aus der Antike stammen. Obwohl die menschliche Faszination für diese geometrischen Kunstwerke so lange zurück reicht, hat sich die mathematische Forschung erst im 20. Jahrhundert intensiver damit beschäftigt. Das führte zu Überraschungen. Wie der Logiker Robert Berger im Jahr 1966 feststellte, birgt das Themenfeld nämlich Fragen, die sich niemals beantworten lassen, sie sind beweisbar unbeweisbar.

Damals untersuchte Berger eine Sammlung mit unendlich vielen Quadraten, die eine unbegrenzte Ebene bedecken sollen. Das ist erst einmal nicht schwer. Doch die Fliesen haben unterschiedlich eingefärbte Kanten und werden nach folgender Regel angeordnet: Sich berührende Kanten müssen stets die gleiche Farbe haben. Hat man mehrere Typen von gefärbten Kacheln, so genannte Ursteine (davon jeweils unendlich viele), kann man mit der mühseligen Aufgabe beginnen und die Ebene nach der vorgegebenen Regel pflastern.

Es ist aber möglich, dass man irgendwann in einer Sackgasse landet. In diesem Fall gibt es eine Lücke, in die keine der verfügbaren Fliesen hineinpasst, weil die Färbungen nicht übereinstimmen. Mit einer anderen Zusammenstellung von Ursteinen (zum Beispiel mit nur einer Kachel, deren Ränder gleich gefärbt sind) könnte man hingegen für alle Zeiten problemlos vorankommen.

1961 fragte sich der Doktorvater von Berger, Hao Wang, ob man anhand der vorgegebenen Ursteine vorhersagen kann, ob sich die Ebene damit pflastern lässt – oder man irgendwann in einer Sackgasse landet. Diese Frage wird als Domino-Problem bezeichnet. Wang fand nach kurzer Zeit heraus, dass die Frage mit einem anderen Problem zusammenhängt. Wenn sich die Ursteine stets zu einem periodischen Muster zusammenlegen lassen, dann wäre das Domino-Problem entscheidbar. Das bedeutet: Das Muster müsste sich aus gleichen Ausschnitten zusammensetzen, die entlang zweier Raumrichtungen verschoben werden. Falls alle lückenlosen Bedeckungen periodische Anordnungen zuließen, gäbe es laut Wang einen Algorithmus, der bestimmen kann, ob eine Sammlung von Ursteinen eine Ebene abdeckt oder nicht (siehe dazu den Kasten »Periodizität und Inflation«).

Berger, der Doktorand von Wang, nahm sich des Domino-Problems an. Dafür bediente er sich eines Tricks aus der theoretischen Informatik. Dort spielen Turingmaschinen eine wichtige Rolle, das sind rudimentäre Modelle eines Computers. Sie sind extrem einfach aufgebaut, können aber jeden beliebigen Algorithmus ausführen, indem sie Zahlen auf einem Band auslesen, es neu beschreiben und hin und her schieben. Berger fand eine Möglichkeit, die Funktionen der Turingmaschine (Band auslesen, bewegen und beschreiben) auf Parkettierungen abzubilden. Zum Beispiel: Legt man Kachel 1 links an Kachel 2, entspricht das dem Verschieben des Bands um eine Stelle nach rechts. Wie der Logiker zeigte, können



CLAUDIO ROCCHINI (COMMONS:WIKIMEDIA:ORG:WIKIFILE:WANG_TESSELLATION.SVG) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS:ORG:LICENSES:BY-SA/3.0/LEGALCODE): BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

WANG-KACHELN Diese Parkettierung aus 13 verschiedenen, gefärbten quadratischen Kacheln ist nichtperiodisch.

die Fliesen nur dann die gesamte Ebene bedecken, falls die dazugehörige Turingmaschine unendlich lang weiterläuft und niemals zum Halten kommt.

Damit war Berger auf das fundamentale Problem der theoretischen Informatik gestoßen, das Halteproblem. Für das hatte Alan Turing bereits 1937 bewiesen, dass es zu den unentscheidbaren Aussagen der Mathematik gehört. Es gibt keinen allgemeinen Algorithmus, der für alle Computerprogramme entscheiden kann, ob sie irgendwann anhalten und ein Ergebnis ausspucken oder unendlich lange weiterrechnen. So hatte Berger Wangs 1961 gestellte Frage beantwortet: Um herauszufinden, ob ein Satz von Kacheln eine Ebene pflastert, muss man das Halteproblem lösen. Und da dieses unentscheidbar ist, gilt das auch für das Domino-Problem. Es wird also immer Fälle geben, bei denen man nicht vorhersagen kann, ob eine gewisse Menge von Ursteinen eine Ebene lückenlos bedeckt.

Auf der Suche nach Aperiodizität

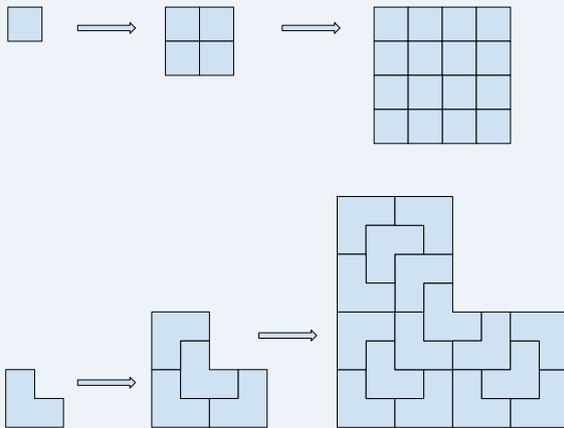
Wie Wang zuvor gezeigt hatte, setzt die Entscheidbarkeit des Domino-Problems voraus, dass sich alle Fliesen, die die Ebene bedecken, auf periodische Weise zusammensetzen lassen. Da das Domino-Problem aber unentscheidbar ist, folgt daraus, dass es Fliesen gibt, die keine periodischen Muster zulassen. Berger hatte damit die Existenz »aperiodischer« Kacheln bewiesen: Sie bedecken eine Fläche lückenlos, ohne dass sich Ausschnitte regelmäßig wiederholen. Für diese erstaunlichen Ergebnisse hatte der damalige Doktorand eine Menge von 20 426 unterschiedlichen Ursteinen vorgestellt, also mehr als 20 426 quadrati-

Periodizität und Inflation

Das Paradebeispiel für ein periodisches Muster ist eine quadratische Kachelung. Zum Beispiel könnte man ein Quadrat aufblasen und mit kleineren Vierecken füllen. Dabei entstehen keine hierarchischen Strukturen: Man findet zwar immer größere Quadrate vor, aber diese sind nicht eindeutig bestimmt, sie lassen sich verschieben, ohne dass das Muster zusammenbricht.

Die Situation ändert sich hingegen, wenn man eine L-förmige Kachel aufbläst. Es gibt nämlich eine eindeutige Vorschrift, wie man die Ursteine in der vergrößerten Version anordnen muss. Hat man also eine große L-förmige »Superkachel«, in der ganz viele kleine Ursteine angeordnet sind, lässt sich genau bestimmen, aus welchen kleineren L-Formen die Superkachel

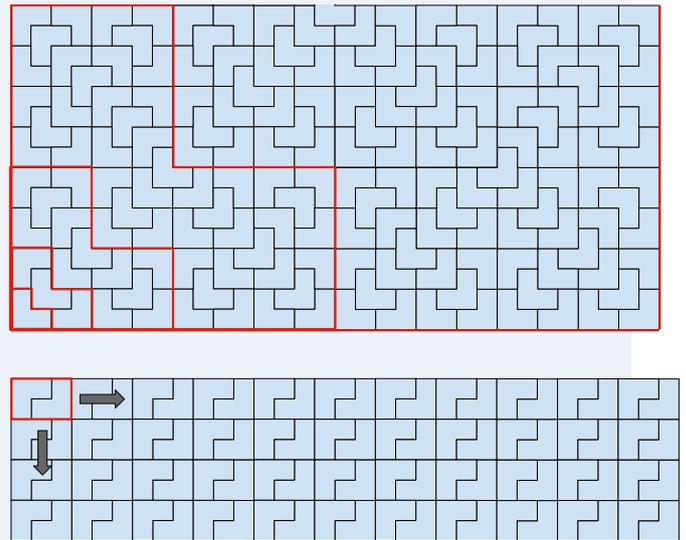
INFLATION Um die Ebene lückenlos zu bedecken, kann man die quadratischen und L-förmigen Fliesen vergrößern und mit den ursprünglichen Kacheln füllen.



durch Inflation entstand. Dadurch ergibt sich eine hierarchische Struktur: Im Muster findet man immer größere L-Formen, deren Inhalt eindeutig bestimmt ist. Dies verhindert ein sich regelmäßig wiederholendes Muster, denn die Verschiebung eines Ausschnitts würde die hierarchische Struktur zerstören.

Das gilt aber nur, wenn man die L-förmigen Kacheln mittels Inflation entsprechend anordnet. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, die Fliesen zu einem periodischen Muster zusammenzusetzen. Deshalb sind L-Kacheln nicht aperiodisch – und damit kein Einstein.

PERIODIZITÄT Die L-förmige Kachel erlaubt sowohl periodische (unten) als auch nichtperiodische (oben) Parkettierungen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / AMANON BISCHOF

sche Kacheln mit verschiedenen Färbungen. Daraufhin fragten sich Mathematikerinnen und Mathematiker, ob es auch kleinere Sätze aperiodischer Fliesen gibt – und machten schnell Fortschritte. Schließlich legte Rao zusammen mit seinem Kollegen Emmanuel Jeandel im Jahr 2017 die Frage bei. Die beiden Forscher konnten beweisen, dass die kleinstmögliche Sammlung aperiodischer gefärbter quadratischer Kacheln aus elf Exemplaren besteht.

Wie verändert sich diese Mindestzahl, wenn man beliebige Kachelformen zulässt, nicht nur quadratische? In den folgenden Jahrzehnten unterboten sich Fachleute immer weiter: Zunächst fand Berger ein Beispiel mit 104 Ursteinen, 1968 lieferte der Informatiker Donald Knuth einen Satz mit 92, ein Jahr später präsentierte der Mathe-

matiker Rafael Robinson eine Variante mit bloß sechs Fliesentypen – und 1974 veröffentlichte Penrose eine Lösung mit nur zwei Kacheln.

Aber ist es auch möglich, einen einzigen aperiodischen Urstein zu finden? Zahlreiche Personen haben in den vergangenen Jahrzehnten nach einem solchen Einstein gesucht, jedoch erfolglos. Einer Lösung am nächsten kam die Hobbymathematikerin Joane M. Taylor, die 2011 eine passende Fliese fand – allerdings besteht diese nicht aus einem einzigen zusammenhängenden Stück. Taylor hat eine komplizierte Form entworfen, die von mehreren davon losgelösten Vierecken umgeben ist.

Auch Penrose und Rao hatten dem Heiligen Gral nachgejagt, widmeten sich nach mehreren Misserfolgen

aber schließlich anderen Dingen. Nicht so David Smith. Als Kaplan im November 2022 eine E-Mail von Smith mit dem »Hut« erhielt, war sein Interesse schnell geweckt. Mit Hilfe einer Software reihte Kaplan immer mehr hutförmige Kacheln aneinander, und es wirkte, als könnten sie die Ebene wirklich lückenlos bedecken. Und: Das erzeugte Muster schien sich nicht zu wiederholen. »Ich ließ alle anderen Projekte stehen und liegen und widmete mich fortan nur noch der Hut-Kachel«, erzählte Kaplan auf dem Hatfest.

Auf der Suche nach den passenden Regeln für den »Hut«

Doch das musste bewiesen werden. Eine typische Methode, um zu zeigen, dass eine Pflasterung möglich ist, nennt sich Inflation. Dazu bläst man eine Kachel auf: Man vergrößert sie so lange, bis Kopien der ursprünglichen Fliese lückenlos hineinpassen. Das lässt sich mit Hilfe der oktagonalen so genannten Ammann-Beenker-Parkettierung veranschaulichen, die aus zwei einfachen Ursteinen besteht (einem Parallelogramm und einem rechtwinkligen Dreieck, siehe »Ammann-Beenker-Parkett«). Damit ein aperiodisches Muster entsteht, gibt es wie bei den Quadraten von Wang Anlegeregeln, man darf die Steine also nur auf bestimmte Weise zusammenfügen. Diese Regeln lassen sich durch Markierungen an Kanten und Ecken darstellen, die mit jenen anderer Kacheln übereinstimmen müssen. Nun kann man eine der Fliesen, etwa das Dreieck, so stark aufblähen, bis die eigentlichen Ursteine hineinpassen. In dem vergrößertem Dreieck, der »Superkachel«, finden dann drei ursprüngliche Dreiecke und zwei Parallelogramme Platz.

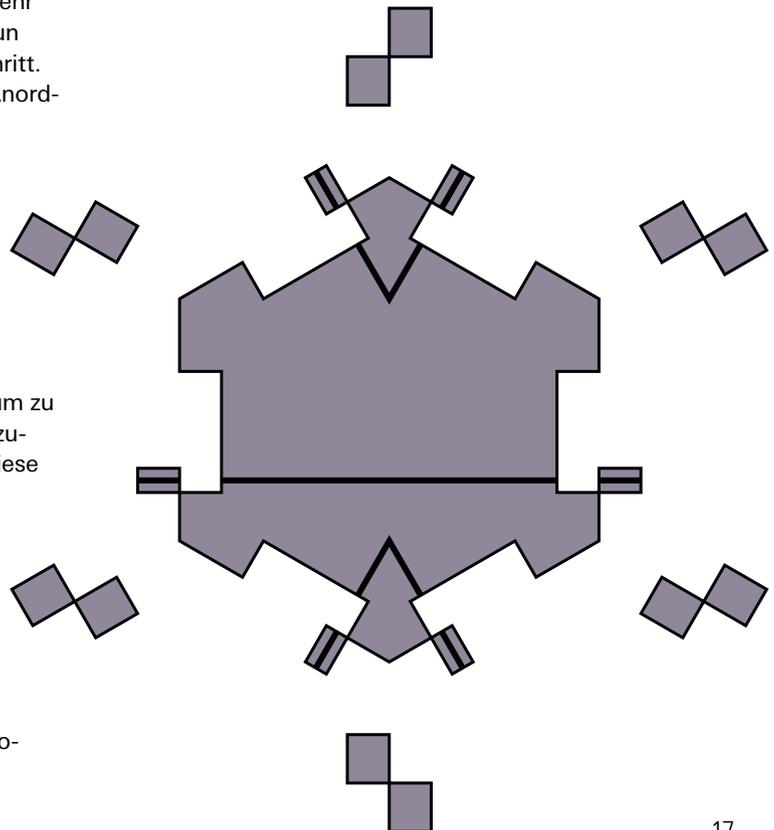
Man kann die Inflation aber auch weitertreiben, indem man die Superkachel vergrößert, wodurch noch mehr Ursteine hineinpassen. Allerdings nehmen diese nun einen anderen Platz ein als im vorigen Inflationsschritt. Bläst man die Form nochmals auf, ist die Urstein-Anordnung der ersten Vergrößerung plötzlich wieder im dreifach vergrößerten Dreieck vorhanden, sogar mehrmals. So kann man unendlich lange weitermachen. Man vergrößert den gepflasterten Bereich, wobei jeder zweite Inflationsschritt das ursprüngliche Muster enthält. Da man die Schritte unbegrenzt fortsetzen kann, lässt sich so die gesamte Ebene bedecken.

Kaplan wollte die gleiche Methode anwenden, um zu beweisen, dass die Hut-Kachel eine Parkettierung zulässt. Schnell stellte er aber fest, dass es mit der Fliese nicht so einfach ist wie mit den Ammann-Beenker-Kacheln. Der Informatiker suchte einen ganzen Monatlang nach einem Weg, um die Inflation anzuwenden. An seinem Geburtstag wurde er schließlich fündig. Als er sich ansah, wie man mehrere Hut-Kacheln zusammensetzen kann, identifizierte Kaplan vier »Metakacheln«: eine sechseckige Struktur aus vier, ein Fünfeck aus zwei, ein Parallelo-

gramm aus zwei Hüten und eine einzelne Hut-Kachel, die er näherungsweise durch ein Dreieck beschrieb. Die zusammengesetzten Hut-Fliesen formen keine exakten Polygone, sondern ragen immer ein wenig heraus. Doch diese behelfsmäßige Struktur genügt, um wie bei anderen Kachelsätzen eine Inflation durchzuführen. Man kann die Metakacheln aufblasen und mit kleineren Metakacheln füllen. Das lässt sich so lange wiederholen, bis die gesamte Ebene bedeckt ist. »Das war ein schönes Geburtstagsgeschenk an mich selbst«, sagt Kaplan.

Durch diese Inflationmethode kann man nicht nur zeigen, dass ein Kachelsatz die gesamte Ebene lückenlos bedeckt. Es lässt sich auch beweisen, dass das sich ergebende Muster nichtperiodisch ist. Das kann man gut an den so genannten Robinson-Kacheln erkennen, die aus sechs Ursteinen bestehen. Die auf den Fliesen eingezeichneten Linien entsprechen den Anlegeregeln: Man darf die Steine nur so aneinanderlegen, dass gleichfarbige Linien glatt fortgesetzt werden. Die gelben Linien bilden dann Quadrate, in deren Mittelpunkt die Ecke eines größeren Quadrats startet und so weiter. Man findet also immer größere Vierecke, die sich kreuzen. Wäre die Pflasterung periodisch, würden Ausschnitte des Musters an anderer Stelle genau so auftauchen. Wenn man aber einen Teil der Parkettierung nimmt und verschiebt, zerstört man zwangsläufig die hierarchische

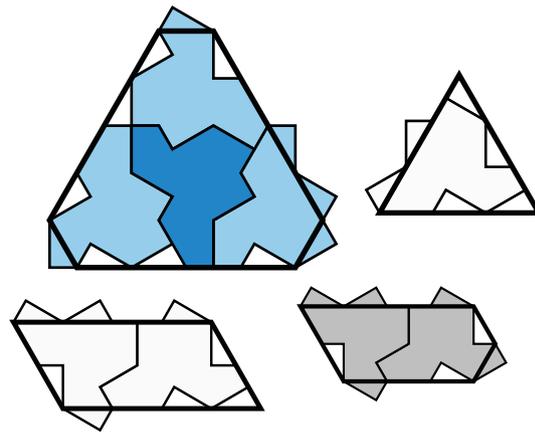
SOCOLAR-TAYLOR-KACHEL Die unzusammenhängende Kachel kann die gesamte Ebene lückenlos bedecken, ohne jemals ein periodisches Muster zu formen.



Struktur: Man findet immer ein Quadrat, das größer ist als die Verschiebung. Damit kann das Muster nicht periodisch sein.

Eine solche »hierarchische Struktur« lässt sich auch bei der Hut-Kachelung finden. Innerhalb der Metakacheln sind die Hüte eindeutig angeordnet. Nach einem Inflationsschritt haben die vier Polygone einen festen Platz innerhalb der größeren Metakacheln. Das lässt sich immer weiter fortführen. Am Ende finden sich beliebig große Strukturen, die durch eine Verschiebung von Kacheln zwangsläufig zerstört würden. Damit ist eine solche Hut-Kachelung nichtperiodisch.

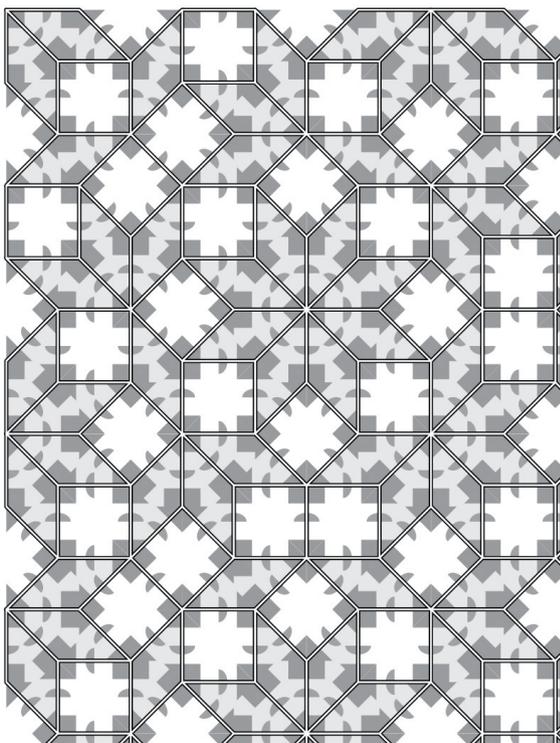
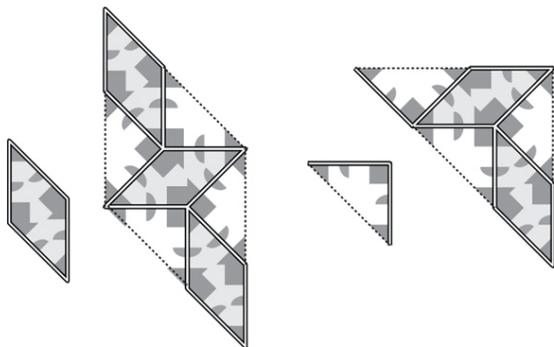
»An diesem Punkt musste man jedoch ausschließen, dass es eine periodische Parkettierung des Huts gibt«, sagt Kaplan. Dafür wandte er sich im Januar 2023 an den Mathematiker Chaim Goodman-Strauss und den Softwareentwickler Joseph Myers, die sich in der Vergangenheit ebenfalls mit Pflasterungen beschäftigt hatten. Denn Kaplan wusste: Um periodische Muster auszuschließen,



INFLATION DES HUTS Die Hut-Kachel lässt sich nicht direkt aufblasen und mit kleineren Hut-Fliesen füllen. Daher führt man den Inflationsschritt mit vier verschiedenen Polygonen durch.

DAVID SMITH, JOSEPH SAMUEL MYERS, CHAIM S. KAPLAN, AND CHAIM GOODMAN-STAUSS, 2023
(CC BY-NC-SA 4.0) (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/4.0/LEGALCODE)

AMMANN-BEENKER-PARKETT Indem man die Fliesen aufbläst und mit Steinen ursprünglicher Größe füllt, erhält man ein nichtperiodisches Muster, das die gesamte Ebene bedeckt. Wie sich herausstellt, sind die Ammann-Beenker-Fliesen aperiodisch.



CHAIM GOODMAN-STAUSS (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:AMMANNBEENKER.PNG) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/4.0/LEGALCODE)

CHAIM GOODMAN-STAUSS (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:AMMANNBEENKER.PNG) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/4.0/LEGALCODE)

müsste man alle möglichen Anordnungen der Hut-Kachel untersuchen und beweisen, dass sich daraus unmöglich etwas Periodisches ergeben kann.

Myers hatte bereits mit ähnlichen Kachelformen wie dem Hut gearbeitet und Computerprogramme für solche Fälle geschrieben. Acht Tage, nachdem er mit der Aufgabe betraut wurde, lieferte er den gewünschten Beweis: Er hatte 188 Fallunterscheidungen durchgeführt und bewiesen, dass alle zu einem nichtperiodischen Muster führen. Um sich zu vergewissern, haben die Fachleute eine weitere Software unabhängig von der ersten entwickelt und beide Versionen frei veröffentlicht, so dass man sie auf eventuelle Fehler prüfen kann. »Wir haben die Arbeit durchgesehen, sie ist korrekt«, bestätigt der Mathematiker Michael Baake von der Universität Bielefeld.

»Wahrscheinlich ist jetzt nicht der richtige Zeitpunkt ...«

Damit war bewiesen: Die Hut-Kachel ist ein Einstein. Hier wäre die Geschichte vielleicht zu Ende, wenn Smith nicht weitergebastelt hätte. Im Dezember, als Kaplan verzweifelt nach einer passenden Inflationmethode suchte, schrieb der Frührentner wieder einmal eine E-Mail: »Wahrscheinlich ist jetzt nicht der richtige Zeitpunkt ...«, begann die Nachricht. Er hatte eine weitere Kachel gefunden, die ihn an eine Schildkröte erinnerte und die Ebene ebenfalls lückenlos und nichtperiodisch zu bedecken schien. Zunächst schob Kaplan diese Information bei Seite. Wie hoch konnte die Wahrscheinlichkeit schon sein, dass Smith in so kurzer Zeit direkt zwei Einsteine finden konnte?

Nachdem sich Kaplan, Goodman-Strauss und Myers vergewissert hatten, dass die Hut-Kachel aperiodisch ist, nahmen sie die Schildkröte genauer unter die Lupe. Myers erkannte einen Zusammenhang mit der Hut-Fliese: Indem man die Längen der Seiten des 13-Ecks variiert, findet man weitere lückenlose, nichtperiodische Parkettierungen vor. Tatsächlich hatte Smith nicht nur eine Einstein-Kachel gefunden, sondern eine ganze Familie mit

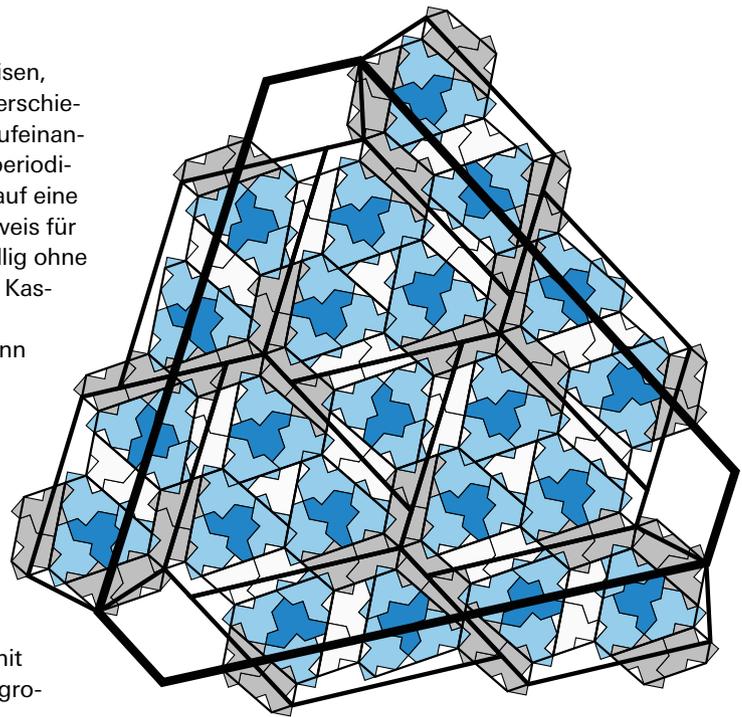
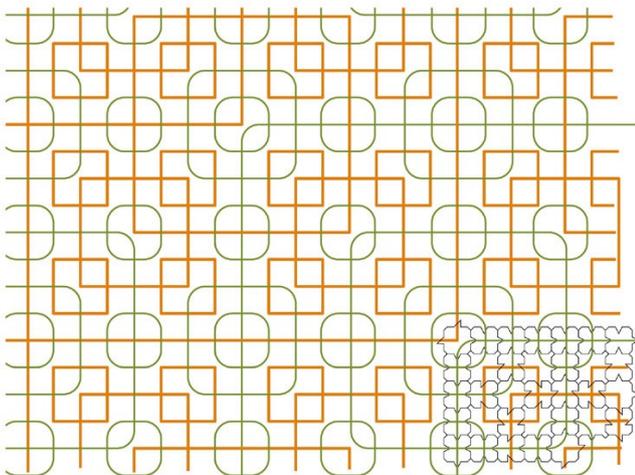
unendlich vielen Mitgliedern. Myers konnte beweisen, dass sich die Positionen und Ausrichtungen der verschiedenen Fliesen in den Pflasterungen eins-zu-eins aufeinander abbilden lassen. So kommt man von einem aperiodischen Muster zum nächsten. Das brachte Myers auf eine Idee: Ende Februar 2023 hatte er einen neuen Beweis für die Aperiodizität der Hut-Kachel vorgelegt, der völlig ohne Unterstützung eines Computers auskommt (siehe Kästen »Ein neuer Beweis«).

Alle Kachelungen funktionieren jedoch nur, wenn man Spiegelungen der Fliesen zulässt. Manche Fachleute sind der Meinung, dass das für eine Einstein-Parkettierung nicht zulässig sei. Tatsächlich sind die Anforderungen an Parkette nicht klar geregelt. Einige fordern, dass man die Kacheln nur verschieben darf (in zwei Dimensionen kann auf diese Weise jedoch keine Aperiodizität entstehen), andere akzeptieren auch Rotationen und wieder andere lassen Spiegelungen zu. »Selbst wenn manche nicht damit zufrieden sind, stellt das Ergebnis dennoch einen großen Fortschritt dar«, sagt Rao.

Der Grund für den Unmut: In drei Raumdimensionen ist es zwar kein Problem, ein Stück Papier umzudrehen, aber in zwei Dimensionen ist das nicht möglich. Demnach müsste man die gespiegelte Kachel als zweiten Urstein auffassen. Und wenn man den praktischen Fall einer glasierten Fliese betrachtet, ist die Spiegelung ebenfalls problematisch. Zudem lehrt uns die Erfahrung mit Schuhen und Molekülen, dass sich gespiegelte Versionen von Objekten in der Regel anders verhalten als die Originale.

Die Hut-Kachel hat weitere Bedenken hervorgebracht. »Das Problem ist nicht nur, dass sie gespiegelt auftaucht«, erläutert Michael Baake, »sondern, dass eine der beiden

HIERARCHISCHE STRUKTUR In den orangen Linien der Robinson-Kachelung lässt sich eine hierarchische Struktur erkennen: Sie bilden immer größere, verhakete Quadrate.



HUT-HIERARCHIE Indem man die Polygone des Huts zusammensetzt, ergeben sich immer größere Strukturen, die die gleichen Formen haben. Diese hierarchische Struktur stellt sicher, dass das sich ergebende Muster niemals periodisch ist.

Versionen – gespiegelt oder nicht – in einer Kachelung zwangsweise häufiger auftritt als die andere.« Die Schwierigkeit daran hängt mit einer besonderen Eigenschaft von aperiodischen Kacheln zusammen: Steht man auf einem solchen Parkett, dann lässt sich normalerweise anhand des Musters nicht beurteilen, in welchem Bereich der Ebene man sich befindet.

Der Grund für die Ununterscheidbarkeit hat mit der Inflation zu tun. Man kann jede beliebige endliche Anordnung von Kacheln aufblasen und sie anschließend mit den ursprünglichen Ursteinen füllen. Wiederholt man diesen Schritt immer wieder, vervielfältigt man dadurch den Ausschnitt, mit dem man die Pflasterung begonnen hat. Am Ende taucht der Ausschnitt unendlich oft in der Ebene auf – allerdings ohne Regelmäßigkeit. Deshalb kann eine Person unmöglich anhand des sie umgebenden Musters herausfinden, an welchem Ort auf dem Parkett sie sich befindet. Es gibt unendlich viele Stellen, an denen alles um einen herum gleich aussieht. Gegen dieses Prinzip verstößt die Hut-Kachel aber. Dadurch, dass ihr Spiegelbild entweder selten oder häufig auftaucht, kann man zumindest zwischen zwei verschiedenen Klassen von Parkettierungen unterscheiden.

Während Kaplan, Myers und Goodman-Strauss noch mit der Hut-Kachel beschäftigt waren, meldete sich Smith erneut. Er hatte mit der Familie von Hut-Kacheln herumgespielt und war auf eine weitere interessante Form gestoßen: Ein 14-seitiges Polygon mit gleich langen

Seiten. Dabei handelt es sich um einen Sonderfall der Hut-Variationen, der durch seine gleichen Seitenlängen allerdings nicht nur nichtperiodische, sondern zudem periodische Kachelungen ermöglicht. Ein Einstein war das 14-Eck also nicht. Als Smith die Fliesenform aus Papier zurechtgeschnitten hatte, fiel ihm etwas Spannendes auf. Die Kacheln schienen auch ohne ihre gespiegelten Versionen die Ebene lückenlos bedecken zu können. Und noch besser: Das entstehende Muster wirkte stets nichtperio-

disch. Offenbar braucht man die gespiegelten Steine nur, wenn man eine Periodizität erhalten will.

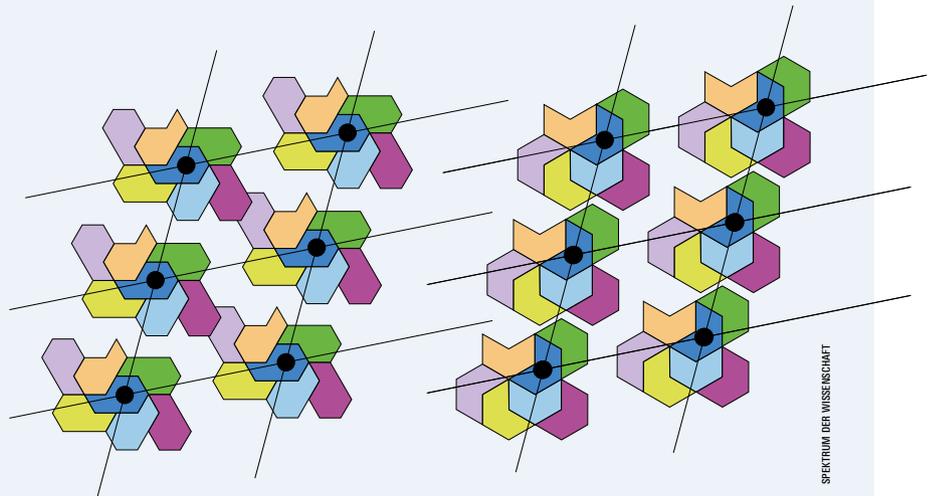
Als er davon erfuhr, war Kaplan zunächst skeptisch. »Wenn das stimmt, fresse ich meinen Hut!«, schrieb er Smith in einer E-Mail. Dennoch haben Kaplan, Myers und Goodman-Strauss die neue Fliese eingehender geprüft. Und sie konnten Smiths Verdacht bestätigen. Die Form ermöglicht tatsächlich bloß nichtperiodische Kachelungen, wenn man keine gespiegelten Teile zulässt. Doch

Ein neuer Beweis

Der Softwareentwickler Joseph Myers hat eine neue Methode entwickelt, um zu beweisen, dass die Hut-Kachel aperiodisch ist – also die Ebene bloß auf nichtperiodische Weise pflastern kann. Der Vorteil an seinem Vorgehen ist, dass er dazu keinerlei Computerunterstützung braucht.

Dafür zeigte er in einem ersten Schritt, dass die Hut-Kachelung mit zwei Parkettierungen aus einfachen Formen zusammenhängt, nämlich zwei verschiedenen Varianten des Huts, die sich durch Veränderung der Kantenlängen ergeben. Die Kacheln dieser Pflasterungen sind so genannte Polyiamonds, geometrische Formen, die aus gleichseitigen Dreiecken bestehen. Diese zwei Polyiamonds haben in der Familie der Hut-Fliesen eine besondere Rolle: Sie lassen im Gegensatz zu den anderen Mitgliedern auch periodische Parkette zu. Dennoch ist es möglich, sie zu einem nichtperiodischen Muster zusammenzusetzen.

Myers konnte jedoch zeigen, dass der Hut und die zwei Polyiamonds zusammenhängen. So kann man jeden Hut in einer Pflasterung durch eines (gegebenenfalls vergrößerten oder verkleinerten) dieser Polyiamonds ersetzen, das genauso wie der Hut orientiert ist. Daraus ergibt sich dann ebenfalls eine lückenlose Kachelung. Man kann jeder Hut-Fliese in einer Parkettierung genau ein Polyiamond zuweisen. Wenn Myers also



POLYIAMONDS Wenn die beiden Polyiamond-Parkette periodisch wären, müssten die entsprechenden Ausschnitte in einem gleichen Gitter angeordnet sein. Die entsprechenden Verschiebungsvektoren dürften sich bloß um einen rationalen Faktor unterscheiden. Doch wie sich herausstellt, ist das nicht der Fall.

bewies, dass beide dem Hut-Parkett zugeordnete Polyiamond-Muster nichtperiodisch sind, dann muss ebenfalls die Hut-Kachelung nichtperiodisch sein.

Um das zu beweisen, führte der Softwareentwickler einen Widerspruchsbeweis: Er nahm an, die beiden Polyiamond-Parkettierungen, die mit dem Hut zusammenhängen, seien periodisch und leitete aus dieser Annahme einen Widerspruch ab. Den Gesetzen der Logik zufolge muss die Annahme falsch sein, das heißt, die Polyiamond-Kachelungen sind nichtperiodisch.

Falls eine Parkettierung periodisch ist, dann gibt es Verschiebungsvektoren, die eine Kachel von einem Ort in der Ebene auf eine

andere verschieben. Da beide Polyiamond-Parkettierungen der gleichen Hut-Kachelung entspringen, hängen auch sie zusammen (siehe oben): Wie Myers zeigte, müssten sich die Verschiebungsvektoren in den Polyiamond-Pflasterungen um einen rationalen Faktor (eine Bruchzahl) unterscheiden. Doch der Softwareentwickler fand ein Verhältnis von $\sqrt{2}$, eine irrationale Zahl.

Demnach können die beiden Polyiamond-Kachelungen keine Verschiebungsvektoren besitzen – und damit nicht periodisch sein. Da aber jede Hut-Parkettierung diesen Polyiamond-Mustern entspricht, gibt es nur nichtperiodische Hut-Parkette. Somit ist die Hut-Kachel aperiodisch.

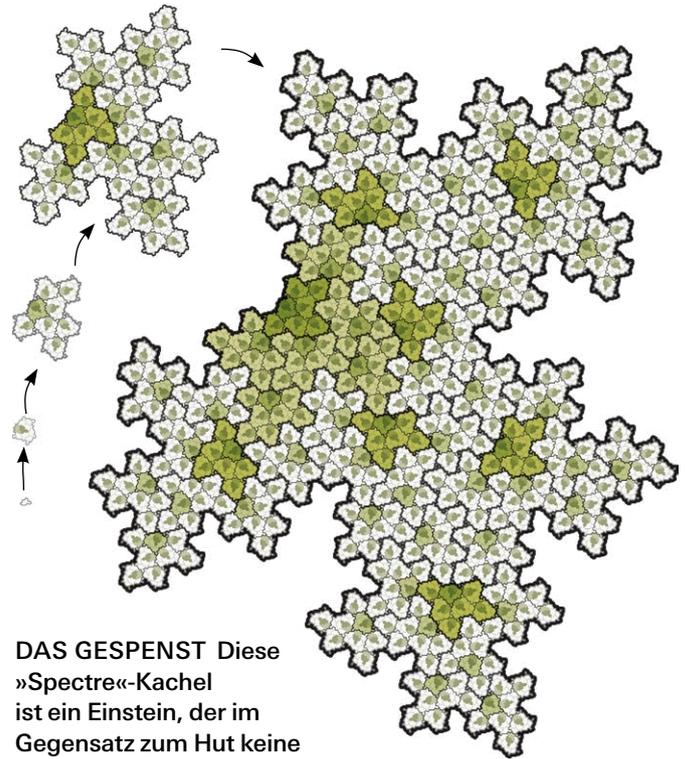
ganz zufrieden waren die Wissenschaftler damit nicht. Denn mit den gespiegelten Versionen lassen sich ebenso periodische Muster erzeugen. Sie haben daher den Begriff einer »schwach aperiodischen« Einstein-Kachel eingeführt.

In einem nächsten Schritt haben die Forscher daher die Ecken der neuen Fliese abgerundet, wodurch eine Form entstand, die einem Puzzleteil – oder einem Gespenst – ähnelt. Durch die Abrundungen ist es nicht mehr möglich, diese »Spectre«-Kachel (Deutsch: Gespenst) lückenlos mit ihren Spiegelungen anzuordnen. Das Gespenst bedeckt die Ebene bloß dann, wenn keine gespiegelten Versionen vorkommen. Doch die Wissenschaftler mussten auch für diesen Fall beweisen, dass die Kacheln ausschließlich nichtperiodische Muster erzeugen.

Die geschwungene Form der Gespenst-Kachel stellt dabei eine Schwierigkeit dar – es ist viel einfacher, mit Vielecken umzugehen. Daher haben Myers, Kaplan und Goodman-Strauss gezeigt, dass sich die Spectre-Pflasterungen eins-zu-eins auf Parkette mit dem ursprünglichen von Smith untersuchten 14-Eck abbilden lassen. Sprich: Jedes Gespenst in der Ebene entspricht genau einem 14-Eck in der gleichen Ausrichtung und umgekehrt. Somit mussten die Forscher lediglich zeigen, dass das 14-Eck ohne Spiegelung aperiodisch ist. Weil das Spectre ohnehin keine Spiegelung zulässt, würde daraus direkt folgen, dass es sich hierbei um eine Einstein-Kachel handelt.

Dafür haben Myers, Goodman-Strauss und Kaplan die klassische Herangehensweise gewählt und mit Hilfe der Inflation gezeigt, dass das 14-Eck die gesamte Ebene bedecken kann. Wie sich aufwändigen Fallunterscheidungen zeigen ließ, ist jede Kachelung zwangsläufig nichtperiodisch. Damit ist das Gespenst ebenfalls ein Einstein. Dieses Mal aber eines, das ohne Spiegelbild auskommt – und deshalb von manchen Fachleuten als Vampir bezeichnet wird, das der Legende nach kein Spiegelbild besitzt.

Aber auch bei Spectre-Pflasterungen herrscht ein Ungleichgewicht. Die Gespenst-Kachel erscheint innerhalb einer Parkettierung in zwölf unterschiedlichen Ausrichtungen, die um jeweils 30 Grad gegeneinander verdreht sind. Und wie sich herausstellt, tauchen sechs die-



DAS GESPENST Diese »Spectre«-Kachel ist ein Einstein, der im Gegensatz zum Hut keine Spiegelungen benötigt.

ser gedrehten Formen deutlich seltener auf als die anderen. Würde man also auf einem unendlichen Spectre-Parkett stehen, könnte man wie bei der Hut-Kachelung zwischen zwei verschiedenen Versionen unterscheiden. »Das ist vor allem aus physikalischer Sicht nicht völlig zufriedenstellend«, erklärt Baake. Wenn man die Pflasterung mit dem Grundzustand eines riesigen Teilchensystems identifiziert (etwa einem Quasikristall), dann lässt diese Unterscheidbarkeit zwei verschiedene Zustände zu.

Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass ein weiterer Einstein gefunden wird, der diese Unterscheidbarkeit nicht mit sich bringt. Zudem gibt es jede Menge anderer offener Fragen auf dem Gebiet. »Es wäre interessant, herauszufinden, wie viele Seiten eine Einstein-Kachel mindestens braucht«, sagt Rao. »Oder ob eine rein aperiodische Kachel auch ein Polygon sein kann.« Ein neues Ziel ist also, einen möglichst einfachen Einstein zu finden. Und wer weiß, vielleicht spielt David Smith gerade mit einer Form herum, die diese Eigenschaft mit sich bringt. ◀

VORLÄUFER DES SPECTRE David Smith erkannte, dass diese Form die Ebene stets nichtperiodisch pflastert, wenn man keine Spiegelungen zulässt.

QUELLEN

Baake, M. et al.: Dynamics and topology of the Hat family of tilings. ArXiv: 2305.05639, 2023

Smith, D. et al.: A chiral aperiodic monotile. ArXiv: 2305.17743, 2023

Smith, D. et al.: An aperiodic monotile. ArXiv:2303.10798, 2023



GLIOME

Krebszellen manipulieren Neurone

Hirntumoren können synaptische Verbindungen mit Nervenzellen knüpfen und wachsen auf Kosten der kognitiven Fähigkeiten weiter heran. Das hat fatale Folgen.

► Sie lassen sich nur schwer behandeln und enden meist tödlich: Die als maligne Gliome bezeichneten Hirntumoren gehören zu den gefürchtetsten Krebserkrankungen. Wie die ausschließlich im Zentralnervensystem vorkommenden bösartigen Tumorzellen mit den knapp 100 Milliarden Neuronen im menschlichen Gehirn interagieren, ist bislang kaum bekannt. Dabei wäre ein Verständnis

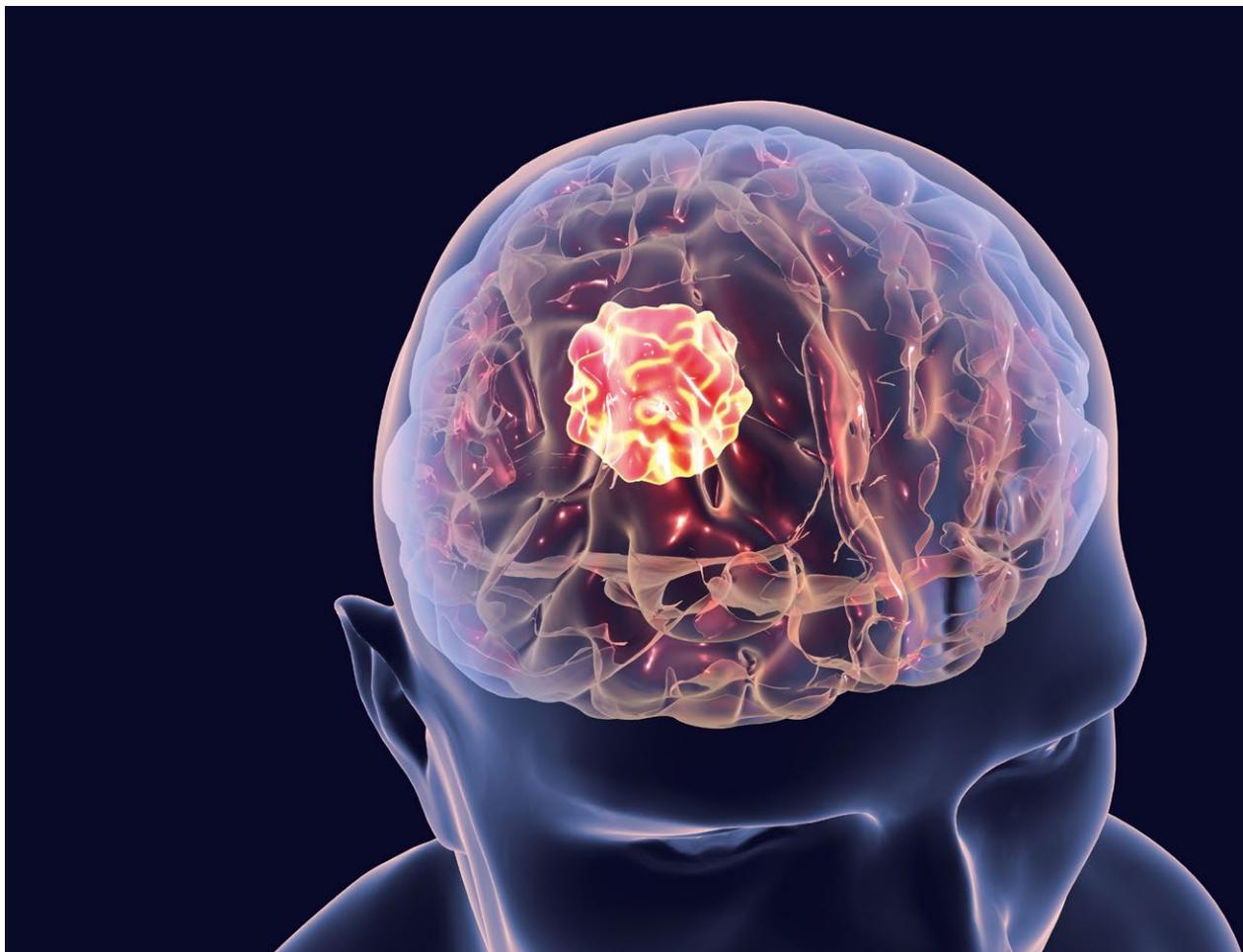
HIRNTUMOREN sind schwer zu behandeln und treten glücklicherweise eher selten auf (Illustration).

für diese Wechselwirkungen wichtig, weil es in den letzten Lebensmonaten der meisten Patienten zu einem fortschreitenden kognitiven Verfall kommt, der ihre Lebensqualität zusätzlich beeinträchtigt.

Das menschliche Gehirn stellt ein komplexes System dar mit hochgradig koordinierten Interaktionen zwischen großen spezialisierten Gruppen von Neuronen, den neuronalen Netzen. Die Dynamik und Formbarkeit dieser Netze, oft als Neuroplastizität bezeichnet, bildet die Basis für Hirnentwicklung und Lernen, ermöglicht aber auch eine Regeneration nach Hirnschäden. Als grundlegendste Einheit der Neuro-

plastizität fungieren die Kontaktpunkte zwischen den Neuronen – diese Synapsen bieten die Informationsweitergabe innerhalb des Gehirns sowie zum Rest des Körpers. Alle menschlichen Gedanken, Handlungen, Emotionen und Erinnerungen entstehen in einem Geflecht aus elektrochemischen Signalen, das durch Synapsen vermittelt wird.

