

Spektrum

der Wissenschaft

Wie entstand das Leben?

Vom Gestein zur ersten Zelle

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

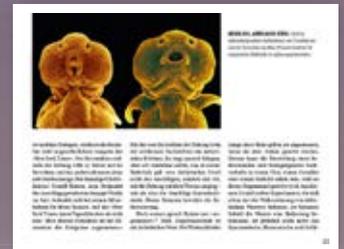
KOSMOLOGIE **Die frühesten Galaxien**
NEUROWISSENSCHAFT **Wie das Gehirn die Welt konstruiert**
INDUSTRIE **Klimaschonende Stahlproduktion**



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)

Anfänge

Auch wenn es keineswegs so geplant war: Dieses Heft von »Spektrum der Wissenschaft« scheint ein bisschen unter dem Motto »Wie alles anfing« zu stehen. Damit meine ich aber nicht etwa unsere Erstaussgabe aus dem Jahr 1978, sondern viel grundlegendere Ereignisse, die wesentlich länger in der Vergangenheit liegen. Am weitesten

zurück blickt dabei der Artikel ab S. 58, der die Zustände im Universum unmittelbar nach dem Urknall beleuchtet. Neue Experimente sollen nun die extremen Bedingungen im damaligen »Quark-Gluon-Plasma« in bisher unerreichter Präzision nachbilden.

Um die frühesten Galaxien dreht sich der Beitrag ab S. 66. Bereits die ersten Ergebnisse des James-Webb-Weltraumteleskops sorgten unter Fachleuten für beträchtliche Unruhe, da sie dem allgemein akzeptierten kosmologischen Standardmodell zu widersprechen schienen. Konnten wirklich derart früh in der Entwicklung des Universums schon Sterne und Galaxien entstanden sein? Jetzt gilt es, die Unstimmigkeiten durch vorsichtige Anpassungen des Standardmodells zu bereinigen – oder diese notfalls durch grundsätzlich andere Erklärungen als bisher aus der Welt zu schaffen.

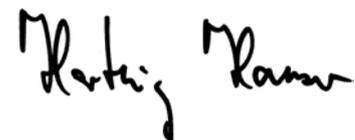
Und schließlich beschreibt unser Titelthema ab S. 12 den Stand des Wissens darüber, wie das Leben auf der Erde entstand. Die Chemikerin Martina Preiner vom Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg plädiert darin für eine stärkere fächerübergreifende Zusammenarbeit, um dem größten Rätsel der Biologie auf die Spur zu kommen: wie sich in einer unbelebten Umwelt zunächst organische Moleküle und

daraus schließlich die ersten Organismen bilden konnten.

Doch auch in die Zukunft blicken wir mit dem Auftakt unserer neuen dreiteiligen Serie zum Thema »Klimaneutrale Industrie« (S. 42). In der vorliegenden Ausgabe geht es neben einem allgemeinen Überblick vor allem um die Stahlherstellung, die weltweit rund sieben Prozent des gesamten CO₂-Ausstoßes verursacht. Durch Direktreduktion des Eisenerzes mit Wasserstoff, der dann mittels erneuerbarer Energien produziert werden soll, ließe sich der wertvolle Werkstoff künftig wesentlich umweltschonender herstellen. Da Hochöfen allerdings über Jahrzehnte im Betrieb sind, ist die Umstellung ein Langzeitprojekt, das jetzt schnell angegangen werden muss.

Daher ist das in gewisser Hinsicht ebenfalls – ein Anfang.

Herzlich, Ihr




Hartwig Hanser

Redaktionsleiter

hanser@spektrum.de

In dieser Ausgabe

Martina Preiner

Wie entstand das Leben auf der Erde? Diese Frage fasziniert die Leiterin der Max-Planck-Forschungsgruppe »Geochemische Protoenzyme«. Ab S. 12 beschreibt sie, wie man einer Antwort näherkommen kann.



György Buzsáki

Der Systemneurowissenschaftler ist überzeugt: Das Gehirn ist keine Tabula rasa, sondern steckt von Beginn an voller Informationen, die sinnvoll mit Erfahrungen verknüpft werden müssen (S. 34).



Marc-Olivier Renou (links), Antonio Acín (Mitte), Miguel Navascués

Die drei Physiker haben ein Experiment erdacht, dass die Existenz einer Quantentheorie ohne imaginäre Zahlen ausschließt (online unter [spektrum.de/aktion/zusatzinhalte](https://www.spektrum.de/aktion/zusatzinhalte)).