Bislang ging man davon aus, dass Gliome die neurologischen und kognitiven Funktionen auf eine der folgenden Weisen beeinträchtigen: durch das Eindringen ins Hirngewebe, durch den von ihnen ausgeübten Druck, durch das Anschwellen des angrenzenden Gewebes oder durch



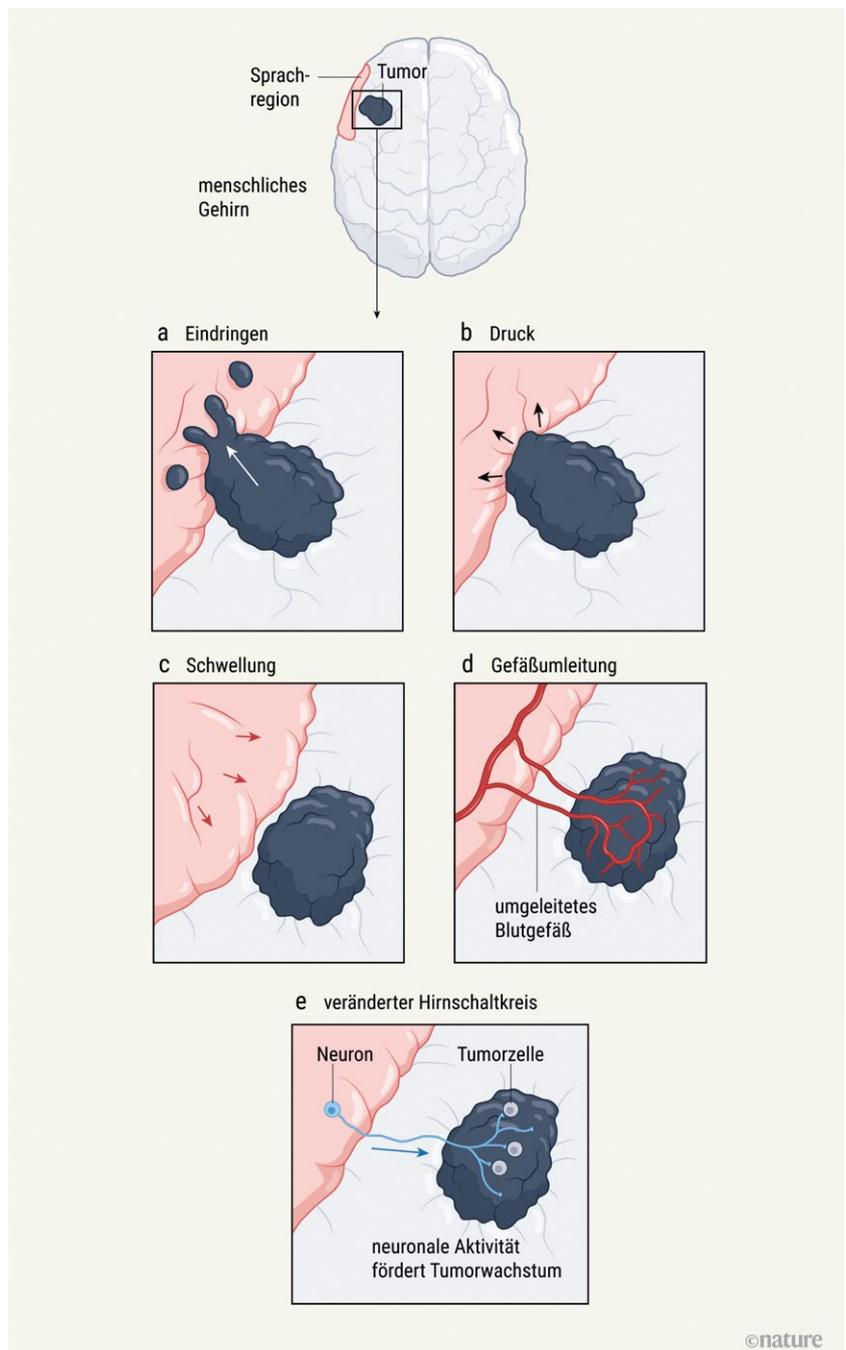
die Beeinträchtigung der Blutversorgung, indem der Tumor Blutgefäße zu sich umleitet. Forscherinnen und Forscher um den Neurochirurgen Shawn Hervey-Jumper von der University of California in San Francisco enthüllten nun einen bisher unbekannt Mechanismus, bei dem Gliome die Schaltkreise des Gehirns nach ihren eigenen Bedürfnissen umgestalten, indem sie die Neuroplastizität durch synaptische Umstrukturierung missbrauchen und dadurch die Hirnarchitektur aktiv verändern. Die Fähigkeit, aus dieser induzierten Plastizität Kapital zu schlagen, ermöglicht es den Geschwülsten, zusätzliche neuronale Signale zu erhalten und sich zu vermehren.

Frühere Forschungen hatten bereits gezeigt, dass neuronale Aktivität das Wachstum von Gliomen fördern kann. So bilden sich zwischen Hirn- und Krebszellen elektrophysiologisch funktionsfähige Synapsen; und die zwischen ihnen fließenden Ströme, die normalerweise der Kommunikation im Gehirn dienen, fördern die starke Ausbreitung des Tumors. Bei der Erbkrankheit Neurofibromatose scheinen neuronale Erregungen in den Sehbahnen die Tumorentstehung zu beeinflussen. Die jetzige Studie deutet darauf hin, dass sogar bewusste Gedanken hier mitwirken – eine unerwartete Verbindung zwischen Gehirn und Geist.

Verbindung zu fernen Hirnzentren

Das Team von Hervey-Jumper bat Patienten, die bei einer Hirnoperation wach lagen, Gegenstände auf Bildern zu benennen, während es gleichzeitig ihre Hirnaktivitäten aufzeichnete. Dabei regten sich auch Hirngebiete, die vom Tumor befallen waren, aber weit weg von den bekannten Spracharealen lagen und normalerweise wohl nichts mit den Sprachnetzwerken zu tun haben.

Die synaptischen Verknüpfungen in großräumigen Netzwerken des Gehirns maßen die Forscher per Magnetenzephalografie. Diese Technik detektiert winzige Magnetfelder,



Fatale Auswirkungen eines Hirntumors

Ein Gliom beeinträchtigt auf verschiedene Weise die Funktionsfähigkeit des Gehirns. Liegt es etwa in der Nähe von Sprachzentren wie in der linken Hirnrinde, kommt es zu Sprachstörungen. Verursacht wird das, indem das Geschwulst in das Hirngewebe eindringt (a), es zusammendrückt (b), Schwellungen auslöst (c) oder die Blutversorgung zum Tumor umleitet (d). Nun fand eine US-amerikanische Arbeitsgruppe heraus, dass ein Gliom zudem zu kognitiven Defiziten führt, indem es die neuronalen Schaltkreise des Gehirns verändert (e). Dabei bilden sich aktive Synapsen zwischen Tumor und Neuronen, die ein aggressives Wachstum der Krebszellen fördern und meist zum Tod des Betroffenen führen.

die durch die elektrische Aktivität großer Populationen von Neuronen erzeugt werden. Hirnregionen, deren Magnetfelder sich synchron verhalten, gelten als funktionell gekoppelt. Dabei konnten die Wissenschaftler verschiedene Bereiche des Tumorgewebes ausmachen, deren Verknüpfungen mit anderen Hirnarealen sich in solche hoher (HFC) oder niedriger funktioneller Konnektivität (LFC) unterscheiden ließen.

In ersteren regten sich verstärkt Gene, die neuronale Schaltkreise aufbauen helfen – darunter eines, das für ein Protein namens Trombospondin 1 (TSP-1) codiert. Dieses wird normalerweise von Astrozyten des Gehirns ausgeschieden und wirkt an der Synapsenbildung mit. Die erhöhte Genaktivität im Tumorgewebe beeinflusste wiederum die Verdrahtung zum gesamten Gehirn.

Die dabei ablaufenden Vorgänge untersuchte die Arbeitsgruppe von Hervey-Jumper anhand tumorhaltiger Organoiden, also künstlicher dreidimensionaler Zellkulturen. Wie sich herausstellte, kommunizierten Zellen aus HFC-Gliomen im Vergleich zu LFC-Tumoren stärker mit den Neuronen in den Kulturen. Das passt zu Symptomen bei Hirntumorpatienten, etwa epileptischen Anfällen, die mög-

licherweise durch die synaptischen Interaktionen des Krebsgeschwürs ausgelöst werden.

Als nun die Wissenschaftler das Protein TSP-1 zu LFC-Regionen von Tumoren hinzufügten, verhielten sich diese wie HFC-Gliome: Es trat eine ähnlich starke Verknüpfung mit den Neuronen im Organoid auf. Im Einklang dazu ging das Krebswachstum zurück, sobald die Forscher die Kulturen mit dem TSP-1-Hemmstoff Gabapentin behandelten. Darüber hinaus bildeten Hirntumoren im Hippocampus von lebenden Mäusen Synapsen, wenn sie TSP-1 zugaben.

Ein Warnsignal

In speziell aufbereiteten Kulturmedien entwickelten HFC-Gliomzellen zelluläre Fortsätze, die als »tumor microtubes« bekannt sind und Krebszellen miteinander verbinden, wobei sie vermutlich die neuronale Aktivität unterstützen. Diese Beobachtung ist vor allem deshalb wichtig, weil sich Tumorzellen mit derartigen Mikroröhren als besonders hartnäckig gegenüber einer Strahlentherapie erweisen.

Sowohl bei Mäusen als auch bei Menschen gingen Überlebensrate und kognitive Fähigkeiten zurück, wenn sich in den Gehirnen Gliome

mit hoher funktioneller Konnektivität ausgebreitet hatten. Die Studie von Hervey-Jumper und seinem Team demonstriert eindrücklich, wie solche Tumoren die neuronale Plastizität kapern und dadurch auf Kosten der Hirnleistung wachsen. Ein kognitiver Rückgang bei Hirntumorpatienten könnte somit ein Warnsignal für eine schlechte Überlebenschance sein. Die elektrische Kommunikation im Gehirn zwischen den Neuronen und dem Tumor wirkt verblüffend. Offensichtlich liegt hier eine einzigartige Form der Plastizität vor, zu der Hirntumoren in der Lage sind. ◀

George M. Ibrahim ist Neurochirurg am Hospital for Sick Children in Toronto und Assistenzprofessor für Biomedizinische Technik an der University of Toronto (Kanada). **Michael Taylor** ist Professor und Neuroonkologe am Texas Children's Hospital in Houston (USA).

QUELLE

Krishna, S. et al.: Glioblastoma remodelling of human neural circuits decreases survival. *Nature* 617, 2023

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 617, S. 469–471, 2023

KI ALS WETTERFROSCH

Wettervorhersagen ohne meteorologisches Verständnis

Zwei neue Algorithmen zeigen das riesige Potenzial künstlicher Intelligenz im Bereich der Wettermodelle. Doch die Technologie birgt auch Risiken.

▶ Täglich erreichen uns Schlagzeilen über den Einsatz und Missbrauch von generativer künstlicher Intelligenz (KI) – den Algorithmen wie ChatGPT, die realistische Inhalte unter anderem in Text- oder Videoform erzeugen

können. Die anfängliche öffentliche Begeisterung wurde schnell durch Bedenken gedämpft. Eine ähnliche Debatte zu den neuen Technologien führen auch Atmosphärenwissenschaftler: Denn einige von ihnen

haben nun begonnen, generative KI in ihre Modelle zur Wettervorhersage einzubauen. Im Juli 2023 haben zwei Forschungsgruppen ihre neuesten KI-Wettermodelle in der Fachzeitschrift »Nature« vorgestellt: Das



GREMLIN / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIGITALES WETTER

Vielleicht liegen Wetterprognosen dank künstlicher Intelligenz bald weniger oft daneben.

Team um Kaifeng Bi vom chinesischen Unternehmen Huawei Cloud in Shenzhen hat ein Modell entwickelt, das das Wetter für bis zu sieben Tage vorhersagt, während Yuchen Zhan und seine Kolleginnen und Kollegen

von der Tsinghua-Universität in Peking einen Algorithmus zur Niederschlagsvorhersage für bis zu drei Stunden im Voraus präsentiert haben.

Herkömmliche Wettervorhersagemodelle basieren auf physikalischen Gleichungen, die mit computergestützten Verfahren ausgewertet werden – ein Ansatz, der als numerische Wettervorhersage bekannt ist. Generative KI-Wettermodelle arbeiten anders. Anstatt eine Vorhersage

auf Grundlage physikalischer Erkenntnisse zu treffen, stützen sie sich auf historische Messungen und Statistik. Diese Methode hat sich als so vielversprechend erwiesen, dass sich ein Paradigmenwechsel abzeichnet: KI-basierte Modelle könnten die numerische Wettervorhersage vollständig ersetzen.

Das Herzstück eines numerischen Wettervorhersagemodells ist sein »dynamischer Kern«, das sind Gleichungen, welche die zu Grunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten codieren: Impuls-, Masse- und Energieerhaltung. Doch selbst die schnellsten Computer brauchen sehr lange, um solche Gleichungen zu lösen. Und die Ergebnisse führen zu Vorhersagemodellen mit einer Auflösung von nur etwa 28 Kilometern – das ist viel zu grob, um kleinskalige physikalische Prozesse wie Wolken, Strahlung und Turbulenzen zu modellieren.

Um den Einfluss dieser Prozesse auf die Vorhersage dennoch zu berücksichtigen, kann man eine Reihe von Parametern einführen, deren Werte man ebenfalls aufwändig simulieren muss. Dadurch fügt man aber eine Fehlerquelle in das Modell ein. Eine andere Methode, die vor fast 20 Jahren vorgeschlagen wurde, behält den dynamischen Kern bei, ersetzt aber die beschriebenen Parametrisierungen durch wesentlich schnellere KI-Algorithmen.

10 000-mal schneller als andere Modelle

Die beiden Forschungsgruppen um Bi und Zhang haben einen noch radikaleren Ansatz gewählt: Sie haben die gesamte numerische Wettervorhersage durch ein KI-Modell ersetzt. Das Team von Huawei Cloud hat sein Programm dazu ausschließlich mit Beobachtungsdaten trainiert, während Zhang und Co ihre KI zusätzlich mit physikalischen Gleichungen gefüttert haben.

Die Forschungsgruppe um Bi hat ihr Modell »Pangu-Weather« genannt. Es sagt die Temperatur, die Windgeschwindigkeit und den Luftdruck sowie andere Wettervariablen vor-

aus. Das Programm ist rund 10 000-mal schneller als numerische Wettervorhersagemodelle – bei gleicher räumlicher Auflösung und vergleichbarer Genauigkeit. Pangu-Weather kann dabei mehr Höhenstufen über der Erdoberfläche verarbeiten als seine KI-Vorgänger, wie etwa FourCastNet. Zudem verwendet die KI ein dreidimensionales Modell, um die atmosphärischen Zustände bei unterschiedlichen Drücken zuverlässig zu erfassen und sicherzustellen, dass die Vorhersagen zwischen den einzelnen Ebenen zusammenpassen. Dadurch wird das Programm besonders genau.

Auf diese Weise kann Pangu-Weather mittelfristige Vorhersagen machen. Das KI-Modell trifft aber keine Aussage über den Niederschlag – die Wettervariable, die sich am schwersten prognostizieren lässt. Dieser Herausforderung haben sich Zhang und sein Team mit ihrem Kurzzeitvorhersagemodell »NowcastNet« gestellt, das Regen wenige Stunden im Voraus vorhersagt. Indem sich NowcastNet ausschließlich auf diese Aufgabe konzentriert, kann das Programm schärfere und realistischere meteorologische Szenarien erzeugen als seine KI-basierten Vorgänger wie PredRNN.

Das Team von Huawei Cloud berichtet von kürzeren Rechenzeiten, was enorme Vorteile bringen könnte. Denn Behörden, die für numerische Wettervorhersagen zuständig sind, verfügen nur über begrenzte Rechenkapazitäten. Die durch Einsatz der KI frei gewordenen Ressourcen könnten sie in Simulationen stecken, die derzeit noch nicht möglich sind: von der Ausbreitung von Bränden über Atmosphärenchemie und die Entwicklung von Rauchmustern bis hin zu Vegetationsveränderungen. Außerdem könnten die schnelleren Methoden höher aufgelöste Modelle erzeugen.

Damit ließen sich auch vermehrt globale statt regionaler Modelle nutzen, was Ungenauigkeiten an den Grenzgebieten zwischen den betrachteten Regionen verringert. Insgesamt könnte man also mehrere Wetterzu-

stände abbilden und mit physikalischen Prozessen (wie der Ausbreitung von Bränden) verbinden, die sich auf die Luftqualität und die menschliche Gesundheit auswirken.

KI kennt keine Extreme

Allerdings bergen die KI-Wettermodelle auch Risiken. Drei davon hängen mit Extremereignissen zusammen, die sich durch den Klimawandel häufen. Erstens: Je nachdem, wie weit die Trainingsdaten der KI zurückreichen, könnten seltene Ereignisse wie »Monsterstürme«, die bisher nur wenige Male pro Jahrhundert auftreten, zu selten erfasst werden.

Zweitens werden KI-Modelle meist optimiert, indem genaue lokale Messungen über große Regionen gemittelt werden. Das könnte zu Problemen bei der Vorhersage mancher Phänomene wie schweren Stürmen oder tropischen Wirbelstürmen führen.

Und drittens ist das Verhalten eines KI-Systems oft unvorhersehbar, wenn es unter Bedingungen arbeitet, denen es noch nie zuvor begegnet ist. Ein extremes Wetterereignis könnte daher zu falschen Vorhersagen führen.

Andere Probleme, die sich durch die Verwendung von KI ergeben, sind eher technischer Natur. Wenn Fachleute neue Modelle entwickeln, die wie Pangu-Weather mehrere Größen wie Temperatur und Bewölkung vorhersagen, müssen sie besonders vorsichtig sein, denn die Variablen können voneinander abhängen.

In numerischen Wettervorhersagemodellen sind diese Abhängigkeiten eingebaut, in reinen KI-Modellen jedoch nicht. Außerdem befinden sich viele KI-Programme noch im Anfangsstadium und enthalten nicht alle Variablen, die Meteorologen interessieren: etwa die Art des Niederschlags – Regen, Hagel oder Schnee – oder die physikalischen Faktoren, die beim Niederschlag eine Rolle spielen.

Und schließlich erfordert die Entwicklung komplexer Modelle wie Pangu-Weather einen erheblichen

Rechenaufwand, den sich aktuell nur große Unternehmen leisten können. Aber obwohl ihre Entwicklung kompliziert ist, können sie problemlos auf gewöhnlichen Rechnern laufen.

Angesichts der potenziellen Vorteile und Risiken ist es an der Zeit, dass sich Meteorologen mit KI-basierten Wettermodellen auseinandersetzen und lernen, wie deren Vorhersagen zu interpretieren sind. Das ist entscheidend, denn KI-Systeme unterscheiden sich von physikalischen Modellen: Das Verständnis ihrer Vorhersagen erfordert Erfahrung.

Wir verwenden zum Beispiel den mit FourCastNet zur Verfügung gestellten Softwarecode, um Echtzeitvorhersagen zu machen, die wir anschließend mit numerischen Wettervorhersagen und Satellitenbeobachtungen vergleichen. Auf diese Weise können wir dem Forschungsteam von FourCastNet Feedback geben. Eine wichtige Voraussetzung für solche Initiativen ist, dass die Veröffentlichungen von einem einfach auszuführenden Code begleitet werden. Daher sollten die Herausgeber von Fachzeitschriften aus unserer Sicht die Verfügbarkeit solcher Codes vorschreiben. Fachleute könnten die Quellcodes von Pangu-Weather und NowcastNet nutzen, um die Modelle zu testen, Rückmeldungen zu geben und dabei zu helfen, über den angemessenen Einsatz von KI im Hinblick auf die öffentliche Sicherheit zu entscheiden. ◀

Imme Ebert-Uphoff forscht zusammen mit **Kyle Hilburn** am Cooperative Institute for Research in the Atmosphere an der Colorado State University.

QUELLEN

Zhang, Y. et al.: Skilful nowcasting of extreme precipitation with NowcastNet. *Nature* 619, 2023

Bi, K. et al.: Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature* 619, 2023

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 619, 473–474, 2023



Seit
2010

Sie möchten Lehrstühle oder Gremien mit Frauen besetzen? Sie suchen Expertinnen, Gutachterinnen oder Rednerinnen?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.800 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

KOSMOLOGIE

Weltraumteleskop Euclid öffnet seine Augen

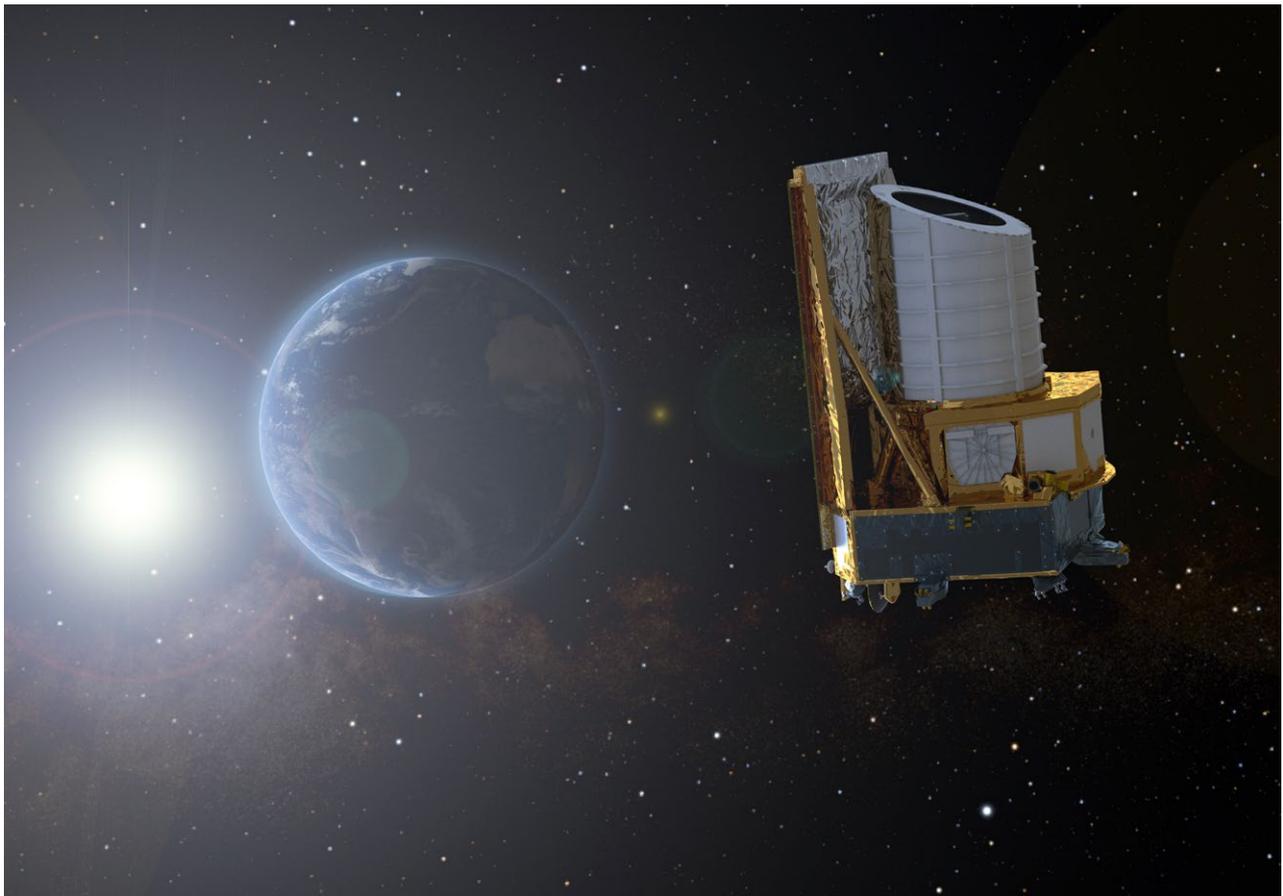
Das Weltraumteleskop Euclid ist an seinem Bestimmungsort angekommen. Erste Aufnahmen im sichtbaren Licht und im Infraroten sind viel versprechend.

► Rund elf Jahre nach dem offiziellen Beginn des Projekts im Jahr 2012 hat das Weltraumteleskop Euclid nach einer vierwöchigen Reise zum Lagrange-Punkt L2 seine ersten Bilder geliefert. Es sind zwar noch unbearbeitete Rohbilder, aber sie belegen eine sehr gute optische Qualität des Teleskops und seiner beiden Instrumente VIS (Visible Instrument) und NISP (Nahinfrarotspektrograf und Photometer). Die Aufnahmen zeigen Sternfelder mit

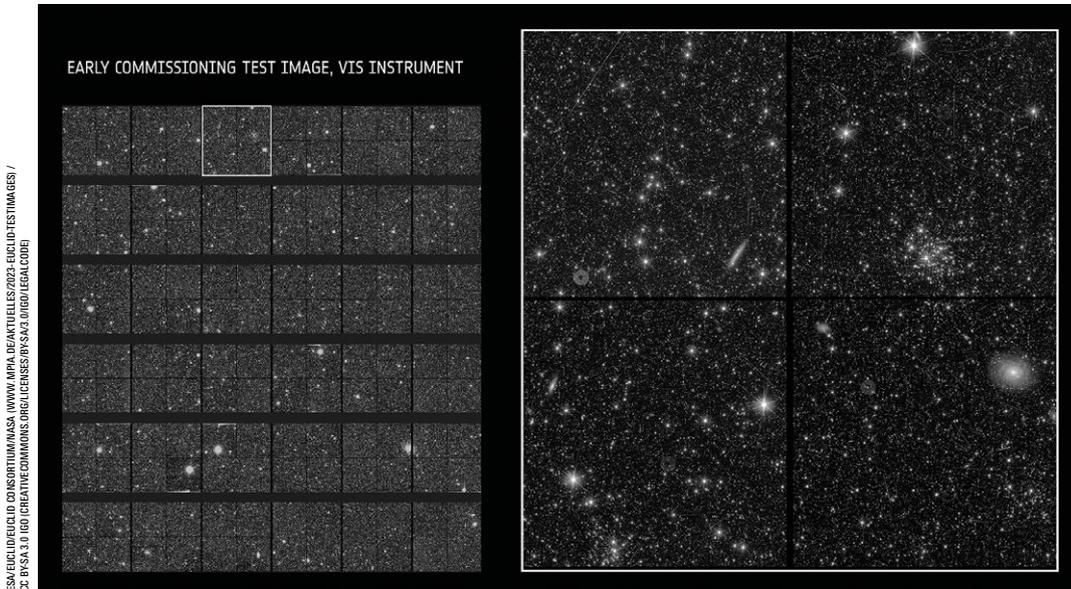
einzelnen Galaxien im Hintergrund und sind gestochen scharf. Somit hat das Teleskop die rauen Bedingungen während des Starts augenscheinlich gut überstanden.

VIS besteht aus 36 CCD-Chips mit insgesamt 609 Megapixeln und ist damit eine der größten Digitalkameras im Weltraum. Das Instrument deckt den Spektralbereich von 550 (grünes Licht) bis 900 Nanometer (Nahinfrarot) ab und dient zur Aufnahme von Bildern. NISP verwendet einen CCD-

EUCLID-MISSION Zwei große kosmologische Fragen sollen mit dem Teleskop (Illustration) beantwortet werden: »Was sind die grundlegenden physikalischen Gesetze des Kosmos?« und »Wie ist das Universum entstanden und woraus besteht es?«.

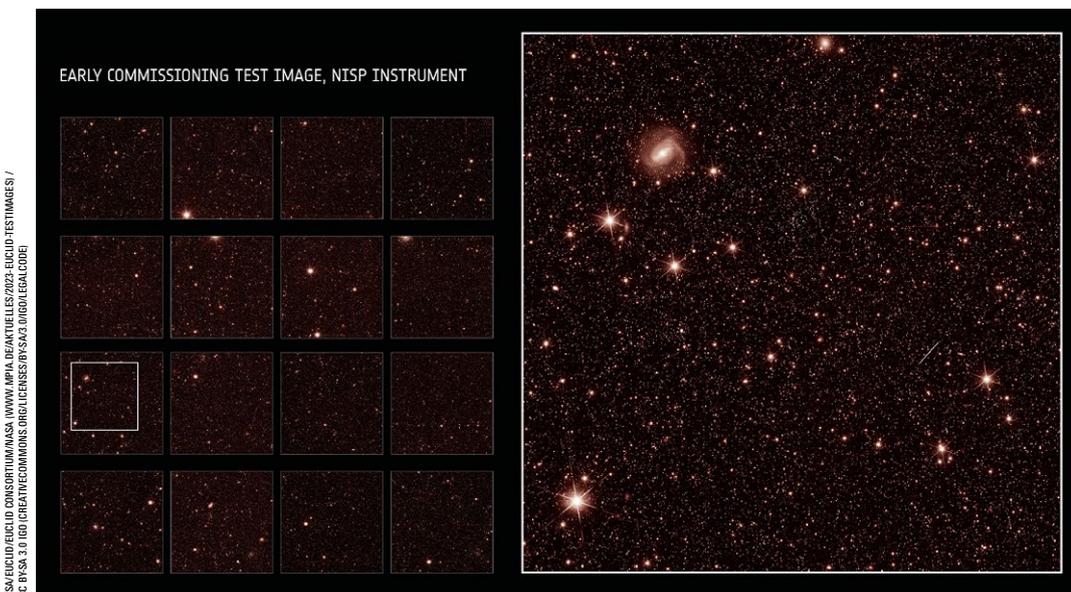


ESA. ACKNOWLEDGEMENT: WORK PERFORMED BY ATG UNDER CONTRACT FOR ESA (WWW.ESA.INT/ESA_MULTIMEDIA/IMA/GES/2020/05/EUCLID_ON ITS WAY TO L2/ CC BY-SA 3.0) (CREATIVEDOMAINS.ORG/LICENSING/SAG.0100/LEGACODE)



Euclids erstes Testbild im sichtbaren Licht

Gestochen scharf schon auf dem Rohbildern präsentieren sich Sterne und Galaxien auf den ersten Euclid-Bildern im sichtbaren Licht. Rechts ist eine Detailvergrößerung des im linken Bild markierten Bereichs zu sehen. Die feinen Striche sind Spuren geladener Partikel aus dem All, die während der Aufnahme auf Euclids Detektoren trafen. Sie werden auch als Cosmics bezeichnet.



Aufnahme im Infraroten

Auch im Infraroten liefert das Weltraumteleskop Euclid sehr detailreiche Bilder. Rechts ist vergrößert dargestellt, was im linken Bild markiert wurde. In diesem ist auf etwa »11 Uhr« eine Spiralgalaxie mit zentralem Balken zu sehen. Der helle Strich rechts könnte die Spur eines geladenen Teilchens auf dem Detektor oder eine Strichspur eines Asteroiden sein.

Detektor aus 16 CCD-Chips mit insgesamt 64 Megapixeln. Es nimmt Daten im infraroten Spektralbereich von 900 bis 2000 Nanometer auf und erzeugt sowohl Bilder als auch Spektren der beobachteten Objekte.

Euclid soll zum ersten Mal systematisch vom Weltraum aus den Einfluss der nach wie vor rätselhaften Dunklen Materie und der Dunklen Energie auf die Entwicklung und die räumliche Struktur des Universums erkunden. Beide Komponenten machen zusammen 95 Prozent des Kosmos aus, während die gewöhnliche Materie auf nur etwa fünf Prozent kommt. Der Einfluss der Dunklen Materie bestimmt die Schwerkraft innerhalb und zwischen den Galaxien sowie Galaxienhaufen; die Dunkle Energie wird für die beobachtete beschleunigte Ausdehnung des Kosmos verantwortlich gemacht. Euclid soll rund ein Drittel des Himmels abtasten und dabei schon nach wenigen Tagen mehr wissenschaftliche Bildinformationen

zur Erde senden als das Weltraumteleskop Hubble in den bislang mehr als 33 Jahren seit Beginn seiner Beobachtungen.

An der Instrumentierung von Euclid sind deutsche Forschungsinstitute maßgeblich beteiligt, darunter das Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg und das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching bei München. Sie entwickelten und bauten unter anderem Schlüsselkomponenten für die Optik. Die vier bis zu 18 Zentimeter großen und 2,5 Kilogramm schweren Linsen des NISP-Instruments bilden das größte Linsenobjektiv, das jemals in den Weltraum geschickt wurde. Mit einer Einstellgenauigkeit von weniger als einem Zehntel des Durchmessers eines menschlichen Haares (etwa 0,007 Millimeter) ist es zudem das am besten justierte Objektiv aller Weltraummissionen. Um die notwendigen Genauigkeiten zu erreichen, wurden völlig neue Methoden im Hinblick auf

die Fertigung und die Ausrichtung der Linsen erarbeitet. Insgesamt sind Forschungseinrichtungen in 17 Ländern an Euclid beteiligt, darunter auch Institute in den USA, Kanada und Japan.

Euclid kann nicht den gesamten Himmel abbilden, da unser Milchstraßensystem mit seinen mehreren hundert Milliarden Sternen den Himmel so ausfüllt, dass man die Galaxien vor lauter Sternen nicht sieht. Auch die Ansammlungen von Gas und Staub in der galaktischen Ebene verschleiern die Sicht. Außerdem wird Euclid die Ebene des Sonnensystems meiden, da hier Staub den Himmel im Infraroten deutlich aufhellt und die Messungen verfälscht. Somit beschränken sich Euclids Beobachtungen auf etwa ein Drittel des Himmels, wo weder Objekte noch Staub im Vordergrund die Sicht behindern. ◀

Tilmann Althaus ist Redakteur für Astronomie.

Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS

SPEKTRUM PLUS-LESEREXKURSION

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Neben einer Einführung in die Forschungsschwerpunkte gibt es eine Campusführung mit Besichtigung wissenschaftlich-technischer Einrichtungen wie die Anlagen KATRIN und GridKa.

TERMIN: **Dienstag, 5. Dezember 2023, 09:30 Uhr**

Anmeldung und weitere Vorteile:
Spektrum.de/plus



Oppenheimers gespaltene Geschichte

Ein Kinofilm zeichnet Oppenheimers Aufstieg im Atombombenprojekt der USA nach. Noch interessanter ist jedoch sein Fall in Ungnade.

» spektrum.de/artikel/2169840

Es währte 70 Jahre, bis die US-Regierung den »Vater der Atombombe« explizit vom Verdacht reinwusch, er habe sein Land verraten. Für die posthume Absolution, die Energieministerin Jennifer Granholm im Dezember 2022 aussprach, könnte ein Film den Ausschlag gegeben haben.

Das Biopic »Oppenheimer« hält sich eng an eine monumentale, 2006 mit dem Pulitzer-Preis ausgezeichnete Biografie. Die Buchautoren Kai Bird und Martin J. Sherwin hatten sich immer wieder vergeblich um die Rehabilitierung des Quantenphysikers bemüht, der einst als kriegsentscheidender Nationalheld gefeiert und kurz darauf als Gefährder der nationalen Sicherheit geächtet worden war.

Erst als 2022 die Dreharbeiten in der Wüste von New Mexico in vollem Gange waren und es sich abzeichnete, dass der entstehende Blockbuster auf eine peinliche Kritik hinauslaufen würde, bequemte man sich dazu, das Unrecht offiziell einzugestehen.

Der britische Filmregisseur Christopher Nolan hat mit »Interstellar« bewiesen, dass er wissenschaftlichen Stoff in packende Bilder zu übersetzen versteht. Mit »Oppenheimer« riskiert er viel mehr. Er zeigt Kopfarbeiter mit Krawatte, Zigarette oder Pfeife, die an altmodischen Kreidetafeln diskutieren. So sahen die Revolutionäre der Quantenphysik aus.

Die Protagonisten der neuen Wissenschaft, verkörpert durch eine Riege prominenter Darsteller, werden geradezu verschwenderisch im Sekundenakt herbeizitiert: Bohr und Heisenberg, Einstein und Gödel, Szilard und Rabi, Teller und Lawrence, Fermi und Feynman. Obendrein mutet uns Nolan eine nichtlineare Erzählweise zu, die nur durch die jugendliche oder ältliche Maske des Hauptdarstellers Auskunft über die Zeit gibt, in der wir uns befinden.

Damit ist die Bühne einer modernen Tragödie bereitet. Im Weltkrieg kämpfen USA und Sowjetunion Seite an Seite, und die meisten Intellektuellen denken irgendwie links. Kommunisten zu kennen und als Freunde zu haben ist nichts Besonderes. Als »Oppie« anlässlich seiner Bestellung zum Leiter des Atombombenprojekts einen Fragebogen ausfüllen

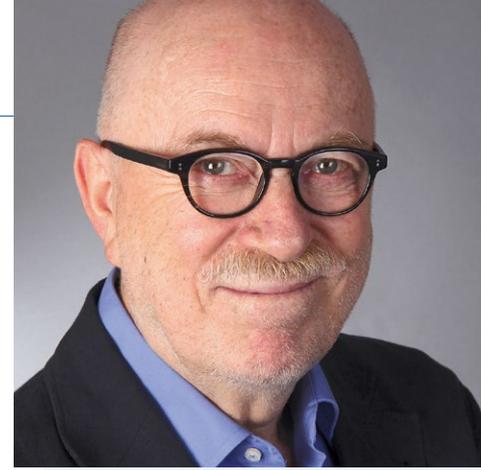
muss, schreibt er hinein: Ich bin oder war Mitglied jeder kommunistischen Tarnorganisation, die es in den USA gibt. Ein aufmüpfiger Scherz.

Trotzdem bescheinigt man ihm seine Unbedenklichkeit, denn er ist die ideale Besetzung für den Job: charismatisch, unter Physikern anerkannt und beliebt, ein Organisator. Als die erste atomare Testbombe in der Wüste detoniert, kennt Oppenheimers Euphorie keine Grenzen. Man trägt ihn buchstäblich auf Schultern wie einen Popstar.

Ein normaler Blockbuster wäre damit an seinem Happy End. Aber Nolan nötigt dem Zuschauer, der nun schon fast zwei Stunden unter Leinwandphysikern ausgeharrt hat, eine weitere Stunde auf. Jetzt kommt Oppenheimers Fall.

Der Vater der Atombombe ist erschüttert von den Bildern aus Hiroshima und Nagasaki – die wir nicht sehen müssen; es genügt der Widerschein auf seinem Gesicht. Er schlägt zusammen mit Einstein und anderen Physikern internationale Abrüstungsverhandlungen vor. Doch der politische Wind hat sich gedreht. Nazideutschland hat schon Wochen vor den Atombombenabwürfen auf Japan kapituliert. Sie signalisieren vielmehr dem neuen Gegner, der Sowjetunion, die Potenz der USA.

Als die UdSSR alsbald atomar gleichzieht, konstruieren die US-Physiker eine noch viel mächtigere Superwaffe, die Wasserstoffbombe. Oppenheimer opponiert, viele Theoretiker mit ihm. Das wird ihm als Verrat ausgelegt. Er darf populärwissenschaftliche Vorträge halten und pazifistische Artikel schreiben, aber für das politisch-militärische Establishment, dessen Held er einst war, ist er gestorben. Dieser Aspekt der Geschichte ist der spannende Teil: nicht die Spaltung von Atomen, sondern der ganzen Welt. Sie endet nicht mit der Rehabilitierung Oppenheimers, und das verschafft Nolans Film eine Relevanz, die über Blockbuster-Effekte hinausgeht.



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

Quantenregeln für die Unordnung

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gilt als unumstößliches physikalisches Gesetz. Allerdings fußt er auf Konzepten aus dem 19. Jahrhundert. Dass auf großen Skalen manche Prozesse unumkehrbar sind, führen moderne Ansätze auf quantenmechanische Information zurück.

► spektrum.de/artikel/2169843



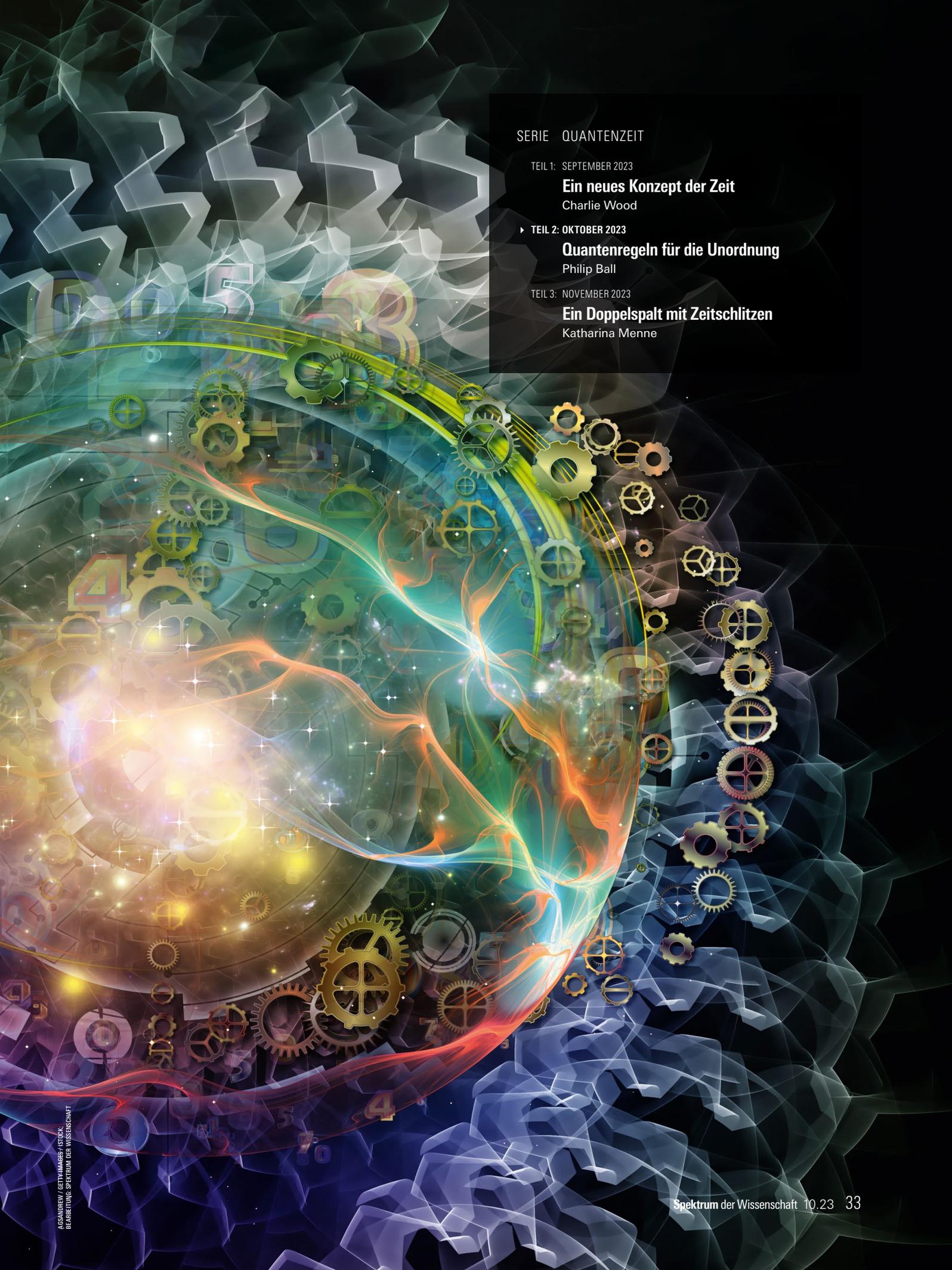
Philip Ball ist Wissenschaftsjournalist in London.

AUF EINEN BLICK

Dampfmaschine trifft auf Quantenmechanik

- 1** Die Zeit der industriellen Revolution wurde durch Maschinen geprägt, die Energie umwandeln. Die damals entwickelte Wärmelehre bot einen theoretischen Rahmen für diese Erfindungen.
- 2** Eine Grundregel der Thermodynamik lautet: Jedes System strebt mit der Zeit zu größerer Unordnung. Doch die Argumentation beruht auf der Statistik sehr großer Zahlen von Teilchen.
- 3** Es ist umstritten, wie solche Wahrscheinlichkeitsaussagen aus dem eigentlich deterministischen mikroskopischen Bild hervorgehen. Ansätze auf Basis der Quantenmechanik liefern Erklärungen.

VOM QUANT ZUR MASCHINE
Die Regeln, nach denen klassische Wärmekraftmaschinen funktionieren, müssen letzten Endes aus subatomaren Zusammenhängen hervorgehen.



SERIE QUANTENZEIT

TEIL 1: SEPTEMBER 2023

Ein neues Konzept der Zeit

Charlie Wood

▶ TEIL 2: OKTOBER 2023

Quantenregeln für die Unordnung

Philip Ball

TEIL 3: NOVEMBER 2023

Ein Doppelspalt mit Zeitschlitzen

Katharina Menne

In der Physik gibt es wohl kein Prinzip, das so unantastbar ist wie der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Laut ihm nimmt die Entropie, das ist eine Art Maß für die Unordnung eines Systems, immer zu oder bleibt zumindest gleich. »Wenn jemand Sie darauf hinweist, dass die von Ihnen bevorzugte Theorie des Universums den maxwellschen Gleichungen widerspricht – nun, können Sie sagen, um so schlimmer für die maxwellschen Gleichungen«, schrieb der britische Astrophysiker Arthur Eddington 1928 in seinem Buch »The Nature of the Physical World« (1931 unter dem deutschen Titel »Das Weltbild der Physik und ein Versuch seiner philosophischen Deutung« erschienen). »Wenn es sich herausstellt, dass sie mit der Beobachtung unvereinbar ist – gut, auch Experimentalphysiker pfuschen manchmal. Aber wenn Ihre Theorie gegen den zweiten Hauptsatz verstößt, dann ist alle Hoffnung vergebens. Dann bleibt ihr nichts mehr übrig, als in tiefster Demut in der Versenkung zu verschwinden.« Ein Verstoß gegen dieses Gesetz wurde noch nie beobachtet und ist nicht zu erwarten.

Dennoch, einige Fachleute beunruhigt etwas am zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Sie sind nicht davon überzeugt, dass wir ihn richtig verstehen oder dass er auf soliden Fundamenten ruht. Obwohl er als Gesetz gilt, basiert er üblicherweise bloß auf probabilistischen Argumenten: Das Ergebnis eines Prozesses ist stets das wahrscheinlichste. Angesichts der üblicherweise ungeheuer großen Zahl von beteiligten Teilchen bedeutet das letztlich, dass dieser eine Ausgang unvermeidlich ist.

Doch für viele ist eine bloße Beschreibung dessen, was vermutlich passieren wird, unbefriedigend. »Von physikalischen Gesetzen erwarten wir Exaktheit«, sagt die Physikerin Chiara Marletto von der University of Oxford. Lässt sich der zweite Hauptsatz zu mehr als nur einer Aussage über Wahrscheinlichkeiten kondensieren?

Bei dieser Frage scheinen mehrere Forschungsgruppen nun unabhängig voneinander zu einer Antwort gelangt zu sein. Sie verknüpfen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik mit den Prinzipien der Quantenmechanik – denen, so vermuten einige, auf einer fundamentalen Ebene Richtungsabhängigkeit und Irreversibilität innewohnen. Wenn man dieser Auffassung folgt, dann entsteht der zweite Hauptsatz nicht durch klassische Wahrscheinlichkeiten, sondern auf Grund von Quanteneffekten wie der Verschränkung. Er ergibt sich aus der Art und Weise, wie Quantensysteme Informationen austauschen, und aus grundlegenden Prinzipien, die festlegen, was dort geschehen darf und was nicht. In diesem Sinn ist eine Zunahme der Entropie mehr als nur das wahrscheinlichste Ergebnis einer Veränderung. Sie ist eine logische Konsequenz einer ganz grundlegenden Ressource: der Quanteninformation.

Die Thermodynamik wurde im frühen 19. Jahrhundert entwickelt und sollte beschreiben, wie Wärme fließt und Arbeit verrichtet wird. Eine solche Theorie wurde dringend benötigt, während die Dampfkraft die industrielle Revolution vorantrieb und die Ingenieure ihre Maschinen so effizient wie möglich machen wollten. Letztendlich

wurde die Thermodynamik zu einer der zentralen Säulen der modernen Physik. Sie lieferte Kriterien, nach denen sich alle veränderlichen Prozesse richten.

Die klassische Thermodynamik kennt nur eine Hand voll Gesetze, von denen das erste und das zweite die grundlegenden sind. Der erste Hauptsatz besagt, dass Energie in einem geschlossenen System immer erhalten bleibt; gemäß des zweiten fließt Wärme immer vom heißen zum kalten Bereich. Im Allgemeinen wird Letzteres mittels des Begriffs der Entropie ausgedrückt. Sie darf insgesamt nicht abnehmen. In Alltagssprache übertragen wird Entropie häufig mit Unordnung gleichgesetzt. Der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann definierte sie strenger als eine Größe, die sich auf die Gesamtzahl der Mikrozustände in einem System bezieht. Dabei geht es um die Anzahl von Möglichkeiten, wie Teilchen angeordnet sein können.

Das scheint zu erklären, warum Veränderungen überhaupt stattfinden. Denn auf der Ebene einzelner Teilchen lassen sich alle klassischen Bewegungsgesetze hinsichtlich der Zeit einfach umkehren. Demnach könnte jeder Prozess grundsätzlich ebenso gut rückwärts ablaufen und sich beispielsweise ein verquirltes Ei wieder in Eigelb und Eiweiß trennen. Doch laut des zweiten Hauptsatzes

VERWIRBELTE TINTE In klarem Wasser breiten sich Farbstoffmoleküle so lange aus, bis sie gleichmäßig verteilt sind. Damit steigt die Entropie. Die Thermodynamik verbietet den umgekehrten Vorgang – nie wird man erleben, wie sich Lösungsmittel und Tinte von selbst entmischen.



müssen Vorgänge in einer Weise stattfinden, bei denen sich die Entropie erhöht. Das wird gemeinhin als Ursache dafür angesehen, dass die Zeit eine Richtung hat. Dieser Interpretation zufolge fließt die Zeit von der Vergangenheit in die Zukunft, weil das Universum – aus Gründen, zu denen es weder Klarheit gibt noch Einigkeit herrscht – auf einen Zustand mit immer höherer Entropie zusteuert. Schließlich sollte sich die Wärme völlig gleichmäßig verteilen. Daraufhin gibt es keine treibende Kraft mehr für weitere Veränderungen. Diese bedrückende Perspektive bezeichnete der deutsche Physiker und Entdecker des zweiten Hauptsatzes Rudolf Clausius im 19. Jahrhundert als Wärmetod des Universums.

Die mikroskopische Beschreibung der Entropie durch Boltzmann scheint diese Richtungsabhängigkeit zu erklären. Systeme mit vielen Teilchen, die ungeordneter sind und eine höhere Entropie aufweisen, überwiegen bei Weitem gegenüber solchen mit geringerer Entropie. Molekulare Wechselwirkungen rufen mit größerer Wahrscheinlichkeit Zustände hervor, die weniger stark geordnet sind. Der zweite Hauptsatz scheint also nur eine Frage der Statistik zu sein, ein Gesetz der großen Zahlen. Nach dieser Auffassung gibt es keinen fundamentalen Grund, warum die Entropie nicht abnehmen kann und warum sich zum Beispiel nicht alle Luftmoleküle zufällig in einer Ecke eines Zimmers versammeln. Das wäre lediglich ungeheuer unwahrscheinlich.

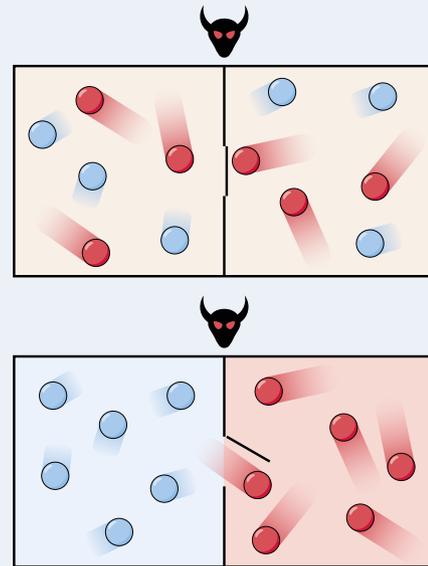
Diese statistische Physik lässt jedoch einige Fragen offen. Sie verweist auf die wahrscheinlichsten Mikrozustände in einem ganzen Ensemble von Möglichkeiten und zwingt dazu, sich mit Durchschnittswerten darüber zu begnügen. Allerdings sind die Gesetze der klassischen Physik deterministisch – sie lassen für jede Ausgangssituation nur ein Resultat zu. Auf welchem Teil des Wegs kommt das hypothetische Ensemble von Zuständen überhaupt ins Spiel, wenn doch nur ein einziges Ergebnis möglich ist?

Von Grund auf neu konstruierte Physik

David Deutsch von der University of Oxford versucht seit einigen Jahren, dieses Dilemma zu umgehen. Er entwickelt eine Theorie, die, wie er es ausdrückt, »eine Welt beschreibt, in der Wahrscheinlichkeit und Zufall bei physikalischen Prozessen völlig unerheblich sind«. Sein Projekt, an dem Chiara Marletto inzwischen beteiligt ist, nennt sich Konstruktorthorie. Sie zielt darauf ab, nicht nur festzustellen, welche Prozesse wahrscheinlich stattfinden können und welche nicht, sondern auch, welche überhaupt erlaubt und welche verboten sind.

Im Rahmen der Konstruktorthorie soll letztlich die gesamte Physik in Form von Aussagen über mögliche und unmögliche Transformationen ausgedrückt werden. Das Modell knüpft an die Anfänge der Thermodynamik an, indem es Veränderungen als etwas betrachtet, das von Maschinen (Konstruktoren) erzeugt wird. Diese arbeiten zyklisch und folgen einem Muster, das dem so genannten Carnot-Zyklus entspricht, der seit dem 19. Jahrhundert die Arbeitsweise von Motoren beschreibt. Der Konstruktor ist

Maxwells Dämon



SPERTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE ZEITZ

Ein Raum ist mit Gas einheitlicher Temperatur gefüllt. Das entspricht auf mikroskopischer Ebene Molekülen, die zwar unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen, sich aber wahllos im gesamten Volumen verteilt haben. Diese Unordnung bedeutet hohe Entropie.

Ein hypothetisches Wesen – ein Dämon – könnte den Raum nun zweiteilen und mit einer Tür versehen, für deren Öffnung es keine Energie aufwenden muss. Nun lässt es in der einen Richtung lediglich die schnellen Teilchen passieren, in der anderen nur die langsamen. So würden sich in einer Hälfte Moleküle mit größerer Energie sammeln, das heißt höherer Temperatur. Gegenüber dem Anfangszustand wäre die Entropie des Systems insgesamt gesunken – das aber verbietet der zweite Hauptsatz der Thermodynamik.

Das Gedankenexperiment von James Clerk Maxwell beschäftigt Fachleute seit dem 19. Jahrhundert und trug dazu bei, theoretische Konzepte zu schärfen. Überlegungen dazu, wie das Wesen die Zustände der einzelnen Teilchen in Erfahrung bringen kann und wie es mit diesem Wissen umgehen muss, führten schließlich zur Lösung des Dilemmas: Auch Messungen und deren Verarbeitung tragen zur Entwicklung der Entropie bei. Das verdeutlicht die Bedeutung der Quanteninformation für die Thermodynamik.

so etwas wie ein Katalysator, der einen Prozess in Gang setzt und am Ende wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt wird. »Angenommen, man möchte eine Umwandlung beschreiben, etwa den Bau eines Hauses aus Ziegelsteinen«, erläutert Marletto. »Man kann sich eine Reihe verschiedener Maschinen vorstellen, die dies mit unterschiedlicher Genauigkeit bewerkstelligen. All diese Maschinen sind Konstrukteure, die in einem Zyklus arbeiten.« Und sie kehren in ihren ursprünglichen Zustand zurück, wenn das Haus gebaut ist.

Aber nur, weil es eine Maschine zur Durchführung einer bestimmten Aufgabe gibt, heißt das nicht, dass sie diese wieder rückgängig machen kann. Ein Gerät, das ein Haus baut, kann es vielleicht nicht wieder abtragen. Damit unterscheidet sich die Funktionsweise des Konstrukteurs von den dynamischen Gesetzen für die Bewegungen der Ziegelsteine, die umkehrbar sind.

Der Grund für die Irreversibilität, so Marletto, liegt darin, dass ein Konstruktor für die meisten komplexen Aufgaben auf eine bestimmte Umgebung eingestellt ist. Aus dieser benötigt er spezifische Informationen, die für die Erfüllung seines Auftrags wichtig sind. Die umgekehrte Abfolge beginnt jedoch in einer anderen Umgebung, so dass derselbe Konstruktor nicht zwangsläufig funktionieren wird.

Im Februar 2022 hat Marletto zusammen mit ihrem Oxford-Kollegen Vlatko Vedral sowie einem Team vom Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica in Turin gezeigt, dass mit der Konstruktorthorie tatsächlich Prozesse auftreten, die irreversibel sind – obwohl alles nach quantenmechanischen Gesetzen abläuft, die selbst umkehrbar sind. »Wie wir zeigen, gibt es einige Transformationen, für die man einen Konstruktor für die eine Richtung finden kann, aber nicht für die andere«, sagt sie.

Die Forscherinnen und Forscher betrachteten eine Transformation, bei der die Zustände von Quantenbits (Qubits) vorkommen. Sie sind das quantenmechanische Analogon zu den aus der Informatik gewohnten Informationseinheiten, den Bits. Qubits können nicht nur in einem von zwei Zuständen, sondern auch in einer Überlagerung von beiden existieren.

In Marlettos und Vedrals Modell kann ein einzelnes Qubit B von einem bekannten Ausgangszustand B_1 in einen Zielzustand B_2 umgewandelt werden, wenn es sich entlang einer Reihe anderer Qubits bewegt und mit ihnen nacheinander wechselwirkt. Diese Interaktionskette verschränkt die Qubits: Ihre Eigenschaften hängen dann voneinander ab, so dass man ein Qubit nur dann vollständig charakterisieren kann, wenn man zugleich alle anderen betrachtet.

Wenn die Anzahl der Qubits in der Reihe sehr groß wird, lässt sich B beliebig genau in den Zustand B_2 bringen, erklärt Marletto. Der Prozess der aufeinanderfolgenden Wechselwirkungen von B mit der Reihe von Qubits stellt eine konstruktorähnliche Maschine dar, die B_1 in B_2 umwandelt. Im Prinzip kann man den Prozess rückgängig machen und B_2 in B_1 zurückverwandeln, indem man B die gleiche Reihe entlang zurückschickt.



ZERBROCHENES EI Der erste Hauptsatz der Thermodynamik hält das Gesetz der Energieerhaltung fest. Ihm stünde nicht entgegen, wenn ein auf den Boden gefallenes Ei sich wieder zusammenfügen und zurück in die Hand hüpfen würde. Das untersagt jedoch der zweite Hauptsatz.

OKSANA OSTYENKO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Was aber, wenn man nach der Umwandlung versucht, mit einem neuen B den Prozess anhand derselben Qubit-Reihe zu wiederholen? Wenn die Anzahl der Qubits in der Reihe nicht sehr groß ist und man den Prozess häufig durchführt, dann gelingt mit diesem Aufbau die Transformation von B_1 nach B_2 immer weniger gut. Entscheidend ist jedoch: Laut den Berechnungen von Marletto und Vedral funktioniert die umgekehrte Umwandlung von B_2 nach B_1 sogar noch schlechter. Dem Team gelang obendrein eine experimentelle Bestätigung dieser Vorhersage. Bei dem Versuch wurde B durch Photonen und eine Reihe von drei Qubits durch einen faseroptischen Schaltkreis simuliert.

Verschränkung zerstreut Informationen

»Man kann den Konstruktor in einer Richtung beliebig gut annähern, aber nicht in der anderen«, resümiert Marletto. Es gibt bei der Transformation also eine Asymmetrie, die dem Prinzip des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ähnelt. Das liegt daran, dass die Transformation das Qubit-System vom Quantenzustand eines einzelnen Teilchens (ein so genannter reiner Zustand) B_1 in einen gemischten Zustand B_2 bringt, der mit den anderen Qubits verschränkt ist.

Ein reiner Zustand ist einer, über den wir alles wissen, was es zu wissen gibt. Wenn aber zwei Objekte verschränkt sind, kann man das eine nicht vollständig charakterisieren, ohne auch das andere entsprechend gut zu kennen. Es ist daher einfacher, von einem reinen Quantenzustand in einen gemischten Zustand überzugehen als umgekehrt. Denn die Informationen aus dem reinen Zustand werden durch Verschränkung zerstreut und lassen sich nur schwer wiederherstellen.

Hier ist die Irreversibilität laut Marletto »nur eine Folge der dynamischen Entwicklung des Systems«. Sie folgt

nicht aus statistischen Überlegungen. In diesem Fall ist sie nicht bloß das wahrscheinlichste Ergebnis, sondern unvermeidlich und durch die quantenmechanischen Wechselwirkungen des Systems bestimmt. »Unsere Vermutung ist«, so Marletto, »dass sich die thermodynamische Irreversibilität darauf zurückführen lässt.«

Einen weiteren gedanklichen Zugang zum zweiten Hauptsatz hat der schottische Wissenschaftler James Clerk Maxwell entwickelt, der zusammen mit Boltzmann die statistische Sichtweise der Thermodynamik begründete. Maxwell verknüpfte die Regeln der Thermodynamik mit dem Konzept der Information.

Maxwell beunruhigten die theologischen Implikationen eines kosmischen Wärmetods und der Unumkehrbarkeit von Vorgängen, die den freien Willen zu untergraben schienen. Daher suchte er 1867 nach einer Möglichkeit, den zweiten Hauptsatz zu widerlegen. In seinem hypothetischen Szenario verwandelt ein mikroskopisch kleines Wesen (das später zu seinem Unmut als Dämon bezeichnet wurde) die scheinbar unnütze Wärme zurück in eine Ressource, mit der sich Arbeit verrichten lässt. Maxwell hatte zuvor nachgewiesen, dass in einem Gas im thermischen Gleichgewicht mehrere molekulare Energien vorherrschen. Manche Moleküle sind sozusagen heißer als andere – sie bewegen sich schneller. Aber alle Teilchen sind zufällig durchmischt, so dass es keine Möglichkeit zu geben scheint, diese Unterschiede zu nutzen.

Hier kommt der maxwellsche Dämon ins Spiel (siehe »Maxwells Dämon«). Er teilt den Raum in zwei Hälften und baut eine reibungsfreie Tür zwischen ihnen ein. Der Dämon lässt die heißen Moleküle in die eine Richtung passieren, aber nicht in die andere. Schließlich hat er so ein heißes Gas auf der einen Seite und ein kühleres auf der anderen hergestellt, und er kann das Temperaturgefälle ausnutzen, um eine Maschine anzutreiben.

Um den zweiten Hauptsatz scheinbar zu unterlaufen, hat der Dämon Informationen über die Bewegungen der Moleküle verwendet. Information ist also eine Ressource, die man zur Verrichtung von Arbeit verwenden kann. Doch sie bleibt auf unseren makroskopischen Skalen verborgen; deswegen können wir sie nicht nutzen. Wegen dieser unvermeidlichen Unkenntnis der Mikrozustände kann die klassische Thermodynamik nur von Durchschnittswerten und Ensembles sprechen.

Ein Jahrhundert später bewies der Physiker Rolf Landauer, dass Maxwells Dämon den zweiten Hauptsatz nicht aushebeln kann. Denn die gesammelten Informationen müssen irgendwo gespeichert werden, und jeder endliche Speicher muss schließlich geleert werden, um Platz für neue zu schaffen. Landauer zeigte 1961, dass

dieses Löschen von Informationen nicht möglich ist, ohne eine minimale Wärmemenge abzuführen und damit die Entropie der Umgebung zu erhöhen.

Für diese informationstheoretische Sicht auf den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik entwickeln Fachleute inzwischen eine neue, quantenmechanische Perspektive. Das liegt zum Teil an der Auffassung, dass die Quantenmechanik eine grundlegendere Beschreibung darstellt – schließlich verhalten sich die Gasteilchen nicht wie klassische Billardkugeln. Darüber hinaus spiegelt das Bestreben das aufkeimende Interesse an der Quanteninformationstheorie selbst wider. Quantenmechanische Prinzipien, insbesondere die Verschränkung von Teilchen, erlauben einen viel weitergehenden Umgang mit Information als auf klassischem Weg.

Axiome für eine vernünftige Thermodynamik

Insbesondere bietet der Ansatz eine Möglichkeit, das statistische Bild loszuwerden, bei dem man Durchschnittswerte über Ensembles vieler verschiedener Mikrozustände bilden muss. »Das wirklich Neue ist die Erkenntnis, dass man im Rahmen der Quanteninformation Ensembles durch eine Verschränkung mit der Umgebung ersetzen kann«, sagt Carlo Maria Scandolo von der kanadischen University of Calgary. Ihm zufolge spiegelt der Rückgriff auf ein Ensemble die Tatsache wider, dass wir nur Teilinformationen über den Zustand haben – es könnte dieser oder jener Mikrozustand sein, mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten. So müssen wir einen Mittelwert über eine Verteilung bilden. Die Quantentheorie bietet jedoch eine andere Möglichkeit, Zustände mit Teilinformationen zu erzeugen: durch Verschränkung. Verknüpft man auf die Art ein Quantensystem mit seiner Umgebung, über die wir nicht alles wissen können, geht unweigerlich ein Teil der Information über das System selbst verloren. Es endet in einem gemischten Zustand, über den man nicht einmal theoretisch alles wissen kann, sofern man sich bloß auf das System konzentriert.

Dann ist man gezwungen, von Wahrscheinlichkeiten zu sprechen, und zwar nicht, weil es Dinge über das System gibt, die man nicht weiß, sondern weil einige dieser Informationen grundsätzlich nicht bekannt sind. »Auf diese Weise ergeben sich Wahrscheinlichkeiten ganz natürlich aus der Verschränkung«, so Scandolo. »Die ganze Vorstellung, das thermodynamische Verhalten könne man unter Berücksichtigung der Umgebung bestimmen, funktioniert nur, solange es Verschränkung gibt.«

2015 hat Scandolo zusammen mit Giulio Chiribella von der Universität Hongkong vier Axiome formuliert, die erforderlich sind, um mit den Mitteln der Quanteninformation eine »vernünftige Thermodynamik« zu erhalten – das heißt eine, die nicht auf Wahrscheinlichkeiten beruht. Die Axiome beschreiben, welche Eigenschaften die Information in einem Quantensystem haben muss, das mit seiner Umgebung verschränkt ist. Insbesondere stellen sie sicher, dass alles, was mit dem System und seiner Umge-

Quantenmechanik erlaubt einen viel weitergehenden Umgang mit Information

bung geschieht, im Prinzip umkehrbar ist, so wie es die übliche mathematische Formulierung für die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems vorsieht.

Als Folge dieser Axiome, so zeigten Scandolo und Chiribella, werden eingangs voneinander unabhängige Systeme durch reversible Wechselwirkungen immer stärker miteinander korreliert. Korrelationen sind das, was verschränkte Objekte aneinanderkoppelt: Die Eigenschaften des einen sind mit denen des anderen verknüpft. Ein Maß für die Stärke des wechselseitigen Zusammenhangs ist die »gegenseitige Information«, eine Größe, die mit der Entropie verbunden ist. Das heißt: Alles, was einschränkt, wie sich die Korrelationen verändern können, begrenzt ebenso die Möglichkeiten für die Entropie. Wenn die Entropie des Systems abnimmt, muss sie in der Umgebung zunehmen, so dass die Summe der beiden Entropien niemals abnehmen kann. Auf diese Weise leitet der neue Ansatz die Entropie aus den zu Grunde liegenden Axiomen ab, anstatt sie von vornherein zu postulieren.

Einen vielseitigen Zugang zu dieser neuen Quantenversion der Thermodynamik bieten die so genannten Ressourcentheorien. Sie geben Auskunft darüber, welche Umwandlungen möglich sind und welche nicht. »Eine Ressourcentheorie bietet ein einfaches Modell für Situationen, in denen es aus irgendwelchen Gründen Einschränkungen dafür gibt, welche Handlungen man durchführen und auf welche Systeme man zugreifen kann«, erklärt die theoretische Quantenphysikerin Nicole Yunger Halpern von der University of Maryland.

Quantenmechanische Ressourcentheorien übernehmen das auf Basis der Quanteninformationstheorie entwickelte Bild von der Welt, bei dem es für die möglichen physikalischen Prozesse grundlegende Einschränkungen gibt. Diese werden dort typischerweise als »No-go-Theoreme« ausgedrückt, das sind Aussagen über die Undurchführbarkeit bestimmter Prozesse. So ist es beispielsweise generell unmöglich, einen unbekanntem Quantenzustand zu »klonen«, also ein Qubit auf ein anderes zu kopieren, ohne das ursprüngliche zu verändern.

Ein genauer Blick auf die Details des zweiten Hauptsatzes

Das Rezept für eine Ressourcentheorie hat mehrere Hauptzutaten. Die erlaubten Handlungen werden als freie Operationen bezeichnet. »Sobald man die freien Operationen spezifiziert hat, hat man die Theorie festgelegt«, führt Yunger Halpern aus, »und dann kann man darüber nachdenken, welche Transformationen möglich sind und nach der optimalen Effizienz fragen, mit der wir sie durchführen können.« Eine Ressource ist unterdessen etwas, worauf man zugreifen kann, um etwas Nützliches zu tun. Das kann Kohle sein, mit der man einen Ofen befeuert und eine Dampfmaschine antreibt, oder auch ein zusätzlicher Speicher, der es Maxwells Dämon ermöglicht, das zweite Gesetz der Thermodynamik noch ein wenig länger zu unterlaufen.

Quanten-Ressourcentheorien ermöglichen einen genauen Blick auf die feinen Details des klassischen zweiten

Es geht um die effiziente Durchführung einer Aufgabe mit verfügbaren Ressourcen

Hauptsatzes. Es ist nicht mehr nötig, über eine riesige Anzahl von Teilchen nachzudenken, sondern man kann Aussagen darüber treffen, was Einzelnen von ihnen erlaubt ist. Wenn wir dies tun, so Yunger Halpern, wird deutlich, dass die klassische Aussage, die Entropie müsse am Ende mindestens derjenigen am Anfang entsprechen, nur eine Art grob gefasste Summe einer ganzen Familie von Ungleichheitsbeziehungen ist. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt zum Beispiel, dass man einen Nichtgleichgewichtszustand in einen ausgeglicheneren Zustand bringen kann. »Aber die Frage, welcher der vielen Zustände näher am thermischen Gleichgewicht liegt, ist nicht einfach zu beantworten«, erläutert Yunger Halpern. Um sie zu klären, »müssen wir eine ganze Reihe von Ungleichungen überprüfen«.

Mit anderen Worten: Bei den Ressourcentheorien scheint es sich um eine ganze Reihe von Miniaturversionen des zweiten Hauptsatzes zu handeln. »Es könnte einige Transformationen geben, die der zweite Hauptsatz erlaubt, die aber durch diese kleinteiligere Familie von Ungleichungen verboten sind«, sagt Yunger Halpern. Aus diesem Grund, fügt sie mit Blick auf ihren Forschungsbe reich hinzu, »habe ich manchmal das Gefühl, dass alle ihre ganz persönlichen zweiten Hauptsätze haben.«

Der ressourcentheoretische Ansatz, urteilt der Physiker Markus P. Müller von der Universität Wien, »erlaubt eine vollständige, mathematisch rigorose Herleitung der thermodynamischen Gesetze, ohne irgendwelche konzeptuellen oder mathematischen Unklarheiten.« Der Ansatz erfordere eine Neubetrachtung dessen, »was man eigentlich unter Thermodynamik versteht«. Es geht nicht mehr so sehr um die durchschnittlichen Eigenschaften vieler Teilchen, sondern um den Versuch, eine Aufgabe mit den verfügbaren Ressourcen effizient durchzuführen. Letztlich geht es aber immer noch um Information. Die Notwendigkeit, sie zu verwerfen beziehungsweise das Unvermögen, sie vollumfänglich im Blick zu behalten, ist laut Yunger Halpern der eigentliche Grund, warum es den zweiten Hauptsatz gibt.

All diese Bemühungen, die Thermodynamik mitsamt des zweiten Hauptsatzes auf ein neues Fundament zu stellen, erinnern an einen Auftrag, den der deutsche Mathematiker David Hilbert im Jahr 1900 formulierte. Er identifizierte in seinem Fachgebiet 23 Probleme, denen man sich im 20. Jahrhundert widmen sollte. Punkt sechs dieser beim Internationalen Mathematiker-Kongress in Paris vorgestellten Liste lautete, »diejenigen physikalischen Disziplinen axiomatisch zu behandeln, in denen schon heute die Mathematik eine hervorragende Rolle spielt«. Hilbert war besorgt darüber, dass die Physik

seiner Zeit auf willkürlichen Annahmen zu beruhen schien, und er wollte sie wie die Mathematik auf solide Grundlagen stellen.

Einige arbeiten heute noch an Hilberts sechstem Problem und versuchen insbesondere, die Quantenmechanik und ihre Verallgemeinerung, die Quantenfeldtheorie, mit Hilfe von Axiomen neu zu formulieren. Allerdings ging es Hilbert gerade auch um die Thermodynamik: »Was die Axiome der Wahrscheinlichkeitsrechnung angeht, so scheint es mir wünschenswert, daß mit der logischen Untersuchung derselben zugleich eine strenge und befriedigende Entwicklung der Methode der mittleren Werte in der mathematischen Physik, speciell in der kinetischen Gastheorie Hand in Hand gehe.«

Die Geister scheiden sich darüber, ob Hilberts Wunsch für den Fall des zweiten Hauptsatzes bereits erfüllt wurde. »Ich denke, dass Hilberts sechstes Problem noch lange nicht vollständig gelöst ist und halte es für einen faszinierenden und wichtigen Aspekt der physikalischen Grundlagenforschung«, meint Scandolo. »Die noch offenen Fragen dürften in absehbarer Zeit beantwortet werden, sofern man ihnen genügend Zeit und Energie widmet.« Der eigentliche Wert einer konzeptuellen Neuaufstellung des zweiten Hauptsatzes liegt darin, dass es unser Verständnis des Gesetzes selbst vertiefen würde. Yunger Halpern vergleicht die Motivation für die Arbeit daran mit dem Grund, warum Literaturwissenschaftler immer noch die Stücke von Shakespeare analysieren. Sie tun es nicht unbedingt, weil eine neue Betrachtung korrekter wäre, sondern weil derart tiefgründige Werke eine unerschöpfliche Quelle der Inspiration und der Erkenntnis sind. ◀

QUELLEN

Chiribella, G., Scandolo, C. M.: Operational axioms for diagonalizing states. ArXiv 1506.00380, 2015

Landauer, R.: Irreversibility and heat generation in the computing process. IBM Journal of Research and Development 5, 1961

Marletto, C. et al.: Emergence of constructor-based irreversibility in quantum systems: Theory and experiment. Physical Review Letters 128, 2022



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/quantenphysik

Quanta magazine

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Physicists Rewrite the Fundamental Law That Leads to Disorder« 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.

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

Übersetzung: An diesem Heft wirkte mit: 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 € 9,80 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 105,60; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 82,10. 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.

Einem Teil der Auflage liegt Werbung der Firmen RSD Reise Service Deutschland GmbH, Pro Idee GmbH & Co. KG und des Stern-Magazins bei.

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. 44 vom 1.1.2023.

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: © 2023 (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 Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



Kinderstube der Dinosaurier

Lange galten sie als tumbe Monster, die ihre Eier schlicht vergruben und dann ihrem Schicksal überließen. Doch immer mehr Funde stellen die Dinosaurier ganz anders dar: als fürsorgliche Eltern, die ihren Nachwuchs behüteten.

» spektrum.de/artikel/2169846



Daniel T. Ksepka ist promovierter Wirbeltierpaläontologe und ausgewiesener Experte für die Evolution der Vögel und Dinosaurier. Derzeit arbeitet er als wissenschaftlicher Kurator am Bruce Museum in Greenwich (USA).

AUF EINEN BLICK

Nestwärme der »Schrecklichen Echsen«

- 1** Dinosaurier zeigten eine verblüffende Vielfalt an Nist- und Brutpflegeverhalten.
- 2** Ursprünglich vergruben die Tiere wohl Eier mit weicher Schale, die fossil kaum erhalten sind. Unabhängig voneinander entstanden dann mehrfach stabilere hartschalige Eier.
- 3** Nahe Verwandte der heutigen Vögel brüteten ihr mit farbigen Eiern bestücktes, offenes Nest per Körperkontakt aus und bewachten es.

BUNTES GELEGE Die Eier heutiger Vögel zeichnen sich durch eine bemerkenswerte Vielfalt an Farben und Mustern aus, wodurch sie beispielsweise vor Fressfeinden besser geschützt sind. Manche Dinosauriereier wie das in der unteren rechten Ecke waren vermutlich auch gefärbt.



Es war ein altes Rätsel der Paläontologie: Warum kennen wir von manchen Dinosauriern Tausende von Eiern, von anderen hingegen überhaupt keine? Schließlich gingen seit mehr als 100 Jahren die meisten Paläontologen von der Hypothese aus, dass alle Dinosaurier Eier mit harter Schale legten – so wie es noch heute ihre engsten Verwandten, die Krokodile und Vögel, tun. Davon sollte es doch genügend Fossilien geben.

Neue Entdeckungen und Erkenntnisse vermitteln uns inzwischen einen anschaulichen Eindruck vom Leben dieser längst ausgestorbenen Tiere. Sie zeigen auch, inwieweit die Dinosaurier ihren heutigen Verwandten ähnelten und wo sie sich andererseits von ihnen unterschieden. Die vogelähnliche Anatomie und Verhaltensweisen haben sich immer weiter herauskristallisiert – wenn es jedoch um die Fortpflanzung der Dinosaurier geht, scheint die Geschichte viel weniger klar zu sein.

Der Weg zu unseren aktuellen Erkenntnissen über Dinosauriernester war lang. Als 1821 die erste Dinosaurierart *Megalosaurus bucklandi* ihren Namen erhielt, wusste man fast nichts über ihre Fortpflanzung. Erst 1921 ergab sich ein wichtiger Anhaltspunkt: Der angesehene Fossilsucher Roy Chapman Andrews (1884–1960) entdeckte in der mongolischen Wüste Gobi unversehrte Dinosauriernester. Eier hatte man zwar schon 1859 in Frankreich gefunden, aber zu jener Zeit ordnete man sie fälschlicherweise Riesenvögeln zu.

Andrews hielt die hübschen, länglich ovalen Eier für Produkte des kreidezeitlichen Dinosauriers *Protoceratops* aus der Gruppe der gepanzerten Ceratopsia. Schließlich galt der Verwandte des viel größeren *Triceratops* an der fraglichen Ausgrabungsstätte als mit Abstand häufigster Dinosaurier, und so erschien es nur plausibel, dass auch die Nester von ihm stammten. Als man in der Nähe eines

Nests einen ungewöhnlichen, mit einem Schnabel ausgestatteten Dinosaurier aus der Gruppe der zweibeinig laufenden Theropoden fand, ging Andrews davon aus, dieser sei beim Plündern von *Protoceratops*-Eiern verendet. Und so erhielt der ungewöhnliche Dinosaurier den Namen *Oviraptor*, was so viel wie »Eierdieb« bedeutet.

1993 kehrte eine Arbeitsgruppe unter Leitung von Mark Norell vom American Museum of Natural History in New York zu Andrews' alten Fossilfundstätten zurück und entdeckte ein wirklich bemerkenswertes Skelett von *Citipati*. Dieser enge Verwandte von *Oviraptor* hatte ein Gelege aus länglichen Eiern ausgebrütet. Die angeblichen *Protoceratops*-Eier hatten also in Wirklichkeit immer zu Oviraptoriden gehört – und so avancierten die bis dahin mit einem zwielichtigen Leumund behafteten »Eierdiebe« zu fürsorglichen Eltern.

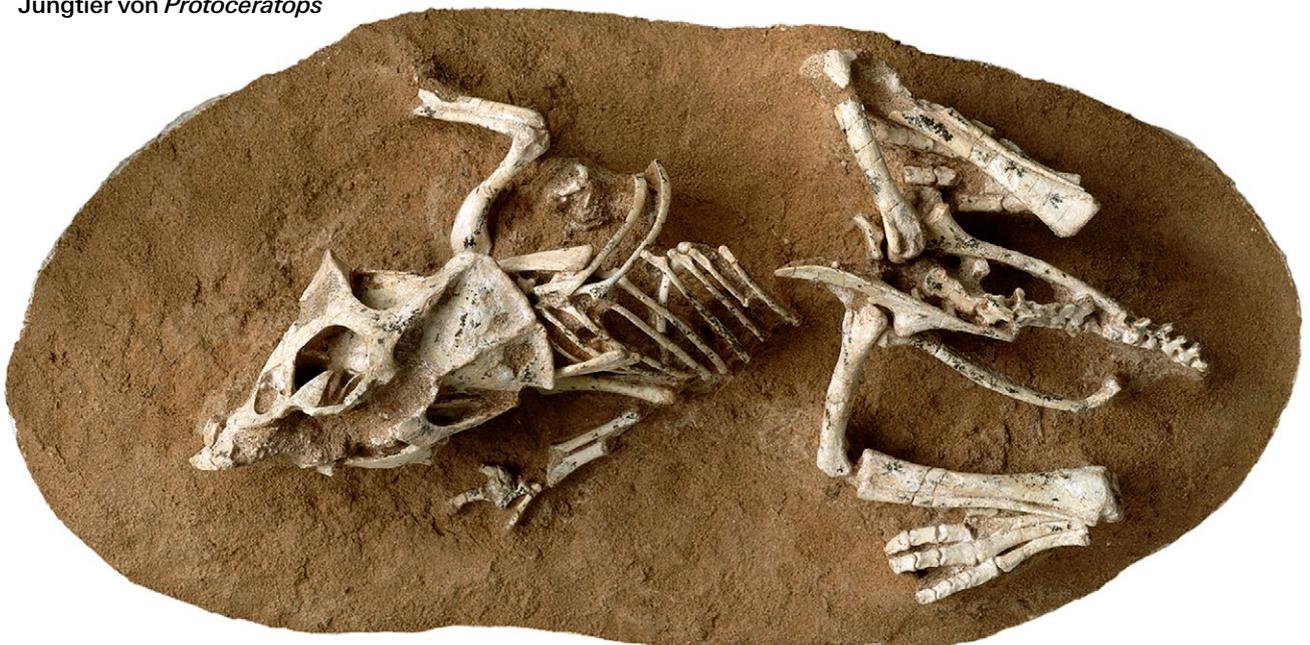
Die Entdeckung warf jedoch eine neue Frage auf: Wenn all diese Eier zu den relativ seltenen Oviraptoriden gehörten, warum hatte man dann nie auch nur ein einziges Ei von dem viel zahlreicheren *Protoceratops* gefunden? Fast ein Jahrhundert nach Andrews' Entdeckung des falsch zugeordneten Oviraptoriden-Nests stieß Norell schließlich auf die ersten echten *Protoceratops*-Eier. Der Fund stellte ihn jedoch vor ein Rätsel: In den einzelnen Eiern lagen zusammengekauerte, gut erhaltene Embryonen, aber die Eier selbst waren kaum zu sehen – nur ein »Halo« schien die winzigen Skelette zu umgeben (siehe »Weichei«). Norell wandte sich an seine Kollegin Jasmina Wiemann, eine Expertin für molekulare Paläontologie, die heute an der University of Chicago forscht, um zusammen mit ihr den chemischen Aufbau der *Protoceratops*-Eier genauer zu untersuchen.

Wie die beiden 2020 herausfanden, besaßen die Eier ursprünglich statt einer harten eine weiche, nicht mineralisierte Schale, ähnlich wie die meisten heutigen Schildkröteneier. In Teile der Schale hatte sich Phosphat eingelagert, nachdem die Eier im Sediment vergraben worden

AUS DEM EI GEPELLT

Ein frisch geschlüpftes

Jungtier von *Protoceratops*





waren, so dass sie der Zerstörung entgingen und schließlich wie ein Halo aussahen. Diese Entdeckung war die Erklärung für das Rätsel der fehlenden *Protoceratops*-Eier: Eine weiche Schale bleibt als Fossil meist nicht erhalten.

Damit war unmittelbar klar, warum versteinerte Eier mancher Dinosaurier häufig gefunden wurden, während man von anderen keine entdeckt hatte: Die Hadrosaurier mit ihrem »Entenschnabel«, die riesigen, langhalsigen Sauropoden sowie viele Theropoden legten Eier mit harter, kalkhaltiger Schale. Der Kalkanteil in solchen hartschaligen Eiern stellt eine Art Fossilvorstufe dar, denn die Verbindung Kalziumkarbonat bleibt über Hunderte von Jahrmillionen stabil. Die organischen Bestandteile einer weichen Eierschale werden hingegen meist rasch abgebaut. Deshalb bestanden für die Eier von *Oviraptor* viel bessere Aussichten, sich in den Fossilfunden wiederzufinden, als für die von *Protoceratops*.

Das Familienleben der Dinos

Niemand hat jemals – mit Ausnahme von Vögeln – einen lebenden Dinosaurier zu Gesicht bekommen, aber dank solcher Entdeckungen erfahren wir heute zuvor unvorstellbare Einzelheiten über das Familienleben der ausgestorbenen Tiere. Es waren bemerkenswerte Geschöpfe. Häufig werden die Gemeinsamkeiten zwischen Dinosauriern und Vögeln betont, doch in Wirklichkeit vereinten die Dinosaurier einen Merkmalsmix von Vögeln und Reptilien, kombiniert mit einzigartigen Eigenschaften, die in den beiden anderen Gruppen fehlen. Die Entdeckung der weichschaligen Eier von *Protoceratops* kam vollkommen unerwartet, denn sowohl Vögel als auch Krokodile legen nur solche mit harter Schale (siehe »Spektrum« Oktober 2020, S. 22). Damit offenbarten sich gleichfalls neue Einzelheiten über das Nistverhalten von *Protoceratops*: Eier mit weicher Schale reagieren empfindlicher auf die Umwelt, denn sie trocknen schneller aus. Außerdem können sich Elterntiere nicht unmittelbar auf sie setzen,

WEICHEI Im etwa 80 Millionen Jahre alten Gelege des Dinosauriers *Protoceratops* lassen sich die versteinerten Embryonen noch gut erkennen (links). Die ledrigen, kalkfreien, aber phosphathaltigen Eierschalen sind jedoch mehr oder weniger verschwunden und äußern sich nur durch einen leichten Halo rund um die Überreste (Pfeil in der Vergrößerung unten).



ohne zu riskieren, dass die Schale bricht. Wegen solcher Einschränkungen vergrub *Protoceratops* seine Eier wahrscheinlich in feuchtem Sediment und ließ sie von äußeren Wärmequellen wie verwesenden Pflanzen oder Sonnenlicht ausbrüten.

Als Norell und Wiemann weitere Eier aus unterschiedlichen Zweigen des Dinosaurierstammbaums studierten, kristallisierte sich eine verblüffende Folgerung heraus: Das allererste Dinosaurierei war vermutlich weich. Wie die beiden schlussfolgerten, legten die Vorfahren der Sauropoden weiche Eier, und das Gleiche galt wohl auch für die geflügelten Pterosaurier, die als nahe Verwandte der Dinosaurier gelten. Der Befund deutet darauf hin, dass die ältesten Dinosaurier sich zum Nisten auf feuchte Umgebungen beschränken mussten. In anderen Dinosauriergruppen entwickelten sich dann die harten Kalkschalen, die Feuchtigkeit festhielten und Gelege unter vielfältigeren Umweltbedingungen ermöglichten. Diese Entwicklung bot sicher einen großen Vorteil, und bei mindestens drei Abstammungslinien bildeten sich unabhängig vonein-

ander Eier mit harter Schale heraus: Theropoden, Sauro-
poden sowie Hadrosaurier.

Hartschalige Eier verraten ebenfalls beeindruckende Details über die komplexe Vielfalt der Fortpflanzungs- und Verhaltensbiologie von Dinosauriern. Die Eier heutiger Vögel zeigen eine bemerkenswerte Vielfalt an Mustern. So erinnern die bunt gescheckten Eier der Strandläufer mit ihren Flecken- und Spiralmustern an ein Gemälde von Jackson Pollock. Gartenrotschwänze legen intensiv grünblaue Eier im Farbton des Himmels an einem schönen Frühlingstag. Die glänzend grünen Eier der Araucana-Hühner erinnern fast an Keramik. Krokodile hingegen beschränken sich auf einfarbige, ungemusterte Eier. Bei verborgenen unterirdischen Nestbauten spielt die Eierfarbe keine Rolle, aber Vögel, die ihren Nachwuchs in offenen Nestern ausbrüten, können ihr Gelege mit der Farbe gegenüber natürlichen Feinden tarnen oder zwischen den eigenen Eiern und denen anderer Arten unterscheiden. Während eines großen Teils der Geschichte ihres Fachgebiets konnten Paläontologen nicht wissen, ob die Dinosauriereier farblich eher der einfachen Anmutung der Krokodileier oder der bunten Vielfalt der Vogeleier ähnelten. Dann aber entdeckte Wiemann in Dutzenden von ausgebleichenen fossilen Eiern in Museumsschubladen verborgene Farbspuren, die nur auf den Tag warteten, an dem Fachleute herausfanden, wie man ihnen ihre Geheimnisse entlockt.

Mit massenspektrometrischen Methoden wies Wiemann in den Eiern von Oviraptoriden und anderen Dinosauriern Protoporphyrin und Biliverdin nach. Diese beiden Pigmente bilden in unterschiedlichen Kombinationen die Farbpalette, die man bei heutigen Vogeleiern findet. Indem sie die chemische Zusammensetzung in verschiedenen Schichten der Schalen untersuchte, konnte Wiemann die Farbmuster von dutzenden Dinosauriereiern rekonstruieren. Ihre Arbeiten lieferten verblüffende Erkenntnisse: In der Morphologie der Eier und im Nistverhalten von Dinosauriern hatte sich seit der Zeit der einfachen, vergrabenen Nester mit schlichten, weichschaligen Eiern, die *Protoceratops* hinterlassen hatte, eine üppige Vielfalt entwickelt.

Hinweise auf das Nistverhalten

Wie sich herausstellte, legten der Oviraptoride *Heyuannia* und der mit sichelförmigen Klauen ausgestattete Dromaeosaurier *Deinonychus* farbenprächtige blaugrüne Eier (siehe »Versteinerte Farben«). Manche Troodontiden-Eier, die Wiemann untersuchte, waren wohl braun, andere eher fleckig weiß. Dagegen verzichteten wahrscheinlich alle Dinosaurier, die nicht zu den Theropoden gehörten, gänzlich auf Pigmente in ihren Eierschalen. Die in der Studie rekonstruierten Eier von Sauropoden und Hadrosauriern erschienen schlicht weiß.

Die Erkenntnis, dass sich Pigmente nur in den Eierschalen von Theropoden nachweisen ließen, liefert – ne-



VERSTEINERTE FARBEN In den Eiern eines in China gefundenen Nests des Oviraptoriden *Heyuannia* konnten Farbpigmente nachgewiesen werden. Demnach waren die Eier einst blaugrün.

ben typischen Vogelmerkmalen wie ein Federkleid oder das zum Gabelbein verwachsene Schlüsselbein – ein weiteres Indiz für den Ursprung der heutigen Vögel aus dieser Dinosauriergruppe. Vögel stellen die einzigen Vertreter der Amnioten (das sind alle Landwirbeltiere außer Amphibien) dar, die farbige Eier legen. Demnach dürften Eierschalenpigmente in der Evolution nur ein einziges Mal bei einem Vorfahren der Vögel und der höher entwickelten Theropoden entstanden sein.

Die Farbe fossiler Eier liefert gleichfalls Hinweise auf das Nistverhalten. Vom schlichten Nest eines frühen Dinosauriers – lediglich ein in den Boden gegrabenes Loch – bis zum raffiniert konstruierten Bau eines Webervogels lag ein langer Evolutionsweg (siehe »Die Evolution des Dinosauriereis«). Die Oviraptoriden machten dabei den ersten Schritt: Im Gegensatz zu früheren Dinosauriern ließen sie ihre Eier teilweise offen in flachen Senken liegen, die sie in den Boden gescharrt hatten.

Einen der bemerkenswertesten Anhaltspunkte darauf, wie diese Dinosaurier ihre Eier ausbrüteten, liefert das bereits erwähnte spektakuläre Fossil eines nistenden *Citipati*. Das Skelett befindet sich in der Mitte eines Kreises aus Eiern und hat die Vordergliedmaßen um das kostbare Gelege geschlungen. Das Elterntier hatte demnach wohl versucht, seine Brut zu schützen, kam aber dann in einem Sandsturm ums Leben. Die Eier liegen

jedoch weit auseinander – so als ob das ausgewachsene Tier es vermieden habe, sich direkt auf sie zu setzen, um sie nicht zu zerquetschen. Oviraptoriden wie *Citipati* deckten demnach ihre Nester mit den gefiederten Armen ab und schützten sie so ohne unmittelbaren Körperkontakt vor Kälte.

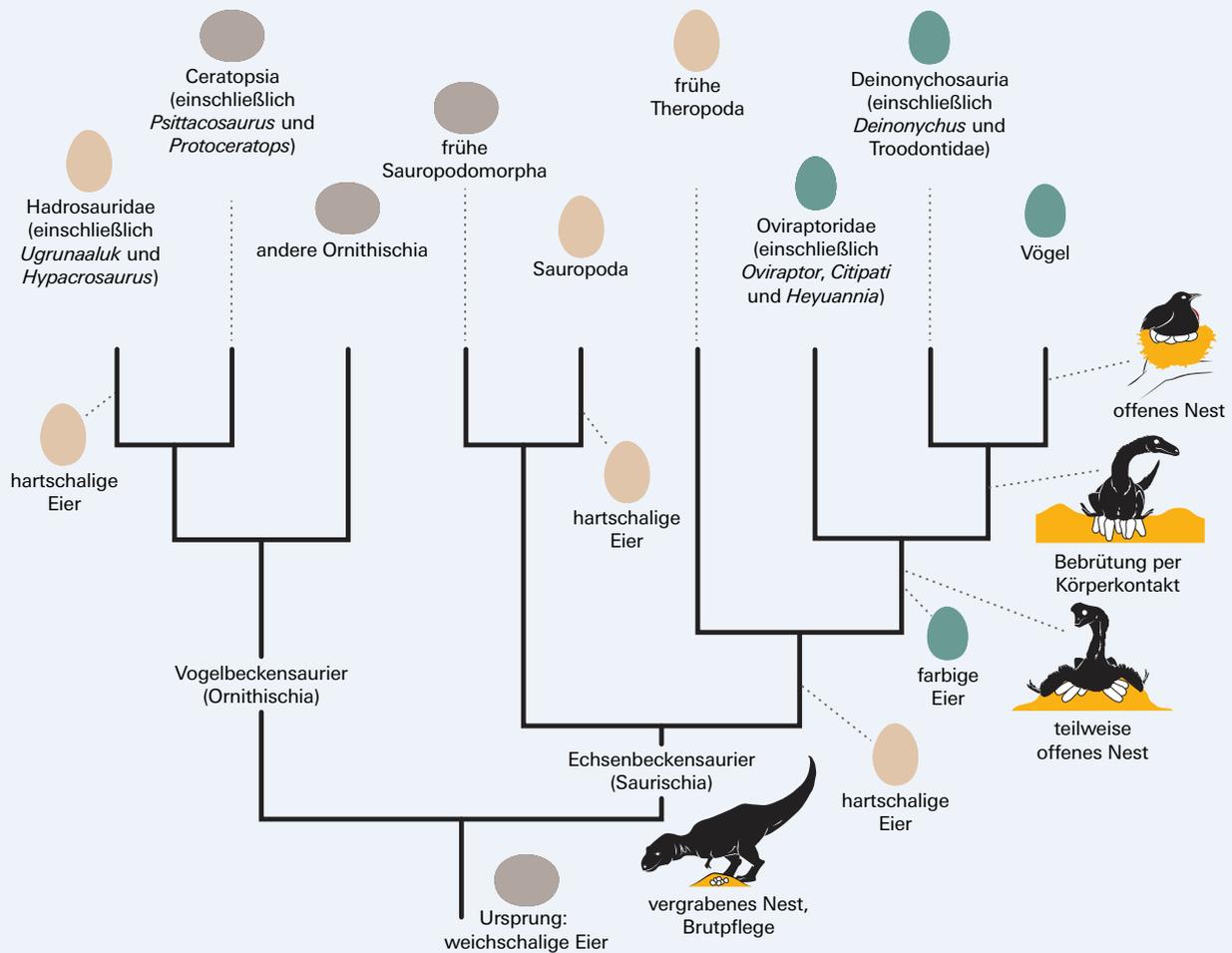
Noch raffiniertere Niststrategien entwickelten sich bei den näher mit den Vögeln verwandten Troodontiden. In ihren in Nordamerika gefundenen Nestern liegen die Eier eher in der Mitte. Das ermöglicht dem brütenden Elterntier, das ganze Gelege mit dem Bauch abzudecken und so

die hartschaligen und damit stabileren Eier durch direkten Körperkontakt zu wärmen, so wie es heute die meisten Vögel tun.