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM

TITELTHEMA

12 **Vom Gestein zur ersten Zelle**

Fachübergreifende Forschungsarbeiten liefern Hinweise darauf, wie das Leben entstand.

Von Martina Preiner

FORSCHUNG AKTUELL

- 22 **Die Überlebenden der Kälte**
Erbgutanalysen zeichnen ein bewegtes Bild der europäischen Steinzeitbevölkerung.
- 25 **Waldbrände fördern Ozonabbau**
Die überraschende Aktivität von Rauchpartikeln.
- 28 **Sind KIs bald die besseren Mathematiker?**
Mehrere Forschungsgruppen arbeiten momentan daran, den Algorithmen das Rechnen beizubringen.

IMPRESSUM

SPRINGER'S EINWÜRFE

- 33 **Patentierete Intelligenz**
Expertise für KI-Forschung wandert zunehmend in den privaten Sektor ab.

KOGNITION

34 **Die Konstruktion der Welt**

Unser Gehirn ist bei der Geburt keineswegs nur ein unbeschriebenes Blatt.

Von György Buzsáki

SERIE: KLIMANEUTRALE INDUSTRIE (TEIL 1)

CO₂-EMISSIONEN

42 **Kraftakt für die Industrie**

Der lange Weg zu mehr Nachhaltigkeit.

Von Verena Tang

TECHNOLOGIE

47 **Mit Wasserstoff zu sauberem Stahl**

Direktreduktion soll Hochöfen ersetzen.

Von Davide Castelvechi

TITELBILD:
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (ERSTELLT MIT DALL-E)

SCHLICHTING!

- 54 **Kann man polarisiertes Licht sehen?**
Das geübte Auge erkennt die Schwingungsebene von Strahlung.

57 IM BILD

TEILCHENBESCHLEUNIGER

58 **Ein Löffelchen Ursuppe**

Verbesserte Experimente sollen die extremen Bedingungen im frühen All präziser nachbilden als je zuvor.

Von Clara Moskowitz

KOSMOLOGIE

66 **Wie standhaft ist das Standardmodell?**

Neue Beobachtungen erfordern Nachjustierungen bei der Theorie zur Entwicklung der ersten Galaxien.

Von Rebecca Boyle

72 LESERBRIEFE

FREISTETTERS FORMELWELT

73 **Ein Damm zwischen zwei Ozeanen**

Ruhm und Unsterblichkeit in der Wissenschaft.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

74 **Mandelpinskis**

Eine unscheinbare Änderung an einer Formel eröffnet den Weg zu neuen Objekten der fraktalen Geometrie.

Von Christoph Pöppe

80 FUTUR III

82 VORSCHAU

Weitere Beiträge

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

REZENSIONEN

QUANTENPHYSIK

Die Realität braucht imaginäre Zahlen



IRISAN / GETTY IMAGES / ISTOCK

12 Entstehung des Lebens



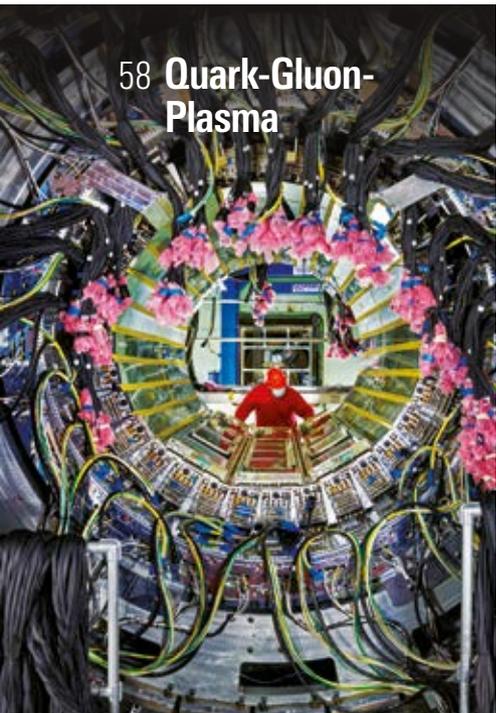
STEFANIA INFANTE / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2022