Aus den neu entwickelten Brutstrategien der Oviraptoriden und Troodontiden ergab sich, dass die Eier teilweise frei an der Oberfläche lagen – und damit zum ersten Mal in der Geschichte der Dinosaurier zu sehen waren. Die Entstehung der ersten gefärbten Eier fällt mit der Evolution dieser teilweise offenen Nester zusammen. Offenbar wirkte sich hier ein neuer Selektionsdruck aus. Braun gefleckte Eier wären beispielsweise gegenüber Fressfein-

Die Evolution des Dinosauriereis

Fachleute konnten die Evolution der Eier und des Brutverhaltens von Dinosauriern rekonstruieren. Demnach legte der gemeinsame Vorfahre aller Dinosaurier Eier mit weicher Schale und vergrub sie im feuchten Boden. In mehreren Abstammungslinien entwickelten sich dann unabhängig voneinander hartschalige Eier. Farben tauchten in den Gelegen ungefähr zu der Zeit auf, als Dinosaurier offene Nester anlegten, auf denen sie ähnlich wie heute viele Vögel saßen und brüteten.



BARBARA AULONNO / AMERICAN SCIENTIST JAN-FEB 2022; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

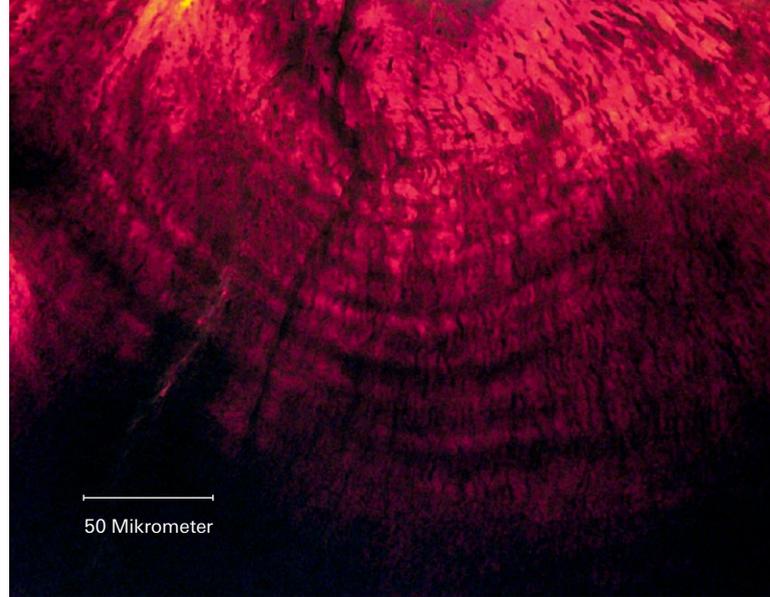
den besser getarnt, wenn die Eltern das Nest zur Futtersuche verlassen mussten.

Welchen Vorteil hellblaue Eier bieten, erscheint weniger klar. Manche Vögel setzen sich mit gefärbten Eiern gegen Brutparasiten wie Kuckucke zur Wehr, denn fremde Eier sind so leichter zu erkennen und können dann vom Elterntier beseitigt werden. Die Frage, ob es unter den Dinosauriern ebenfalls Brutparasiten gab, bleibt spekulativ, aber die Vorstellung, wie ein Oviraptoride heimlich ein Ei in ein anderes Dinosauriernest legt, hat durchaus seinen Reiz.

Nachdem man immer mehr Eier und Embryonen von Dinosauriern entdeckt hatte, ließ sich genauer rekonstruieren, was vor Jahrmillionen in den Nestern geschah. Eine höhere Bruttemperatur beschleunigt die Entwicklung des Embryos und verkürzt damit die riskante Zeit im Ei. Vögel sind Meister darin, das Schlüpfen der Jungen zu forcieren: Sie nutzen ihre Körperwärme und drehen die Eier im Nest, um die Küken schneller schlüpfen zu lassen. Im Verhältnis zur Körpermasse (das Ausbrüten größerer Eier dauert länger) schließen Vögel die Brutzeit ungefähr doppelt so schnell ab wie Krokodile. Nun wollten Paläontologen wissen, ob Dinosaurier so lange brüteten wie Krokodile oder eher so kurz wie Vögel.

Die Frage war zunächst schwierig zu beantworten, doch mittlerweile kennen wir einen versteckten Zeitstempel bei Dinosaurierembryonen. Beim Zahnwachstum schieben besondere Zellen, die Odontoblasten, täglich eine dünne Schicht aus Zahnbein (Dentin) unter die äußere Zahnschmelzschicht. Das Dentin härtet über Nacht aus und bildet eine ringförmige Wachstumslinie. Die Zahl dieser nach ihrem Entdecker, dem österreichischen Histologen Viktor von Ebner-Rofenstein (1842–1925), benannten »Ebner-Linien« repräsentiert also das Alter eines Zahns (siehe »Verräterische Wachstumslinien«). Bei ausgewachsenen Dinosauriern lassen die Ebner-Linien erkennen, wie schnell die Zähne ersetzt wurden. Handelt es sich aber um einen Saurierembryo, zeigen sie das Alter des Embryos selbst an. Wie bei Krokodilen begann das Wachstum der Zähne auch bei Dinosauriern bereits im Ei. Zählt man also die Ebner-Linien in den Zähnen eines Sauriers, der kurz vorm Schlüpfen stand – und rechnet man noch ein wenig Zeit hinzu, weil die Zahnbildung gewöhnlich erst einige Wochen nach der Eiablage beginnt –, kann man abschätzen, wie viele Tage ein fossiler Embryo im Ei lag.

Gregory Erickson von der Florida State University hatte bereits Ebner-Linien bei ausgewachsenen Dinosauriern studiert und verlegte nun das Schwergewicht seiner Arbeiten auf Jungtiere. Immer leistungsfähigere Computertomografen und neu entdeckte fossile Embryonen ermöglichten es seiner Arbeitsgruppe, die Ebner-Linien bei den *Protoceratops*-Fossilien zu zählen, an denen man auch erkannt hatte, dass viele Dinosauriereier weiche Schalen besaßen. 2017 konnte Erickson anhand der CT-Aufnahmen zeigen, dass der Nachwuchs bei diesen kleinen Sauriern etwa 83 Tage nach der Eiablage schlüpfte. Dagegen brauchte der riesige Entenschnabelsaurier



VERRÄTERISCHE WACHSTUMSLINIEN Während des Zahnwachstums lagert sich Nacht für Nacht unter dem Zahnschmelz eine dünne Dentinschicht ab. Die daraus resultierenden Ebner-Linien lassen sich im Polarisationsmikroskop erkennen und zur Altersbestimmung heranziehen. Das Bild zeigt einen Dünnschnitt durch den Zahn eines Embryos des Hadrosauriers *Hypacrosaurus stebingeri*.

Hypacrosaurus nach den Analysen der Arbeitsgruppe mit 171 Tagen ungefähr doppelt so lange und bestätigte damit die allgemeine Regel, wonach größere Tiere länger brüten. Letztere ähnelten also in ihrem Wachstum eher Krokodilen als Vögeln.

Mit ähnlichen Methoden fand eine Arbeitsgruppe unter Leitung von David Varricchio von der Montana State University 2018 heraus, dass es bei den Troodontiden ein wenig schneller ging: Mit 74 Tagen liegt ihre Brutzeit genau zwischen den Werten, die man für einen Vogel und ein Krokodil von gleicher Körpermasse vorhersagen würde. Und wie steht es mit *Oviraptor*? Leider können uns die Ebner-Linien bei der Erforschung dieses Dinosauriers nicht helfen, denn er besaß keine Zähne.

Aufpasser im Nest

Zurück zu *Protoceratops*: Jener Saurier legte zwar wie heutige Schildkröten weichschalige Eier, liefert jedoch gleichfalls Hinweise auf ein fürsorgliches Nistverhalten wie bei Vögeln. Ein solches Merkmalsmosaik macht die Erforschung der Dinosaurier so spannend. Die Evolution entspricht keineswegs der verbreiteten Vorstellung, es gäbe schlicht ältere und modernere Eigenschaften. David Fastovski von der University of Rhode Island beschrieb 2011 ein *Protoceratops*-Nest, in dem zwar keine Eier lagen, dafür aber 15 Jungtiere, die sich in einer Nisthöhle aneinanderdrängten. Die Saurierjungen waren im Vergleich zu frisch geschlüpfen Tieren schon relativ groß und hielten sich demnach bereits mehrere Wochen zusammen im Nest auf, statt sich wie viele heutige Reptilien gleich nach dem Schlüpfen in alle Winde zu zerstreuen. Eine ähnliche Ansammlung von Jungtieren kennt man auch von *Psitta-*

GREG M. ERICKSON: PRESSEBILD ZU ERICKSON, G.M. ET AL., DINO SAUR INCUBATION PERIODS DETERMINED FROM GROWTH LINE COUNTS IN EMBRYONIC TEETH SHOW REPTILIAN-GRADE DEVELOPMENT. PNAS 114, 2017, FIG. 1A (DOI:10.1073/PNAS.1513714114)

cosaurus, einem älteren Verwandten von *Protoceratops*. In einem *Psittacosaurus*-Nestbau fand man ein fünf Jahre altes jungliches Tier zusammen mit 24 kleineren Babys. Das größere Individuum erschien als Elternteil zu jung; vielleicht handelte es sich um ein älteres Geschwister, das über die Jungen wachte.

Noch wichtiger wird die Brutpflege unter schwierigen Umweltbedingungen; und manche Dinosaurier trotzten bei ihrer Jungenaufzucht sogar klimatischen Extremen. Zu den Gebieten, die weitgehend als Neuland bei der Erforschung des Nistverhaltens von Dinosauriern gelten, gehört die Arktis. Als man Dinosaurier noch für wechselwarme Tiere hielt, erschien es ausgeschlossen, dass sie den Winter in hohen Breiten überleben konnten. Wie wir jedoch heute wissen, gediehen viele Dinosaurier viel weiter im Norden, als man es früher für möglich gehalten hatte. In der Kreidezeit lag Nordamerika sogar noch näher am Nordpol als heute. Dinosaurier waren auch im nördlichsten Teil des heutigen Alaska zu Hause und stießen in Regionen jenseits von 80 Grad nördlicher Breite vor – also weit oberhalb des auf 66,3 Grad liegenden nördlichen Polarkreises.

Seit 2009 sammelten Arbeitsgruppen unter Leitung von Patrick Druckenmiller von der University of Alaska in Fairbanks eine Fülle von Fossilien in der Arktis, darunter Hadrosaurier, Ceratopsiden und Troodontiden. Und was noch bemerkenswerter ist: Die Fachleute entdeckten aus all diesen Gruppen auch Knochen von Jungtieren. Die winzigen Zähne und Knochen sind in vielen Fällen nicht größer als ein Stecknadelkopf; es handelte sich also tatsächlich um frisch geschlüpfte Dinosaurier – manche nicht größer als ein Meerschweinchen.

Während der Kreidezeit blieb es im Norden Alaskas im Winter mehr als 80 Tage lang ununterbrochen dunkel. Wegen dieser unwirtlichen Jahreszeit hatten Paläontologen angenommen, die Dinosaurier hätten die sonnigen Sommermonate der Arktis genutzt und seien dann nach Süden gewandert, bevor die Sonne im Oktober verschwand. Die Entdeckung fossiler Jungtiere in Alaska lässt jedoch darauf schließen, dass viele Arten in Wirklichkeit sogar dem Polarwinter standhielten.

Indem Druckenmiller und Erickson Modelle des polaren Tageslichts mit Schätzungen über die Brutzeiten kombinierten, gelangten sie zu dem Schluss, dass den Dinosauriern aus den Polargebieten schlicht die Zeit für eine größere Wanderung fehlte. Der Hadrosaurier *Ugrunaaluk* aus Alaska brauchte fast sechs Monate, um seine Eier auszubrüten. Selbst wenn die Spezies bei Frühlingsbeginn sofort mit dem Nisten begann, ließ der Kalender nahezu keine Zeit zwischen dem Schlüpfen des Nachwuchses und dem Einsetzen der winterlichen Dunkelheit. Demnach wären, so Druckenmiller, die Jungen viel zu klein gewesen, um die 2500 Kilometer nach Süden zurückzulegen, bevor die Sonne am Polarkreis verschwand.

Zusammen mit Befunden von anderen Hadrosaurierarten, wonach Elterntiere ihre Brut versorgten, kristallisiert sich ein bemerkenswertes Bild heraus: Vielleicht hüteten die *Ugrunaaluk*-Herden ihren Jungen sorgfältig

während der vielen Wochen des dunklen Polarwinters und halfen ihnen, sich von Resten von Baumrinde, Farnen oder Moos zu ernähren. Eine solche Lebensweise wäre im wärmeren Klima der Kreidezeit durchaus möglich gewesen. Es lag zwar im Winterhalbjahr Schnee, die Temperaturen waren jedoch in der Arktis weniger extrem als heute.

Die Evolution des Verhaltens von Dinosauriern zeigt, welche vielfältigen Strategien sich in den Jahrmillionen entwickelt haben, in denen diese Tiere über die Erde streiften. Manche neuen Entdeckungen wie die farbigen Eier oder die Hinweise auf Brutpflege untermauern die Ähnlichkeiten zwischen Theropoden und Vögeln. Andererseits waren jedoch einige Dinosaurier mit ihrer Nistökologie weit von den Vögeln entfernt – wie Schildkröten vergruben sie weichschalige Eier im Boden und überließen sie dann zum Ausbrüten sich selbst. Nur eines ist sicher: Angesichts des rasanten Fortschritts der Forschung in den letzten Jahren können wir damit rechnen, in naher Zukunft viele weitere Rätsel rund um die Frage zu knacken, wie es einst in der Kinderstube der Dinosaurier aussah. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



BASTOS / STOCK.ADOBE.COM

QUELLEN

Druckenmiller, P.S. et al.: Nesting at extreme polar latitudes by non-avian dinosaurs. *Current Biology* 31, 2021

Erickson, G.M. et al.: Dinosaur incubation periods directly determined from growth-line counts in embryonic teeth show reptilian-grade development. *PNAS* 114, 2017

Norell, M.A. et al.: The first dinosaur egg was soft. *Nature* 583, 2020

Wiemann, J. et al.: Dinosaur egg colour had a single evolutionary origin. *Nature* 563, 2018

LITERATURTIPP

Herrscher des Erdmittelalters. *Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung* 3/2021

Unser Sonderheft stellt die außergewöhnliche Tierwelt im Mesozoikum vor.

AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

Zeit stoppen durch Handauflegen

In einer Sanduhr ändert sich rhythmisch der Luftdruck im unteren und oberen Gefäß. Normalerweise merkt man das kaum. Doch mit Hilfe dieses Phänomens lässt sich der Fluss des Granulats auf einfache Weise manipulieren und sogar anhalten.

► spektrum.de/artikel/2169849

»Siehe eine Sanduhr: Da läßt sich nichts durch Rütteln und Schütteln erreichen«

Christian Morgenstern

▶ Sieht man von einigen Nischen ab, in denen die Sanduhr bis in unsere Zeit hinein überlebt hat, spielt sie heute für die Zeitmessung keine Rolle mehr. Doch jahrhundertlang galten solche Geräte als ausreichend präzise für viele alltägliche Anwendungen. Dabei wird die Dauer bestimmt, die der Sand braucht, um vom oberen ins untere Glasgefäß zu gelangen.

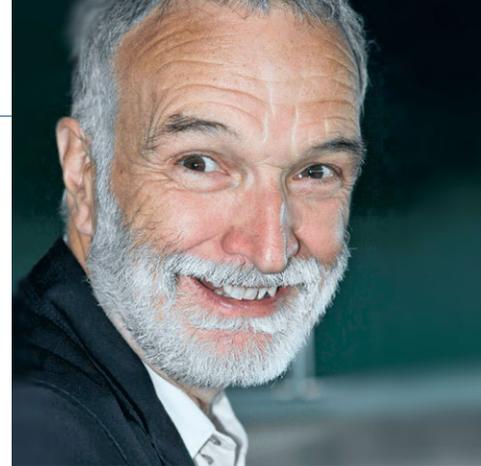
Bereits bei den ersten Exemplaren stellte sich bald heraus, dass normaler Sand gar nicht so gut geeignet ist, weil er etwa durch unterschiedliche Körnung und andere Nachteile leicht in dem engen Hals zwischen den beiden Behältern stockt. Es wurden daher schon sehr früh andere Granulate benutzt, die einen möglichst gleichmäßigen Durchfluss gewährleisten.

An dieser Stelle drängt sich die Frage auf, warum nicht statt des Granulats Wasser benutzt wird, mit dem sich solche Schwierigkeiten vermeiden ließen. Lange

bevor es die Sanduhr gab, waren in der Antike tatsächlich Wasseruhren in Gebrauch. Allerdings haben sie einen entscheidenden Nachteil: Die Durchflussmenge hängt vom hydrostatischen Druck des Wassers ab. Der wiederum wird durch dessen Höhe im oberen Gefäß bestimmt. Da der Pegel stetig sinkt, ist der Strom naturgemäß nicht konstant.

Kraftbrücken zwischen den Körnchen verstetigen den Zeitfluss

Demgegenüber läuft bei der Sanduhr das Granulat gleichmäßig mit stets derselben Geschwindigkeit durch die Öffnung, unabhängig von der Füllhöhe. Diese fundamentale Eigenschaft von Granulaten ist darauf zurückzuführen, dass die Körner Brücken bilden. Diese lenken die Gewichtskraft der darüberliegenden Nachbarn auf die Seitenwände des Behälters um, wo sie



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



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

UNGESTÖRT UND UNTERBROCHEN
Granulat fließt normalerweise gleichmäßig durch eine Verengung zwischen der oberen und der unteren Hälfte des Glaskörpers einer Sanduhr. Das Rieseln stoppt, wenn man das untere Glas mit den warmen Händen umschmiegt.

durch Reibung fixiert werden – ähnlich wie bei Steinen in Torbögen.

Der Druck durch die Last der Teilchen steigt mit der Tiefe daher nur asymptotisch bis zu einem Schwellenwert an. Sobald die Schichtung doppelt so hoch ist wie der Behälter breit, bleibt der Druck am Boden praktisch konstant. Unter diesen Bedingungen herrschen an der Öffnung daher stets dieselben Verhältnisse und ein gleich bleibender Massenstrom.

Trotz dieser guten Voraussetzungen lässt sich eine Sanduhr durchaus manipulieren. Wenn man sie zum Beispiel rhythmisch auf- und abbewegt, dauert es länger, bis sich der obere Behälter in den unteren entleert – die Uhr geht nach. Dieses merkwürdige Verhalten ist eine weitere Konsequenz der im Granulat ausgebildeten Kraftbrücken. Sie hängen vom auflastenden Gewicht ab, das heißt vom Produkt der Masse und der Schwerebeschleunigung. Deshalb ändert sich beim Schütteln die Bedingung für einen gleichmäßigen Durchfluss.

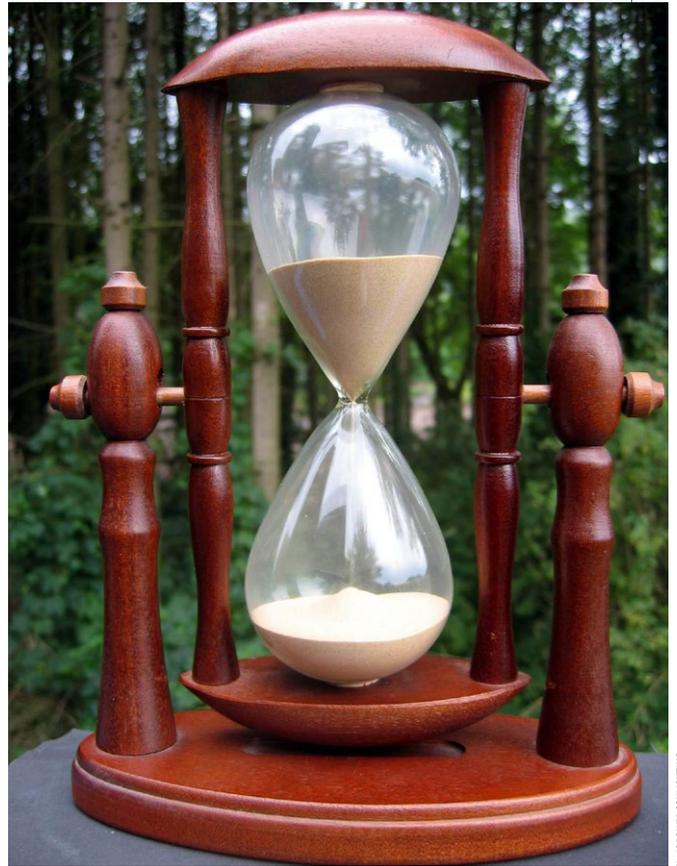
Gedränge nach unten, Erleichterung nach oben

Entscheidend ist dabei: Die Beschleunigungen in der einen und anderen Richtung wirken asymmetrisch. Wegen des konstanten Drucks im Granulat bleibt eine zusätzliche Beschleunigung auf das Granulat nach unten wirkungslos. Demgegenüber nimmt in umgekehrter Richtung der Druck ab, und damit strömt das Granulat schwächer. Das verzögert in der Summe das Rinnen vom oberen in den unteren Behälter.

Außer mit dem Granulat ist eine Sanduhr mit Luft gefüllt. Sie spielt auch beim Betrieb der Sanduhr eine zwar unauffällige, aber wichtige Rolle. Der durch die Verengung fließende Sand führt stets eine kleine Menge Luft mit sich, wodurch sich der Luftdruck im unteren Behälter schrittweise ein wenig erhöht und im oberen Gefäß entsprechend verringert. Sobald der Druckunterschied ein bestimmtes Maß überschreitet, drängt Luft ausgleichend von unten nach oben und bremst das Granulat einen Augenblick lang.

In dieses Geschehen kann man auf einfache Weise eingreifen und damit gleichzeitig beweisen, dass der unsichtbare ausgleichende Luftstrom äußerst real ist. Dazu muss man nur den unteren Behälter mit den Händen möglichst großflächig umschmiegen. Nach kurzer Zeit stoppt der Sand: Die Zeit steht still.

Die im Vergleich zur Umgebung und damit zur Temperatur der Sanduhr warmen Hände heizen den unteren Behälter auf – und wegen deren geringer Wärmekapazität als Erstes die darin enthaltene Luft. Der infolgedessen steigende Luftdruck wirkt dementsprechend zusätzlich dem Herabrieseln des Granulats entgegen.



H. JOACHIM SCHLICHTING

STUNDENGLAS Bei diesem Exemplar dauert es 60 Minuten, bis der Sand vom oberen in den unteren Behälter geflossen ist.

Ich habe mehrere kommerziell zu erwerbende Exemplare verschiedener Hersteller allesamt mit Erfolg ausprobiert. Wer es dennoch nicht mit der Wärme der Hände allein schaffen sollte, kann die Sanduhr vorher einige Zeit in den Kühlschrank stellen. Ebenso ist es eindrucksvoll, den unteren Teil dem heißen Gebläse eines Haartrockners auszusetzen. Der unvorbereitete Beobachter wird dabei manchmal auf den abwegigen Gedanken gebracht, der warme Luftstrom würde auf irgendeine Weise den Sand im luftdicht abgeschlossenes Glas beeinflussen.

Die Unterbrechung ist jedoch nicht von großer Dauer. Denn wie stark der Luftdruck durch die Erwärmung im unteren Behälter auch erhöht wird, schließlich kommt es zum Temperatur- und Druckausgleich. Dann beginnt die Zeit erneut zu fließen. ◀

Woher stammt Sars-CoV-2?

Auf dem chinesischen Markt, von dem die Covid-19-Pandemie mutmaßlich ausging, sind hunderte Abstrichproben genommen worden. Deren Untersuchung beweist: Das frühe Infektionsgeschehen spielte sich in Anwesenheit von Tieren ab. Trotzdem ist nach wie vor unklar, wie die Seuche begann.

» [spektrum.de/artikel/2169852](https://www.spektrum.de/artikel/2169852)



Tanya Lewis ist leitende Redakteurin für Gesundheits- und Medizinthemen beim »Scientific American«.

► Marderhunde sehen alles andere als bedrohlich aus. Die kleinen Säuger mit ihrem weichen Pelz und der »Gesichtsmaske« erinnern eher an knuffige Plüschtiere. Sie sind mit Füchsen verwandt und in den Wäldern Ostasiens heimisch; als Allesfresser ernähren sie sich von Vögeln, Nagern, Fischen, Insekten, Weich- und Krustentieren sowie Pflanzen. In China werden sie üblicherweise wegen ihres Fleisches und Fells gehandelt. Vor einigen Jahren gerieten sie aber aus anderen Gründen in den Fokus: wegen ihrer möglichen Rolle beim Aufkommen der Covid-19-Pandemie.

Genetische Daten, erhoben ab Januar 2020, belegen: Marderhunde sind – neben weiteren Wildtieren – auf einem Markt im chinesischen Wuhan verkauft worden, auf dem die Pandemie möglicherweise ihren Anfang nahm. Viren des Typs Sars-CoV-2, die Covid-19 verursachen, ließen sich an Marktständen nachweisen, an denen die Tiere gehandelt wurden. Zudem haben Experimente

KEIMZELLE? Der Huanan-Markt für Meeresfrüchte am 21. Januar 2020.

华南海鲜批发市场

GUANAN HAIXIAN PIFA SHICHANG

AUF EINEN BLICK

Rätselhafter Ursprung

- 1** Genetische Untersuchungen belegen: Die frühesten Covid-19-Fälle ereigneten sich im Umfeld eines chinesischen Markts, auf dem lebende Tiere verkauft wurden.
- 2** Das wirft die Frage auf, ob Sars-CoV-2 von Wildtieren auf den Menschen übergesprungen ist. Fachleute interessieren sich in dem Zusammenhang besonders für Marderhunde.
- 3** Die Datenlage reicht aber nicht aus, um das abschließend zu klären. So erscheinen weiterhin alternative Szenarien denkbar – etwa, dass Sars-CoV-2 aus einem Labor entwichen ist.

ergeben, dass Marderhunde sich mit Sars-CoV-2 anstecken und das Virus übertragen können. Viele Fachleute vermuten daher, der Erreger sei auf dem Wuhan-Markt von Wildtieren auf Menschen überggesprungen. Andere Wissenschaftler betonen, dies sei nicht gesichert und es scheine ebenso möglich, dass Sars-CoV-2 aus einem Labor entkommen ist.

Es gibt keine Videoaufnahmen von infizierten Marderhunden, die Menschen anniesen und sie mit dem Virus anstecken. Auch aus epidemiologischen Untersuchungen zum Ursprung der Covid-19-Pandemie sind keine Ergebnisse bekannt, die eindeutig für ein solches Szenario sprechen. Aber dass Tiere, die nachweislich Sars-CoV-2 übertragen, zur selben Zeit an genau jenem Ort waren, an dem sich die ersten Menschen mit dem Erreger infizierten, ist durchaus bedenkenswert. Das meint jedenfalls Alex Crits-Christoph, leitender Wissenschaftler für Computerbiologie bei Cultivarium, einer gemeinnützigen Forschungsorganisation in Watertown, Massachusetts.

Verdächtige Übereinstimmung

Die Suche nach den Ursprüngen der Pandemie begann, als Wissenschaftler vom Chinesischen Zentrum für Seuchenkontrolle und -prävention (CCDC) einschlägige genetische Daten aus Wuhan veröffentlichten. Ab dem 1. Januar 2020 hatten Fachleute hunderte Abstriche auf dem Huanan-Markt für Meeresfrüchte genommen, der in der Stadt liegt und auf dem neben Wasser- noch etliche weitere Tiere verkauft wurden, darunter Ratten, Füchse, Krokodile, Schlangen, Pfaue und Schleichkatzen. Die Experten analysierten das Genmaterial in den Abstrichen und luden die Ergebnisse in eine Datenbank hoch. Ein internationales Forschungsteam um Crits-Christoph stellte anhand dieser Informationen fest: Erbgut des Virus lässt sich in denselben Bereichen des Markts nachweisen wie DNA-Spuren von Wildtieren. Chinesische Wissenschaftler um William Liu vom CCDC bestätigten das später in der Fachzeitschrift »Nature«.

Jene räumliche Übereinstimmung sei ein wichtiger Befund, meint Angela Rasmussen, Virologin bei der Vaccine and Infectious Disease Organization im kanadischen Saskatchewan, die an den Untersuchungen beteiligt war. »Es ist ziemlich bezeichnend, dass wir an den exakt gleichen Stellen auf dem Markt sowohl Erbmateriale von Marderhunden als auch solches von Sars-CoV-2 nachgewiesen haben, während dort zugleich nur wenig menschliche DNA zu finden ist«, sagt Rasmussen. Die Nachforschungen haben weiterhin bestätigt, dass auf dem Markt lebende Tiere verkauft wurden. Bereits einige Jahre zuvor hatte der Evolutionsbiologe Edward Holmes von der University of Sydney, der ebenfalls an den Untersuchungen mitwirkte, dort gefangen gehaltene Marderhunde fotografiert.

Die Abstrichanalysen bestätigen freilich nicht, dass die Marderhunde – oder andere Tiere – mit dem Virus infiziert gewesen waren, geschweige denn, dass sie es als Erste auf den Menschen übertrugen. Damit scheint weiterhin ein alternatives Szenario denkbar: Der Erreger könnte aus

einem der verschiedenen Labors in Wuhan entwichen sein, in denen über Coronaviren geforscht wird. Zwar gibt es keine stichhaltigen Hinweise darauf, doch auszuschließen ist es anhand der vorliegenden Evidenz nicht.

Es mag viele frustrieren, dass wir hier immer noch im Dunklen tappen – ungewöhnlich ist es aber nicht. Die Suche nach dem Ursprung einer neuen Viruserkrankung dauert oft Jahrzehnte. Beispielsweise sind Schleichkatzen, die auf einem Tiermarkt im chinesischen Guangdong gehandelt wurden, schon früh als Zwischenwirte des Sars-CoV-Virus identifiziert worden, das von 2002 bis 2003 eine Pandemie mit hunderten Todesopfern verursachte. Allerdings dauerte es 15 weitere Jahre, bis sich die Herkunft des Virus zu Fledermäusen zurückverfolgen ließ. Und der Ursprung des Ebolavirus – ebenso wie zahlreicher anderer Erreger – ist bis heute nicht zweifelsfrei identifiziert. Bei Sars-CoV-2 kommt erschwerend die zurückhaltende Informationspolitik der chinesischen Regierung hinzu, die einschlägige Daten nur zögerlich freigibt. So hat das CCDC-Team die Analyseergebnisse vom Huanan-Markt erst 2022 in einem Preprint-Artikel veröffentlicht – zwei Jahre nachdem das Probenmaterial gesammelt worden war und ohne die beteiligten Tierarten zu kennzeichnen.

Viele der viruspositiven Abstriche stammen aus der südwestlichen Ecke des Markts, wo laut vorangegangenen Berichten lebende Tiere verkauft wurden. Ein halbes Dutzend Proben enthielt neben dem viralen Erbgut auch Marderhund-DNA sowie -RNA, oft in höherer Menge als menschliches Genmaterial. Darüber hinaus wiesen die Fachleute genetische Spuren von Amurigel, Malaiischen Stachelschweinen, Larvenrollern (Schleichkatzen), Sibirischen Wieseln, Grauen Bambusratten und anderen Tieren nach. Im Prinzip könnte jede dieser Arten dem Virus als Zwischenwirt gedient haben, doch die meisten haben sich als nicht anfällig gegenüber dem Erreger erwiesen – Marderhunde schon. Die ursprünglichen Wirtsorganismen sind nach Ansicht vieler Experten wohl wilde Fledermäuse gewesen (siehe »Spektrum« Mai 2020, S. 32).

»Es gibt keine abschließenden Beweise, dass Tiere an der frühen Infektionskette beteiligt waren, aber etliches spricht dafür«, sagt Crits-Christoph. Es sei zwar denkbar, dass der Huanan-Markt nicht der Ort gewesen sei, an dem Sars-CoV-2 von Tieren auf Menschen übersprang, sondern lediglich der Platz eines »Superspreader«-Ereignisses, bei dem bereits infizierte Menschen zahlreiche weitere ansteckten. In dem Fall aber »müsste man sich fragen: weshalb gerade dort?«, gibt Crits-Christoph zu bedenken. »Wenn Menschen den Erreger dorthin transportierten und verbreiteten, warum dann ausgerechnet an den Orten mit den meisten Wildtier-Verkaufsständen?«

Die in »Nature« veröffentlichte CCDC-Studie äußert sich in diesem Punkt zurückhaltend. Ihr Autorenteam betont, die Abstrichproben vom Huanan-Markt würden »nicht beweisen, dass die Tiere dort infiziert waren«. Und selbst wenn sie das Virus damals in sich trugen, scheine es durchaus möglich, dass sie es von infizierten Menschen aufgenommen hatten – und nicht andersherum.



PHILL / GETTY IMAGES / ISTOCK

MARDERHUNDE könnten das Virus Sars-CoV-2 auf den Menschen übertragen haben.

Schon vorherige Studien hatten den Markt als frühes Epizentrum der Sars-CoV-2-Pandemie identifiziert und auf eine mögliche Tier-zu-Mensch-Übertragung von Viren hingewiesen, die sich dort abgespielt haben könnten. Eines jener Forschungsprojekte leitete Jonathan Pekar, der heute an der University of California, San Diego, in Bioinformatik promoviert. Er und sein Team fanden Belege dafür, dass zu Beginn der Pandemie zwei Viruslinien – mit A und B bezeichnet – in Wuhan zirkulierten, die beide mit dem Huanan-Markt in Verbindung standen. Die B-Linie sei vermutlich die erste gewesen, die auf Menschen übersprang. Falls dem so war, dann spricht das eher gegen die Laborhypothese, wonach Sars-CoV-2 aus einem Labor am Institut für Virologie Wuhan entwich. Denn dann hätte es zweimal separat auf den Markt eingeschleppt werden müssen.

Schwierige Rückverfolgung

»Ist es möglich, dass sich jemand im Labor mit der Linie B infiziert, damit auf dem Markt auftaucht und sie verbreitet, aber auf dem 15 Kilometer langen Weg dorthin niemanden ansteckt – und in der darauf folgenden Woche genau das Gleiche mit Linie A passiert?«, fragt Rasmussen. »Es ist möglich, aber nicht sehr plausibel, verglichen mit dem alternativen Szenario: dass nämlich sowohl Linie A als auch Linie B von Tieren kamen und bei zwei verschiedenen Übertragungsereignissen auf den Menschen wechselten.«

Freilich ist das umstritten. Kritiker weisen darauf hin, die beiden frühen Sars-CoV-2-Linien würden sich durch lediglich zwei genetische Mutationen voneinander unterscheiden. Angesichts der raschen Virusevolution scheinere es möglich, dass die eine aus der anderen hervorging,

nachdem der Erreger auf den Markt gelangt war. Von mehreren Übertragungsereignissen auszugehen, sei nicht zwingend erforderlich. »Die Tatsache, dass sich die frühen Sars-CoV-2-Erreger in zwei Gruppen unterteilen lassen, die genetisch kaum voneinander abweichen, bedeutet meiner Meinung nach nicht, dass sie mehrmals auf den Menschen überwechselten«, sagt Jesse Bloom, Computerbiologe am Fred Hutchinson Cancer Center in Seattle, der über die Evolution von Sars-CoV-2 forscht. »Genauso gut kann der eine Typ den anderen hervorgebracht haben, während er bereits in Menschen zirkulierte.«

Immerhin geben die Ergebnisse der Abstrichanalysen eine bessere Vorstellung davon, wo die Wissenschaftler suchen müssen, um dem Ursprung des Virus näher zu kommen, meint Alex Crits-Christoph. Man könne sich nun auf vorgelagerte Märkte, den Wildtierhandel oder auf Zuchtfarmen konzentrieren, von denen die Tiere möglicherweise kamen. Würden dort genetische Sequenzen früher Sars-CoV-2-Linien nachgewiesen, so der Computerbiologe, könne man möglicherweise genauer eingrenzen, in welchen tierischen Wirten der Erreger evolvierte.

Manche Wissenschaftler stehen der These, Sars-CoV-2 sei von Wildtieren auf Menschen gewechselt, eher ablehnend gegenüber: Was aus dem Probenmaterial vom Huanan-Markt abzulesen ist, passe nicht zum zeitlichen Ablauf der Pandemie. Die ersten bestätigten symptomatischen Covid-19-Fälle traten um den 10. Dezember 2019 herum auf; die Proben aber wurden fast einen Monat später gesammelt. Vielleicht zirkulierte das Virus sogar schon Mitte November 2019 in menschlichen Populationen, wie vergleichende genetische Analysen vermuten lassen. Es ist unmöglich zu wissen, ob damals dieselben Tiere auf dem Markt waren wie zum Zeitpunkt der Probenentnahme und ob sie den Erreger bereits vor dem ersten Auftreten menschlicher Erkrankungsfälle in sich trugen. »Der größte Schwachpunkt dieser empirischen Untersuchungen liegt darin, dass die Proben erst im Januar 2020 gesammelt wurden«, sagt Bloom. »Das macht es sehr schwer, die Analyseergebnisse – insbesondere zur räumlichen Verteilung von tierischem, menschlichem und viralem Erbgut – zu interpretieren.«

Bloom hat Ende April 2023 seine eigene Analyse der CCDC-Daten als Preprint-Version veröffentlicht. Sie bestätigt die Anwesenheit zahlreicher Tiere auf dem Huanan-Markt, darunter Marderhunde. Der Computerbiologe ging jedoch noch einen Schritt weiter und ermittelte die Menge des DNA-Materials nach Spezies aufgeschlüsselt. Dabei bezog er – anders als die Forschungsgruppe um Crits-Christoph – sämtliche Chordatiere ein, also alle mit stabförmiger Stützstruktur im Rücken, und nicht nur Säugetiere. Zwar ist bekannt, dass Sars-CoV-2 nur Säugetiere befällt, aber die anderen Chordatiere dienten Bloom als Kontrollgruppe. Seinen Ergebnissen zufolge enthielten nur sehr wenige Sars-CoV-2-positive Proben eine bedeutende Menge an Marderhund-DNA. Jene Abstriche mit dem meisten viralen Erbmaterial wiesen zugleich den höchsten Gehalt an Fisch-DNA auf. Fische gelten jedoch als unempfindlich für den Erreger.

»Offenbar lässt sich mit dieser Art der Analyse – dem Messen des genetischen Gehalts in Abstrichproben – nicht wirklich herausfinden, ob Tiere infiziert gewesen waren und wenn ja, welche«, resümiert Bloom. »Meine Studie demonstriert, dass man aus entsprechenden Untersuchungen kaum Schlüsse ziehen kann, weil sie Zusammenhänge nahelegen, die eindeutig keinen Sinn ergeben.«

Diesen Einwand lässt Crits-Christoph nicht gelten. Er weist darauf hin, das Ermitteln von Korrelationen sei ohnehin keine geeignete Methode, um zu beantworten, welche Spezies das Virus übertragen habe. Denn das genetische Material des Erregers, das an Marktständen nachgewiesen wurde, sei mit ziemlicher Sicherheit von erkrankten Menschen ausgeschieden worden. Zwar basiert auch Crits-Christophs eigene Analyse auf Korrelationen: nämlich zwischen Sars-CoV-2-empfindlichen Tieren und Marktbereichen mit positivem Virusnachweis. Er nutzt nach eigener Aussage die Korrelation aber lediglich, um zu zeigen, dass sich die Tiere am Ort des Geschehens befunden haben – und nicht, dass sie damals infiziert gewesen sind.

Laborunfall statt Zoonose?

Alina Chan ist wissenschaftliche Beraterin am Massachusetts Institute of Technology und der Harvard University. Sie vertritt vehement die These, Sars-CoV-2 sei aus einem Labor freigekommen, und äußert starke Kritik an den empirischen Untersuchungen auf dem Huanan-Markt. Ihr zufolge bestätigen die genetischen Analysen nur, dass es auf dem Markt Tiere gab, was bereits bekannt gewesen sei. »Ich halte es für kaum überraschend, dass an den dortigen Verkaufsständen Marderhund-DNA nachweisbar ist«, sagt Chan. Zudem merkt sie an, Erbmaterial von Sars-CoV-2 sei auf dem Markt nicht nur dort gefunden worden, wo Tiere gehandelt wurden.

Bloom hält dem entgegen, die Laborhypothese stütze sich genauso auf Indizien wie die Annahme, das Virus sei von Wildtieren auf den Menschen übergelungen. Das Hauptargument der Laborhypothese sei die räumliche Nähe des frühen Infektionsgeschehens zu virologischen Labors, was nicht besonders überzeugend wirke: »Die Covid-19-Pandemie begann zwar in Wuhan, wo Labors existieren, in denen Forschungsarbeiten an sarsähnlichen Coronaviren stattfinden. Doch es gibt keine stichhaltigen Belege dafür, dass eines dieser Labors mit Sars-CoV-2-ähnlichen Erregern arbeitete.«

Bloom sieht vier plausible Szenarien, wie die Pandemie begonnen haben könnte. Zwei davon haben mit einem Labor beziehungsweise dem dortigen Forschungspersonal zu tun. So könnten Fachleute des Instituts für Virologie Wuhan bei Feldarbeiten von Fledermäusen infiziert worden sein; oder sie könnten virushaltige Proben von Fledermäusen oder anderen Tieren gesammelt, zurück nach Wuhan gebracht und sich bei Untersuchungen dort daran angesteckt haben. Den anderen beiden Szenarien liegt eine natürliche Übertragung zu Grunde: Ein Marderhund oder ein anderer tierischer Zwischenwirt

könnte Personen in Wuhan infiziert haben; oder eine Fledermaus übertrug das Virus außerhalb von Wuhan auf einen Menschen, der es in die Stadt einschleppte (die Fledertiere, die als Überträger in Frage kommen, sind dort innerorts nicht anzutreffen). »Meines Wissens liegen all diese Varianten nach wie vor im Bereich des Möglichen«, sagt Bloom, »und sie sind allesamt so beunruhigend, dass wir versuchen sollten, ein ähnliches Geschehen künftig zu vermeiden.«

Chan skizziert ein weiteres mögliches Szenario der Laborhypothese. Demnach könnte Sars-CoV-2 experimentell so verändert worden sein, dass es menschliche Zellen infizierte – etwa bei so genannten Gain-of-Function-Experimenten (siehe »Spektrum« April 2022, S. 48). Das modifizierte Virus könne dann versehentlich in die Umwelt gelangt sein. Diese Idee ist sehr umstritten, und viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weisen darauf hin, dass es dafür im Grunde genommen keine Belege gibt. Chan und andere haben auf ein vermeintlich ungewöhnliches Merkmal des Virus hingewiesen, eine Furin-Spaltstelle, die ihrer Meinung nach auf eine künstliche Veränderung hindeutet. Furin-Spaltstellen gibt es aber auch bei zahlreichen natürlichen Spezies von Coronaviren, weshalb dieses Argument die meisten Fachleute nicht überzeugt.

Mindestens acht US-Geheimdienste haben eigene Untersuchungen zum Ursprung des Virus angestrengt. Vier von ihnen kamen mit »geringem Vertrauen« zu dem Schluss, dass eine natürliche Übertragung von Tieren auf Menschen am wahrscheinlichsten sei; zwei favorisierten mit »geringem« beziehungsweise »mäßigem« Vertrauen die Laborhypothese; die restlichen beiden blieben unentschieden. 2023 hat die US-Regierung die Geheimhaltung von Informationen zur Herkunft von Sars-CoV-2 aufgehoben, um den Wissensaustausch darüber zu erleichtern.

Eine eindeutige Antwort darauf, woher das Virus stammt, gibt es also bisher nicht. Dennoch ist Crits-Christoph davon überzeugt, dass die Wissenschaft der Lösung des Rätsels stetig näher kommen wird. »Die Leute haben immer wieder gewettet, dass keine weiteren Informationen zu diesem Thema veröffentlicht würden, und trotzdem kamen immer wieder neue heraus«, sagt er. »Eine solche Wette würde ich nie eingehen.« ◀

QUELLEN

Bloom, J.: Association between Sars-CoV-2 and metagenomic content of samples from the Huanan seafood market. *bioRxiv* 10.1101/2023.04.25.538336, 2023

Freuling, C. M. et al.: Susceptibility of raccoon dogs for experimental Sars-CoV-2 infection. *Emerging Infectious Diseases* 26, 2020

Liu, W. J. et al.: Surveillance of Sars-CoV-2 at the Huanan seafood market. *Nature* 10.1038/s41586-023-06043-2, 2023

Pekar, J. et al.: The molecular epidemiology of multiple zoonotic origins of Sars-CoV-2. *Science* 377, 2022

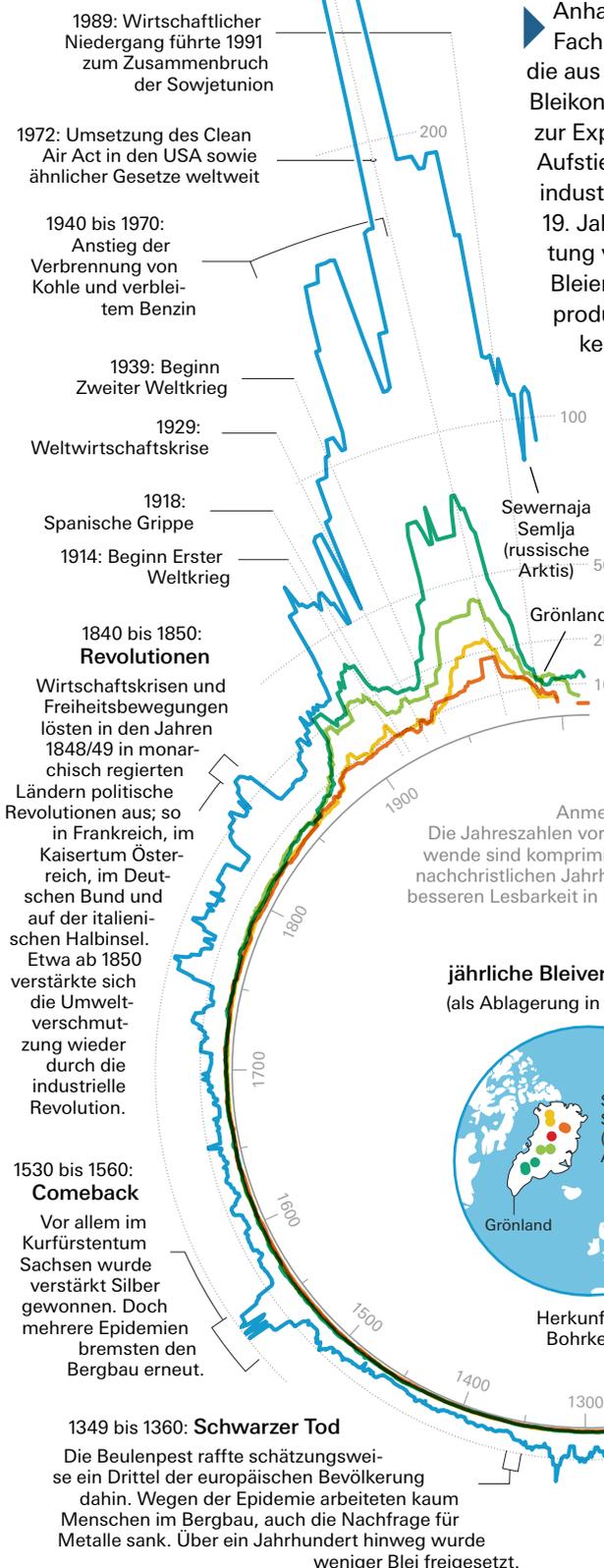
Zhang, Y., Holmes, E.: A genomic perspective on the origin and emergence of Sars-CoV-2. *Cell* 181, 2020

Schwermetall spiegelt historische Ereignisse

Die großen Imperien der Weltgeschichte hinterließen nicht nur Ruinen auf dem Erdboden, sondern auch Bleipartikel im arktischen Eis.

Text:
Mark
Fischetti,
Grafik:
Nadieh
Bremer

300
Mikrogramm
Blei pro
Quadratmeter
und Jahr



Anhand von Eisbohrkernen aus Grönland und der russischen Arktis können Fachleute aufs Jahr genau die Menge an Blei in der Atmosphäre ablesen, die aus Europa, Asien und Nordamerika in den Norden wehte. Dabei finden die Bleikonzentrationen Entsprechungen zu Ereignissen in der Geschichte, etwa zur Expansion der Phönizier im Mittelmeerraum um 1000 v. Chr. oder zum Aufstieg des Römischen Reichs. Ebenso haben grassierende Seuchen und die industrielle Revolution Spuren im Eisarchiv hinterlassen. Vom Altertum bis ins 19. Jahrhundert stammte das Schwermetall hauptsächlich aus der Verhüttung von silberhaltigem Blei. Wenn etwa die Römer das Edelmetall aus dem Bleierz gewannen, gelangte bei dem Schmelzvorgang das Blei »als Abfallprodukt in die Atmosphäre«, erklärt der Glaziologe und Atmosphärenchemiker Joe McConnell vom Desert Research Institute in Nevada.

Die Verbrennung von Kohle und bleihaltigem Benzin sowie die Herstellung bleihaltiger Farben von den 1940er bis 1970er Jahren führten zu so hohen Bleikonzentrationen in der Luft wie nie zuvor in der Geschichte. Erst gesetzliche Maßnahmen wie der US-amerikanische Clean Air Act aus dem Jahr 1970 oder das Benzinbleigesetz von 1972 in Deutschland reduzierten die Emissionen. Die Covid-19-Pandemie hat dagegen vermutlich keine großen Spuren im Eis hinterlassen. Die Lockdowns waren vergleichsweise kurz, zudem arbeiten die Industrien vieler Volkswirtschaften heutzutage weitgehend bleifrei.

Anmerkung:
Die Jahreszahlen vor der Zeitenwende sind komprimiert dargestellt, die nachchristlichen Jahrhunderte hingegen zur besseren Lesbarkeit in regelmäßiger Streckung.

jährliche Bleiverschmutzung
(als Ablagerung in Eisbohrkernen)



Herkunft der Bohrkerne

27 v. Chr. bis 195 n. Chr.: Römisches Reich

Während der Hochphase der Kaiserzeit war der Bleiausstoß besonders stark. Doch als sich ab 165 die Antoninische Pest – vermutlich eine Masern- oder Pockenepidemie – ausbreitete, gingen die Emissionen zurück. Später begann eine Krisenzeit im Reich.

740 bis 814: Zeit von Karl dem Großen

Frankenkönig Pippin der Jüngere förderte die Silberverhüttung, um aus dem Edelmetall Münzen prägen zu lassen. Sein Sohn Karl der Große wurde im Jahr 800 zum Kaiser gekrönt und beherrschte bis zu seinem Tod 814 große Teile Westeuropas.

835 bis 1016: Überfluss und Hungersnot

In der Zeit von 875 bis 905 war die Bleiverschmutzung in der Luft gering. Damals herrschte eine Dürre in Europa; die schlechte Nahrungsvorsorgung ließ den Bergbau erlahmen. Danach bauten die Menschen im heutigen Deutschland wieder vermehrt die reichen Blei- und Silbervorkommen ab – bis zu Beginn des 11. Jahrhunderts die Minen aufgegeben wurden, als erneut eine Hungersnot ausbrach.

UND AUS MCCONNELL, JR. ET AL.: PERMANENT ARCTIC LEAD POLLUTION SUGGESTS SUBSTANTIAL GROWTH IN MEDIEVAL SILVER PRODUCTION MODERATED BY PLAGUE, CLIMATE, AND CONFLICT. PNAS 116, 2019; SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2020; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

LANDWIRTSCHAFT

Wie Glyphosat die Welt eroberte

Das Herbizid wurde ursprünglich auf der Suche nach besseren Wasserenthärtern entwickelt. Wie es wirkt, verstand man erst, nachdem es in der modernen Landwirtschaft bereits allgegenwärtig geworden war.

» spektrum.de/artikel/2169858



Philip A. Rea ist Professor für Biologie an der University of Pennsylvania.



AUf EINEN BLICK

Unkrautvernichter durch Zufall

- 1** Glyphosat ist der weltweit am meisten eingesetzte Unkrautvernichter. Mehrere Milliarden Kilogramm davon gelangen jährlich auf die Äcker.
- 2** Am Anfang stand zunächst ein Stoff, der Pflanzen aller Art den Garaus machte. Als darüber hinaus Nutzpflanzen entwickelt wurden, denen das Mittel nichts anhaben kann, veränderte sich die Landwirtschaft radikal.
- 3** Beim Aufstieg von Glyphosat spielten mehrere zufällige Entdeckungen eine Rolle. Erst Jahre nach der Markteinführung entschlüsselten Fachleute, wie die Chemikalie wirkt.

RESISTENZ Sojabohnen waren die ersten Nutzpflanzen, die gentechnisch resistent gegen Glyphosat gemacht wurden. Das Mittel kann ihnen nichts anhaben.

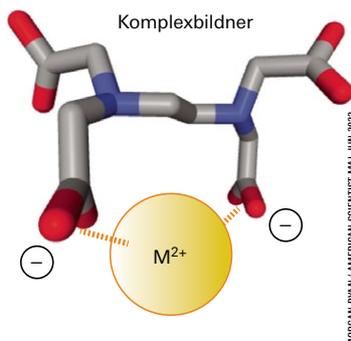
Der umstrittene Unkrautvernichter Glyphosat, bekannt etwa unter dem Markennamen »Roundup«, hat die weltweite Landwirtschaft radikal verändert. Seine Entdeckung und seinen Erfolg verdankt er einer Reihe besonderer Zufälle.

Seit seiner Einführung im Jahr 1974 wurden weltweit mehr als zehn Millionen Tonnen Glyphosat versprüht. Ursprünglich erfolgte der Einsatz vorsichtig, um nur unerwünschtes Grün und keine Nutzpflanzen abzutöten. Als 1996 jedoch gentechnisch veränderte Pflanzen auf den Markt kamen, die gegen die tödliche Wirkung von Glyphosat resistent sind, konnte man das Unkrautvernichtungsmittel bei diesen Nutzpflanzen ungehindert anwenden – und der Einsatz stieg explosionsartig an. 2019 wurde das Mittel allein in den USA auf durchschnittlich 121 Millionen Hektar (1,2 Millionen Quadratkilometer) Ackerland pro Jahr ausgebracht. Das entspricht etwa dem Fünffachen der gesamten Landfläche des Vereinigten Königreichs.

Hinter der Entdeckung des Mittels stehen ein außergewöhnliches Zusammentreffen einiger besonderer Faktoren und ein wissenschaftlicher Zufall. Wenn man biologisch aktive Substanzen nach rationalen Gesichtspunkten entwirft, untersucht man zunächst Verbindungen mit bekannter Wirkung. Anschließend stellt man leicht veränderte Versionen dieser Moleküle her, in der Hoffnung, sie mögen die gewünschten Aktivitäten in verfeinerter oder verstärkter Form haben.

Glyphosat wurde nicht auf eine solche Weise entwickelt – ganz im Gegenteil. Seine Anfänge bei Monsanto gehen auf das Jahr 1960 zurück. Damals erfanden Wissenschaftler in der unternehmenseigenen Abteilung für anorganische Stoffe ein neues Verfahren, um Amino-methylphosphonate (AMP) herzustellen: Moleküle, die als Wasserenthärter dienen sollten. Wasserenthärtungsmittel binden sich an Mineralien, die Kalkablagerungen (Kalzium- oder Magnesiumkarbonat) in Rohren, auf Warmwasserbereiteern und Ähnlichem verursachen, und verhindern so das Verkalken. Das Unternehmen hatte bereits einige solcher Wasserenthärter auf dem Markt, doch nachdem es ein Verfahren entwickelt hatte, mit dem sich die Produkte einfach und mit hoher Ausbeute herstellen ließen, begann es, nach leistungsfähigeren und günstigeren Varianten zu suchen.

WASSERENTHÄRTER bekämpfen Kalkablagerungen (Kalzium- oder Magnesiumkarbonat), indem sie Kalzium- oder Magnesiumionen binden. Glyphosat wurde als eine von vielen Verbindungen auf der Suche nach solchen Mitteln hergestellt und untersucht (M: Metall).



In einer anderen Abteilung von Monsanto sprach sich zu jener Zeit Philip C. Hamm, der damalige Leiter des Herbizid-Screening-Programms des Unternehmens, dafür aus, alle neuen in der Firma hergestellten Verbindungen unabhängig von ihrer Herkunft auf ihre Herbizidaktivität zu prüfen, um eine umfassende Suche nach neuen Produkten zu ermöglichen. Dabei fand man unter den AMP zwei Substanzen mit schwach Pflanzentötender Wirkung. Hamm fiel auf, dass sie nicht nur gegen einjährige Pflanzen wirkten, sondern auch gegen mehrjährige. Solche Unkrautvernichter waren zu der Zeit noch nicht auf dem Markt.

In den folgenden neun Jahren, von 1960 bis 1969, suchten die Forscher von Monsanto nach AMP-Verbindungen mit einer Herbizidwirkung, die mindestens zehnmal so hoch sein sollte wie die der ersten beiden – ohne Erfolg. Dann lenkte John E. Franz von der Abteilung für landwirtschaftliche Produkte die Aufmerksamkeit der Forschung auf eine andere Stoffklasse: Statt auf AMP, bei denen das Stickstoffmolekül an drei Kohlenstoffatome gebunden ist (tertiäre Amine), konzentrierte sich die Suche fortan auf solche, bei denen der Stickstoff mit zwei Kohlenstoffatomen verbunden ist (sekundäre Amine).

Amine sind Abkömmlinge des Ammoniaks (NH₃). In ihnen hängen an einem zentralen Stickstoffatom verschiedene Kohlenwasserstoffgruppen. Sekundäre Amine hatte bei Monsanto bis dahin noch niemand hergestellt.

Die Suche nach wirksamen sekundären AMP zahlte sich bald aus. Von einer Hand voll neuer Verbindungen, die Franz synthetisierte, wirkte eine als Herbizid mindestens zehnmal so stark wie die tertiären AMP, mit denen die Suche begonnen hatte. Dabei handelte es sich um N-(Phosphonomethyl)glycin, heute als Glyphosat bekannt.

Fünf Dollar für das Patent auf Glyphosat

Franz synthetisierte Glyphosat erstmals im Mai 1970. Im Mai 1971 reichte Monsanto das Patent ein, im März 1974 wurde es erteilt. Als einziger auf dem Patent genannter Erfinder erhielt Franz stolze fünf Dollar mit der Anmeldung des Patents. Beförderungen und Auszeichnungen folgten, jedoch erst viele Jahre später.

Um ein Patent anzumelden, muss man sowohl wissen, was bereits entdeckt wurde, als auch, was die entscheidende Neuerung ist. Das Patent von Monsanto aus dem Jahr 1974 wurde daher nicht für die Entdeckung von Glyphosat erteilt, sondern für die Feststellung seiner herbiziden Eigenschaften. Die ursprüngliche Entdeckung von Glyphosat wird nämlich dem Schweizer Chemiker Henri Martin zugeschrieben, der das Molekül 1950 erstmals synthetisierte, als er für das Pharmaunternehmen Cilag (heute eine Tochtergesellschaft von Johnson & Johnson) arbeitete. Weil der Stoff keine offensichtlichen pharmazeutischen Anwendungen hatte und Cilag über kein Portfolio an Herbiziden verfügte, verschwand Glyphosat vorerst in den Archiven der Chemieindustrie, bis es 1964 in einem weiteren Patent auftauchte, das diesmal der Stauffer Chemical Company (heute ein Teil von Sanofi-Aventis) erteilt wurde. Obwohl es sich um ein landwirt-

Kontroverse um Glyphosat

In Deutschland ist Glyphosat seit 1974 als Unkrautvernichter zugelassen. EU-weit wurde es 2001 als Pflanzenschutzmittel genehmigt; 2017 fand auf Grundlage neuer Studien eine Wiedergenehmigung zunächst bis Dezember 2022 statt, die wiederum bis zum 15. Dezember 2023 verlängert wurde. Ob die EU-weite Genehmigung danach erneuert wird, wird derzeit geprüft.

Aktuell gibt es in Deutschland 58 erlaubte glyphosathaltige Pflanzenschutzmittel, für den Einsatz gelten seit 2021 allerdings strenge Beschränkungen. Ein etwaiges deutschlandweites Verbot würde momentan dem EU-Recht widersprechen, da das Mittel dort zugelassen ist.

Dazu schreibt das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf seiner Website: »Bei bestimmungsgemäßer und sachgerechter Anwendung des Wirkstoffs Glyphosat bestehen keine

Zweifel an der gesundheitlichen Unbedenklichkeit.«

In der Kritik ist der Stoff jedoch auch, weil er die Biodiversität gefährdet: Da sämtliche Pflanzen bei der Behandlung mit dem Breitbandherbizid absterben, fehlt etwa Insekten dort die Nahrungsgrundlage. Außerdem gibt es Studien, nach denen der Stoff schädlich für Insekten ist, etwa in dem er deren Mikrobiom verändert und sie anfälliger gegenüber Schädlingen macht. Umweltverbände fordern daher ein Verbot.

schaftliches Unternehmen handelte, hatte das Patent von Stauffer nichts mit Herbiziden zu tun. Vielmehr ging es um die Synthese von Phosphinsäuren als Wasserenthärtungsmittel, und Glyphosat wurde als eines von mehreren Oxidationsprodukten dieser Klasse von Säuren erwähnt. Es kursieren Vermutungen, Monsanto habe seine ursprünglichen Glyphosatproben von Stauffer erworben. Das stimmt jedoch nicht, Glyphosat wurde bei Monsanto unabhängig synthetisiert.

Der Markterfolg von Glyphosat spornte Monsanto und andere Agrochemieunternehmen dazu an, eine chemisch veränderte Form mit verbesserter Wirkung zu entwickeln. Allerdings war Glyphosat selbst bereits überraschend nah an der Perfektion, vor allem wenn man bedenkt, dass der Stoff nicht nach rationalen Gesichtspunkten entwickelt wurde. Als die Chemiker nun systematisch einzelne Atome oder Atomgruppen des Moleküls ersetzten, war das Ergebnis stets das gleiche: Statt sich zu verbessern, verlor das Molekül seine herbizide Wirkung teilweise oder sogar ganz. Während die meisten Medikamente und Pestizide einzelne oder gebündelte Atomgruppen enthalten, die für die Toxizität der Verbindung verantwortlich sind, so genannte Toxophore, ist Glyphosat in seiner

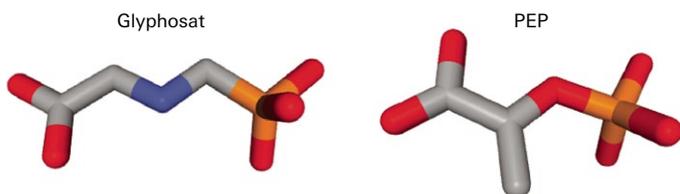
Gesamtheit das Toxophor: Jede Veränderung des Moleküls verringert seine Wirksamkeit. So konnten keine Modifikationen mit dem Original konkurrieren – bis das ursprüngliche Patent 1991 auslief. Und auch dann behielt Monsanto die Exklusivrechte in den Vereinigten Staaten, bis schließlich im Jahr 2000 das Patent für das Isopropylaminsalz des Produkts auslief, das sich besser lösen, verpacken, lagern und anwenden lässt.

Selbst mit seinem großen kommerziellen Erfolg blieb Glyphosat eine Art biochemisches Rätsel. Als das Mittel 1974 als Breitbandherbizid auf den Markt kam, war nur bekannt, dass es Pflanzen nach dem Keimen aus dem Boden relativ wahllos tötet. Das Einzige, was man wusste, waren die 1972 von Ernest Jaworski und seinen Kollegen bei Monsanto veröffentlichten Ergebnisse, die darauf hinwiesen, dass Glyphosat auf irgendeine Weise den Weg hemmt, der für die Herstellung der Aminosäuren Phenylalanin und Tyrosin verantwortlich ist.

Erst zwischen 1979 und 1980, fünf Jahre nach seiner Markteinführung, wurde der genaue Angriffspunkt von Glyphosat identifiziert: das Enzym 5-Enolpyruvylshikimat-3-phosphat (EPSP)-Synthase. Die Entdeckung machte eine Forschungsgruppe unter der Leitung des Biochemikers Nikolaus Amrhein von der ETH Zürich. Jaworski war auf der richtigen Spur gewesen, denn er hatte herausgefunden, dass Glyphosat auf den Biosyntheseweg einwirkt, der unter anderem zu Aminosäuren führt, die aromatische Kohlenstoffringe enthalten. Innerhalb dieses Synthesewegs konzentrierte sich die Gruppe um Amrhein auf das Enzym, das den Stoff Shikimat-3-Phosphat umsetzt. Jenes Molekül steht am Anfang einer Kette enzymkatalysierter Reaktionen, die für Pflanzen außerordentlich wichtig sind (siehe »Wichtiger Reaktionsweg«).

Der Shikimisäureweg verdankt seinen Namen der berühmten Shikimi-Pflanze (Japanischer Sternanis, *Illicium anisatum*). Aus ihr isolierte 1885 der niederländische Chemiker Johann Frederik Eijkman erstmals die organische Säure Shikimisäure (oder Shikimat). Der Stoffwech-

FATALE ÄHNLICHKEIT Die chemische Struktur von Glyphosat (links) ähnelt der von Phosphoenolpyruvat (PEP, rechts). Beide konkurrieren miteinander um die Bindung im aktiven Zentrum des Enzyms EPSP-Synthase, wo die katalytische Reaktion stattfindet.



selweg ist in mehrfacher Hinsicht besonders. Er ist in Pflanzen allgegenwärtig und in Bakterien und Pilzen weit verbreitet, aber – und das ist das Entscheidende – Tieren fehlt er völlig. Sie besitzen das Enzym nicht, auf das Glyphosat abzielt. Die Produkte des Shikimisäurewegs sind jedoch für das Überleben von Mensch und Tier unverzichtbar. Wir nehmen sie zu uns, indem wir Pflanzen oder das Fleisch Pflanzen fressender Tiere essen.

Auf dem Shikimisäureweg entstehen durch eine Abfolge enzymkatalysierter Reaktionen unter anderem die lebenswichtigen Aminosäuren Phenylalanin, Tyrosin und Tryptophan. Diese Moleküle und einige andere Zwischenprodukte des Stoffwechselwegs dienen Organismen als Vorstufen für die Herstellung einer unermesslichen Fülle von Stoffen – Vitamine, Pigmente, Geschmacksstoffe, Strukturmoleküle und viele andere Verbindungen.

Ohne jenen speziellen Stoffwechselweg wäre unsere Biosphäre kaum wiederzuerkennen. Ein Drittel des Kohlenstoffs, den grüne Pflanzen durch Fotosynthese gewinnen, landet dort. Viele essenzielle Nährstoffe, Vitamine und Vitaminvorstufen, von denen alles Leben abhängt, werden auf diesem Weg gebildet. Kein Wunder, dass ein Wirkstoff, der den Shikimisäureweg ausbremst, für Pflanzen so verheerend ist. Denn genau das tut Glyphosat: Es hemmt die EPSP-Synthase und stoppt dadurch die Synthese von EPSP aus Phosphoenolpyruvat (PEP) und Shikimat-3-Phosphat (S3P). So verhindert die Substanz die Herstellung von Phenylalanin, Tyrosin, Tryptophan und vielen anderen wichtigen Verbindungen, die letztlich ausgehend von EPSP entstehen.

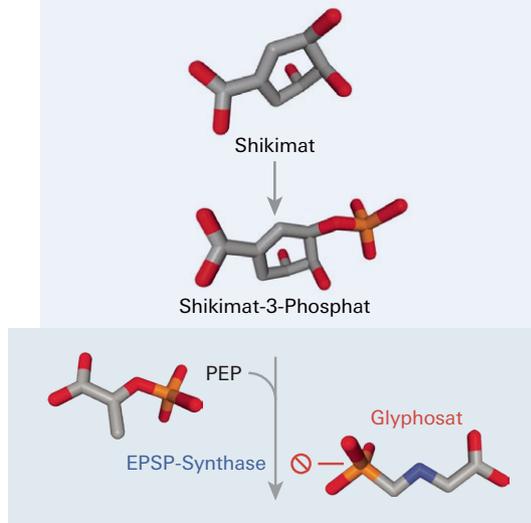
Doppelter Angriff

Glyphosat schaltet aber nicht nur ein äußerst zentrales Enzym aus. Es tut dies auch auf außergewöhnliche Art und Weise. In den 1980er Jahren, fast ein Jahrzehnt nach der Einführung des Unkrautvernichters, machte eine schottische Forschungsgruppe an der University of Glasgow unter der Leitung des Biochemikers John R. Coggins eine unerwartete Entdeckung. Glyphosat hemmt zwei verschiedene Substrate – also zwei Substanzen, die normalerweise mit der EPSP-Synthase reagieren – auf verschiedene Weise. Das eine Substrat, PEP genannt, hemmt der Unkrautvernichter »kompetitiv«, was die Forscher nicht verwunderte. Das andere Substrat aber, S3P, hemmt er »unkompetitiv«, was wiederum sehr überraschend war und weit reichende Folgen hat (siehe »Drei Wege der Enzymhemmung«).

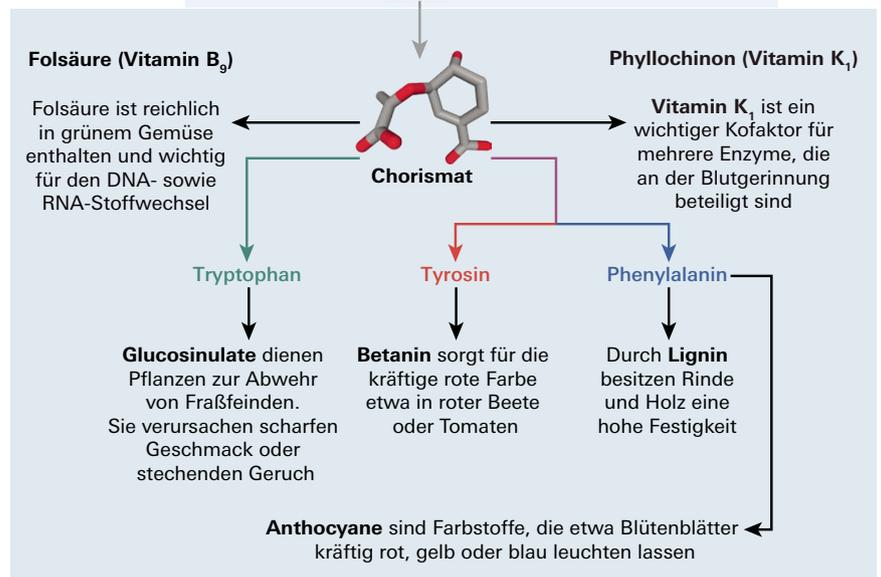
Kompetitive Inhibitoren (Hemmstoffe) ähneln dem Substrat und heften sich direkt an die aktive Stelle des Enzyms. Sie konkurrieren mit dem Substrat also um die Bindungsstellen und verlangsamen so allein durch ihre Anwesenheit die katalyti-

Wichtiger Reaktionsweg

Ausgehend von Shikimat stellen Pflanzen sowie viele Bakterien- und Pilzarten unverzichtbare Stoffe her, etwa die Aminosäuren Tryptophan, Tyrosin und Phenylalanin sowie die Vorstufen unzähliger lebenswichtiger Naturstoffe, von denen einige beispielhaft genannt sind. Für die Umsetzung von Shikimat ist das Enzym EPSP-Synthase zentral. An diesem greift Glyphosat an.



MORGAN RYAN / AMERICAN SCIENTIST MAI-JUN 2022, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



sche Aktivität des Enzyms. Eine andere Art von gängigem Hemmstoff, der nichtkompetitive oder allosterische Inhibitor, bindet sich an eine andere Stelle als das aktive Zentrum und ähnelt dem Substrat für gewöhnlich kaum. Inhibitor und Substrat können daher gleichzeitig an das Enzym gekoppelt sein.

Diese beiden Arten der Hemmung kommen häufig vor – im Gegensatz zur unkompetitiven Hemmung. Unkompetitive Inhibitoren können sich erst an das Enzym heften, nachdem ein Substrat angedockt und dadurch dessen Form verändert hat. Daher erhöht sich die Wirkung eines solchen Hemmstoffs, wenn mehr Substrat vorhanden ist. Das führt zu einer positiven Rückkopplung: Wird die Aktivität des Enzyms gehemmt, häuft sich Substrat aus vorgelagerten Reaktionen an. Durch die höhere Substratkonzentration gelangt dann noch mehr des verfügbaren Enzyms in den Zustand, in dem es sich mit dem Inhibitor verbinden kann.

Das Enzym EPSP-Synthase, auf das Glyphosat einwirkt, verarbeitet die zwei Substrate S3P und PEP. Zuerst koppelt S3P an das Enzym und verändert damit dessen Form (Konformationsänderung). Dadurch bildet sich erst die Bindungsstelle für PEP – oder aber für Glyphosat. Auf diese Weise verstärkt die Anheftung von S3P dessen enzymhemmende Wirkung. Laufen die vorgelagerten Reaktionen im Stoffwechselweg weiterhin ungebremst ab, häuft sich S3P an und wird nicht weiter umgesetzt, weil der darauf folgende Schritt durch inaktive EPSP-Synthase-Komplexe blockiert wird, die Substrat und Glyphosat gebunden haben. In der Folge bricht der unverzichtbare Shikimisäureweg zusammen, und die Pflanze stirbt.

Unkompetitive Hemmung ist damit sehr schwer zu kontrollieren und potenziell tödlich. Wohl aus diesem Grund hat sie sich offenbar als Regulationsmechanismus im Pflanzenstoffwechsel evolutionär nicht durchgesetzt und kommt entsprechend extrem selten vor.

Strukturstudien der EPSP-Synthase, die 2001 – 25 Jahre nach der Markteinführung des Herbizids – veröffentlicht wurden, enthüllten ein weiteres Geheimnis: Wie genau verändert sich die Form der EPSP-Synthase beim Binden an S3P, so dass sie für die unkompetitive Hemmung durch Glyphosat anfällig wird?

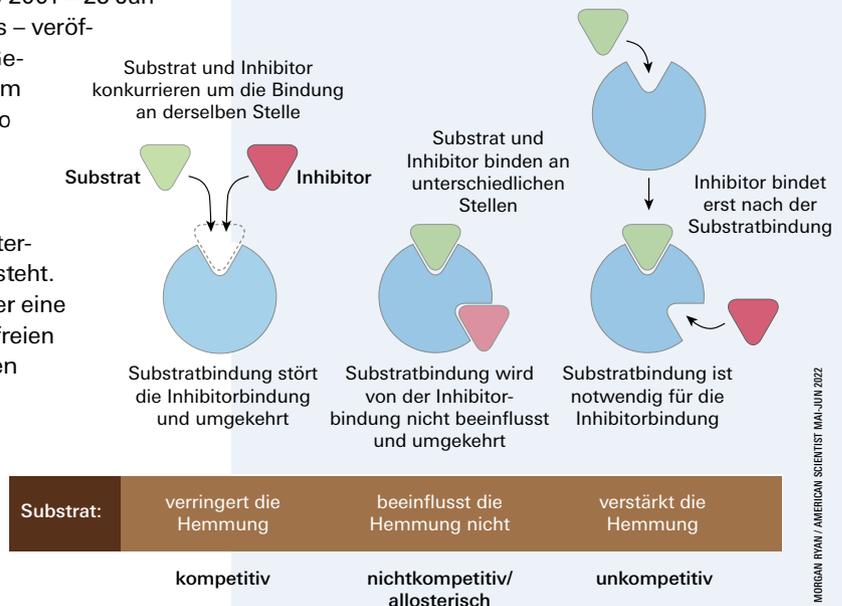
Die EPSP-Synthase ist ein relativ kleines Protein. Es besitzt nur eine einzige Untereinheit, die aus zwei ähnlichen Lappen besteht. Diese nehmen entweder eine »offene« oder eine »geschlossene« Anordnung ein. In seiner freien Form, wenn es nicht mit Substratmolekülen verbunden ist, befinden sich die Domänen in der offenen Stellung. Bei der Interaktion mit S3P – dem einzigen Substrat, das sich an die offene Form des Enzyms heftet – schließen sie sich und bilden dadurch eine neue Bindungsstelle im Enzym. Nun kann Glyphosat diese aktive Stelle besetzen, die eigentlich für PEP vorgesehen ist.

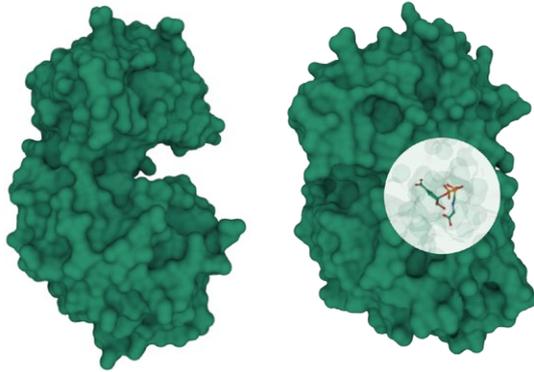
Die Eigenschaft, die Glyphosat zu seinem enormen Markterfolg verhalf, war anfangs der Grund für einen stark beschränkten Einsatz. Fast alle Pflanzen beinhalten den Shikimisäureweg, egal ob Unkraut oder Kulturpflanze. Daher limitierte man Glyphosat weitgehend auf die Unkrautbekämpfung vor der Aussaat.

Drei Wege der Enzymhemmung

Drei Mechanismen können die Enzymaktivität hemmen. Während zwei davon häufig vorkommen, ist einer eher ungewöhnlich: die unkompetitive Hemmung, über die Glyphosat wirkt. Dabei kann der Hemmstoff erst an das Enzym koppeln, wenn das Substrat bereits an dieses gebunden ist.

Bei der kompetitiven Hemmung (linke Spalte) wird das Andocken eines Hemmstoffs umso unwahrscheinlicher, je mehr Substrat zur Verfügung steht, weil Letzteres die Bindungsstellen besetzt. Bei der nichtkompetitiven oder allosterischen Hemmung (Mitte) beeinflusst die Erhöhung der Substratkonzentration die Hemmstoffbindung nicht, weil sich Substrat und Hemmstoff an unterschiedliche Stellen anheften. Bei der unkompetitiven Hemmung (rechte Spalte) wird das Ankoppeln des Hemmstoffs, wie etwa Glyphosat, umso wahrscheinlicher, je mehr Substrat vorhanden ist, weil die Bindungsstelle für den Hemmstoff erst durch Wechselwirkung mit dem Substrat entsteht.





MORGAN RYAN / AMERICAN SCIENTIST MAI-JUN 2022

STRUKTURÄNDERUNG Die Struktur des Enzyms EPSP-Synthase erlaubt zwei Zustände. Bevor das erste Substrat – Shikimat-3-Phosphat (S3P) – bindet, befindet sich das Enzym in einer offenen Konformation (links). Beim Anheften von S3P ändert es seine Form (rechts). Erst dann kann das natürliche Substrat PEP an das Enzym andocken – oder der Unkrautvernichter Glyphosat.

Mechanische Innovationen wie abgeschirmte Sprühgeräte, die den Kontakt der Pflanzenblätter mit dem Herbizid verringern sollten, trugen dazu bei, diese Beschränkung aufzuweichen. Doch erst die Entwicklung glyphosatresistenter Pflanzen, wie die »Roundup Ready«-Pflanzen von Monsanto, veränderte die landwirtschaftliche Praxis radikal. Glyphosat war bereits seit 20 Jahren im Umlauf, als die Roundup-Ready-Pflanzen mit dem Aufkommen transgener Methoden in der Pflanzenzucht Mitte der 1990er Jahre zur Marktdominanz aufstiegen. 1996 wurden glyphosatresistente (GR) Sojabohnen eingeführt, woraufhin Glyphosat zum meistverwendeten Herbizid aller Zeiten aufstieg. 2006 waren mehr als 90 Prozent der in den USA angebauten Sojabohnen »GR«, 2014 auch Baumwolle und Mais. Luzerne, Raps und Zuckerrüben folgten.

Das Bakterium, das überlebte

Ebenso wie die Wirkung des kleinen Moleküls Glyphosat zufällig entdeckt wurde, so fand man die erste glyphosatresistente Genvariante des Zielenzym durch reinen Zufall. Und zwar nicht in einer Pflanze, sondern in einem Bakterium, das in den Abwasserrohren einer Glyphosat-Produktionsanlage von Monsanto gedieh.

Auf der Suche nach glyphosatresistenten Pflanzen wurden viele gentechnische Experimente durchgeführt, doch erst mit der Entdeckung von *Agrobacterium* sp. Stamm CP4 kam der Stein richtig ins Rollen. Das Bakterium gehört zu einer Mikrobengattung, die bei Pflanzen Wurzelhalsgallentumoren verursacht. Das CP4-Gen von *Agrobacterium* codiert für eine glyphosatresistente Version der EPSP-Synthase – sicher der Grund, warum es in der Umgebung einer Glyphosat-Produktionsanlage überlebte. Das Gen brachte man in Nutzpflanzenarten ein, und so konnten Landwirte 1996 erstmals Roundup-Ready-Pflanzen erstehen. Anstatt den Unkrautvernichter kurz vor

der Aussaat auf die Felder aufzubringen, konnten sie ihn nun über bereits wachsende Pflanzen sprühen, die gegen den Stoff immun waren: Das Unkraut wurde beseitigt, die Nutzpflanzen blieben unversehrt. Nach der Einführung der Roundup-Ready-Pflanzen stieg der weltweite Einsatz von Glyphosat um das 15-Fache.

Heute wissen wir, dass EPSP-Synthasen in der Natur in zwei Klassen vorkommen: Enzyme der Klasse I, welche Pflanzen und die meisten Bakterien und Pilzen enthalten, sind empfindlich gegenüber Glyphosat; Enzyme der Klasse II, wie die im *Agrobacterium* sp. Stamm CP4 gefundene Version, sind dagegen relativ resistent.

Bemerkenswerterweise beträgt der Unterschied zwischen den beiden Versionen nur wenige Atome. Genau genommen ist er so klein wie der Größenunterschied zwischen den beiden kleinsten Aminosäuren, Alanin und Glycin. Im aktiven Zentrum des Enzyms, an Position 100 in der Kette der Aminosäuren, steht in der glyphosatresistenten Form Alanin, während die nicht resistente Form dort Glycin aufweist. Die beiden Aminosäuren unterscheiden sich durch ihre Seitenkette: Bei Alanin besteht sie aus einer Methylgruppe (CH₃), bei Glycin nur aus einem Wasserstoffatom (H). Glyphosat wiederum liegt in zwei Formen vor, von denen nur eine – die etwas länger ist als die andere – EPSP hemmt (siehe »Zwei Formen«). Im glyphosatresistenten Enzym behindert das enthaltene

Resistentes Bakterium

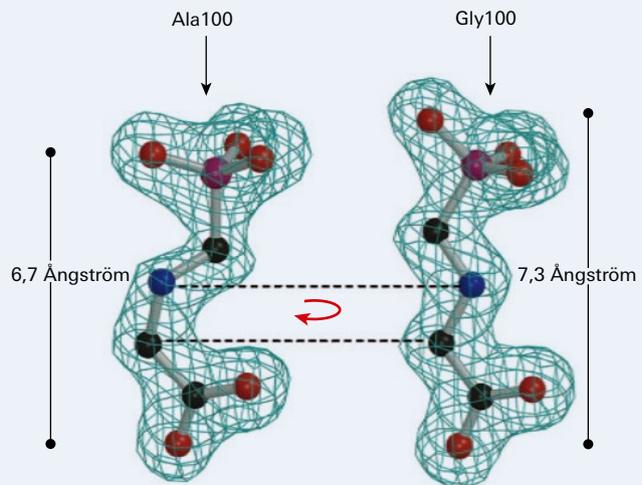
Agrobacterium tumefaciens, eng verwandt mit dem glyphosatresistenten Stamm CP4 von *Agrobacterium* sp., verursacht Wurzelhalsgallentumoren bei Pflanzen wie die hier gezeigten an einem Mangobaum. Das Bakterium ruft Tumoren in zweikeimblättrigen Pflanzen hervor, indem es einen Teil seines großen Ti-Plasmids (Ti steht für tumorinduzierend) in die Wirtszellen überträgt. Glyphosatresistente Pflanzenarten erhielt man zunächst, indem man entschärfte (nicht tumorauslösende) Ti-Plasmide von *A. tumefaciens* einsetzte, die nach genetischer Veränderung das CP4-Gen enthielten.



SCOTT NELSON: FOTO: B. KUWANA (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/SCOTTNELSON/3258880952)/CCO 1.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/PUBLICDOMAIN/WIKI/0.A/LEGAL/0/DE)

Zwei Formen

Glyphosat kommt in zwei Konformationen vor. Die linke Form ist auf Grund der Rotation um die C–N-Bindung – angezeigt durch die gestrichelten Linien – um etwa 0,6 Ångström (10^{-10} Meter) kürzer. In der Langform (rechts) passt das Molekül problemlos an die Bindungsstelle für PEP im Enzym EPSP-Synthase und hemmt so dessen Aktivität. Die glyphosatresistente EPSP-Synthase enthält an einer bestimmten Stelle (Position 100 der Aminosäureabfolge) jedoch die Aminosäure Alanin (Ala) statt Glycin (Gly). Die längere Ala-Seitenkette verhindert, dass Glyphosat in seiner Langform andockt; es muss die kondensierte Konformation annehmen, um sich an das Enzym heften zu können. In dieser Form hemmt der Stoff die Enzymaktivität nicht.



FUNKE, T. ET AL.: MOLEKULARBASIS FÜR DIE HERBIZIDRESISTENZ BEI ROUNDUP-READY CROPS. PNAS 103, 2006, FIG. 4
 (DIE STRICHLEN ZEIGEN DIE ROTATION UM DIE C-N-BINDUNG AN). MATERIALIEN HERVON: AMERICAN SCIENTIST, US
 NUTZUNG MIT FRIHL. GEN. VON PNAS PERMISSIONS; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Alanin durch seine Seitenkette die Bindung und Positionierung des Herbizids in der Langform. In der nicht resistenten Form lässt hingegen Glycin dem Glyphosat genügend Raum zum Andocken.

Damit ist ein Teil der »Magie« des Roundup-Ready-Enzyms erklärt. Aber wie kann das resistente Enzym trotz der längeren Seitenkette weiterhin mit seinem natürlichen Substrat (PEP) reagieren, das mit Glyphosat um die gleiche veränderte Bindungsstelle konkurriert? Ganz einfach: PEP ist kürzer als die hemmende Langform des Glyphosats und kollidiert daher nicht mit der Methylgruppe des Alanins, wodurch das Enzym eine hohe katalytische Aktivität beibehält. Die Roundup-Ready-Pflanzen verdanken ihren Aufstieg also dem Unterschied von 0,6 Ångström (10^{-10} Meter) in der Länge eines kleinen Moleküls.

Heute ist Glyphosat der wirtschaftlich erfolgreichste Unkrautvernichter der Geschichte. Allein in den USA ist es in mehr als 750 Produkten enthalten. Es wird in der Land- und Forstwirtschaft, im Gartenbau und zur Bekämpfung von Wasserpflanzen eingesetzt. Sogar in umstrittenen Vorhaben zur Ausrottung von Drogenpflanzen wie Koka, Schlafmohn oder Marihuana wurde es schon angewandt.

Doch in letzter Zeit geriet Glyphosat unter anderem wegen gesundheitlicher Bedenken in die Kritik. 2015 stufte die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) den Stoff als »wahrscheinlich Krebs erzeugend für den Menschen, Kanzerogen der Gruppe 2A« ein, da es mit einem erhöhten Risiko für Non-Hodgkin-Lymphome – bösartige Tumoren des lymphatischen Systems – einhergeht. Restriktionen werden diskutiert und sind mancherorts bereits umgesetzt (siehe »Kontroverse um Glyphosat«, S. 59). Daher ist die Zukunft der zunehmend umstrittenen Substanz offen. ◀

QUELLEN

Boocock, M.R., Coggins, J.R.: Kinetics of 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase inhibition by glyphosate. *FEBS Letters* 154, 1983

Cornish-Bowden, A.: Why is uncompetitive inhibition so rare? A possible explanation, with implications for the design of drugs and pesticides. *FEBS Letters* 203, 1986

Duke, S.O.: The history and current status of glyphosate. *Pesticide Management Science* 75, 2017

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/landwirtschaft



ISTOCK / CACTUSOUP

Motta, E.V.S. et al.: Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *PNAS* 115, 2018

Schönbrunn, E. et al.: Interaction of the herbicide glyphosate with its target enzyme 5-enolpyruvylshikimate 3-phosphate synthase in atomic detail. *PNAS* 98, 2001

AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

Unsere Neuerscheinungen

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



UNSPLASH / HANS SAUCSON (unsplash.com/photos/4D_PTF9WH4)



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)

Die Physik von Lichtschwertern

Wenn sich Licht nicht ungehindert ausbreiten kann, sind überraschend viele Dinge möglich. Und es braucht einiges an Mathematik, um all das zu beschreiben.

» [spektrum.de/artikel/2169861](https://www.spektrum.de/artikel/2169861)

Das unscheinbare Wort »Streuung« beschreibt in der Physik eine erstaunliche Vielzahl an Phänomenen. Ganz allgemein geht es darum, wie sich die Bahn eines Objekts durch eine Wechselwirkung mit einem anderen verändert. Im Speziellen meint man damit meistens die Ablenkung von Licht an Teilchen – aber selbst in diesem Fall hat man es noch mit zahlreichen unterschiedlichen Vorgängen zu tun.

»Warum ist der Himmel blau?«, ist eine klassische Kinderfrage. Die nicht ganz kindgerechte Antwort lautet: »Weil die Rayleigh-Streuung umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge ist und blaues Licht wegen seiner im Vergleich zum roten Licht kleineren Wellenlänge viel stärker an den Molekülen der Atmosphäre gestreut wird.« Es geht hier um den Spezialfall von Licht, das an Teilchen gestreut wird, deren Durchmesser klein ist im Vergleich zur Wellenlänge.

Wird Licht an größeren Partikeln gestreut, dann hat man es mit Mie-Streuung zu tun, deren Effekt man zum Beispiel beobachten kann, wenn Sonnenlicht durch Nebel oder Staub strahlt. Treffen elektromagnetische Wellen auf Teilchen wie Elektronen, spricht man von Thomson- oder Compton-Streuung. Es gibt jede Menge Möglichkeiten, wie Licht streuen kann – dazu zählt auch die Wechselwirkung mit anderem Licht:

$$\sigma = \frac{973\alpha^4\omega^6}{10125\pi m_e^8}$$

Diese Formel beschreibt den Wirkungsquerschnitt der Halpern-Streuung. Sie ist nach dem Physiker Otto Halpern benannt, der das Phänomen 1931 erstmals beschrieben hat. Um es zu verstehen, muss man sich der Quantenelektrodynamik zuwenden – der Beschreibung des Elektromagnetismus durch quantenmechanische Felder. Licht ist hierbei keine klassische Welle mehr, sondern besteht aus Lichtquanten, den Photonen. Im Rahmen der Quan-

tenfeldtheorie kann sich ein Photon kurzfristig in ein Paar aus Teilchen und Antiteilchen verwandeln, die sich dann aber sofort gegenseitig auslöschen und wieder ein Photon produzieren. Solche Quantenfluktuationen passieren zwar ständig, spielen für die klassische Beschreibung von Licht allerdings keine Rolle. Trotzdem gibt es sie, und sie ermöglichen die »Streuung« von Licht an Licht – und damit theoretisch auch Lichtschwerter. So ist es möglich, dass Lichtstrahlen sich gegenseitig »spüren« und man so mit ihnen kämpfen kann.

Im Rahmen der Halpern-Streuung kann das Teilchen-Antiteilchen-Paar eines Photons mit dem eines anderen Photons wechselwirken. Der in der Formel beschriebene Wirkungsquerschnitt ist indirekt proportional zur achten Potenz der Masse der erzeugten Teilchenpaare. Deswegen findet man in der Gleichung das Symbol m_e , die Elektronenmasse. Der direkte Nachweis der Halpern-Streuung ist erst 2015 am Teilchenbeschleuniger des europäischen Kernforschungszentrums CERN gelungen. Physiker haben dort geladene Bleiatome beschleunigt und miteinander wechselwirken lassen. Dabei entstanden starke elektromagnetische Felder mit Photonen, die aneinander streuen konnten. Insgesamt ließen sich 13 solche Prozesse beobachten.

Die Auswirkungen der Halpern-Streuung sieht man ebenfalls beim Blick hinaus ins All. Viele astronomische Prozesse erzeugen Gammastrahlung, also hochenergetische Photonen. Bei ihrem Weg durchs Universum können sie mit Photonen des extragalaktischen Hintergrundlichts wechselwirken, einem extrem schwachen, diffusen Licht, das von all den Sternen und Galaxien seit der Entstehung des Kosmos stammt. Die Gammastrahlen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit, am Hintergrundlicht gestreut zu werden, was ihre Energie verringert. Anders gesagt: Wenn es um sehr große Distanzen geht, macht die Halpern-Streuung das Universum undurchsichtig für hochenergetisches Licht.



Florian Freistetter

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

Was zittert denn da?

Teilchen, die sich von selbst zu bewegen scheinen, ohne eine bestimmte Richtung einzuschlagen: Was der Botaniker Robert Brown im Jahr 1827 beobachtete und noch nicht erklären konnte, gilt heute als ein Beleg für die ständige Bewegung von Atomen und Molekülen.

» [spektrum.de/artikel/2169864](https://www.spektrum.de/artikel/2169864)



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.

► Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist es heute selbstverständlich: Alle Materie ist aus Atomen und Molekülen zusammengesetzt. Diese Vorstellung vom »diskontinuierlichen« Aufbau der Materie ist aber noch nicht sehr lange gefestigt. Im Jahr 1827 führte Robert Brown die ersten ausführlicheren Versuche durch, die einen Hinweis darauf gaben. Erklären konnte man das Phänomen, das ihm zu Ehren später Brownsche Bewegung getauft wurde, aber erst knapp 80 Jahre nach seiner Entdeckung.

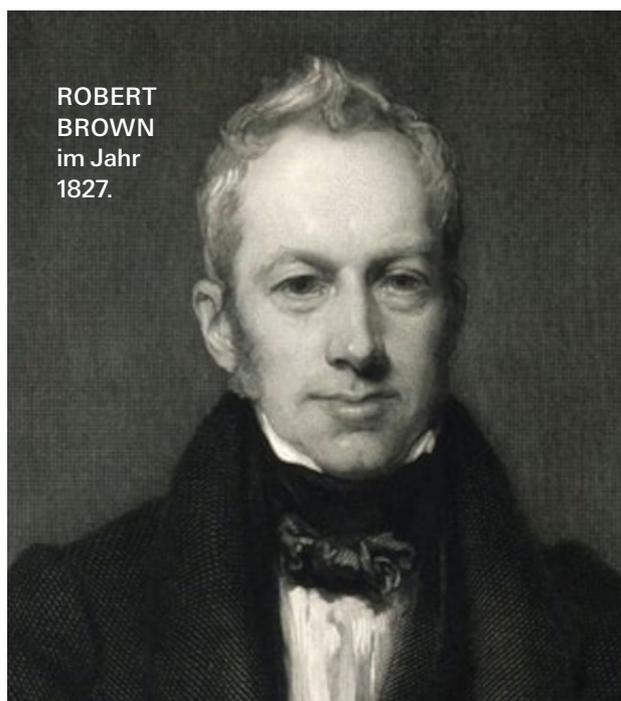
Der renommierte schottische Botaniker Robert Brown (21. Dezember 1773–10. Juni 1858) wurde vor allem für seine genauen mikroskopischen Untersuchungen bekannt. So war er einer der Ersten, der den Zellkern beschrieb sowie grundlegende Unterschiede bei der Befruchtung von Bedecktsamern (Angiospermen) und Nacktsamern (Gymnospermen) erkannte. 1827 jedoch machte Brown seine wohl wichtigste Entdeckung, als er mit dem Mikroskop beim Beobachten von Pollen etwas Eigenartiges wahrnahm: Kleinste Partikel vollführten eine kontinuierliche zitternde Bewegung.

Um der Ursache für dieses Phänomen auf den Grund zu gehen, unternahm der Wissenschaftler einige weitere Versuche. Seine Ideen und Beobachtungen veröffentlichte er 1828 in einem Artikel mit dem Titel »A brief account of microscopical observations made in the months of June, July, and August, 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies«.

Brown schaffte es nicht mehr, das Rätsel hinter der eigenartigen Bewegung zu lösen. Eine gültige Erklärung stellten später andere auf – die Physiker Albert Einstein, Jean Baptiste Perrin und Marian von Smoluchowski. Heute trägt das Phänomen seinem Entdecker zur Ehren den Namen Brownsche Bewegung.

Um das Originalexperiment nachzustellen, benötigt man ein Mikroskop mit einer bis zu 400-fachen Vergrößerung, außerdem Mörser und Pistill, Objektträger und Deckglas sowie Wasser, einen Spatel, eine Pipette und frische Pollen. Man zerreibt im Mörser eine Spatelspitze Pollen möglichst fein mit zwei Milliliter Wasser. Dann gibt man zwei bis drei Tropfen der entstandenen Suspension auf den Objektträger und deckt sie mit einem Deckglas ab, ohne dass dabei Blasen entstehen. Jetzt mikroskopiert man bei zirka 400-facher Vergrößerung und geringer Beleuchtungsstärke. Bei Bedarf lassen sich die Beobachtungen wunderbar mit der Handykamera aufzeichnen. Die kleinen Partikel sind dabei keine ganzen Pollenkörner, sondern viel winzigere Pollenbruchstücke, die durch das Zerreiben im Mörser entstehen.

Betrachtet man die in Wasser suspendierten Pollenbruchstücke durch das Mikroskop, lassen sich zahlreiche



ROBERT BROWN
im Jahr
1827.