34 Kognition



PANKSVATUNNY / GETTY IMAGES / ISTOCK

42 Klimaneutrale Industrie



CHRISTOPHER PAVNE

58 Quark-Gluon-Plasma



NASA/WMAP SCIENCE TEAM (WWW.NASA.GOV/FUNCTION/WEBSITE/STARSGALAXIES/FUSE_FOSSIL_GALAXIES/HTML)

66 Kosmisches Standardmodell



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

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

Liebhaber der Blüte

Die brasilianischen »Restingas« sind tropische und subtropische feuchte Laubwälder an den östlichen Küsten des Landes. Hier lebt eine Amphibienart namens Izecksohns Brasilianischer Laubfrosch (*Xenohyla truncata*). Die Tiere naschen mit Vorliebe an den Früchten und dem Nektar der Baumart *Cordia taguayensis*. Sie sind damit die einzigen bekannten Amphibien, die bevorzugt pflanzliche Kost zu sich nehmen.

Auf der Suche nach Nektar versenken sich die Laubfrösche regelrecht in die Blüten, so dass nur noch ihr Hinterteil zu sehen ist. Wenn sie sich wieder herausgearbeitet haben, sind sie über und über mit Pollen bedeckt, den sie wahrscheinlich zu den nächsten Blüten weitertragen. Vermutlich gehören sie damit zu den Bestäubern des Baums – empirisch sicher bestätigt ist das allerdings noch nicht.

Food Webs 10.1016/j.fooweb.2023.e00281, 2023



ASTRONOMIE

Erstmals Schwarzes Loch mit Jet fotografiert

► Astronominen und Astronomen ist es zum ersten Mal gelungen, im Radiowellenbereich ein Schwarzes Loch gemeinsam mit seinem Jet abzulichten. Die Aufnahme zeigt die Umgebung des extrem massereichen Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie Messier 87 (M87). Das Monster treibt einen gerichteten Gasstrom an, einen so genannten Jet. Er entspringt dort, wo eine leuchtende Materiescheibe um das Schwarze Loch herumwirbelt. Ein Panoramabild, das all diese Strukturen gleichzeitig zeigt, fingen nun Wissenschaftler um Ru-Sen Lu von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften ein. Sie bedienten sich dabei eines weltweiten Netzwerks aus Radioteleskopen. Die Geräte arbeiten so zusammen, dass sie gemeinsam ein virtuelles Teleskop von der Größe der Erde ergeben.

Auf der Aufnahme ist das Schwarze Loch selbst nicht zu erkennen, da es kein Licht aussendet. Doch es wird von einer heißen Materiescheibe umkreist, die Strahlung abgibt und

somit sichtbar ist. Die Scheibe erscheint als ringförmige Struktur und lässt sich mit Radioteleskopen beobachten und abbilden. Den dunklen Fleck in ihrem Innern bezeichnen Astronomen als »Schatten« des Schwarzen Lochs.

Schwarze Löcher verschlingen Materie, die auf sie einstürzt, stoßen aber auch gewaltige Jets aus, die hunderttausende Lichtjahre lang sein können. Das Massemonster im Zentrum von M87 und seinen Materiestrom haben Fachleute schon früher jeweils auf separaten Aufnahmen abgelichtet. Das neue Panoramabild zeigt beide gemeinsam im Frequenzbereich der Radiowellen. Daraus lassen sich einige wichtige Schlüsse ziehen.

Denn es ist noch ungeklärt, wo genau die Jets von Schwarzen Löchern starten. Sie könnten weiter draußen in der Materiescheibe entspringen, ähnlich einem Teilchenwind (das so genannte Blandford-Payne-Szenario). Oder sie entstehen in unmittelbarer Nachbarschaft des Massemonsters und werden von der schnell rotierenden Raumzeit herausgeschleudert – der so genannte Blandford-Znajek-Prozess. Die neuen Beobachtungen legen nahe, dass letzterer Mechanismus am Werk ist.