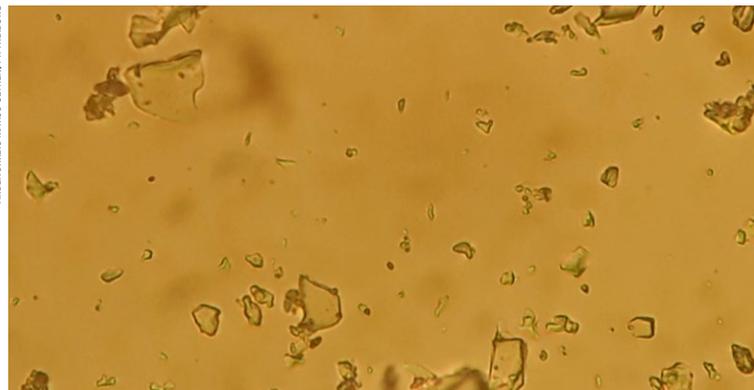
GRÖSSENUNTERSCHIED
Pollen unter dem Mikroskop. Die Bruchstücke
(unteres Bild) sind deutlich kleiner.

kleine Teilchen erkennen, die eine unruhige und regellose Zitterbewegung vollführen. Größere Partikel hingegen bewegen sich nur langsam, manche sogar überhaupt nicht. Robert Brown schreibt über seine Beobachtungen: »Als ich die Gestalt dieser in Wasser getauchten Partikeln untersuchte, bemerkte ich, dass viele von ihnen sichtlich in Bewegung waren. Ihre Bewegung bestand nicht bloß aus einer Ortsveränderung in der Flüssigkeit ... einige wenige Partikelchen sah man sich um ihre eigene Achse drehen. ... die kleinen sphärischen Partikel zeigten sich in beträchtlicher Anzahl und in offener Bewegung, nebst einigen der größeren Partikel, deren Bewegung weniger augenscheinlich und zuweilen nicht zu beobachten war.«

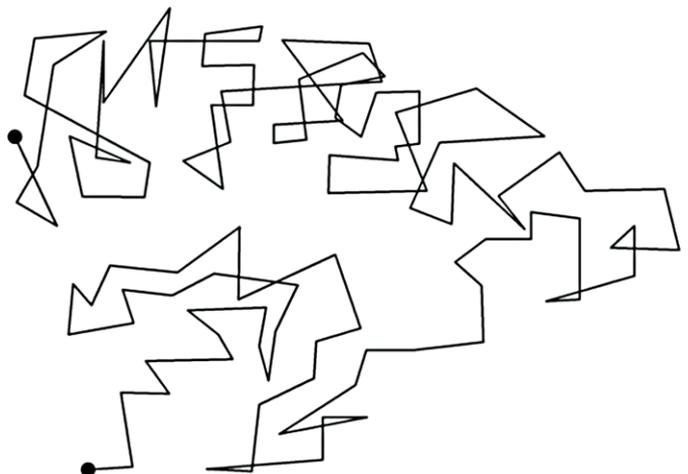
Zeichnet man die Bahn der Bewegung eines Partikels nach, so ergibt sich eine charakteristische Form (siehe »Ungeordnet«).

Robert Brown vermutete zuerst, den Partikeln aus den Blütenpollen wohne eine eigene »Lebenskraft« inne, die sie antreibe. Um seine Hypothese zu überprüfen, unternahm er weitere Versuche und untersuchte unbelebte oder »tote« Materie, wie etwa alte Pollen, Glas, Stein oder Ruß. Das Ergebnis: Ganz egal, was er zu einem feinen Pulver zerrieben hatte, die winzigen Partikel bewegten sich stets – und zwar genau in der gleichen Art und Weise wie bei den Blütenpollen. Demnach sollte die Ursache der Brownschen Bewegung wohl eher physikalischer als biologischer Natur sein.

Ein naheliegender physikalischer Effekt könnte sein, dass Wasser unter dem Deckglas verdunstet. Dadurch



UNGEORDNET Typische Bahn eines in
Wasser suspendierten Teilchens (unten).

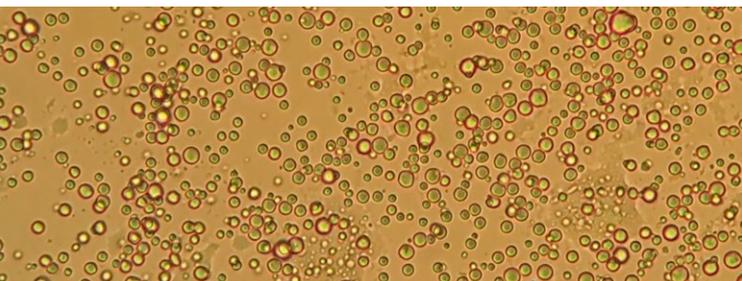
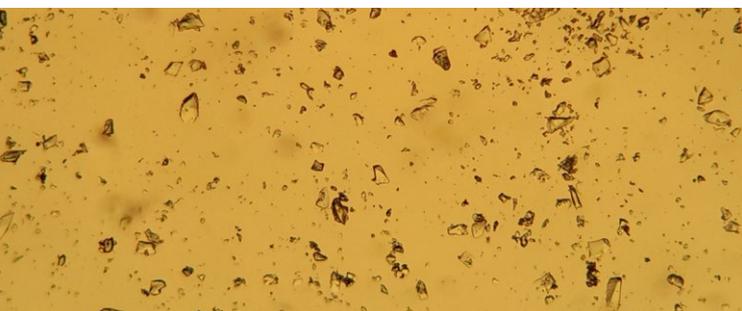
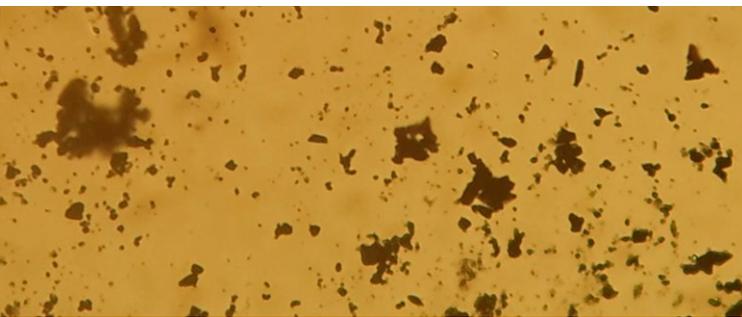


könnten Strömungseffekte entstehen, die für die Bewegung verantwortlich sind. Diese These lässt sich leicht durch einen Versuch widerlegen. Dazu klebt man das Deckglas vorsichtig und mit etwas Fingerspitzengefühl auf die Probe auf und unterbindet damit die Verdunstung des Wassers. Betrachtet man die Probe wieder unter dem Mikroskop, so wird man immer noch – trotz ausgeschlossener Strömungseffekte – die Brownsche Bewegung erkennen.

In den Jahren 1905/1906, fast 80 Jahre nach Browns ersten Experimenten, fand man durch die herausragenden Arbeiten von Einstein, Perrin und Smoluchowski endlich eine gültige Erklärung für das Phänomen.

Ausgangspunkt ist die Vorstellung, dass Materie aus Atomen und Molekülen aufgebaut ist. Die thermische Energie – die Umgebungswärme – hält die winzigen Wassermoleküle in flüssigem Wasser ständig in Bewegung. Dadurch stoßen sie zwangsläufig immer wieder mit den ungleich schwereren suspendierten Bruchstücken von

PARTIKEL Substanzen unter dem Mikroskop (400-fach vergrößert): Aktivkohle (oben), Glas (Deckglas, Mitte), beide fein zerrieben, und Fetttröpfchen aus Sahne (unten).



ARBEITSGRUPPE MARCO OETIKEN, PH FREIBURG

zerriebenem Glas, Aktivkohle oder Pollen zusammen. Bei den Zusammenstößen überträgt sich ein Impuls. Dabei gleichen sich die momentanen, lokalen Impulsüberträge nicht genau aus, wodurch die suspendierten Partikel die charakteristische Brownsche Bewegung ausführen. Weil die Lösungsmittelmoleküle Stöße aus allen verschiedenen Richtungen auf die größeren Teilchen abgeben, ist keine gerichtete, sondern eine regellose Bewegung zu erkennen, genau wie Brown sie schon 1827 beschrieb.

Je wärmer das Wasser ist, desto schneller bewegen sich die Wassermoleküle und desto heftiger sind die Zusammenstöße mit den suspendierten, sichtbaren Teilchen – die sich dadurch ebenfalls rascher bewegen. Langsamer werden die sichtbaren Bewegungen, wenn das Wasser kälter ist, die Teilchen größer sind oder die Flüssigkeit viskoser ist.

Die beobachtbare Bewegung der Partikel gibt indirekt also Aufschluss über die thermische Bewegung der kleinen Wassermoleküle, die unter dem Mikroskop unsichtbar sind. Denn was man sieht, ist einzig die Bewegung der Partikel, die durch die Eigenbewegung und die dadurch entstehenden Stöße der nicht sichtbaren Wassermoleküle verursacht wird. Aus welchem Stoff die Bruchstücke dabei bestehen, ist nicht relevant.

Die Brownsche Bewegung gilt als Bestätigung für eine ständige ungerichtete Bewegung der Atome und Moleküle eines Stoffs. Sie sorgt außerdem für Diffusion und den damit verbundenen Ausgleich der Konzentrationen zweier Lösungen verschiedener Konzentration.

Die Vorstellung eines diskontinuierlichen, also atomaren Aufbaus der Materie erlebte einen Durchbruch und regte zu einem radikalen Umdenken in den Naturwissenschaften an. Heute ist die Teilchenvorstellung eines ihrer wichtigsten Basiskonzepte. Um die Versuche nachzuvollziehen, eignet sich auch in Wasser suspendierte Milch gut. Die exakten Versuchsanleitungen sowie einige Videos zur Brownschen Bewegung sind unter dem unten angegebenen Link zu finden. ◀

QUELLEN

Brown, R.: A brief account of microscopical observations made in the months of June, July & August, 1827, on the particles contained in the pollen of the plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. The miscellaneous botanical works of Robert Brown 1, 1866

Van der der Pas, P. W.: The Discovery of the Brownian Motion, *Scientiarum Historia: Tijdschrift voor de Geschiedenis van de Wetenschappen en de Geneeskunde* 13, 1971

Von Smoluchowski, M.: Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen. In: *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften* 199, Reprint der Bände 199 und 207. Harri Deutsch, 1997

WEBLINK

www.spektrum.de/artikel/2169864

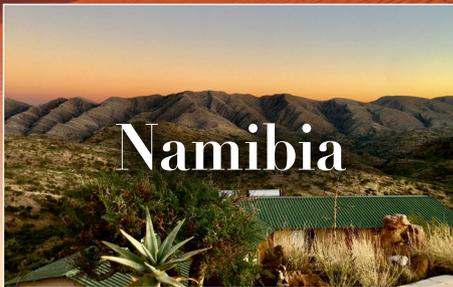
Die Experimentieranleitung für weitere Versuche findet sich online.

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern

2024 drei besondere Reisen

Leserreisen

2024



Namibia

DIE NAMIB UND DER SÜDLICHE STERNENHIMMEL

Neben einem astronomischen Beobachtungsprogramm unter dem fantastischen Nachthimmel Namibias bietet diese Reise im Mai viele interessante geografische Exkursionen zum Kennenlernen des Landes. Erleben Sie bei einer neuntägigen Tour die faszinierende Namibwüste, ihre eigenartige Tier- und Pflanzenwelt, ihre tiefen Canyonlandschaften, ihre bizarren Gesteinsformationen und steilen Gebirgspässe. Am Sternhimmel stehen die vier Highlights des Südhimmels in bester Beobachtungsposition: das Kreuz des Südens, die Große Magellansche Wolke mit dem eindrucksvollen Tarantelnebel, der Eta-Carinae-Nebel als größter galaktischer Nebel. Auch die südliche Milchstraße spannt sich im Mai wie ein Regenbogen über das ganze Firmament.

Reisedatum: 3.–18. 5. 2024, 16-tägig
Preis DZ/VP: € 4.380,–
Betreuung: Prof. Dr. Rainer Glawion



Nördlingen

AUF DEN SPUREN DES RIES-METEORITEN

Ein Studierenerlebnis ganz besonderer Art mit astrogeologischen Wanderungen im Nationalen Geopark Ries und Geopark Schwäbische Alb entführt uns nach Nordbayern in die altherwürdige Stadt Nördlingen. Eine kosmische Katastrophe, der Einsturz eines ein Kilometer großen Steinmeteoriten vor etwa 15 Millionen Jahren, formte in dieser Region eine geologisch einzigartige Landschaft. Das »Rieskrater-Museum« lädt uns in Nördlingen zu einem ausgiebigen, fachkundig begleiteten Rundgang ein. Von hier aus starten wir unsere astrogeologische Zeitreise, die auch den weltberühmten Meteoritenkrater »Steinheimer Becken« auf der Schwäbische Alb zum Ziel hat. Ein geführter Stadtbummel und der herrliche Blick vom 90 Meter hohen Stadtturm, dem »Daniel«, dürfen natürlich nicht fehlen.

Reisedatum: 6.–9. 6. 2024, 4-tägig
Preis DZ/HP: € 780,–
Betreuung: Gisela Pösges, Dipl. Geol.



Nordindien

ZU FÜSSEN DES HIMALAJA

Diese Leserreise führt in das nördliche Indien nach Srinagar, dem alten kulturellen Mittelpunkt von Kaschmir, sowie nach Leh im Westhimalaja. Der klare Nachthimmel ist atemberaubend und in Begleitung des Astrofotografen Stefan Seip lässt sich dieser auch ablichten. Berühmt ist Srinagar für seine prächtigen Mogulgärten und den venezianisch anmutenden Dal-See mit seinen idyllischen Hausbooten und Shikara-Gondeln. Auf der abenteuerlichen Fahrt nach Leh (3500 Meter über dem Meer) in Kargil auf 2676 Meter und Uletokpo auf 3048 Meter sind Zwischenübernachtungen eingeplant. In Leh stehen das berühmte buddhistische Shanti-Stupa-Denkmal, das Hemis-Kloster, das Zentralasiatische Museum und der Stok-Palast auf dem Programm. Weitere drei Tage geht es nach Hanle auf 4260 Meter Höhe, um dort das Hanle-Kloster aus dem 17. Jahrhundert und nach Möglichkeit das auf 4500 Meter Höhe befindliche Indian Astronomical Observatory zu besichtigen.

Reisedatum: 26. 8.–11. 9. 2024, 16-tägig
Preis im DZ/VP: € 5.850,–
Betreuung: Stefan Seip

Infopakete bei unserem Reiseveranstalter:

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

ENERGIEWENDE

Stromnetze für die Zukunft

Um den Strom von Windrädern von Nord nach Süddeutschland zu transportieren, muss man das bestehende Stromnetz ausbauen. Die meisten hinzugefügten Leitungen verbessern das Netz, aber nicht alle. Unter Umständen können sie sogar Schaden anrichten.

► spektrum.de/artikel/2169867



Benjamin Schäfer (links) ist Junior-Professor und Nachwuchsgruppenleiter am Karlsruher Institut für Technologie. **Marc Timme** ist Strategischer Professor für Netzwerkdynamik an der Technischen Universität Dresden.

FÜR DIE ENERGIEWENDE müssen wir unser Stromnetz ausbauen. Doch das ist unter Umständen komplizierter als gedacht.



SERIE ENERGIEWENDE

► TEIL 1: OKTOBER 2023

Stromnetze für die Zukunft

Benjamin Schäfer, Marc Timme

TEIL 2: NOVEMBER 2023

Wärmepumpen als Heilsbringer?

Chris Baraniuk

TEIL 3: DEZEMBER 2023

Was kann Biomasse beitragen?

Lisa Biber-Freudenberger

Steigende Energiepreise, der verzögerte Ausstieg aus fossilen Energien und die Folgen des russisch-ukrainischen Kriegs machen deutlich: Unsere Energieversorgung steckt in der Krise. Im Jahr 2022 war in der Presse immer wieder von Blackouts die Rede – den gefürchteten landesweiten, lang anhaltenden Stromausfällen, die das Land ins Chaos stürzen würden. Dank eines relativ warmen Winters und schnell eingeleiteter Maßnahmen wie Gaslieferungen mit teilweise moralisch zweifelhafter Herkunft blieben die albatrauhaften Szenarien glücklicherweise aus.

Auch wenn Deutschland inzwischen einen großen Teil seines Stroms durch erneuerbare Energien gewinnt (im Jahr 2022 betrug der Anteil 44 Prozent), sind wir noch auf fossile Energieträger wie Kohle und Gas angewiesen, um eine dauerhafte Stromversorgung auf derzeitigem Niveau sicherzustellen. Denn nicht immer scheint die Sonne oder weht der Wind – und die Speichermöglichkeiten sind bisher ungenügend ausgebaut. Außerdem ist die Verteilung des Stroms schwierig: So kann es sein, dass manche Windkraftanlagen an stürmischen Tagen stillstehen, um das Netz nicht zu überlasten.

Eine der drängendsten Aufgaben der Energiewende ist daher nicht nur der Bau weiterer Windkraft- und Fotovoltaikanlagen, sondern auch der Ausbau des bestehenden Stromnetzes. Gerade in Norddeutschland gibt es große Windparks, während sich viele Abnehmer im Süden des Landes befinden. Ein Versorgungsnetz zu planen, ist aber nicht immer einfach. Einer der Gründe dafür ist ein Spezialfall des so genannten Braess-Paradoxons: Zusätzliche Leitungen sollten den Stromtransport eigentlich verbessern, doch in manchen Fällen können sie die gegenteilige Wirkung haben und zu einer Überlastung führen, die Stromausfälle bedingen kann.

Anhand der konkreten Ausbaupläne für das deutsche Stromnetz konnten wir das Paradoxon erstmals auf

großen Skalen nachweisen. Dafür haben wir mit Arbeitsgruppen verschiedener Bereiche gearbeitet und sowohl experimentelle als auch theoretische Ergebnisse durch aufwändige Simulationen erhalten. Zudem haben wir eine neue, einfache Methode entwickelt, um die Ursachen für das unliebsame Phänomen zu identifizieren. Somit können wir gezielt Netzausbau und stabilen Netzbetrieb unterstützen.

Die Energieträger der Zukunft

Energie betrifft als Thema alle Bereiche unseres Lebens. Ohne genügend Energie zur richtigen Zeit am richtigen Ort funktioniert nichts. Wir können keine Informationen mittels Internet, Telefon, Fernsehen oder Radio austauschen, grundlegende Funktionen im Haushalt fallen aus, kein Licht, kein Herd, kein Kühlschrank, keine Heizung, fast keine Mobilität – weder mit dem Pkw noch mit dem öffentlichen Nah- oder Fernverkehr. Auch der Transport von Gebrauchsgütern und Nahrungsmitteln bricht ein, ebenso wenig lassen sich diese Waren in Landwirtschaft und Industrie erzeugen. Alles hängt von einer verlässlichen, vorhersehbaren und bezahlbaren Energieversorgung ab.

Selbst wenn fossile Brennstoffe jederzeit Energie liefern, sind sie nicht zukunftsfähig. Schon allein, weil Ressourcen wie Öl, Gas oder Kohle nur in begrenzter Menge auf der Erde vorkommen. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen zudem, dass wir möglichst wenig der vorhandenen fossilen Energieträger verbrennen dürfen, wenn wir einen massiven zusätzlichen Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) vermeiden und die Erderwärmung begrenzen wollen. Außerdem sind die meisten fossilen Ressourcen bloß an bestimmten Orten der Erde verfügbar, weshalb wir in unserem Öl- und Gasverbrauch stark von anderen Ländern abhängen – mit erheblichen Nachteilen, wie wir spätestens durch den russischen Angriff auf die Ukraine feststellen mussten.

Die Kernenergie fußt ebenfalls auf begrenzten Ressourcen wie Uran, das als Erz lediglich in wenigen Regionen gefördert wird. Damit bleiben wirtschaftliche Abhängigkeiten bestehen. Der Betrieb von Kernkraftwerken erzeugt noch dazu nicht nur radioaktiven und giftigen Sondermüll, von dem niemand weiß, wie man ihn sicher verwahren kann; die Energiegewinnung geht auch mit einem schwer abschätzbaren Risiko einher, so dass bisher kein Versicherungsunternehmen mögliche Betriebsunfälle und deren Folgen abdeckt. Damit verbleibt das ökonomische und gesundheitliche Risiko bei den Bürgerinnen und Bürgern. Kernfusion könnte eine sichere, abfallarme Energiequelle der Zukunft darstellen, steht in den nächsten Jahren und Jahrzehnten aber nicht in großem Maßstab zur Verfügung.

Die Energiewende gehört daher zu den größten Herausforderungen unserer Zeit. Die Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen wie Wind, Sonne, Wasser und Erdwärme bildet die aktuell zugänglichste zukunftsfähige Lösung. Sie sind unbegrenzt verfügbar und vermeiden viele der Nachteile fossiler Energiequellen. Wie unter

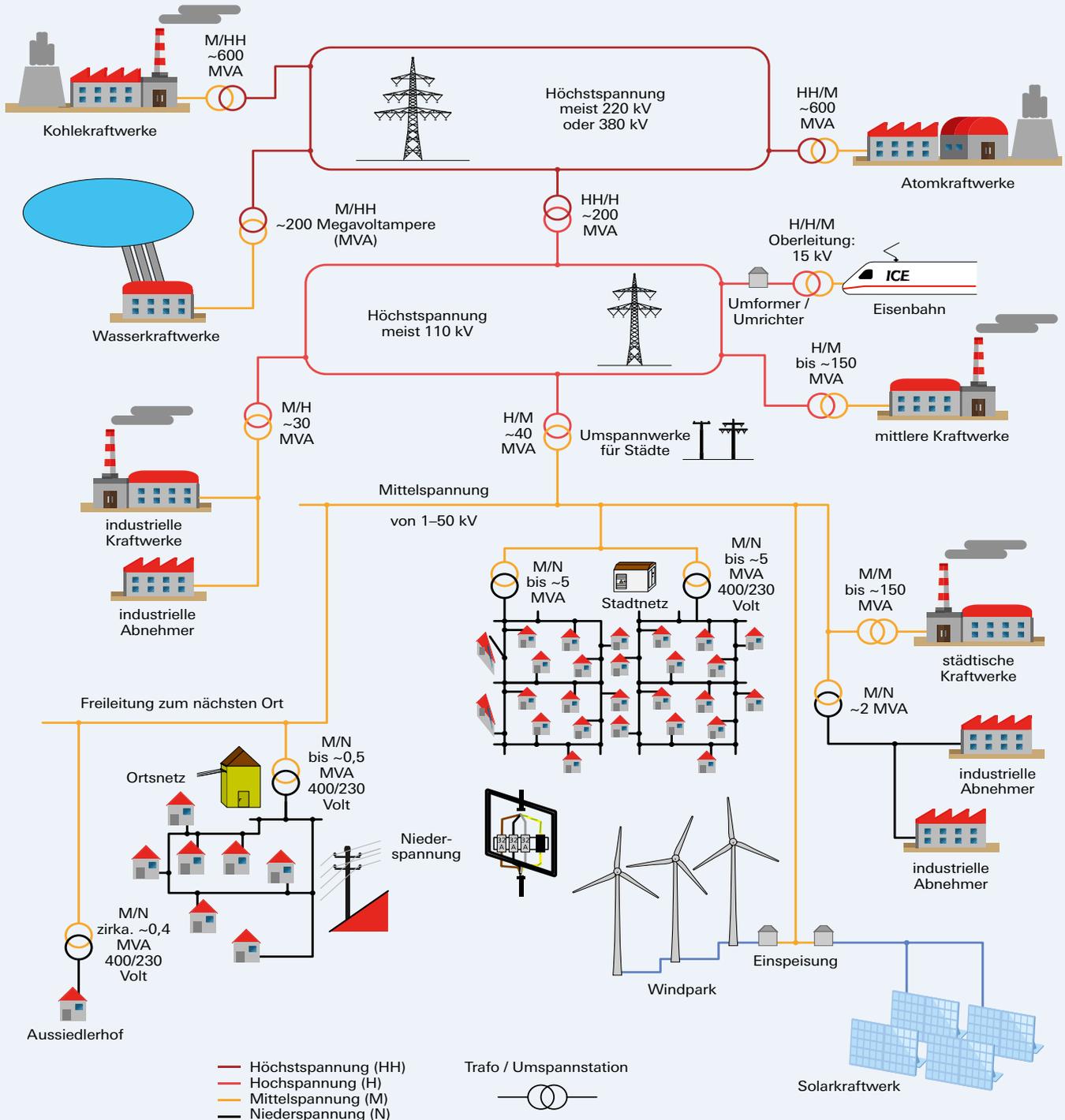
AUF EINEN BLICK

Ausbau, aber sicher

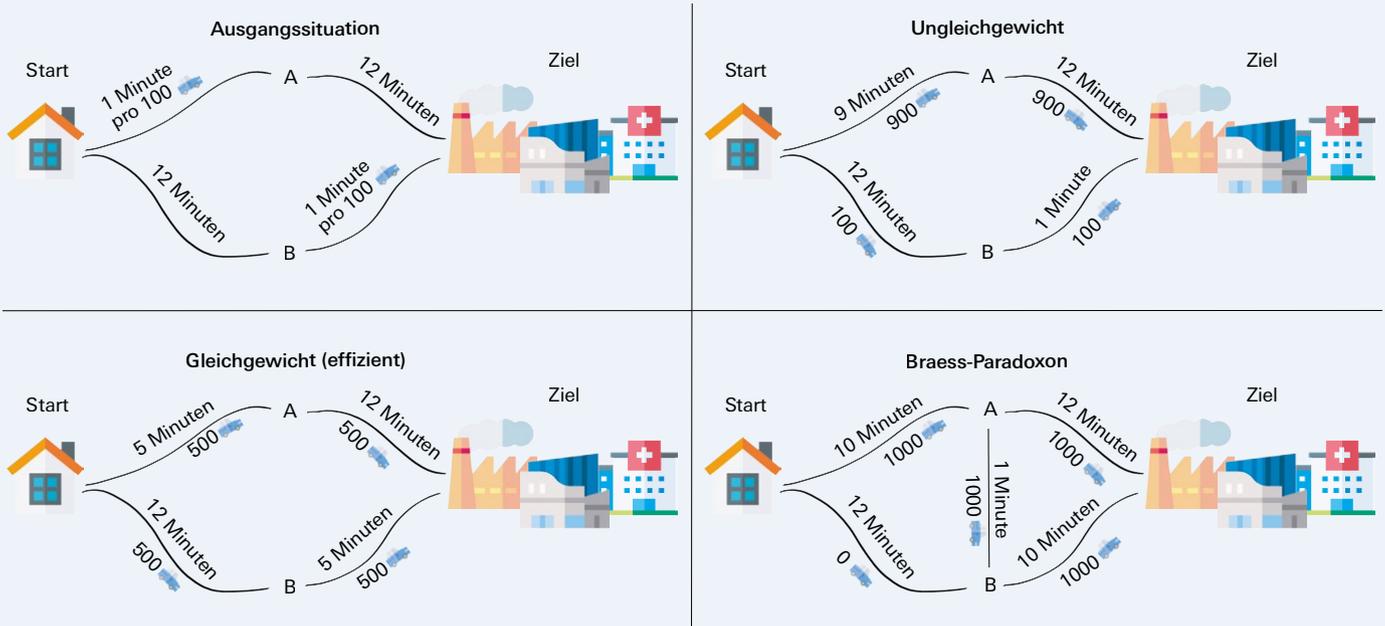
- 1** Für die Energiewende müssen die Stromnetze ausgebaut werden, um den Wind- und Solarstrom in Deutschland und Europa zu verteilen. Allerdings können neue Stromleitungen auch das Gesamtnetz überlasten.
- 2** Dieses Phänomen heißt Braess-Paradoxon. Es wurde nun im Labor und an konkreten Ausbauplänen des deutschen Stromnetzes nachgewiesen.
- 3** Eine neue Methode hilft, die Ursachen zu erkennen und kritische Leitungen zu identifizieren, um den Netzausbau zu vereinfachen.

Komplexes Netzwerk

Damit der Strom möglichst verlustfrei von den Erzeugern zu den Verbrauchern kommt, sind mehrere Umspannwerke nötig. Denn die Leitungen werden mit unterschiedlichen Spannungen betrieben.



Das Braess-Paradoxon: Ein Rechenbeispiel



BENJAMIN SCHÄFER (MIT FLATICON ICONS); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Angenommen, 1000 Fahrzeuge fahren von einem Startort zu einem Zielort, etwa während des morgendlichen Berufsverkehrs von einem Wohnviertel in ein Gewerbegebiet. Es gibt zwei mögliche Routen: Eine führt über Punkt A nördlich der autofreien Innenstadt, die zweite über Punkt B in südlicher Richtung. Vom Start bis zu Punkt B verläuft eine Schnellstraße, auf der jedes Fahrzeug zwölf Minuten lang fährt, unabhängig davon, wie viele Autos unterwegs sind. Nach Erreichen des Zwischenpunkts wird die Straße allerdings enger, man kommt also umso schneller voran, je weniger andere Fahrzeuge dort entlangfahren. Für diese kurze Strecke benötigt man eine Minute, wenn 100 Autos sie befahren, zwei Minuten bei 200 Fahrzeugen und so weiter. Es dauert also pro 100 Autos je eine Minute länger. Auf der alternativen Route über Punkt A sind die Verkehrswege in der umgekehrten Reihenfolge angeordnet: Erst kommt der engere Straßenabschnitt, dann die Schnellstraße.

In einem solchen System hängt die Reisezeit von der Routenwahl aller Verkehrsteilnehmer ab. Nutzen alle 1000 Fahrzeuge die Route über

Punkt B, braucht jedes Fahrzeug zwölf Minuten auf dem ersten Abschnitt und weitere zehn Minuten auf dem zweiten Abschnitt, das heißt insgesamt 22 Minuten. Wenn zehn Prozent der Autos auf die Route über A wechseln, brauchen sie für den ersten Teil nur eine Minute (100 Fahrzeuge), also insgesamt $1 + 12 = 13$ Minuten. Wegen dieser Zeitersparnis werden früher oder später weitere Autos die Route über A nutzen, bis sich ein »Nash-Gleichgewicht« einstellt, benannt nach dem Begründer der Spieltheorie, John Nash. In diesem Fall kann niemand mehr die Route wechseln, ohne länger unterwegs zu sein. Wenn 500 Fahrzeuge über B und 500 über A fahren, brauchen alle $12 + 5 = 17$ Minuten. Für niemanden gibt es einen Anlass, die andere Route zu nutzen, weil sich die Fahrzeit dadurch nicht verkürzt.

Doch nun könnte die Stadt eine Abkürzung zwischen den Punkten A und B bauen, etwa einen Tunnel, der unterhalb der Innenstadt verläuft. Dieser ist so kurz und gut ausgebaut, dass man ihn in nur einer Minute durchfahren kann, unabhängig von der Anzahl der Fahrzeuge. Wie sich

aber herausstellt, tut die Stadt ihren Bewohnern damit keinen Gefallen.

Durch die Abkürzung kann jedes Auto die beiden kurzen Streckenabschnitte durch den Tunnel verbinden, um insgesamt schneller ans Ziel zu kommen. Im ursprünglichen Nash-Gleichgewicht würde die Fahrzeit dann nur noch $5 + 5 + 1 = 11$ statt 17 Minuten auf den vorherigen Routen betragen. Das Problem: Für jede einzelne Person wäre es also potenziell sinnvoll, diese Abkürzung zu nehmen. Wechseln aber die 1000 Fahrzeuge auf diesen vermeintlich schnellen Weg, brauchen alle jeweils zehn Minuten für jede der beiden kürzeren Abschnitte (plus die eine Minute durch den Tunnel), also insgesamt 21 Minuten. Damit sind alle vier Minuten länger zum Ziel unterwegs als mit ihrer ursprünglichen Routenwahl (ohne Tunnelnutzung).

Und das Schlimmste: Auch das ist ein Nash-Gleichgewicht. Für kein Fahrzeug ist es jetzt schneller, die Route zu wechseln. Zusammenfassend hat der wahrscheinlich teure Tunnel den Verkehrsfluss auf den Nadelöhren erhöht und alle Autos sind länger unterwegs als zuvor.

anderem eine Studie eines Teams um Energieforscher Stefan Bofinger vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik 2010 gezeigt hat, könnte die gesamte europäische Stromversorgung durch erneuerbare Quellen (zum größten Teil durch Windkraft- und Fotovoltaikanlagen) abgedeckt werden.

Allerdings ist die elektrische Leistung erneuerbarer Stromquellen nicht konstant, sondern schwankt. Sie hängt von der Stärke des Winds oder der Sonneneinstrahlung ab und damit von vielen Faktoren wie der Jahres- und Tageszeit und der Wetterlage. Falls es bewölkt ist, die Sonne nur flach über dem Horizont steht oder es sehr heiß ist, liefert eine Fotovoltaikanlage weniger Leistung. Ebenso ungünstig ist es, wenn der Wind bloß schwach weht. Damit sind die Einspeisungen ins Stromnetz schwer vorherzusagen.

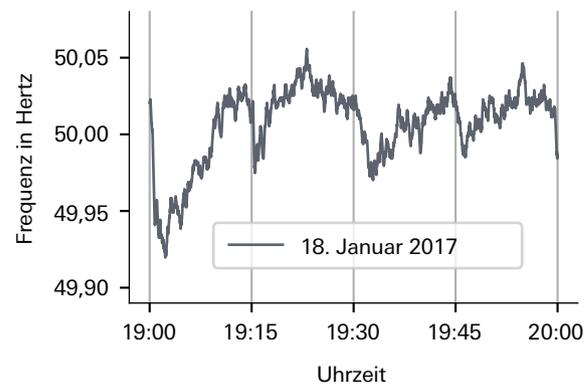
Um eine verlässliche Stromversorgung sicherzustellen, müssen die eingespeisten Leistungen jederzeit möglichst genau mit dem Verbrauch übereinstimmen. Nur dann kann der Strom zwischen verschiedenen Orten, insbesondere von den Kraftwerken zu den Verbrauchern, konsistent übertragen werden. Ist diese Balance zwischen Einspeisung und Abnahme nicht gewährleistet, wird das Stromnetz destabilisiert und es kommt möglicherweise zu Ausfällen.

Der Handel mit elektrischer Energie an Strombörsen gleicht das Angebot und die Nachfrage aus. Dabei stellt er ein Gleichgewicht her und glättet Schwankungen, indem der Strom über den Tag hinweg und zwischen verschiedenen Orten ökonomisch sinnvoll verteilt wird.

Erneuerbare Energien fordern unser Stromnetz heraus

Das Stromnetz, über das Angebot und Nachfrage zu jedem Zeitpunkt ausbalanciert wird, ist ein vielschichtiges, komplexes dynamisches System. Wenn wir zum Beispiel unser Handy an einer Steckdose laden, erhalten wir nicht einfach den Strom vom nächstgelegenen Kohle-, Kern- oder Windkraftwerk. Vielmehr verbinden wir uns mit einem europaweiten Netzwerk, das sich von Portugal bis in die Türkei und von Sizilien bis Dänemark erstreckt. Verschiedenste Erzeuger speisen Energie ein, von Kohle-, Gas- und Kernkraftwerken bis zu Wasser- und Geothermiekraftwerken sowie Solarparks. Dieser Strom wird von vielen kleinen Haushalten, Industriestandorten sowie mehr und mehr auch von elektrischen Fahrzeugen verbraucht.

Große Leistungsmengen fließen auf langen Strecken durch Hochspannungsleitungen auf so genannten Übertragungsnetzen, an die Mittelspannungsnetze angehängt sind; diese wiederum sind mit lokalen Verteilnetzen verbunden. Daran knüpfen einzelne Abnehmer wie Häuser oder Industrieanlagen an. Um die verschiedenen Spannungsebenen in Einklang zu bringen und den Strom über große Distanzen zu übertragen, hat sich gegen Ende des 19. Jahrhunderts der Wechselstrom durchgesetzt. In Europa nutzen wir eine Netzfrequenz von 50 Hertz.



SCHWANKUNGEN Wenn die Frequenz im Stromnetz genau 50 Hertz entspricht, sind Erzeugung und Verbrauch exakt ausgeglichen. In der Praxis schwankt die Netzfrequenz um den Sollwert von 50 Hertz.

Dieser Wert ist aber nur ein Idealwert. In Wirklichkeit sorgt das Ungleichgewicht zwischen Einspeisung und Abnahme ständig für kleine Abweichungen. Das lässt sich mit einer Waage veranschaulichen: Ist zu einem Zeitpunkt die insgesamt eingespeiste Leistung höher als die Gesamtabnahme, liegt die Frequenz oberhalb von 50 Hertz (die rechte Seite der Waage ist zu schwer). Ist die eingespeiste Leistung hingegen geringer als die abgenommene, fällt die Frequenz auf unter 50 Hertz (die linke Seite der Waage ist zu schwer). Auf den ersten Blick scheinen Schwankungen von bis zu 0,1 Hertz wie im Jahr 2017 nicht allzu bedeutend. Allerdings entspricht das einem Überschuss von 1 bis 1,5 Gigawatt, also der Leistung eines Blocks in einem Kernkraftwerk. Daher werden bereits bei kleinen Abweichungen zahlreiche Gegenmaßnahmen ergriffen, um den Stromnetzbetrieb zu stabilisieren. Zum Beispiel kann man ein Ungleichgewicht durch Zwischenspeicher wie große Batteriesysteme oder Pumpspeicherkraftwerke ausgleichen.

Erneuerbare Energiequellen führen nicht nur zu stärkeren Schwankungen, sondern sind als dezentrale Quellen großflächiger verteilt und oft nicht nahe an den Verbrauchsstellen. Das gilt insbesondere für Offshore-Windparks am Meer, aber auch für Windenergie- und Fotovoltaikanlagen an Land. Gleichzeitig steigt in Wohnorten die Anzahl der Fotovoltaikanlagen auf Hausdächern und Balkonen, die ebenfalls Strom ins Netz einspeisen. Aus reinen Konsumenten werden damit auch Produzenten.

Wegen all dieser Faktoren wird das Stromnetz auf verschiedenen Netzebenen ausgebaut: vom Übertragungsnetz mit Hochspannung bis hin zum Verteilnetz mit Niederspannung. So soll der Strom über lange Strecken sicher und stabil übermittleit werden, etwa vom Offshore-Windpark in der Nordsee bis nach Bayern.

Das seit den 1880er Jahren historisch gewachsene Energieversorgungssystem in Europa steht damit vor einem seiner größten Umbauten. In Deutschland sind im

April 2023 zunächst die Kernkraftwerke vom Netz gegangen, und bis spätestens 2038 sollen alle Kohlekraftwerke abgeschaltet werden. Überall sind Fotovoltaik und Windstrom auf dem Vormarsch.

Eigentlich würde man erwarten, dass eine neue Verbindung in einem Netzwerk zu einem stabileren Betrieb führt – sich der Stromfluss über das Netz also besser verteilt. Das ist aber nicht immer so. Fügt man eine Leitung an der falschen Stelle hinzu, kann das ein System destabilisieren, bis hin zum kompletten Zusammenbruch. Dieses Phänomen ist als Braess-Paradoxon bekannt, auf das der Mathematiker Dietrich Braess bereits 1968 stieß, als er Straßennetze theoretisch untersuchte. Kurz darauf wurde das Paradoxon tatsächlich beobachtet, unter anderem in Stuttgart, wo eine neue Straße zu zäherem Verkehrsfluss um den Schlossplatz führte.

Denn nicht jede zusätzliche Straße bewirkt, dass die Verkehrsteilnehmer schneller an ihr Ziel gelangen. Zum Beispiel ist wissenschaftlich erwiesen, dass neue Straßen insgesamt mehr Verkehr anziehen. Aber selbst wenn man von diesem sozialen Phänomen absieht und annimmt, dass die Gesamtzahl der Fahrzeuge konstant bleibt, können neue Straßen zu Stau führen.

Braess hat das nach ihm benannte Paradoxon erstmals in einem einfachen mathematischen Modell von Verkehrsflüssen nachgewiesen. Eine schnell befahrbare, zusätzliche Straße sorgte dafür, dass alle Autos länger zu ihrem Ziel brauchten.

Unser Stromnetz braucht einen Ausbau in Form von Leitungen, um elektrische Energie von den Erzeugern zu den Verbrauchern zu transportieren. Ähnlich wie im Beispiel des Verkehrs sorgt allerdings nicht jede hinzugefügte Stromleitung automatisch für eine Verbesserung. Auch in diesem Fall kann nämlich eine neue Verbindung zu höheren Flüssen in anderen Leitungen führen und damit zu größeren Verlusten im Gesamtsystem oder gar zu einem Stromausfall.

Bereits 2012 hat einer der Autoren, Marc Timme, zusammen mit seinem Kollegen Dirk Witthaut das Braess-Paradoxon in Wechselstromnetzen vorhergesagt. In dieser Arbeit konnten sie mathematisch nachweisen, dass eine neue Verbindung in Stromnetzen zu einem Stromfluss führen kann, der andere Leitungen im Netz überlastet. Vier Jahre später haben die Elektrotechniker Ladimer Nagurney und Anna Nagurney von der University of Massachusetts Amherst diesen Effekt in sehr kleinem Maßstab für Gleichstromnetze im Labor nachgewiesen.

Das Braess-Paradoxon im Labor

Wie bereits im Verkehr stellt sich die Frage: Tritt das Braess-Paradoxon auch in der Realität auf oder handelt es sich um eine Kuriosität mathematisch konstruierter Modelle?

Um das herauszufinden, haben wir zunächst Laborversuche an unterschiedlichen Wechselstromschaltungen durchgeführt. Engagierte Kollegen von der Technischen Universität Clausthal und am nahe gelegenen Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN) in Goslar haben

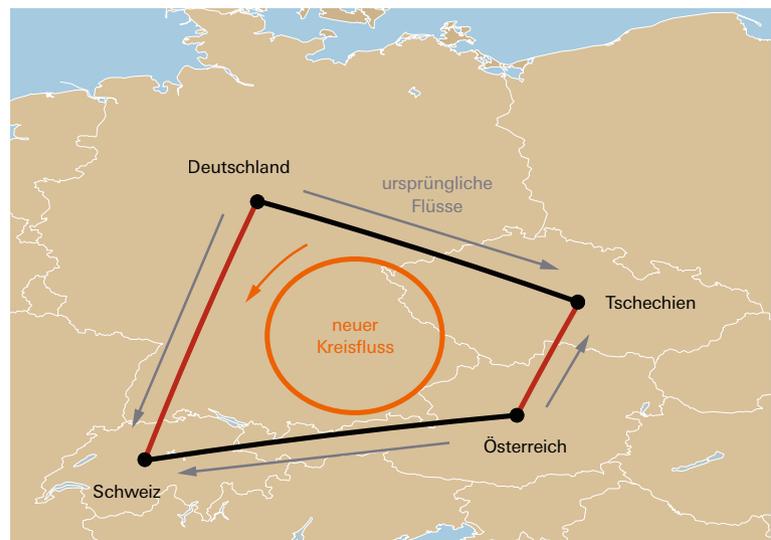
das ermöglicht. Gemeinsam planten wir die Experimente dort bis ins Detail, um Schäden an der teuren Ausrüstung zu vermeiden. In verschiedenen Konstellationen von Verbrauchern und Erzeugern veränderten wir den Wechselstromwiderstand, um einen höheren Stromfluss zu ermöglichen. Und tatsächlich konnten wir beobachten, dass die Verbesserung einer Leitung zu zusätzlicher Belastung in einem anderen Teil des Netzes führen kann und damit dessen Stabilität gefährdet.

Als zweiten Schritt haben wir realistische Situationen im europäischen Verbundnetz simuliert. Insbesondere haben wir geprüft, ob das Paradoxon auch im zentralen deutschen Teil des Übertragungsnetzwerks auftreten könnte. Kollegen am Forschungszentrum Jülich haben umfangreiche Computersimulationen für Deutschland entwickelt und beachteten dabei die genauen technischen Gegebenheiten des aktuellen Stromnetzes, fügten aber auch bereits im Bau befindliche oder geplante Leitungen ein. Ausgesprochen interessant: Wir konnten gemeinsam verschiedene Szenarien mit Erzeugern und Verbrauchern testen und somit feststellen, welche der geplanten Leitungen Probleme verursachen können.

Um den Strom von den Windturbinen im Norden in den Süden zu transportieren, sind etwa »Stromautobahnen« geplant, die als Hochspannungs-Gleichstrom-Leitungen (HVDC, vom Englischen: high-voltage direct current) den Strom besonders verlustarm über große Distanzen übertragen. Wie sich herausstellte, liegt das Problem, wie auch im Beispiel des Verkehrs, nicht in der Überlastung

KREISFLUSS Das Braess-Paradoxon, unter anderem in Stromnetzen, lässt sich wie folgt erklären: Eine neue Leitung sorgt für einen kleinen zusätzlichen Strom, der durch die Stromerhaltung insgesamt einen Kreisfluss im Netzwerk erzeugt. Ist dieser zum ursprünglichen Fluss gleich ausgerichtet (rot), lässt sich das Braess-Paradoxon beobachten. Hier eine Illustration des Phänomens anhand eines vereinfachten Modells.

BENJAMIN SCHÄFER



Die meisten Stromnetze verfügen über ausreichende Kapazitäten, um dem Paradoxon standzuhalten

der neuen Verbindungen, sondern auf bestimmten Zubringern. Soll viel Strom über die Stromautobahn fließen, müssen alle umliegenden Leitungen mehr Last schultern. Einige werden dadurch möglicherweise überlastet, was im schlimmsten Fall zu Stromausfällen führen könnte. Daran zeigt sich: Man sollte nicht über Einzelmaßnahmen diskutieren, sondern das System ganzheitlich durchdenken und entsprechend stärken. Sogar die genaue zeitliche Reihenfolge der gebauten Leitungen kann eine wichtige Rolle spielen.

Eine intuitive Erklärung

Aber nicht immer sind solche detaillierten Netzsimulationen möglich, da sie sehr aufwändig sind. Um dennoch herauszufinden, welche Verbindungen zum Braess-Paradoxon führen könnten, haben wir ein neuartiges Verfahren entwickelt, das ohne viel Rechenzeit auskommt. Statt den gesamten Einfluss einer zusätzlichen Leitung zu untersuchen, haben wir die Stromflüsse im Netzwerk modelliert, die sich durch kleine Änderungen ergeben, indem man etwa eine existierende Leitung leicht verstärkt oder eine sehr schwache neue Verbindung hinzufügt.

Dafür haben wir zunächst so genannte Kreisflüsse untersucht. Ein Beispiel hierfür ist ein kreisförmiges Netzwerk, das aus vier Punkten besteht und die Gesamtleistungsabnahme ganzer Länder wie Deutschland, der Schweiz, Österreich und Tschechien darstellt.

Angenommen, es fließt zu einem Zeitpunkt mehr Strom durch eine neue Leitung von Deutschland in die Schweiz, weil wir gerade zu viel Wind- und Sonnenenergie erzeugen und die Schweiz einen Pumpspeicher auffüllt. Bleibt der Gesamtverbrauch der Schweiz konstant, dann bezieht sie mehr Strom von uns und weniger aus Österreich. Das ist, als hätten wir einen kleinen positiven Stromfluss auf die Leitung Schweiz-Österreich in unserem Netzwerk addiert. Diese Argumentation lässt sich für alle Leitungen wiederholen: Österreich exportiert weniger Strom in die Schweiz, weshalb nun mehr Strom nach Tschechien fließt. Darum bezieht Tschechien weniger Strom aus Deutschland (was gut passt, weil ja Deutschland mehr Strom in die Schweiz schickt). Insgesamt hat der zusätzliche Strom zwischen Deutschland und der Schweiz einen Kreisfluss im gesamten Netzwerk ausgelöst: Deutschland → Schweiz → Österreich → Tschechien → Deutschland.

Diese simple Überlegung beschreibt zwar nicht vollständig die Vorgänge im realen System, hilft uns jedoch, schnell zu beurteilen, welche neuen Verbindungen das Braess-Paradoxon verursachen könnten: Zeigt der Kreisfluss in die gleiche Richtung wie der ursprüngliche Fluss in der Leitung, steigt die Belastung, und es kann zur Überlastung kommen. In einem solchen Fall muss man sicherstellen, dass genügend Kapazität frei ist, um einen stabilen Weiterbetrieb zu garantieren. Erhöht sich die Last in der bereits am stärksten belasteten Verbindung, sollte man sehr vorsichtig sein: Denn hier droht am ehesten ein Stromausfall.

Das Konzept des Kreisflusses ist einfach zu berechnen und lässt sich auch auf große vernetzte Systeme wie das deutsche Stromnetz übertragen. Es liefert zudem ein intuitives Verständnis für das Braess-Paradoxon. Führt der neue Kreisfluss zu mehr Belastung an einer Schwachstelle im Netz, kann das Paradoxon auftreten, sonst nicht.