Nature 10.1038/s41586-023-05843-w, 2023

BIOLOGIE

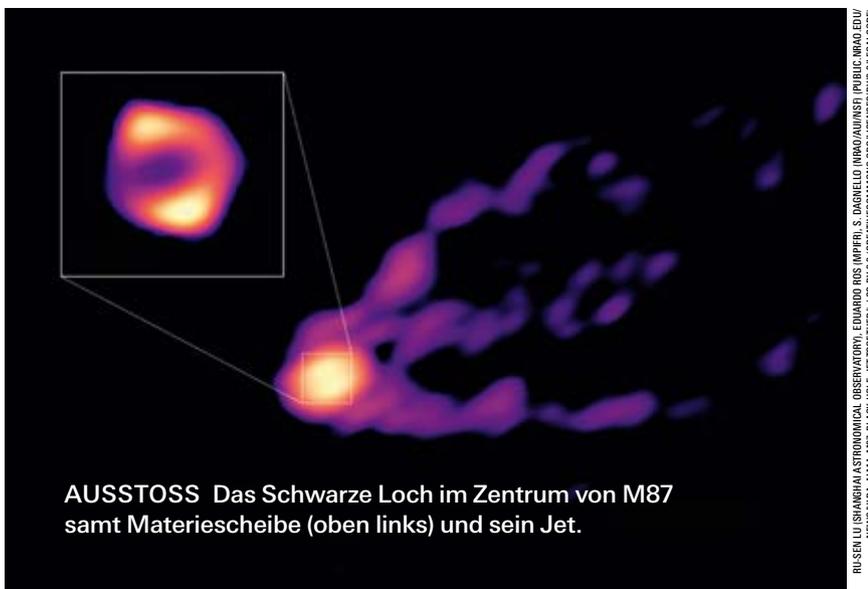
Hyänen-WG mit Beutetieren

► Das Lewa-Naturschutzgebiet im Norden Kenias gilt als eines der schönsten und bestgeschützten Wildtierreservate des Landes – und lockt zahlreiche Wissenschaftler an, die hier Studien durchführen. Marc Dupuis-Désormeaux von der York University in Toronto und seine Arbeitsgruppe haben dort Tüpfelhyänen (*Crocuta crocuta*) beobachtet. Diese größte aller Hyänenarten besiedelt weite Teile Afrikas, jagt vorwiegend größere Wirbeltiere und lebt in Gruppen mit komplexer Sozialstruktur zusammen, die mehr als 100 Tiere umfassen können. Als die Forscher und Forscherinnen die unterirdischen Bauten der Hyänen untersuchten, stießen sie auf unerwartete Wohngemeinschaften.

Zwischen 2016 und 2019 haben sich mindestens zwei Familienverbände der Räuber ihre Wohnstätten nachweislich mit potenziellen Beutetieren geteilt. Wie Kamerafallen festhielten, war ein Bau außer von sieben Hyänen auch von zwei Stachelschweinen (*Hystrix cristata*) und drei Warzenschweinen (*Phacochoerus africanus*) bewohnt. Einen weiteren Bau besiedelten elf Hyänen, zwei Stachelschweine und sechs Warzenschweine. Ein solches Zusammenleben war für Afrika bislang nicht nachgewiesen.

Die Tiere kamen alle durch den gleichen Eingang und verpassten sich manchmal nur um zwei Minuten. Allerdings, so vermutet die Arbeitsgruppe, nutzten sie wohl nicht dieselben Schlafhöhlen, sondern hielten sich in unterschiedlichen Bereichen der verzweigten Systeme auf. Sicher sagen lässt sich das freilich nicht, ohne die Höhlen auszugraben – wovon die Biologen absahen.

Tüpfelhyänen reißen sowohl Warzen- als auch Stachelschweine, wenngleich sie Letztere wegen deren unangenehmer Bewaffnung eher meiden. Das geht aus Analysen von Kotproben hervor, die aus dem Umfeld von



AUSSTOß Das Schwarze Loch im Zentrum von M87 samt Materiescheibe (oben links) und sein Jet.

RU-SEN LU (SHANGHAI ASTRONOMICAL OBSERVATORY), EDUARDO ROOS (INPER), S. PACHELLO (INPER), J. HUBER (MADRID), NEWS/VEBA-ALMA-1M7-BLACK-HOLE-JET/GETTY/CC BY 2.0 (CREATIVE COMMONS ORBUCC/NEWS/VEBA-ALMA-1M7-BLACK-HOLE-JET/GETTY/CC BY 2.0)



SOZIAL Tüpfelhyänen leben in komplexen Gemeinschaften.

Hyänenbauten stammen. Rings um die beiden Höhlensysteme, in denen die eigenartigen Wohngemeinschaften hausten, wiesen die Forscher jedoch keinerlei Überreste von Warzen- oder Stachelschweinen in den Ausscheidungsprodukten der Räuber nach. Womöglich deutet das auf abweichende Ernährungsvorlieben verschiedener Hyänengruppen hin.

Innerhalb der Höhlen dürften kollektive Überraschungsangriffe wegen der Enge kaum möglich sein – und Verteidiger klar im Vorteil. Zudem nutzen die Tiere den Zugangsbereich zu unterschiedlichen Zeiten: Warzenschweine sind vor allem tagaktiv, während Stachelschweine und Hyänen den Bau hauptsächlich nachts verlassen. Vielleicht profitieren die Stachelschweine sogar von der Beute der Räuber: Sie nagen gern an Knochen, welche die Hyänen bisweilen heimbringen.

African Journal of Ecology 10.1111/aje.13153, 2023

PHYSIK

Künstliche Intelligenz findet neue Wasserstoffstruktur

Ein selbstlernender KI-Algorithmus hat eine neue kristalline Struktur festen Wasserstoffs aufgespürt, die bisher weder in Experimenten noch in theoretischen Berechnungen aufgetaucht ist. Wie eine Arbeitsgruppe um Yubo Yang von der University of Illinois in Urbana-Champaign berichtet, entsteht der Kristall bei Drücken von einigen hundert Milliarden Pascal – das ist das Mehrmillionenfache des Luftdrucks auf

Meereshöhe – und Temperaturen um 1000 Kelvin. Die Wasserstoffmoleküle sind unter solchen Verhältnissen nicht mehr annähernd kugelförmig, sondern eiförmig verzerrt.

Der KI-Algorithmus hat in seinen Simulationen außerdem ermittelt, wie sich Wasserstoff unter weniger extremen Bedingungen verhält, und dabei die bereits bekannten Strukturen dieser Substanz korrekt reproduziert. Das macht die Fachleute zuversichtlich, dass die neu identifizierte kristalline Phase tatsächlich existiert. Bisher ist dies jedoch nicht unabhängig nachgewiesen.

Das Team nutzte ein Simulationsverfahren namens Quanten-Monte-Carlo, um die Positionen der Wasserstoffmoleküle im Kristall zu berechnen. Der Algorithmus erlaubt es, die Berechnungen auf sehr viel mehr Atome zu erweitern als zuvor möglich, wodurch die Strukturbestimmungen verlässlicher werden. Yang und Co. testeten zunächst, ob sich damit Wasserstoffstrukturen, deren Existenz bereits nachgewiesen ist, korrekt berechnen lassen – mit Erfolg. Dabei stellten sie fest, dass die Simulationen auch etwas bislang Unbekanntes vorhersagen.

Schon bei vorherigen Simulationen habe es Anzeichen auf eine kristalline Phase mit eiförmig verzerrter Molekülgestalt gegeben, berichtet Mitautor David Ceperley. Allerdings hätten diese mit zu wenigen Atomen gerechnet, um den Effekt gut abzubilden. Der selbstlernende KI-Algorithmus habe die Struktur nun deutlich zum Vorschein gebracht. Sie experimentell nachzuweisen, ist allerdings wegen der erforderlichen Drücke und Temperaturen außerordentlich schwierig.

Physical Review Letters 10.1103/PhysRevLett.130.076102, 2023

ÖKOLOGIE

Polare Eisschilde schmelzen rasant

Der jährliche Massenverlust der antarktischen und grönländischen Eisschilde ist seit 1992 auf das Vierfache gestiegen und mittlerweile für ein Fünftel des globalen Meeresspiegelanstiegs verantwortlich. Das belegen Satellitendaten, gesammelt und ausgewertet im Rahmen des internationalen Forschungsprojekts »Ice Sheet Mass Balance Intercomparison Exercise« (IMBIE). Laut neuestem IMBIE-Bericht haben die polaren Eisschilde zwischen 1992 und 2020 etwa 7560 Milliarden Tonnen verloren. Diese Wassermenge würde einen Würfel mit einer Kantenlänge von rund 20 Kilometern füllen.