Glücklicherweise verfügen die meisten Stromnetze über ausreichende Reservekapazitäten, um dem Braess-Paradoxon standzuhalten. Außerdem gehen die Netzbetreiber vor dem Bau neuer Leitungen und während des Betriebs gewissenhaft mögliche Szenarien durch. Dennoch stehen nicht immer genügend Ressourcen zur Prüfung aller Eventualitäten zur Verfügung. Zudem kann sich die Reihenfolge des Ausbaus verschiedener Netzteile durch finanzielle oder politische Faktoren ändern. In solchen Fällen ist ein intuitives Verständnis des Braess-Paradoxons wichtig, um Betriebsentscheidungen zu erleichtern oder sogar zu leiten. Dann können die Stromnetze stabiler und damit insgesamt zukunftsfähiger werden. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/erneuerbare-energien



ANETTBAKOS / STOCK.ADOBE.COM

QUELLEN

Manik, D. et al.: Predicting Braess' paradox in supply and transport Networks. ArXiv:2205.14685, 2022

Murchland, J.D.: Braess's paradox of traffic flow. Transportation Research 4, 1970

Schäfer, B. et al.: Understanding Braess' paradox in power grids. Nature Communications 13, 2022

Witthaut, D., Timme, M.: Braess's paradox in oscillator networks, desynchronization and power outage. New Journal of Physics 14, 2012

Vielfältiges Polarisationsgeschehen

Die Streuung der Sonnenstrahlung an Luftmolekülen polarisiert das Licht. H. Joachim Schlichting beschrieb in seiner Kolumne, wie sich das dem geübten Auge in Form eines seltsamen »Haidinger-Büschels« offenbart.

(»Kann man polarisiertes Licht sehen?«, »Spektrum« Juli 2023, S. 54)

Johannes Grebe-Ellis, Universität Wuppertal: Wer die Kolumne zum Polarisationssehen anregend fand, mag sich für vertiefende Ergänzungen zum Thema interessieren. Die bis heute umfassendste Würdigung des Haidinger-Büschels mit Tipps zur Beobachtung, Hinweisen zu seiner Entdeckungsgeschichte, einem Modell zu seiner Entstehung im menschlichen Auge und Vorschlägen zu seiner Einbettung in ein

phänomenologisches Curriculum zur Polarisation habe ich 2005 unter dem Titel »Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation« vorgelegt (Logos-Verlag, Berlin). Hier findet man einen systematischen Überblick von der Doppelbrechung am Kalkspat bis zur atmosphärischen Polarisation.

Die Erschließung dieser Kontexte in Schule und Hochschule gelingt am einfachsten mit Klassensätzen von Polarisationsfolien. Hierfür habe ich einen einfachen Beobachtungsgang beschrieben (Unterricht Physik 20, 2009). Blickt man durch ein Paar solcher Folien (»Polarisator« und »Analysator«) und verdreht sie gegeneinander, beobachtet man eine vom Drehwinkel abhängige Verdunkelung der Durchsicht. Diese ist in Parallelstellung der Folien minimal und in Kreuzstellung maximal (Malus-Gesetz).

Den »Polarisationsschatten«, das heißt, ein Loch im Spiegelbild des blauen Morgen- oder Abendhimmels, beobachtet an einer ruhigen Wasserfläche, habe ich in einer kleinen Studie beschrieben (MNU 54, 2001).

Bringt man zwischen gekreuzte Polarisationsfilter beispielsweise ein durchsichtiges Plastiklineal, ein Stück Tesafilm oder ein Brillenglas, werden die herstellungsbedingten Spannungszustände des Materials sichtbar. Dies macht man sich in der optischen Spannungsprüfung zu Nutze. Die dabei auftretenden Interferenzfarben sind im Wechsel zwischen Parallel- und Kreuzstellung komplementär.

Und so werden auch die komplementären Farben des Haidinger-Büschels verständlich. Sie verweisen auf die Doppelbrechung der menschlichen Hornhaut als optische Phasenplatte.

Indem wir das Haidinger-Büschel gewahren, tritt die Polarisationsoptik des menschlichen Auges mit der linear polarisierten Strahlung des Himmels, einer Spiegelung oder einer Polarisationsfolie in Wechselwirkung: Polarisation wird durch Polarisation wahrgenommen.

Karten zur Dürre

Heute gehört Deutschland zu den Regionen, die weltweit am meisten Wasser verlieren. Ressourcenmanagement-Expertin Claudia Pahl-Wostl beschrieb Wege, um gegenzusteuern.

(»Wege aus der Trockenheit«, »Spektrum« November 2022, S. 46)

Wolfgang Ewest, Bernau: Im Artikel wurden verschiedene Landkarten von Deutschland mit dem Dürregrad gezeigt. Insbesondere die Abbildung für den 1. September 2022 ruft bei mir einige Verwirrung hervor. Für unsere Gegend Bernau (im Nordosten Berlins) wird für diesen Zeitpunkt eine »außergewöhnliche Dürre« angezeigt. Da ich regelmäßig die Regenmenge messe, weiß ich, dass im August 2022 überdurchschnittlich viel Regen gefallen ist (50 mm). Die Pflanzenwelt im Garten und in der Umgebung war grün und wohl entwickelt. Wie kommt diese Aussage zur Dürre zu Stande?

Antwort der Redakteurin Verena Tang:

Die Karten im Heft zeigen die Trockenheit des Bodens bis in 1,8 Meter Tiefe (»Gesamtboden«). Dieser hatte zu dem Zeitpunkt durch lang anhaltende Trockenheit so viel Wasser verloren, dass auch die Regenfälle im August nicht ausreichten, um das Defizit auszugleichen.

In den oberflächennahen Schichten war der Regen, der im August gefallen war, zu dem Zeitpunkt bereits spürbar. Das sieht man, wenn man sich die Karten für den Oberboden anschaut (hier wird die Bodenfeuchte bis 25 cm Tiefe gemessen). Hier sah es am 1. September 2022 schon wesentlich besser aus.

Alle Karten stammen vom Dürremonitor der Helmholtz-Gemeinschaft (<https://www.ufz.de/index.php?de=37937>). Diese veröffentlicht dort Karten der Bodenfeuchte. Sie finden tagesaktuelle Karten sowie monatliche für die Vergangenheit, ebenso wie Übersichten zum bodenverfügbaren Wasser.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf [Spektrum.de](https://www.spektrum.de) direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

Verwirrend von Schwarz nach Weiß

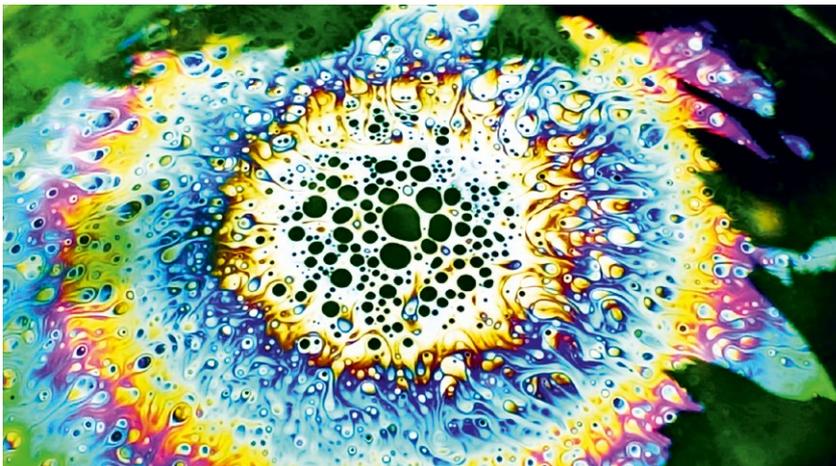
Die faszinierenden Farbspiele bei Seifenblasen hängen auch mit ihrer Lebensdauer zusammen, erklärte H. Joachim Schlichting.

(»Wie man Seifenblasen am Platzen hindert«, »Spektrum« März 2023, S. 62)

Thomas Scharnagl, per E-Mail: Die schönen Aufnahmen der Seifenblasen haben mich an meine aktive Zeit in der Halbleiterherstellung erinnert. Die Interferenzfarben wurden früher genutzt, um Oxid- und Nitrid-Dicken auf Siliziumscheiben per Auge zu schätzen. 100 Angström Genauigkeit war da für geübte Operatoren kein Problem. Zur Dicke null hin verschwinden die Farben, und es bleibt die reflektierende Oberfläche zurück. Das entspricht den weißen Bereichen an der Spitze der Blase.

Bei einer Dicke gegen null haben wir bei der Siliziumscheibe zweimal die Reflexion an einer dichteren Oberfläche, was sich durch konstruktive Interferenz verstärkt, während bei der Seifenblase eine Reflexion an einer dichteren und an einer dünneren Oberfläche erfolgt, so dass sich

VORBOTEN DES PLATZENS
Die dunklen Bereiche zwischen den bunten Schlieren kennzeichnen Stellen, die dünner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts.



H. JOACHIM SCHLICHTING

wegen Phasensprung die Reflexionen auslöschen. Tatsächlich sieht man ja auch vermeintliche Löcher in der Blase.

Was jetzt aber überhaupt nicht zusammenpasst, ist die Tatsache, dass in den Fotos bei den dünnsten Schichten weiße Bereiche direkt an die dunklen angrenzen. Das ist verwirrend.

Antwort des Autors H. Joachim Schlichting:

In der Tat sind die schwarzen Bereiche fast immer von weißen umgeben. Dort, wo die Seifenhaut sehr viel dünner ist als irgendeine der Wellenlängen λ des sichtbaren Lichts, trägt der Unterschied in der Weglänge der beiden reflektierten Strahlen kaum zu einer Phasenänderung bei, so dass der Phasenunterschied ungefähr π beträgt. Das hat eine destruktive Interferenz für alle Wellenlängen zur Folge, also Schwarz.

Dem schließt sich ein weißer Bereich an, der dicker ist, aber immer noch dünner als $\lambda_{\text{blau}}/2n$, wobei n der Brechungsindex ist. Es gibt hier für kein sichtbares Licht eine destruktive Interferenz, so dass alle Farben reflektiert werden.

Der auffällig scharfe Übergang hat – wenn ich mich recht erinnere – einen fluiddynamischen Ursprung. Dabei spielt die Van-der-Waals-Anziehung zwischen den Tensidschichten eine wesentliche Rolle, durch die ab einer bestimmten Dicke das Wasser zwischen ihnen bis auf einen Minimalabstand verdrängt wird.

Warum ein gemeinsamer Vorfahr?

Ein Verständnis dafür, was bio- und geologische Phänomene miteinander verbindet, hilft laut Max-Planck-Gruppenleiterin Martina Preiner dabei, den Ursprung des Lebens nachzuvollziehen.

(»Vom Gestein zur ersten Zelle«, »Spektrum« Juli 2023, S. 12)

Bernhard Stettner, Neuwied: Woher stammt die Gewissheit, dass Archaeen und Bakterien einen gemeinsamen Vorfahren hatten? Wenn die geochemischen Vorgänge wirklich in biochemische Prozesse übergehen könnten, warum sollte so etwas nicht mehr als einmal und auf verschiedene Weise passiert sein?

Antwort des Redakteurs Frank Schubert:

Das geht aus ihren zahlreichen Gemeinsamkeiten hervor, darunter ein Basisstoffwechsel von rund 400 biochemischen Reaktionen, die bei Bakterien und Archaeen weitgehend gleich ablaufen. Das lässt den Schluss zu, dass beide von einem Vorfahren abstammen.

Es könnte durchaus sein, dass Abiogenese mehrfach stattgefunden hat und sich am Ende nur eine der Lebensformen durchsetzte, nämlich die, von der auch wir abstammen. Ebenso könnte in Nischen, die wir bislang nicht untersucht haben, noch heute eine andere der damals existierenden Lebensformen existieren.

Erratum

»Mit Wasserstoff zu sauberem Stahl«, »Spektrum« Juli 2023, S. 47

Das Bild auf S. 52/53 zeigt nicht geschmolzenes Eisen aus einem Hochofen bei Thyssenkrupp, sondern den Auslauf einer Stranggussanlage bei einem anderen Stahlhersteller. Wir danken unseren Lesern für die Hinweise.

Zu spät

Das Ende einer hoffnungsvollen Karriere.

Eine Kurzgeschichte von Nicole Rensmann

Der schrille Ton des Weckers riss Ty aus einem viel versprechenden Traum von seiner Nachbarin, die er heute Abend endlich einmal ansprechen wollte. Er tippte die Snooze-Taste, drehte sich zur Seite und presste das Gesicht ins Kissen. Nur fünf Minuten. Eine Stunde später schreckte er aus dem Schlaf hoch. Er hatte den Wecker ausgestellt, anstatt ihn auf Schlummermodus zu stellen. »Shit!« Ty sprang aus dem Bett, rannte ins Bad, warf sich eine Ladung Wasser ins Gesicht, Zahnputzen ersetzte er durch Mundspülung, die Haare kämmte er mit den Fingern durch. Er rannte quer durch die Räume, zog sich nebenbei Jeans, Hemd und Schuhe an und packte Tablet, Ladekabel und Handy in seinen Rucksack. Den Autoschlüssel steckte er in die Hosentasche.

Keine sieben Minuten später verließ er die Wohnung.

An diesem Morgen hatte er den wichtigsten Termin seiner Karriere: Ty sollte zusammen mit seinem Kollegen Nick vor dem Komitee stehen, das darüber entschied, wer den Posten zum Chief Financial Officer erhielt.

Sein Wagen stand in der Tiefgarage auf der untersten Parkebene, in der hintersten Ecke. Dort blieb es bei der draußen herrschenden Hitze kühl, und er konnte sich das Einschalten der Klimaanlage sparen, zumindest für die ersten zehn Minuten. Nun rannte Ty auf den Wagen zu und öffnete die Türen mit der Fernbedienung des Autoschlüssels, wobei ihm seine Sachen herunterfielen. Alles verteilte sich über den Asphalt.

»So ein verdammter Mist!«, fluchte er. Eilig sammelte er den Speicherstick und seinen Glückskugelschreiber auf und stopfte sie zurück in den Rucksack. Bevor er das Tablet dazulegte, warf er einen Blick darauf. »Scheint nicht zu Bruch gegangen zu sein.« Er nahm das Handy. »Keine Macke. Heute ist mein Glückstag.« Sein fröhliches Lachen schallte durch die beinahe leere Tiefgarage.

Endlich saß er im Auto und knallte die Tür zu. Außer Atem, rann ihm trotz der Kühle der Schweiß von der Stirn. Er drückte den Anlasser – der Motor sprang nicht an. Genervt seufzte Ty und fasste sich an die Hosentaschen, doch der Funkschlüssel war nicht da. Ty schaute aus dem Fenster. Da lag das kleine schwarze Kästchen. Er hatte ihn verloren, als er sein Zeug aufgesammelt hatte. »Oh, Mann.«

Klack. Die automatische Verriegelung war aktiviert. Der Wagen war verriegelt, und Ty saß drin. Er betätigte einen Knopf, um die Türen von innen zu entriegeln. Nichts geschah. Wie wild drückte er den Schalter, immer und immer wieder, aber das Auto blieb verschlossen.

»Damit kann ich den Job vergessen.« Er lehnte sich in seinem Sitz zurück und atmete tief durch. Dann fiel ihm sein Smartphone ein und die Fahrzeug-App, mit der er die Verriegelung entsperren konnte. Auf der untersten Ebene des Parkhauses gab es jedoch keinen Handyempfang.

»So eine verdammte Scheißel!« Eigentlich wollte er sich ja das Fluchen abgewöhnen. Aber hier hörte ihn niemand. Er war in seinem Wunderwagen eingeschlossen. Wutentbrannt schlug er gegen das Lenkrad. Die Sensoren des Innenraums registrierten eine Bewegung, einen Schlüssel allerdings nicht. Und die KI erkannte darin einen Einbruch. Prompt reagierte die Alarmanlage.

Na bitte, das müsste doch jemand mitkriegen. Ty lachte hysterisch und wartete darauf, dass irgendwer den Alarm hörte und ihn aus seinem Gefängnis befreite. Als er sich umdrehte, stellte Ty fest, dass nur zwei weitere Fahrzeuge in diesem Abschnitt parkten. Auf dem schwarzen Mercedes lag Staub, jemand hatte mit dem Finger ein Herz hineingemalt. Das zweite, ein rotes Auto, dessen Marke Ty auf die Entfernung nicht erkannte, stand auf der anderen Seite des Parkdecks. Aber die Sirene dudelte laut, und das würde doch sicher jeder hören, im Deck darüber, auf der Straße, in den Häusern gegenüber.

»Wann hast du das letzte Mal auf das Gedudel einer beschissenen Alarmanlage gehört?«, fragte Ty sich selbst.

Sein Hemd war inzwischen schweißnass. Wen kümmerte es? Die Beförderung war futsch, vermutlich bekam er stattdessen die Kündigung, sobald er im Büro eintraf, wann immer das sein würde. Er boxte gegen die Tür, das Lenkrad, die Windschutzscheibe. Sicherheitsglas – dafür brauchte er eine stärkere Waffe als seine Büromuskeln. Ty lachte wieder und legte den Kopf in den Nacken.

»Das ist absurd.«

Sein Blick fiel auf den Notruf, der über dem Rückspiegel montiert war. Wenn das keine Notsituation war, was dann? Ty schob den Schalter auf »on«. Eine freundliche Unisex-Stimme würde ihn fragen: »Benötigen Sie Hilfe?« Als er einmal einen Unfall gehabt hatte, war er dankbar, auf diesem Weg Krankenwagen und Polizei rufen zu können. Der Standort seines Wagens wurde übermittelt und Ty gerettet.

Dieses Mal ertönte allerdings keine Stimme, er hörte nicht das leiseste Rauschen. Hier unten gab es schließlich keinen Mobilfunkempfang.

»Was ist denn nur mit diesem verdammten Tag los?« Er hämmerte auf das Lenkrad ein. »Nichts funktioniert!« Dann rief Ty um Hilfe, schlug und boxte gegen die Fensterscheiben, die Armatur, den Beifahrersitz.

»Ich will hier raus!«

Allmählich verdrängten sein hitziger Atem und Schweiß die Kühle des untersten Decks der Tiefgarage aus dem Inneren seines Autos. Aber mehr entkam dem blechernen Gefängnis nicht. Seine Hilferufe vernahm niemand, genauso wenig wie den Alarm.

Er dämmerte ein. Hätte er doch wenigstens eine Flasche Wasser mitgenommen.

Dann hörte er einen Motor starten. Sekundenschnell wachte er auf, drehte sich um. Der rote Wagen fuhr an.

Noch einmal gab Ty alles, schrie, trommelte mit den Fäusten gegen die Fenster.

Der Fahrer sah ihn nicht, manövrierte seinen Wagen ungenlenk an den Pfeilern vorbei und fuhr hinaus in die Freiheit.

Ty brach in Tränen aus. »Ich werde hier verrecken.« Er trat gegen die Tür, das Fenster, riss am Lenkrad. Das Auto blieb fest verschlossen, der Alarm stoppte. Der Bordcomputer registrierte einen Fehlalarm, und die KI schrieb sich entsprechend selbst um, um in Zukunft weniger empfindlich zu reagieren. Tys Wutanfall ebte ab, doch das Weinen wollte nicht enden. Über seinem Weinkampf schlief er ein. Als er das nächste Mal erwachte, musste er dringend pinkeln. Die Luft war stickig, sein Hals fühlte sich rau und kratzig an. Er hatte Durst.

Fünf Parkplätze weiter stand ein neues Auto. Der kleine blaue Mini Cooper parkte direkt über Tys Türöffner.

Ty schöpfte Hoffnung. Nervös rutschte er auf dem Sitz hin und her, schaute auf sein Handy – kein Empfang.

Der SOS-Knopf stand weiterhin auf »on« und blieb stumm. Ty schickte eine Nachricht an sein Büro und seine Schwester. Sie hatten sich seit Weihnachten nicht mehr gesprochen, aber der Zeitpunkt schien ihm geeignet, einen Gruß zu senden. Die E-Nachrichten blieben in Wartestellung.

Sein Magen knurrte. Die Zunge klebte am Gaumen, er schmatzte lautstark, zog den Aschenbecher raus und starrte eine Weile hinein. Zu klein für den Inhalt seiner Blase. Dann schaute er wieder aus dem Fenster. Er musste aus diesem bleiernen Gefängnis entfliehen. Jetzt!

Ty schlug mit dem Aschenbecher gegen die Fensterscheibe, 10-, 15-mal, doch es entstand nicht einmal ein Riss im Glas.

24 Stunden später saß Ty immer noch in seinem Wagen fest. Er hatte inzwischen in den Fußraum des Beifahrers uriniert und hasste sich dafür. Sein Hals fühlte sich

wie zugeschnürt an, die Leere in seinem Magen schmerzte. Immer wieder schlief er ein, der Akku des Smartphones stand auf null Prozent, Rücken und Beine waren steif. Er fror.

»Wieso sucht die Firma nicht nach mir?« Er gab sich selbst die Antwort: »Die denken, ich habe gekniffen und mich abgesetzt.« Nach einer kurzen Pause meinte er: »Aber den Wagen können sie orten.« Sein zweites Ich wusste es besser. »Nicht hier, auf der unteren Ebene, in der hintersten Ecke.«

Er erinnerte sich daran, wie groß seine Freude gewesen war, als sein Arbeitgeber ihm einen Firmenwagen mit all dem Schnickschnack zur Verfügung stellte; dieser selbstfahrende und selbstdenkende Wunderwagen war das Highlight seiner Karriere. Warum fuhr er jetzt nicht?

Ty fehlte inzwischen die Kraft, gegen die aus Glas und Metall bestehenden Mauern seines Gefängnisses anzukämpfen. Er schrie nicht mehr, weinte still. In seiner Verzweiflung schickte er Nachrichten an all seine Kontakte.

Der Mini Cooper parkte auf seinem Platz. Die Rückleuchten wirkten wie Augen und schienen Ty zu verhöhnen. Sein Kichern klang wie ein hohles Glucksen. Er wurde verrückt, aber war das ein Wunder? Seine Haare waren strähnig, er stank nach Schweiß, der Wagen nach Urin. Die automatisierte Klimaanlage schaltete sich nicht ein. Natürlich nicht. In diesem beschissenen Hightech-Auto funktioniert nichts, dachte Ty. Zum Sprechen war er schlicht zu schwach.

Endlich kamen Retter.

Ty begrüßte sie mit einem breiten Lächeln, das Handy hielt er wie einen Talisman in der linken Hand, seinen Glückskugelschreiber in der anderen. Seine Kleidung war ihm zu groß geworden. Die Haut zog sich wie Pergament über sein Knochengerüst.

Das Auto war einem Bautrupps aufgefallen, das den Abriss des Parkhauses durchführte – 15 Monate nachdem Ty in seinen Wagen gestiegen war. Einer der Bauarbeiter legte aus Neugier das Smartphone auf die Ladestation seines Abrisswagens. Der Akku lud und sendete die letzten Hilferufe in die Welt hinaus. Zu spät. ◀

DIE AUTORIN

Nicole Rensmann lebt in Remscheid und arbeitete als kaufmännische Angestellte, bevor sie ein Versandgeschäft für fantastische Literatur führte. 1998 veröffentlichte sie ihre erste Kurzgeschichte und hat seitdem mehr als 90 Erzählungen für Erwachsene und Kinder verfasst.



SMARTBOY10 / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die älteste Sprache der Welt

Im Golf von Bengalen sind noch einige wenige einer Sprache mächtig, die zu den Wurzeln der Sprachentwicklung führen könnte: Denn vor Jahrzehntausenden verstanden Menschen ihre Welt als menschlichen Körper.

Parasiten des Regenwalds

Lianen vermehren sich zunehmend – und nehmen Waldbäumen das Licht und die Nährstoffe. Schuld ist wahrscheinlich der Klimawandel.



MELVNY / GETTY IMAGES / ISTOCK

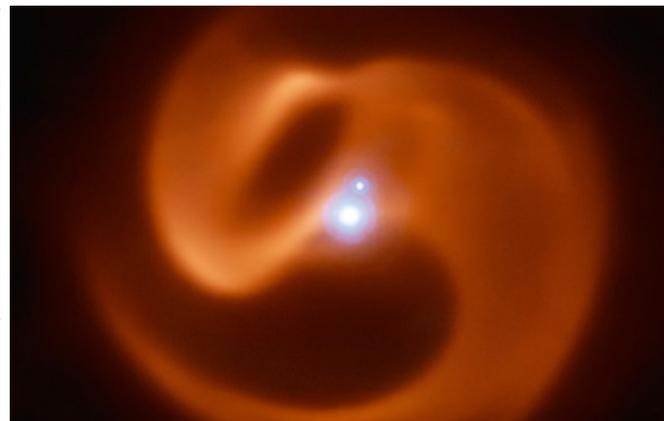
EUN KYOUNG JUNG / GETTY IMAGES / ISTOCK



Ein Doppelspalt mit Zeitschlitz

Stellt man den Versuchsklassiker der Quantenmechanik mit zeitlich statt räumlich getrennten Schlitzen nach, kommt es zu Überraschungen.

ESO - JOSEPH R. CALLINGHAM (ESO) / WEBTELESCOPE.ORG/CONTENT/STORIES/MEDIA/IMAGES/2023/07/7/IMAGE



Schier unmögliche Sterne

Die seltenen und massereichen »Wolf-Rayet-Sterne« rufen mysteriöse Strukturen hervor.

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

GEOMETRIE

Kacheln in höheren Dimensionen

Lange glaubten Mathematiker, dass sich drei- und höherdimensionale Parkettierungen ähnlich verhalten wie ebene Mosaikmuster. Sie mussten erst eine neue Sprache entwickeln, um zu verstehen, dass sie damit falschlagen.



Manon Bischoff ist Redakteurin für Mathematik und Physik bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Im Frühjahr 2023 sorgte der Fund eines »Einsteins« für Begeisterung: Der pensionierte Druckanlagen-techniker David Smith stellte ein 13-Eck vor, mit dem man eine Ebene lückenlos und ohne Überlapp bedecken kann. Das klingt zunächst nicht allzu aufregend, doch jedes entstehende Muster ist zwangsläufig nichtperiodisch – unabhängig davon, wie man die 13-eckigen Kacheln zusammenlegt. Eine solche »aperiodische« Fliese hatten Fachleute und Laien jahrzehntelang gesucht.

Für Mathematikerinnen und Mathematiker sind aber nicht nur geometrische Pflasterungen der Ebene spannend. Sie widmen sich dem Problem außerdem in höheren Dimensionen. Zum Beispiel möchten sie herausfinden, welche Eigenschaften dreidimensionale Steine haben, mit denen sich ein ganzer Raum füllen lässt. Und was sich verändert, wenn man zu noch größeren Dimensionen übergeht.

Insbesondere die Existenz von »Einsteinen« (abgeleitet vom Begriff »ein Stein«, nicht dem Physiker) wirft Fragen auf. Gibt es auch in hohen Dimensionen einzelne Bausteine, die einen Raum lückenlos füllen und dabei bloß nicht-periodische Muster erzeugen? Lange ging man davon aus, dass sich die Eigenschaften ebener Parkettierungen nicht allzu stark von jenen in höheren Dimensionen unterscheiden würden. Doch wie die Mathematikerin Rachel Greenfeld vom Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey, zusammen mit ihrem Kollegen Terence Tao von der University of California in Los Angeles (UCLA) Ende 2022 zeigen konnte, ist diese Annahme falsch.

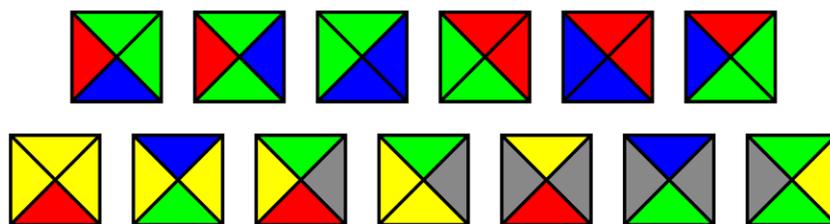
Pflasterungen sprengen die Grenzen der Logik

Geometrische Mosaikmuster aus kunstvoll gestalteten Kacheln sind nicht nur schön anzusehen, sondern auch aus mathematischer Sicht extrem interessant. Doch erst in den 1960er Jahren wurde die Bedeutung der Kachelmuster außerhalb der Geometrie deutlich: Die Untersuchung von Fliesen führt schnell an die Grenzen der Logik.

Das hatte der Mathematiker Hao Wang (1921–1995) festgestellt, als er sich mit quadratischen Steinen beschäftigte. Er hatte daraus eine Art Spiel konzipiert: Auf einer Ebene liegen mehrere Quadrate mit unterschiedlich eingefärbten Kacheln, die man so oft wie gewünscht vervielfältigen und nach oben, unten sowie rechts und links verschieben darf. Drehungen und Spiegelungen sind nicht erlaubt. Zudem dürfen sich nur gleichfarbige Kanten berühren. Ziel des Spiels ist es, die gesamte Ebene mit den Fliesen zu bedecken.

Höchst interessant fand Wang die Frage, ob man – anstatt müh-

WANG-FLIESEN Schaffen Sie es, die Ebene mit den Fliesen so zu bedecken, dass bloß gleichfarbige Seiten aneinandergrenzen?



AUF EINEN BLICK

Wie komplex kann eine Fliese sein?

- 1 Wenn man in zwei Dimensionen eine Ebene so pflastern will, dass sich das Muster nicht regelmäßig wiederholt, dann muss man eine Fliese nicht nur verschieben, sondern außerdem drehen dürfen.
- 2 Fachleute gingen davon aus, dass das auch für höherdimensionale Steine und Räume gilt. Doch 2022 haben Rachel Greenfeld und Terence Tao ein Gegenbeispiel gefunden.
- 3 Zudem konnten sie zeigen, dass es Kacheln gibt, für die man niemals herausfinden wird, ob sie einen Raum lückenlos füllen. Damit stoßen auch einzelne Fliesen an die Grenzen der Mathematik.

sam verschiedene Zusammensetzungen durchzuprobieren – einen Algorithmus entwerfen könnte, der anhand der vorgegebenen Fliesen beurteilt, ob man das Spiel gewinnen kann oder nicht. Wegen der Ähnlichkeit der quadratischen Kacheln zu den Segmenten auf Dominosteinen ist diese Frage inzwischen als »Domino-Problem« bekannt.

Wang ging damals – fälschlicherweise – davon aus, dass jeder Kachelsatz, mit dem man das Spiel gewinnt, die Ebene auch periodisch bedecken kann. Demnach müsste es stets möglich sein, eine zusammenhängende Menge von Kacheln zu finden, die durch reine Verschiebungen die gesamte Fläche pflastert. Wie Wang herausfand, würde daraus folgen, dass das Domino-Problem lösbar ist. Theoretisch könnte man einen Algorithmus entwerfen, der nach gewisser Zeit ausspuckt, ob ein Kachelsatz eine Ebene pflastern kann oder nicht.

Damals waren nichtperiodische Parkettierungen natürlich schon bekannt. Aber die entsprechenden Fliesen ließen sich immer umordnen, damit das Muster periodisch wird. Wie der damalige Doktorand von Wang, Robert Berger, allerdings 1966 zeigen konnte, ist das Domino-Problem unentscheidbar: Es gibt keinen Algorithmus

mus, der für jeden Kachelsatz in endlicher Zeit berechnen kann, ob das Spiel lösbar ist. Das heißt, es wird immer Fliesen geben, für die man niemals beweisen wird, ob sie eine Ebene pflastern.

Damit hatte Berger gleichzeitig nachgewiesen, dass es Kacheln geben muss, die eine Fläche auf bloß nichtperiodische Weise bedecken. Und kurz darauf präsentierte er tatsächlich ein Beispiel dafür: Er hatte einen riesigen Satz von mehr als 20 000 quadratischen Fliesen mit unterschiedlichen Färbungen gefunden, die eine Ebene nachweislich nur nichtperiodisch pflastern. Es war das erste Beispiel aperiodischer Steine.

Wie verändert sich das Ergebnis, wenn man die Größe des Kachelsatzes einschränkt? Mathematikerinnen und Mathematiker interessierte, ob die Domino-Frage für eine feste Anzahl von Fliesenformen entscheidbar ist. Und besonders spannend wird es, wenn man nicht nur quadratische Kacheln betrachtet, sondern auch vielfältige Formen zulässt. Die allermeisten dieser Fragen sind noch offen. Erst recht, wenn man die zweidimensionale Ebene verlässt und zu höheren Dimensionen übergeht.

Je komplexer ein System, desto schneller stößt man auf Unentscheidbarkeiten

»Wenn etwas komplex genug ist, tauchen Unentscheidbarkeiten schnell auf«, sagte der Mathematiker Chaim Goodman-Strauss vom National Museum of Mathematics in New York City auf dem »Hatfest« im Juli 2023, einer Konferenz, die zu Ehren des zweidimensionalen Einsteins in Oxford veranstaltet wurde. Hintergrund dieser Aussage ist ein Konzept aus der theoretischen Informatik, mit dem sich Unentscheidbarkeiten beweisen lassen.

Der Logiker Kurt Gödel (1906–1978) erschütterte in den 1930er Jahren die Grundfesten der Mathematik, als er seine »Unvollständigkeitssätze« vorstellte. Sie besagen, dass es in jedem mathematischen System zwangsläufig Aussagen gibt, die sich weder beweisen noch widerlegen lassen. Damit ist das Fach dazu verdammt, unvollständig zu sein. Das war anfangs ein Schock, aber die meisten Fachleute hofften, es handle sich um eine rein akademische Sonderheit, die keine praktischen Auswirkungen haben würde. Doch sie irrten sich.

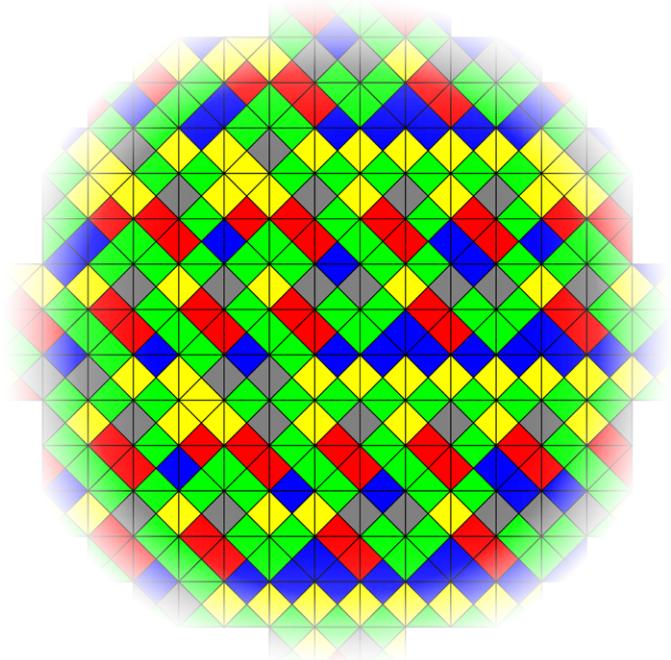
Eines der berühmtesten Beispiele für eine unentscheidbare Aussage ist das Halteproblem aus der theoretischen Informatik, wie der britische Mathematiker Alan Turing 1937 zeigte. In moderner Form besagt es, dass es keinen Rechner gibt, der für sämtliche Algorithmen beurteilen kann, ob ein sie ausführender Computer jemals mit der Arbeit fertig wird. Als Turing das Halteproblem formulierte, gab es noch keine Computer, wie wir sie kennen. Deswegen fußt seine Argumentation auf dem theoretischen Modell eines solchen, einer so genannten Turingmaschine. Diese besteht aus einem unendlich langen Band, auf dem Symbole verzeichnet sind, und einem Schreib- und Lesekopf, der die Symbole des Bands ausliest und gegebenenfalls überschreibt. Wie sich herausstellt, kann eine solche Turingmaschine alle möglichen Algorithmen ausführen, so wie unsere Computer.

Möchte man beweisen, dass eine Aussage unentscheidbar ist, greift man in der Theorie häufig auf Turingmaschinen zurück. Man versucht, das zu untersuchende System mit einer Turingmaschine zu identifizieren und zu zeigen, dass die betreffende Aussage in diesem Bild dem Halteproblem entspricht. Das hatte auch Robert Berger, Wangs Doktorand, gemacht, um zu beweisen, dass das Domino-Problem unentscheidbar ist. Er hatte die Funktionen einer Turingmaschine (Auslesen, Beschreiben und Verschieben des Bands) mit Kachelungen identifiziert. Zum Beispiel: Das Anlegen einer Fliese mit rotem rechtem Rand an eine andere mit rotem linkem Rand entspricht im Bild der Turingmaschine dem Verschieben des Bands. Auf diese Weise konnte Berger ein System konstruieren, bei dem die Fliesen genau dann die ganze Ebene bedecken, wenn die dazugehörige Turingmaschine niemals hält und für immer weiterrechnet. Damit müsste man das Halteproblem lösen, um das Domino-Problem zu entscheiden.

Dass riesige Kachelsätze komplex genug sind, um die Funktionen einer Turingmaschine zu codieren, erscheint noch nachvollziehbar. Damit stellt sich allerdings die Frage, ob auch kleinere Mengen von Fliesen – vor allem eine einzige Kachel – genug Komplexität mit sich bringen, um zu unentscheidbaren Aussagen zu führen. Wie Terence Tao und Rachel Greenfeld 2023 in einer noch nicht veröffentlichten Arbeit zeigen konnten, ist das in der Tat so. Damit gibt es einzelne Steine, für die sich niemals bestimmen lässt, ob sie einen Raum lückenlos ausfüllen können.

Doch der Weg zu diesem Ergebnis war lang – und keineswegs geradlinig. 2019 kam Greenfeld als Postdoc an die UCLA in die Arbeitsgruppe des renommierten

WANG-PARKETTIERUNG Diese Wang-Parkettierung ist nichtperiodisch.



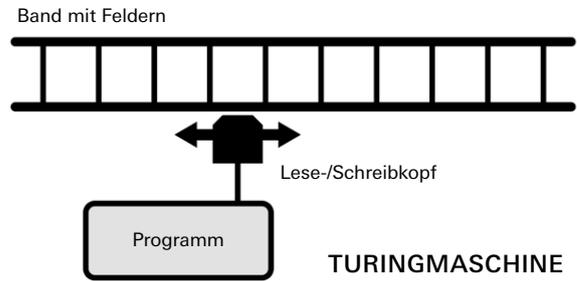
Mathematikers Terence Tao, der 2006 die Fields-Medaille erhielt, eine der bedeutendsten Auszeichnungen des Fachs. Sie und Tao hatten zuvor unabhängig voneinander an einem Problem aus dem Bereich der harmonischen Analysis gearbeitet, das mit Parkettierungen zusammenhängt. Dabei hatten sie viele neue Methoden entwickelt, von denen sie hofften, sie im Gebiet der Kachelungen nutzen zu können.

Eine wichtige Frage der Disziplin ist die so genannte periodische Kachelvermutung, die mit Einstein-Kacheln zu tun hat. Sie besagt, dass es keine einzelne aperiodische Fliese gibt, die eine Ebene allein durch Verschiebungen pflastern kann. »Aus der Vermutung würde folgen, dass man stets herausfinden kann, ob eine Fliese die Ebene bedecken kann oder nicht«, schreibt Tao in seinem Blog. Damit hängt die Vermutung eng mit logischen Fragen der Entscheidbarkeit zusammen.

Die 2023 vorgestellten Hut- und Spectre-Kacheln, die als Einstein gefeiert werden, widersprechen der periodischen Kachelvermutung nicht. Denn damit sie die Ebene bedecken können, muss man sie zumindest drehen dürfen (die Hut-Kachel ist zusätzlich auf Spiegelungen angewiesen). Dass die periodische Kachelvermutung in einer Dimension gültig ist, haben die Mathematiker Jeffrey C. Lagarias und Yang Wang 1996 bewiesen. In zwei Dimensionen ist die Frage nicht ganz beigelegt, jedoch konnte Rick Kenyon 1992 beweisen: Eine solche Fliese kann unmöglich zusammenhängen, sie muss aus mehreren Stücken bestehen. Ob so eine seltsame Kachel existiert, ist noch offen.

Da die periodische Kachelvermutung so schwer zu beantworten ist, untersuchen Fachleute meist eine vereinfachte Variante, die diskrete periodische Kachelvermutung. Statt einer kontinuierlichen Ebene betrachtet man ein zweidimensionales Gitter, also unendlich viele periodisch angeordnete Punkte. Eine Kachel entspricht im diskreten Fall einer endlichen Menge dieser Punkte. Da die Fliese nicht zusammenhängen muss, kann sie auch Lücken enthalten. Dieser Aufbau ähnelt dem ursprünglichen Domino-Problem: Da die quadratischen Kacheln dort zwangsläufig ein schachbrettähnliches Gitter bilden, entspricht das einer diskreten Parkettierung.

2016 konnte der Mathematiker Siddhartha Bhattacha-



rya beweisen, dass die diskrete Kachelvermutung in zwei Dimensionen korrekt ist. Das war zwar ein großer Fortschritt, allerdings lässt sich sein Ergebnis nicht direkt auf kontinuierliche Flächen verallgemeinern. Denn in der Ebene sind wesentlich vielfältigere Kachelformen möglich, die auf einem Gitter nicht existieren. Damit könnte es eine komplizierte, unzusammenhängende Einstein-Kachel im Kontinuum geben, mit der sich die Ebene aperiodisch pflastern lässt – ohne dass es im diskreten Gitter ein Äquivalent dazu gibt.

Da die diskrete Vermutung in einer und zwei Dimensionen bereits bewiesen war, nahmen sich Greenfeld und Tao vor, den dreidimensionalen Fall der diskreten periodischen Kachelvermutung zu untersuchen: Falls man eine dreidimensionale Form nur verschieben darf und damit den Raum vollständig ausfüllt, dann müsste sich stets ein periodisches Muster ergeben können. So zumindest die Erwartung.

Daher versuchten sie, das zweidimensionale Ergebnis von Bhattacharya mit ihren Methoden erneut für die Ebene zu beweisen. Diese Mühe machten sie sich, weil sie hofften, auf diese Weise einen Beweisweg für den dreidimensionalen Fall zu finden. Doch sie landeten immer in einer Sackgasse. Deswegen beschlossen sie, nach einem Gegenbeispiel zur Vermutung zu suchen. Die Jagd auf eine aperiodische Kachel, die allein durch Verschiebungen einen Raum füllt, war eröffnet.

Aber was bedeutet es für eine hochdimensionale Fliese, aperiodisch zu sein? In zwei Dimensionen erzeugt sie zwangsläufig entlang beider Raumrichtungen ein nichtperiodisches Muster. In drei Dimensionen muss das nicht so sein. Man könnte beispielsweise der 2023 gefundenen zweidimensionalen Einstein-Kachel eine endliche Höhe verpassen und sie in einen flachen, dreidimensionalen Klotz verwandeln. Füllt man damit den Raum, ist das Muster zwar in beiden Richtungen der Ebene nichtperiodisch, in der dritten Raumrichtung bildet es aber ordentlich übereinander geschichtete Lagen. Einen solchen Block bezeichnet man daher als »schwach aperiodisch«, im Gegensatz zu »stark aperiodischen« Kacheln, die entlang aller Raumdimensionen nichtperiodisch sind.

Um die periodische Kachelvermutung zu widerlegen, genügt es, eine schwach aperiodische Kachel zu finden. Die bereits erwähnte Einstein-Kachel eignet sich zur Konstruktion jedoch nicht, da man sie auch drehen muss, um damit die Ebene (und somit auch den Raum) zu füllen. Da Tao und Greenfeld ein Gegenbeispiel zur periodischen

»Lustigerweise ist die Lösung fast periodisch, aber eben nicht ganz«

Rachel Greenfeld, Mathematikerin

Kachelvermutung finden wollten, war das Ausweichen auf ein diskretes Gitter vorteilhaft: Sollten sie tatsächlich eine aperiodische Fliese im diskreten Fall finden, würde das automatisch auch die kontinuierliche periodische Kachelvermutung widerlegen. Denn sie könnten die einzelnen Gitterpunkte, welche die aperiodische Kachel definieren, zu Puzzlestücken vergrößern. Damit hätten sie eine Fliese konstruiert, die den dreidimensionalen Raum füllen kann.

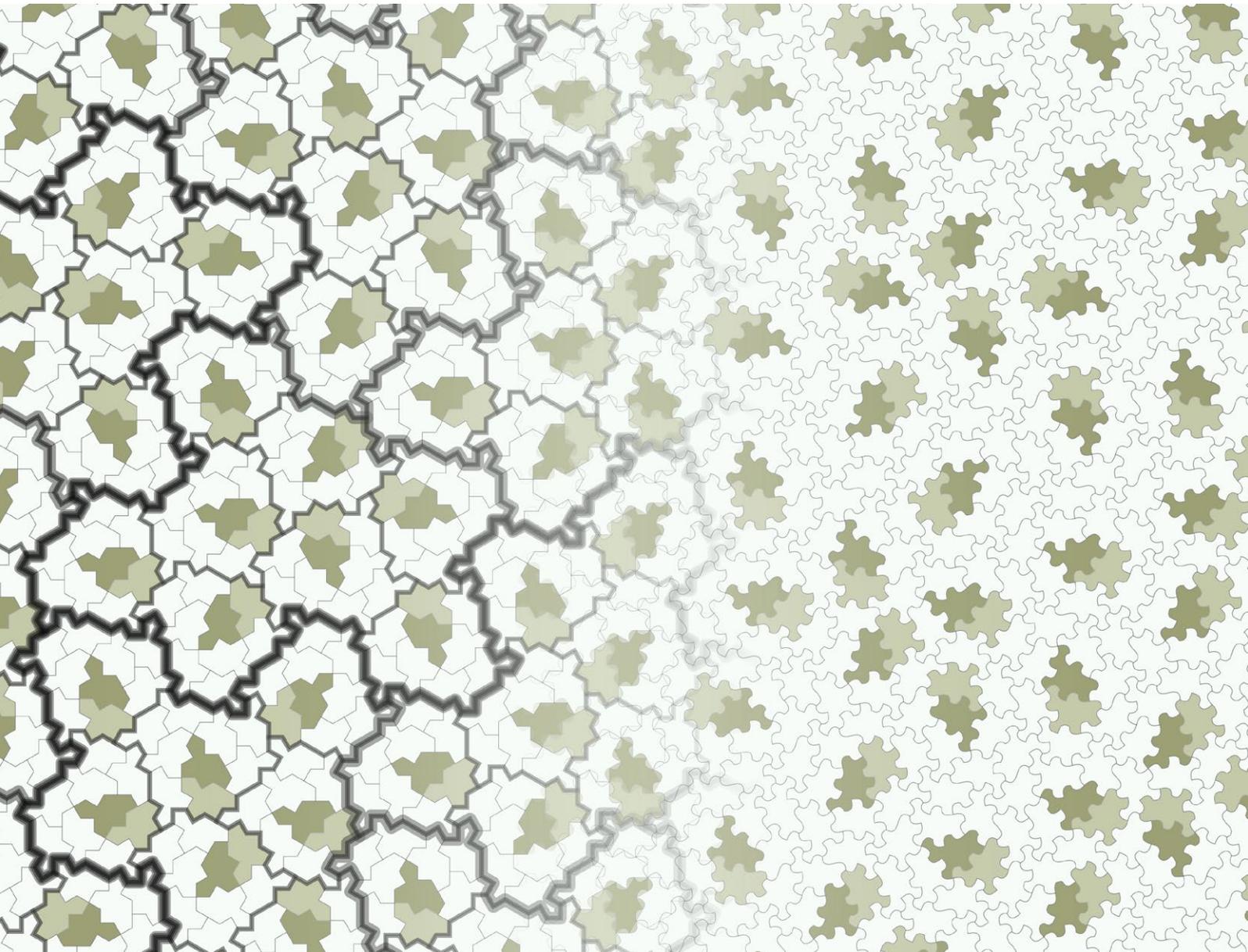
Doch auch im Dreidimensionalen stießen die Mathematikerin und der Mathematiker auf unüberwindbare Hürden. Daher wollten sie untersuchen, ob sie in höheren Dimensionen ein Gegenbeispiel zur diskreten periodischen Kachelvermutung finden würden. Im August 2021 kamen Greenfeld und Tao einem Ergebnis nahe. Sie

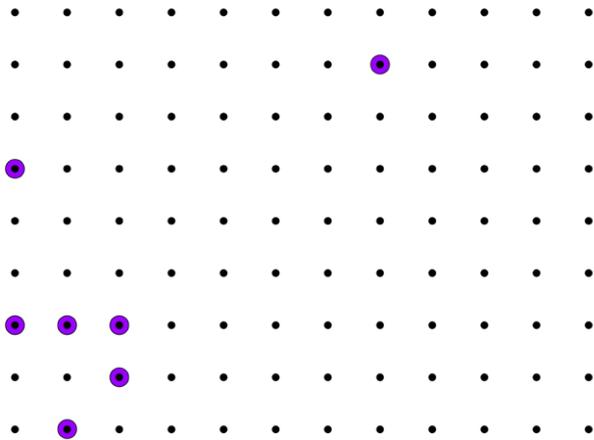
»SPECTRE« Die im Mai 2023 vorgestellte »Spectre«-Kachel ist ein Einstein: Sie bedeckt die Ebene lückenlos und erzeugt dabei bloß nichtperiodische Muster. Allerdings muss man sie dafür auch drehen.

konnten beweisen, dass es Dimensionen gibt, in denen sich nicht entscheiden lässt, ob Kachelsätze bestehend aus zwei Formen einen Raum allein durch Verschiebungen füllen können oder nicht. Daraus folgt, dass in hohen Dimensionen aperiodische Pflasterungen mit bloß zwei Fliesenformen existieren.

Eine neue Sprache und ein Sudoku-Rätsel

Um die periodische Kachelvermutung zu widerlegen, ist aber ein Gegenbeispiel mit bloß einer Fliese nötig – nicht zwei. Daher brauchten Tao und Greenfeld einen anderen Ansatz. Sie mussten eine neue Art von Sprache entwickeln, in der sie ihr Problem formulieren konnten. Sie wollten eine Gleichung in Form von »Fliesenform verknüpft mit Anordnung = geometrischer Raum« erhalten. Der Raum und die Fliesenform können dabei hochdimensional sein. Damit die Fliese aperiodisch ist, müssen alle Anordnungen (die Unbekannte in der Formel) nichtperiodisch sein. Eine Lösung für eine solche Gleichung zu finden, bei der alle Anordnungen nichtperiodisch sind, ist allerdings extrem kompliziert.





DISKRETE KACHELUNG In der diskreten Version entspricht die Ebene einem periodischen Gitter. Eine Kachel ist in diesem Fall eine Sammlung solcher Punkte, etwa die lila markierten.

Daher haben Greenfeld und Tao das Problem in viele kleine Teilaufgaben gegliedert. »Das Ganze funktioniert wie ein Sandwich«, erklärt Greenfeld. Anstatt direkt eine aperiodische Kachel in d Dimensionen zu konstruieren, betrachten sie einzelne $d-1$ -dimensionale Schichten – das ist, als würde man einen dreidimensionalen Block in einzelne Ebenen aufteilen. Der Trick besteht darin, $d-1$ -dimensionale Kacheln zu finden, die den Raum mit identischen Verschiebungen ausfüllen. Das lässt sich am Beispiel von quadratischen Fliesen erklären: Diese muss man jeweils um die eigene Seitenlänge nach oben, unten, rechts oder links verschieben, um die gesamte Ebene abzudecken. Wenn man eine Kerbe in die linke Seite des Quadrats schneidet und eine Ausbuchtung an der rechten Seite hinzufügt, erhält man eine neue Fliese, die mit denselben Verschiebungen die Ebene pflastert. Indem man alle Fliesenformen übereinanderstapelt, die diesen Verschiebungen genügen, hat man eine Kachel in d Dimensionen erzeugt.

Für jede $d-1$ -dimensionale Fliesenform lässt sich ebenfalls eine Gleichung der Form »Fliesenform verknüpft mit Anordnung = geometrischer Raum« formulieren, die jedoch einfacher ist. »Der Vorteil dieser Umformulierung ist, dass sie eine ›Sprache‹ schafft, in der jeder Satz die Lösung einschränkt«, erklärt Tao in seinem Blog. Diese Gleichungen könnten zum Beispiel Anlegeregeln (falls es solche gäbe) entsprechen, etwa »Nur gleichfarbige Kanten dürfen aneinandergrenzen«. Nun brauchten Tao und Greenfeld noch die passenden Einschränkungen, damit die von ihnen konstruierte d -dimensionale Fliese aperiodisch ist – also keine periodische Pflasterung zulässt. Gleichzeitig durften die Einschränkungen nicht zu stark sein, so dass eine Parkettierung überhaupt möglich ist.

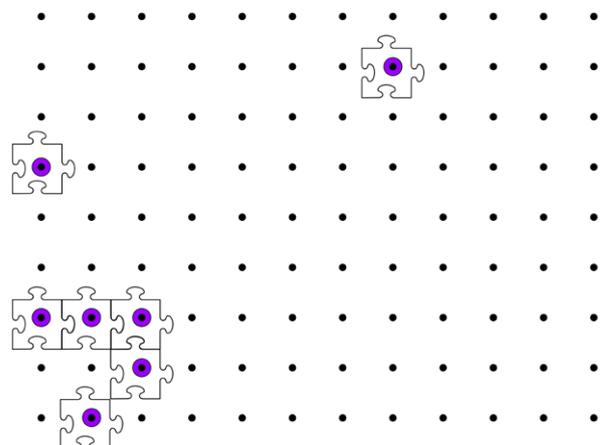
Um diesen Ansprüchen zu genügen, haben die Forscherin und der Forscher die vielen Gleichungen weiter umformuliert, bis sie einer Art Rätsel entsprachen. »Es ist

wie ein riesiges Sudoku-Spiel«, erläutert Greenfeld, »wobei jede Spalte nichtperiodisch sein muss, damit das endgültige Ergebnis, die Kachel, aperiodisch ist.« Die Schwierigkeit bestand nicht nur darin, das Sudoku-Rätsel zu finden, also die passenden Einschränkungen zu definieren. Die beiden mussten auch sicherstellen, dass sich diese Einschränkungen in ihre Sprache übersetzen lassen, um sie als Gleichungen auszudrücken. Nach viel Mühe war ihnen das Kunststück gelungen. »Lustigerweise ist die Lösung fast periodisch, aber eben nicht ganz«, sagt Greenfeld.

Sie mussten die Lösung nur noch zusammenfügen und daraus eine einzelne d -dimensionale Gleichung ableiten. Diese führte zu einem Gegenbeispiel der diskreten periodischen Kachelvermutung. Das Ergebnis ist eine aperiodische Fliese in d Dimensionen, die den Raum allein durch Verschiebungen füllt. Indem Tao und Greenfeld die Punkte, aus denen die Kachel besteht, zu hochdimensionalen Puzzleteilen aufbliesen, konnten sie das Resultat auf den kontinuierlichen Raum verallgemeinern.

Damit ist nun klar: Die periodische Kachelvermutung gilt nicht in allen Dimensionen. »Wir haben d aber nicht berechnet«, kommentiert Greenfeld. »Wir könnten es zwar, doch es ist nicht interessant. Denn wir haben nicht versucht, ein optimales Ergebnis zu erhalten – wir wollten bloß wissen, ob es überhaupt eine Dimension gibt, in der die periodische Kachelvermutung nicht erfüllt ist.« Höchstwahrscheinlich überschätzt das Ergebnis der Mathematikerin und ihres Kollegen die Dimension, ab der die Vermutung nicht mehr gilt. »Sie könnte schon in vier Dimensionen falsch sein«, sagt Greenfeld. »Das war eine echte Überraschung. Ich hatte erwartet, dass die periodische Kachelvermutung für alle Dimensionen gilt«, sagte der Mathematiker Mihalis Kolountzakis von der Universität Kreta dem »Quanta Magazine«. »Aber wenn es um

VOM DISKRETEN INS KONTINUIERLICHE Um aus einer diskreten Kachel eine kontinuierliche zu machen, kann man die Punkte aufblasen – zum Beispiel zu Puzzleteilen, die eine Ebene bedecken.



»Ich kann mich kaum von der Arbeit abwenden. Ich habe selbst im Flugzeug W-LAN-Zugang gekauft, um weiterzumachen, ich bin richtig besessen«

Rachel Greenfeld, Mathematikerin

hohe Dimensionen geht, kommt man mit reiner Intuition meist nicht sehr weit.«

Auch das genaue Aussehen der aperiodischen Kachel haben die beiden Forscher nicht untersucht, sie sei jedoch wahrscheinlich unzusammenhängend und nicht besonders schön, wie Greenfeld erklärt. Aber was wäre, wenn man die periodische Kachelvermutung auf zusammenhängende Kacheln beschränken würde? In zwei Dimensionen ist die Vermutung für Fliesen aus einem Stück beispielsweise bewiesen. Wie Greenfeld jedoch gemeinsam mit Kolountzakis im Mai 2023 herausfand, ist es in hohen Dimensionen sogar möglich, eine zusammenhängende aperiodische Kachel zu konstruieren.

Damit blieb noch die Frage zur Unentscheidbarkeit zu klären: Lässt sich stets vorhersagen, ob eine einzige Fliese einen Raum lückenlos ausfüllen kann? »Die Unentscheidbarkeit ist stärker als die Aperiodizität«, sagt Greenfeld. Wenn man zeigen kann, dass es Fälle gibt, in denen man nicht beurteilen kann, ob eine einzelne Kachel einen Raum kachelt, folgt daraus sofort, dass aperiodische Fliesen existieren. Umgekehrt kann man den Schluss jedoch nicht ziehen. Aus Aperiodizität folgt nicht zwangsweise Unentscheidbarkeit.

Greenfeld und Tao hofften, mit ihren neu entwickelten Methoden nun auch diese Frage angehen zu können. Damit eine einzelne Kachel unentscheidbar ist, muss man ihre Parkettierungen letztlich auf das Halteproblem aus der Informatik abbilden. Dafür muss man unter anderem zeigen, dass sie alle Funktionen einer Turingmaschine – und damit eines Computers – ausführen können. Die Frage war also, ob eine einzelne Kachel komplex genug ist, um diese Funktionen zu ermöglichen.

In einer noch nicht veröffentlichten Arbeit konnten Greenfeld und Tao beweisen, dass das tatsächlich der Fall ist: Es gibt Dimensionen, in denen man niemals entscheiden kann, ob eine einzelne Fliese den Raum füllen kann. »Es macht wirklich Spaß«, sagt Greenfeld über ihre Arbeit. »Ich kann kaum damit aufhören. Ich habe selbst im Flugzeug W-LAN-Zugang gekauft, um weiterzumachen, ich bin richtig besessen.«

Diese Begeisterung ist viel versprechend angesichts der zahlreichen offenen Fragen, die das Gebiet birgt. Etwa, was die kleinste Dimension ist, bei der die periodi-

sche Kachelvermutung noch gilt. Oder ob die Vermutung gültig bleibt, wenn man bloß zusammenhängende Fliesen zulässt. Und natürlich: ob es im Zweidimensionalen eine unzusammenhängende aperiodische Kachel gibt, die allein durch Verschiebungen die Ebene bedeckt. Vielleicht erwarten uns bei der Lösung dieser Probleme weitere Überraschungen. ◀

Bhattacharya, S.: Periodicity and decidability of tilings of \mathbb{Z}^2 . ArXiv:1602.05738, 2016

Greenfeld, R., Tao, T.: A counterexample to the periodic tiling conjecture. ArXiv:2211.15847, 2022

Greenfeld, R., Tao, T.: Undecidable translational tilings with only two tiles, or one nonabelian tile. ArXiv:2108.07902, 2022

Greenfeld, R., Kolountzakis, M. N.: Tiling, spectrality and aperiodicity of connected sets. ArXiv:2305.14028, 2023

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren
und keine Ausgabe mehr verpassen!



Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten
von **Spektrum PLUS** – wie kostenlosen Downloads,
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

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



Fische: schlau wie Hulle

Von wegen langweilig: Mit Hingabe beschreibt der Autor die oft unbekannteren Fähigkeiten von Fischen, sieht aber düster in die Zukunft.

► Wenn ein Fisch am Haken hängt und um sein Leben zappelt, sei es nur ein Reflex: So heißt es oft unter Anglerfreunden. Doch das ist beileibe nicht so. Im Gegenteil, Fische empfinden durchaus Schmerzen. Eine Begründung lautete, dass Fische eben keine Großhirnrinde dafür haben wie Säugetiere. Und weil sie eben nicht wimmern oder schreien, wenn sie gequält werden, ist es einfach, ihnen zu unterstellen, sie würden nicht leiden. Doch im Versuch weichen Fische schmerzauslösenden Reizen aus, atmen hektischer, fressen nicht mehr und versuchen, diesen Schmerzquellen zu entfliehen – und sie erinnern sich daran, wie der Autor Horst Bleckmann mit Bezug auf viele Forschungsarbeiten dazu anführt.

Ob Aal, Kabeljau, Forelle, Guppy oder Elefantenrüsselfisch, Bleckmann zeigt in seinem Buch komplexe

Wesen mit vielen Sinnen und viel Gehirnleistung. Er war Professor für Sinnes- und Neurobiologie und forschte selbst zu der 3-D-Wahrnehmung von Nilhechten, dem siebten Sinn schwach elektrischer Fische oder den Barthaaren von Seehunden als Navigationshilfe. Auf jeder Seite ist seine Begeisterung für die Wasserwesen zu spüren. Dadurch und mit Forschungsergebnissen und Vergleichen zu den Landtieren lässt er neues Bild mit Wow-Effekt über die Neurobiologie der Fische entstehen.

Beachtliche Fischleistungen

Es sind Lebewesen, die auch ohne Großhirn Farben sehen, magnetische Felder spüren oder elektrische Signale verwerten. Sie riechen, können zählen, haben Angst, ertasten ihre Umgebung, erkennen Jahreszeiten, sind je nach Persönlichkeit ängstlich



Horst Bleckmann

Dumm wie ein Fisch?

Springer Verlag, Berlin 2023

€ 27,99

oder furchtlos, und wenn es ihnen zu dunkel ist, produzieren sie ihr eigenes Licht. Mit ein wenig Training können sie sogar Dreiecke von einem Kreis unterscheiden. Bleckmann stellt die Forschung dazu vor, darunter auch viele eigene Ergebnisse. Einiges von Bleckmanns Forschung präsentiert auch der Wissenschaftsjournalist Ed Yong in seinem Bestseller »Die erstaunlichen Sinne der Tiere«.

Der Verlag bezeichnet »Dumm wie ein Fisch?« als Sachbuch, und so unterhaltsam ist es zu lesen; dank der Fülle der Informationen verdient es aber auch den Titel Fachbuch. Bleckmann geht inhaltlich in die Tiefe, erklärt im Detail und verständlich, da er oft auch kurz die Grundlagen anführt: Wie ist ein Gehirn aufgebaut, was sind neuronale Karten eines Fischgehirns, oder wie misst man überhaupt Intelligenz?

Bleckmann schreibt immer mit Achtung von den Leistungen dieser Fische. Und eigentlich sei es eh unerklärlich zu denken, Fische könnten dumm sein, nur weil ein Goldfisch

stupide in einem bauchigen Glasgefäß herumschwimmt. Wie Landwesen müssen sie Beute erkennen, gefräßigen Feinden aus dem Weg schwimmen, ihr Revier verteidigen, die besten Geschlechtspartner finden und auch andere Unterwassergefahren erkennen und im Gedächtnis behalten.

Langsames Hodenwachstum durch Hormone

Doch auch wenn Fische vielen Gefahren ausweichen können, bei einigen klappt das nicht. Und so fügt Bleckmann nach den Kapiteln zu den Sinnen und kognitiven Fähigkeiten die Bedrohungen durch die Menschen an. Knapp, kurz und ziemlich vollständig schildert er, wie Verschmutzungen mit Hormonen das Hodenwachstum von Forellen verlangsamen, welche negativen Folgen Flussbegradigungen haben oder welche Schäden durch Lärm im Meer oder Fischfarmen auftreten. Zum Schluss wird klar: Bleckmann ist resigniert, was den Menschen be-

trifft, und beklagt, »dass unser Gehirn die mit exponentiellem Wachstum verbundenen Gefahren nicht einschätzen kann und dass exponentielles Wachstum in einem begrenzten System wie der Erde früher oder später zur Katastrophe führen muss«. Schuld ist auch die Politik, deren Angst vor Verlust von Wählerstimmen, eine mächtige Fischereilobby und das Leugnen von Fakten – all das und mehr würden Naturschutzmaßnahmen verhindern oder abschwächen. Für ihn ist es nicht kurz vor zwölf, um die Welt zu retten, sondern bereits halb eins. Er geht davon aus, dass in wenigen Jahrzehnten viele Arten nicht mehr existieren werden. Wer das Buch gelesen hat, dem wird noch mehr bewusst, was die Welt dadurch verliert.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.



Jorge Cham, Daniel Whiteson

Wo ist die Mitte des Weltalls

Kosmos Verlag, Stuttgart
2023

20,00 €

Fragen zum Leben, zum Universum und zum Rest

Bananen, der Big Crunch oder warum wir nur kleine kräuselnde Energiewellen sind: Mit Humor klären die Autoren 20 Fragen zum Kosmos.

► Wo kommt das Universum eigentlich her, wie lange wird die Menschheit überleben, leben wir in einer Computersimulation, kann der Mars zu einer zweiten Erde werden oder was passiert, wenn mich ein schwarzes Loch einsaugt?

Der Physik- und Astronomieprofessor Daniel Whiteson von der University California und der zeichnende Robotertechnikexperte Jorge Cham beantworten auf humorvolle Weise diese FAQ rund um das Überleben und das Universum. Die Fragen haben sie sich nicht selbst ausgedacht, sondern stammen von Hörern ihres Podcasts »Daniel and Jorge

explain the universe« (<https://sites.uci.edu/danielandjorge/>). Schon in ihrem Buch »no idea« haben sie erklärt, dass vom Universum bislang ziemlich wenig verstanden ist; doch was Forschende jetzt schon wissen oder vermuten, erklären sie in ihrem neuen Buch »Wo ist die Mitte des Weltalls?« mit ziemlich flotter Schreibe.

So sind 20 Fragen zusammengekommen, die sich um die Raumzeit, Wurmlöcher, Zeitreisen in die Vergangenheit, Außerirdische, schwarze Löcher, Gravitation oder das Innere unserer Sonne drehen oder darum, wie eigentlich $E = mc^2$ zu verstehen ist. Es ist ein Sachbuch, aber so

humorvoll, manchmal etwas sehr flapsig geschrieben, dass man die Texte ohne großes Vorwissen verstehen kann. Helfen tun Begriffe aus dem realen Leben, so wie sie negative von positiver Masse unterscheiden, die der Leser »selbst, Materie und Bananen« haben. Oder wenn der Versuch, zwei sich abstoßende positive Protonen zusammenzubringen, damit verglichen wird, eine Katze in einen Eimer Wasser stecken zu wollen. Die spezielle Relativitätstheorie bezeichnen sie als Tempolimit im All und die Formel $E = mc^2$ sei »schlicht und elegant, fast so wie das ›Swoosh‹-Logo von Nike«.

Nur als Whiteson schreibt: »Für einen Physiker ist die Sonne eine unablässig explodierende Atombombe«, die riesige Mengen an Energie freisetzt, wäre hier eher der Bezug zu einer Fusionsbombe wie einer Wasserstoffbombe passend gewesen.

Einige Themen sind etwas skurril, beispielsweise wenn die Autoren die

Frage »Ist ein Leben nach dem Tod möglich?« auf Quantenebene herunterbrechen; manche sind schon bekannter, zum Beispiel, wie die Fusion in der Sonne funktioniert oder die immer wieder gestellte Frage, ob und wie wir erkennen könnten, ob wir in einer Simulation leben – mit dem Verweis auf Keanu Reeves im Film Matrix. Auch nicht so bekannte Themen sind dabei, zum Beispiel, wenn es um das Higgs-Feld geht.

Die Cartoons sind wunderbar unterhaltsam, auch wenn sie ab und zu das Weiterlesen kurz stoppen. Ein gezeichneter Gag ist fast auf jeder Seite zu finden. Sie sind oft eher lustig als aufklärend, aber dafür bleibt der Inhalt eher haften. So liegt Einstein zum Durchchecken beim Arzt halb nackt auf einer Liege und ruft dem Arzt zu: »Sie stimmt, ich sag's doch!« So wie auch Einsteins spezielle Relativitätstheorie von hinten bis vorne getestet und überprüft und verifiziert wurde.

Egal ob man den flapsigen Schreibstil mag oder nicht, im Buch findet man Bekanntes und Neues rund um den Kosmos, das auf humorvolle Weise aber grundsätzlich sachlich richtig erklärt wird. Das Verdienst der Autoren es, dass auch Neueinsteiger und Laien das Buch mit Genuss lesen können, weil auch sie wissen wollen, woher das Universum stammt und wo es endet. Es kann allerdings passieren, dass nach der Lektüre noch mehr Fragen auftauchen. Doch mit Fragen enthüllen wir auch, wer wir sind und weshalb wir nach Sinn suchen, schreiben die Autoren auf der letzten Seite ... Und bitten die Leser um weitere Fragen.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

Abenteuer Biologie für Kinder

Auch die beiden neuen »Entdecke«-Bände über Urzeitkrebse und fleischfressende Pflanzen sind intelligent, unterhaltsam und informativ.

► In den 1980er Jahren bin ich mit einem Gimmick der Kinderzeitschrift »Yps« in Form eines Tütchens mit Urzeitkrebsen zur ignoranten Tierhalterin der schlimmsten Sorte geworden. Ich gab die Eier einfach in ein Goldfischglas. Ein paar Tage später war ich glücklich und entsetzt zugleich: Die Krebse waren geschüpft, doch es waren viel zu viele für das kleine Glas. Ein Freund mit Aquarien sollte meinen Tierchen Asyl gewähren. Er nahm sie gerne – als Lebendfutter für seine Fische, wie ich leider zu spät erfuhr. Wie gut, dass es heute für alle kleinen Freunde und Freundinnen von Triops, so der wissenschaftliche Name für Rückenschaler und damit auch Urzeitkrebse, Kindersachbücher wie das von Kriton Kunz gibt. Der Biologe, Germanist

und Wissenschaftsjournalist ist geistiger Vater sowie Autor der Sachbuchreihe »Entdecke«. Die umfasst inzwischen 78 Bände – von A wie Amphibien bis Z wie Zugvögel. Die jüngsten Bände widmen sich Urzeitkrebsen und fleischfressenden Pflanzen. Kriton Kunz bürgt für Faktentreue, Transparenz, aktuellen Wissensstand und professionelle Fotos. Die Liste der involvierten Wissenschaftler und Expertinnen ist beeindruckend.

Kleiner Haken an der One-Man-Show: Kunz ist auch sein eigener Lektor. Das führt nicht nur zu ein paar Tippfehlern, sondern auch zu dramaturgischen Schwächen im Storytelling. Je detaillierter er Dinge mit spürbarer Begeisterung beschreibt, je ungebremster er komplexe Zusam-



Kriton Kunz

Entdecke fleischfressende Pflanzen

Natur und Tier-Verlag GmbH

€ 16,80

menhänge erklärt, desto schwerer macht er es der jungen Leserschaft, das alles auch zu verstehen. Wie den akribisch aufgezählten Stammbaum der Familie der Urzeitkrebse oder die Schilderung der Fotosynthese fleischfressender Pflanzen für Fortgeschrittene.

Dafür gehört Kunz aber zu den nicht gerade zahlreichen Autoren, die naturwissenschaftliches Know-how mit Sprachgefühl und Gespür für didaktische Vermittlung vereinen. So nimmt er die Lesenden gleich auf der ersten Seite mit auf eine spannende Zeitreise zu den ersten Vorfahren der Urzeitkrebse vor rund 500 Millionen Jahren. Durch die direkte »du«-Ansprache und ein lebendig geschildertes Setting entwickelt sich ein erzählerischer Sog, dem man sich nicht entziehen kann. Die sich anschließenden Kapitel glänzen mit umfang- wie faktenreichen und anschaulich erklärten Inhalten: über die weit verzweigte Familie der Urzeitkrebse, ihr kurzes Leben, ihre Speisekarte, Verdauung sowie Eigenarten. Das Ergebnis ist ein Kompendium kleiner Krebsarten, das nicht nur die Biologinnen und Biologen von morgen immer wieder erstaunt: So erfahren wir, dass Urzeitkrebse echte Überlebenskünstler ist.

Sie legen ihre Brut als »Dauereier« in Zysten im Boden ab, wo die Larven auch Trockenphasen von bis zu 20 Jahren überstehen. Selbst in der Antarktis leben Urzeitkrebse, und auch ein Aufenthalt im All hat ihnen nichts ausgemacht – fürs Experiment in Außenbehältern an der ISS deponiert. Selbst wenn kein Mensch mehr auf der Erde lebt, sind die Urzeitkrebse wohl immer noch da.

Kuriose Karnivoren detailliert erklärt und atemberaubend fotografiert

Der Band über Fleisch fressende Pflanzen beweist das Interesse der Leserschaft auch an exotischen Themen: Er ist nahezu vergriffen, im Sommer legt der Verlag nach. Sinnvoll strukturiert und nachvollziehbar aufgebaut erzählt das Sachbuch in acht Kapiteln von der Entstehung, Verbreitung und den Besonderheiten der »Karnivoren« genannten Fleischfresser unter den Pflanzen. Den größten Teil machen die ausführlichen Beschreibungen der Fallenarten aus, mit denen die Pflanzen Tiere anlocken: Die einen duften, andere leuchten in der Nacht oder saugen ihre Beute mit Unterdruck an. Wiederum andere – wie die Venusfliegenfalle – schnappen mit einer Klappfalle zu, wenn ein Insekt durch sein Zappeln eine Art elektrisches Signal erzeugt. Manche Karnivoren leben auch in Symbiose mit Tieren. Wie die Kannenpflanzenart, die ihren Stickstoffbedarf aus dem Kot von Säugtieren wie Fledermäusen deckt, die tagsüber in ihr Schutz suchen. Der Autor regt auch zum Nachdenken an, indem er auf die vielen bedrohten Arten hinweist, für deren Schutz nicht viel geschieht. Obwohl bekannt ist, dass ihre Substanzen bei der Entwicklung neuer Medikamente eine Rolle spielen können.

Ob zum Nachschlagen oder anregenden Lesen: Die »Entdecke«-Reihe hebt sich deutlich vom Look aktueller Kindersachbücher mit ihren mundgerecht zerhackten Infosnacks und kunterbunten Illustrationen ab. Hier ist das Layout übersichtlich und klar. Den roten Faden bilden längere Sachtexte. Kleinere brauchen hier

noch die Begleitung durch Erwachsene beim Vorlesen und Erklären. Doch alle werden auf jeder Seite reichlich durch eine großzügige Bebilderung mit teils atemberaubenden Fotos belohnt. Wie die Nahaufnahme einer Schlauchpflanze, auf deren gruselig aufklaffenden Schlund eine ahnungslose Schwebfliege zusteuert. Eine kleine Comic-Eule namens Xabi führt die Leserinnen und Leser durchs Buch und taucht dort auf, wo sparsam eingesetzte Infokästen mit Details oder Funfacts aufwarten. Wer sein frisch erworbenes Wissen testen will, kann sich final noch 20 teils kniffligen Quizfragen stellen. Kriton Kunz facht aber auch den kindlichen Tatendrang an: Im Band über die fleischfressenden Pflanzen gibt es Tipps für deren Haltung und Pflege zu Hause. Und der nicht ganz so einfachen Zucht und Haltung von Urzeitkrebsen widmet Kunz gleich ein ganzes Extrakapitel, das im Netz hinterlegt ist. Vielleicht gebe ich mir und den Triops damit ja noch einmal eine Chance.

Heike Byn hat Literaturwissenschaft studiert. Sie ist Fachjournalistin für Kinder- sowie Jugendmedien und konzipiert zudem Erlebnispfade für Familien und Kinder.



Kriton Kunz

Entdecke die Urzeitkrebse

Natur und Tier-Verlag GmbH

€ 16,80

Humboldt als Reiseblogger mit Handy

Eine Graphic Novel mit Humor: Wie hätte der Naturforscher von seiner Südamerikareise berichtet, hätte er Social Media nutzen können?

► Schon das Buchcover lädt zum Hingucken ein: Humboldt hält ziemlich lässig sein flaches Tablet mit einer Hand auf seinem Schoß, hinter ihm auf dem Schreibtisch zeigt der Bildschirm eines Laptops das digitale Foto eines Berges, auch der mitreisende Botaniker Aimé Bonpland scheint nur kurz von seinem Smartphone aufzuschauen, und auf einer alten Truhe liegt ein Selfiestick. Ansonsten sind auf dem Bild Utensilien der damaligen Zeit um 1800 verteilt. Früchte, Pflanzen, Sextant, Federkiel und eine aufziehbare Taschenuhr.

Alexander von Humboldt ist wissbegierig, ungeduldig und voller Freude, als er 1799 endlich seine Forschungsreise antreten kann. Fünf Jahre lang bereist er mit dem Botaniker Aimé Bonpland rund 8 000 Kilometer in Südamerika. Sie durchwandern Steppen und Gebirge, besteigen Vulkane und erkunden Höhlen, kentern auf Flüssen. Auf der Reise zeichnet Humboldt akribisch auf, was er sieht, Landschaften, Menschen, Pflanzen, Tiere, er dokumentiert seine wissenschaftlichen Beobachtungen schriftlich und schreibt Briefe. Er forscht, aber er will sein Wissen auch mitteilen.

Wie hätte seine Kommunikation ausgesehen, wenn es damals schon Handy, Internet und Social Media gegeben hätte? Oder der Forscher auf digitalen Meetings seine Entdeckungen hätte mitteilen können? So eine digitale Version der Reise hat Bettina Schary gezeichnet. Sie transferiert die Berichte aus den Tagebüchern in eine Graphic Novel und transportiert Humboldt – was seine Kommunikation betrifft – in die heutige Zeit. Und zwar ohne, dass es gewollt, angestrengt oder einfach an



Bettina Schary

Die zweite Entdeckung der Welt

Knesebeck Verlag, München 2023

€ 22,-

den Haaren herbeigezogen wirkt. An vielen Stellen laden fiktive Chatverläufe und Instaposts zum Schmunzeln ein.

Zwar hält sich Schary sonst an die Verhältnisse in der damaligen Zeit, doch »ihr« Humboldt nimmt Reisevideos auf und bittet um Likes, sorgt sich nach einer strapaziösen Reise nicht um Wasser, sondern um ein funktionierendes WLAN, bloggt seine Abenteuer online und plaudert nach der Reise in einem Frühstückssender und auf dem Stuhl bei Lanz.

Der damalige Humboldt ist abenteuerlustig, neugierig und testet gern Unbekanntes aus. Vieles in der Version von Schary könnte also passen. Ob er allerdings bei seinen Videos um Likes bitten würde, ist fraglich.

Das Buch ist auf alle Fälle kurzweilig und charmant gezeichnet. Es macht Lust, noch mehr über die

wissenschaftliche Arbeit des bekannten Naturforschers zu erfahren, denn den geschichtlichen Background und seine Forschung reißt Schary nur kurz an.

Insgesamt ist Schary mit der Übertragung in die heutige digitale Zeit ein neuer Zugang zu dem visionären Wissenschaftler gelungen. Das Buch ist vielleicht sogar für Kinder geeignet, abhängig davon, ob die Kids schon in den sozialen Medien unterwegs sind. Doch nicht nur für jugendliche Leser ist die Graphic Novel geeignet. Die gezeichnete Geschichte von Schary zeigt auf frische Weise auch Erwachsenen einen jungen Wissenschaftler, der ansteckend wirkt, mit seinem schier unbändigen Drang Neues zu entdecken.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

Die Seidenstraße – Vorläufer der Globalisierung

Der Sinologe Höllmann schildert anschaulich die Geschichte der Seidenstraße bis zum aktuellen chinesischen Infrastrukturprogramm.

► Eine Güterzugverbindung von Wuhan in China nach Duisburg. Die Investition in eine Bahnstrecke zwischen den kenianischen Großstädten Nairobi und Mombasa. Der Ausbau des Hafens Gwadar in Pakistan, von dem aus Ölpipelines bis nach China führen könnten – all dies sind Bestandteile der »Neuen Seidenstraße«. Das mit Hunderten von Milliarden US-Dollar finanzierte chinesische Infrastrukturprogramm, das auch als Belt and Road Initiative (BRI) bekannt ist, erinnert schon dem Namen nach an jene Handelsverbindungen, die jahrhundertlang China mit dem Rest der Welt verbanden.

Deren Geschichte erzählt Thomas O. Höllmann in seinem Buch »China und die Seidenstraße. Kultur und Geschichte von der frühen Kaiserzeit bis zur Gegenwart«, das in der Reihe »Historische Bibliothek« der Gerda Henkel Stiftung erschienen ist. Höllmann, Präsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und emeritierter Professor für Sinologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München, kennt Ostasien dank zahlreicher Forschungsreisen aus eigener Anschauung. Für sein Werk stützt er sich daneben auf die Aufzeichnungen Gelehrter und auf archäologische Zeugnisse wie die Wandmalereien in den Höhlen von Dunhuang. Vor allem aber nutzt er historische Gedichte und Reiseberichte. Etwa jenen des chinesischen Gesandten Zhang Qian, der im 2. Jahrhundert v. Chr. bis nach Zentralasien reiste und dort – erfolglos – versuchte, eine militärische Allianz zwischen lokalen Herrschern und dem chinesischen Reich zu schmieden.

Zhang war damit eine der ersten namentlich bekannten Personen, die auf dem gigantischen Netzwerk der

Seidenstraßen unterwegs waren. Ihm folgten unzählige andere: Diplomaten, Abenteurer und vor allem Händler. Schon vor 2 000 Jahren verkauften sie über viele Zwischenstationen teure chinesische Seide bis nach Rom.

Leicht zu transportieren, diente Seide zudem als fast überall akzeptiertes wertstabiles Zahlungsmittel für Geschäfte aller Art. Auch die chinesischen Kaiser mischten gerne mit. Zwar lag der Handel offiziell unter ihrer Würde, doch maskierten sie ihn über ein raffiniertes System von »Tributen« und »Geschenken«. Ausländische Delegationen wussten deshalb schon im Vorhinein, wie viel Seide sie beispielsweise für eine Lieferung von Pferden erhalten würden.

Nicht immer lief dabei alles wie geplant, wie Höllmann in seinem mit vielen Anekdoten gespickten Buch belegt. So etwa, als der westtürkische Khagan im Jahr 618 dem chinesischen Kaiser Gaozu wertvolle Perlen schenken wollte. Der Kaiser wies das Geschenk jedoch mit der Bemerkung zurück, die Perlen seien doch »zu nichts gut«.

Während Händler viele Luxusgüter – neben Seide auch Keramik oder Tee – von Osten nach Westen verkauften, reisten Ideen und Weltanschauungen oft in die Gegenrichtung. So die Lehre des Siddhartha Gautama, den seine Anhänger als »Buddha« verehren, den »Erleuchteten«. Von Nordindien aus verbreiteten Mönche und Missionare den Buddhismus zunächst in Zentralasien und dann über die Seidenstraße in China, Korea, Japan und Vietnam. Aber auch Judentum, Christentum und Islam erreichten entlang der Handelsrouten den Fernen Osten.



Thomas O. Höllmann

China und die Seidenstraße

Verlag: C.H. Beck, München
2022

€ 34,-

Zu einem wahren Lesevergnügen wird diese Geschichte der Seidenstraße, weil Höllmanns Begeisterung für sein Thema auf jeder Seite spürbar ist. Achtzig farbige Bilder, meist von Kunstwerken, führen das Leben entlang der Handelsrouten vor Augen. Vor allem aber weiß Höllmann seine literarischen Quellen zu nutzen. Etwa, indem er den oft eher rauen Charme – und fehlenden Komfort – der Karawansereien mit Tagebucheinträgen eines japanischen Mönches lebendig werden lässt: »Das Kloster«, notiert der Mönch über eine offenkundig schäbige Herberge, »war äußerst ärmlich, die Mönche verhielten sich pöbelhaft und ordinär.« Und über einen anderen Aufenthalt weiß er zu berichten: »Unser Gastgeber war von seinem Charakter her ein Bandit, der die Menschen betrog.«

Auch das Treiben auf den Marktplätzen in den Städten, die praktischerweise bisweilen direkt an die Rotlichtviertel grenzten, beschreibt Höllmann äußerst plastisch. Und ebenso die abenteuerliche und gefährliche Reise der Händler, Gesandten und Prediger mitsamt ihrer Esel,

Yaks, Pferde und Elefanten entlang schier endlos scheinender Wüsten und über die eiskalten Pässe der zentralasiatischen Gebirge.

Höllmann zeichnet das faszinierende Bild eines Netzwerks, das es Menschen aus China, Indien und Europa ermöglichte, einander zu begegnen. Nicht immer verlief das konfliktfrei, aber zum Vorteil aller: finanziell, sozial und in Bezug auf den Austausch von Ideen und Innovationen.

Heute hingegen behinderten die politischen Spannungen zwischen China und westlichen Ländern den Austausch auch unter Wissenschaftlern zunehmend, schreibt Höllmann mit spürbarem Bedauern. Eine Tendenz, die sich zu verfestigen scheint. So hat die chinesische Führung kürzlich ein Anti-Spionage-Gesetz verschärft. Dieses verbietet nun die Weitergabe von Informationen, die eine nur vage definierte »nationale Sicherheit« sowie »nationale Interes-

sen« gefährden könnten. Einem Klima des offenen Meinungs Austausches dürfte das nicht zuträglich sein. Höllmanns Rückblick auf die jahrhundertalte bewegte Geschichte der Seidenstraßen und der Menschen, die sie bevölkerten, lässt zumindest hoffen, dass dies kein Dauerzustand bleibt.

Tobias Sauer ist Journalist. Er hat Politologie, Geschichte und Ethnologie studiert.

Gesetze und Urteile als Mittel des Naturschutzes

Weltweit werden Landschaften, Tiere oder Pflanzen zu Rechtsträgern. Ist das der Weg, den Planeten zu retten?

► Es war ein Paukenschlag am 29. April 2021: Das Bundesverfassungsgericht erklärte das Klimaschutzgesetz der Bundesregierung für unzulässig und forderte Nachbesserungen, um die Freiheitsrechte nachfolgender Generationen zu schützen. Das Urteil ist kein Einzelfall.

Überall auf der Welt wird Klima- und Umweltschutz immer öfter von Gerichten vorangebracht. Doch oftmals fehlen den Klagen Klägerin oder Kläger: In den meisten Ländern ist die Natur kein Rechtsträger. Das allerdings ändert sich zunehmend. Die Rechtsexpertinnen Laura Burgers und Jessica den Outer haben in »Das Meer klagt an!« Schlaglichter auf die Entwicklungen in den unterschiedlichen Weltregionen geworfen.

»Der Klimawandel ist in vollem Gange. [...] Das Ausmaß des Artensterbens ist heute so groß wie nie zuvor. Und dies, obwohl das Netz umweltrechtlicher Vorschriften sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene immer engmaschiger wird.« So schreibt es der Jurist Christian Rotta im Vorwort und umreißt damit das Problem. Rechtsträger sind Menschen oder Organisationen. Faktisch bedeutet das: »Schutzwürdig ist die Natur nur dann, wenn menschliche Interessen davon betroffen sind.« Die Natur hat keine Eigenrechte. Im Umweltrecht geht es stattdessen bislang darum, Pflichten für Menschen zu definieren.

Bereits vor mehr als 50 Jahren schlug der Juraprofessor und Umwelthiker Christopher Stone vor, auch Bäumen, Flüssen und anderen Natureinheiten Rechte zuzusprechen. Das

kleine Kompendium der niederländischen Autorinnen zeigt schnell auf, dass selbst dies eine »westliche« Sichtweise ist: Viele indigene Kulturen gehen wie selbstverständlich davon aus, dass der Natur Rechte innewohnen: »Man könnte die Anerkennung der Rechte der Natur als Übersetzung der indigenen Philosophie ins westliche Rechtssystem sehen«, schreiben Burgers und den Outer.

Auf der Reise, die das Buch mit seinen Leserinnen und Lesern unternimmt, begegnet man daher vielen Beispielen, in denen Gesetze, die der Natur Rechte einräumen, von Indigenen geschaffen wurden oder dem Schutz der Rechte der Indigenen dienen. So berichten die Autorinnen aus Nordamerika, wo die Indianergemeinschaft White Earth Nation dem Wasserrechte Rechte einräumte und damit auch dessen Lebensraum und Süßwasservorkommen unter Schutz stellte. Auf dieser Grundlage verklagt die White Earth Nation seit 2021 Minnesota. Dessen Oberigkeiten hatten einem Konzern erlaubt, für den Bau einer Ölpipeline Millionen Liter Wasser abzapfen zu lassen.

Das kolumbianische Verfassungsgericht folgte hingegen eher der Ratio des deutschen Klimaurteils, als es dem Fluss Atrato Rechte zusprach:



Laura Burgers,
Jessica den Outer

Das Meer klagt an!

S. Hirzel Verlag GmbH,
Stuttgart 2023

€ 15,-

Um die Welt für künftige Generationen zu bewahren, müsse die biologische und kulturelle Vielfalt erhalten werden. Die Natur müsse daher Rechtssubjekt sein.

Weitere Beispiele des Buches stammen aus Afrika, Asien, Ozeanien und natürlich Europa, darunter auch Deutschland. Bezogen auf Deutschland liegt der Schwerpunkt auf den Bestrebungen des Netzwerks »Rechte der Natur – Initiative Grundgesetzreform«, die Rechte der Natur in die Verfassungen mehrerer Bundesländer aufnehmen zu lassen. Den Weg dazu sollen Volksbegehren und anschließende Volksentscheide ebnen. Nicht zuletzt blickt das Buch auf internationale Entwicklungen wie die Bewegung »Stop Ecocide«, deren Ziel es ist, Ökozide in der Verantwortung des Internationalen Strafge-

richtshofs zu verankern und damit auf einem Level mit Kriegsverbrechen und Verbrechen gegen die Menschlichkeit.

Jedes Beispiel ist sehr strukturiert aufgebaut: Die Autorinnen erläutern die Hintergründe der Fälle ebenso wie die kulturellen Rahmenbedingungen. Sie schildern, wer stellvertretend für die Natur Klage führen kann und was die Gesetze in der Praxis bewirkt haben. So viel sei verraten: Ähnlich wie in Deutschland, wo die aktuelle Bundesregierung mit der Streichung der Sektorziele nach Ansicht vieler Fachleute gerade mit dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts bricht, bleibt die Durchsetzung von Gesetzen auch anderenorts oft hinter Wirtschaftsinteressen zurück.

Nur dort, wo die Rechte der Natur in der Verfassung festgeschrieben

sind, scheinen sie zu greifen. Bislang aber haben einzig in Ecuador die Rechte der Natur umfassend Verfassungsrang. Die 2008 neu geschriebene Verfassung zielt schon laut Präambel auf ein bürgerliches Zusammenleben »in Vielfalt und Harmonie mit der Natur, für das gute Leben«. »Das Meer klagt an!« könnte mit seinen Beispielen inspirieren und mehr Menschen diesem Beispiel folgen lassen. Das Buch liest sich leicht, ist klar verständlich und sehr informativ, wenn auch ohne Unterhaltungswert. Wer weiter in die Tiefe gehen möchte, findet zu allen Beispielen hilfreiche Links.

Björn Lohmann ist Wissenschaftsjournalist in Essen.

Aztekische Geschichtsschreibung

Das Bild der Azteken wird stark durch europäische Quellen bestimmt. Doch welche Sicht hatte dieses Volk auf sich selbst?

► Wäre es möglich, Politik, Gesellschaft und Kultur des mittelalterlichen Frankreich nur anhand archäologischer Ausgrabungen und ein paar zeitgenössischer englischer Texte zu erfassen? Wohl kaum, argumentiert die amerikanische Historikerin Camilla Townsend. Und sie bemängelt, dass so eine unzureichende Vorgehensweise in der Geschichtsschreibung über die Azteken lange Zeit vorherrschend gewesen sei. Die Sicht auf dieses mittelamerikanische Volk erscheint durch eine »europäische Brille« verzerrt. Besonders der Brauch des Menschenopfers habe das Bild geprägt, ebenso die Frage, warum dieses große, mächtige Reich unter Moctezuma II. von den europäischen Konquistadoren innerhalb weniger Jahre ab 1519 erobert werden konnte.

Townsend wählt in ihrem Buch andere Quellen, mit denen sie sich der aztekischen Kultur nähert. Denn

die Überlebenden der Kämpfe und der von den Europäern ins Land gebrachten Seuchen erlernten von den neuen Herrschern die lateinische Schrift, mit der sie in der Landessprache Nahuatl ihre Geschichte aufzeichneten. Auf diese »Nahuatl-Annalen« greift Townsend zurück. Sie enthalten Erinnerungen sowie ehemals mündliche Überlieferungen.

In acht Kapiteln zeichnet die Autorin die Entstehung des aztekischen Volkes (vor 1299) über die Ankunft der Spanier (1519) und ihre Eroberungen (1520–1521) bis in das 17. Jahrhundert nach. Indem Townsend die Ankunft der Spanier nicht als zeitliches Ende, sondern als Mittelpunkt ihrer Darstellung wählt, gibt sie auch dem Weiterleben aztekischer Kultur in den nachfolgenden Generationen Raum.

Die »Nahuatl-Annalen« erschließen sich erst, wenn man die Sprache beherrscht. Sie liefern ein Gegen-



Camilla Townsend

Fünfte Sonne

C.H. Beck, München 2023

€ 32,-

stück zu den europäischen Quellen. Zwar gab es den Brauch des aus europäischer Sicht barbarisch erscheinenden Menschenopfers. Er geht auf den religiösen Glauben zurück, dass bereits vier Universen untergegangen seien und erst durch die Selbstopferung des gottgläubigen Nanahuatzin die derzeitige fünfte Sonne geschaffen wurde. Doch standen Menschenopfer nicht im Zentrum des alltäglichen Lebens. Auch aztekische Kriegszüge gegen andere Völker und Städte waren nicht religiös bestimmt, sondern Folgen machtpolitischer Auseinandersetzungen und der durch weit verzweigte, dynastische Heiratspolitik hervorgerufenen Spannungen. Daneben zeigen die »Nahuatl-Annalen«, dass den Azteken die technische Unterlegenheit gegenüber den spanischen Eroberern bewusst gewesen sei, so Townsend. Ebenso wurde ihnen neben europäischen Krankheiten zum Verhängnis, dass sich die Konquistadoren der Hilfe von Völkern bedienten, die von den Azteken unterdrückt worden waren. Hernán Cortez nutzte für Dolmetschertätigkeiten die Sprachbegabung der bei Coatzacoalcos geborenen und in die Sklaverei verkauften Malinche, die später seine Geliebte wurde.

Zeitgenössische europäische Darstellungen spiegeln die Sichtweise des Siegers, der sich nicht nur militärisch, sondern auch kulturell überlegen fühlte. Zwar sind sie sprachlich leichter zugänglich, doch geben sie die historische Wahrheit nur zu einem Teil oder unter oft verzerrter Perspektive wieder. Durch ihren Zugang über die »Nahuatl-Annalen« zeigt Townsend jedoch, dass es sich lohnt, die »europäische Brille« abzulegen. Dann erkennt man eine vielschichtige, komplexe Kultur, die die Eroberung überlebte und sich neu ausrichtete. Allerdings bergen diese Texte ihre eigenen quellenkritischen Probleme. Denn sie entstanden erst nach der Eroberung, als die Kinder und Enkel dieses Volkes sich europäischen Einflüssen anpassten. Auch hier muss also nach historischer Wahrheit, Legende, Beeinflussung sowie einer sich eventuell bewusst

von den Kolonialherren abgrenzenden Selbstdarstellung gefragt werden.

Townsend legt insgesamt ein spannendes Buch vor, das durch eine kommentierte Bibliografie der »Nahuatl-Annalen« ergänzt sowie durch ein Register erschlossen wird. Sie richtet sich an Leserinnen und Leser mit Interesse für die aztekische Geschichte oder auch für die europäische Kolonialgeschichte. Allerdings irritiert es, dass die Autorin das wichtige Kapitel »Wie Wissenschaftler die Azteken erforschen« erst an das Ende ihres Buches setzt. Zwar äußert sie schon einleitend Kritik an der bisherigen Geschichtsschreibung. Doch könnte man dieses Kapitel dann auch am Beginn ihrer Darstellung erwarten.

Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.

Spektrum
der Wissenschaft

DIE WOCHE

Das wöchentliche digitale Wissenschaftsmagazin

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.

**IM
NEUEN
LOOK!**

App & PDF
als Kombipaket
im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **33**
17.08.
2023

PFAS-VERBOT

Eine Welt ohne Teflon?

Die europäische Chemikalienagentur ECHA erwägt weit reichende Beschränkungen für fluoridierte Chemikalien, die in Düsentriebwerken, Elektroautos, Kühlsystemen, Halbleitern und unzähligen Endprodukten verwendet werden. Das hätte Folgen für viele Lebensbereiche.



SCHREIBEN ZUR SELBSTERKENNTNIS

»Ziel ist es, die Gedanken ungefiltert zu Papier zu bringen«



KI-KONTROVERSE

Leidet GPT-4 an Gedächtnisschwund?

- » Eisriesen: Hoffnungen auf einen baldigen Besuch schwinden
- » Quasiteilchen: Physiker finden »Dämon« in supraleitendem Kristall
- » Kleingewässermonitoring: Zu viele Pestizide gelangen ins Wasser
- » Gletschermumie: Halbglatze, Urbauer, Ötzi

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