Die Schmelze erreichte 2019 ihren vorläufigen Höhepunkt, als dem Grönland- und dem Antarktis-Eisschild rund 612 Milliarden Tonnen verloren gingen. Verursacht hatte dies eine Hitzewelle im arktischen Sommer, die in Grönland einen Schwund von etwa 444 Milliarden Tonnen verursachte; hinzu kamen Verluste in der Antarktis von 168 Milliarden Tonnen. Das Abtauen der polaren Eisschilde hat den global gemittelten Meeresspiegel seit 1992 um 21 Millimeter angehoben, was einem Fünftel des gesamten Meeresspiegelanstiegs in jenem Zeitraum von zirka 100 Millimetern entspricht.

In den frühen 1990er Jahren hatte das Abschmelzen der polaren Eisschilde noch lediglich 5,6 Prozent zum Meeresspiegelanstieg beigetragen. Seither hat sich dieser Anteil drastisch erhöht. Setzt sich der Eisschwund ähnlich rapide fort wie bisher, wird er – laut Prognosen des Intergovernmental Panel on Climate Change – bis zum Ende des Jahrhunderts zwischen 148 und 272 Millimeter zur global gemittelten Meeresspiegelerhöhung beitragen haben.

»Die kontinuierliche Überwachung der Eismassen ist entscheidend, um ihr künftiges Verhalten in einer wärmeren Welt vorherzusagen«, sagt Inès

Otosaka von der University of Leeds in Großbritannien, leitende Wissenschaftlerin bei IMBIE. »Nur so können wir die damit verbundenen Risiken einschätzen, denen sich Menschen, die in Küstenregionen wohnen, weltweit stellen werden müssen.« Der aktuelle IMBIE-Bericht ist der dritte seiner Art; an ihm haben 68 Expertinnen und Experten mitgearbeitet. Sie werten permanent die Messungen von 17 verschiedenen Satellitenmissionen aus.

Earth System Science Data 10.5194/essd-15-1597-2023, 2023

GESCHICHTE

Grönlands Wikinger nutzten Holz aus Nordamerika

▶ Trauben und Holz habe Leif Eriksson mitgebracht, als er von seiner Fahrt gen Westen zurückkehrte. So berichten es überlieferte Erzählungen, die von der ersten Entdeckungsreise grönländischer Wikinger nach Nordamerika handeln. Tatsächlich war Holz bei den nordischen Siedlern, die seit 986 n. Chr. an der Westküste Grönlands lebten, außerordentlich knapp. Nur wenige Baumarten gedeihen auf dem kargen Land, und ihr niedriger, windzerzauster Wuchs machte sie als Baumaterial für größere Konstruktionen ungeeignet. Nun bestätigen archäologische Befunde: Die Wikinger importierten wirklich Bauholz aus Nordamerika.

Insgesamt zehn Holzteile, die an mittelalterlichen grönländischen Siedlungsplätzen gefunden wurden, stammen zweifelsfrei aus Nordamerika, berichtet Lísabet Guðmundsdóttir von der Universität von Island in Reykjavik. Die Archäologin hat mehr als 8500 hölzerne Artefakte aus den Wikingersiedlungen Vestribyggð und Eyribyggð mikroskopisch untersucht und die jeweilige Baumart bestimmt. Den größten Anteil des Materials machte – neben einheimischen Gewächsen – Lärchen- und



HEIMSTATT
Wikingerlager
»L'Anse aux
Meadows«
(restauriert).

Fichtenholz aus, das angeschwemmt und importiert wurde. Kiefern- und Eichenholz gehörte ebenfalls zu den Importwaren; letzteres wohl in Form von Fassdauben, die von den Siedlern weiterverarbeitet wurden. Bei diesen Baumarten lässt sich schwer nachweisen, ob sie aus Nordamerika kamen, denn sie wachsen auf beiden Seiten des Atlantiks. Die grönländischen Wikinger führten bekanntlich Holz aus Nordeuropa ein – sowohl in Gestalt kompletter Stämme als auch verarbeiteter Stücke, angeliefert von Schiffen aus Island.

Zwei Holzsorten, die Guðmundsdóttir auf Grönland identifizierte, können aber nicht aus Europa stammen: Hemlocktanne und Banks-Kiefer. Beide gedeihen an den Ufern des Sankt-Lorenz-Golfs südwestlich von Neufundland, nicht weit entfernt vom einzigen bekannten Wikingerstützpunkt in Nordamerika, »L'Anse aux Meadows« auf Neufundland. Lediglich vereinzelte, kleine Stücke dieses Materials lassen sich auf Grönland finden. Es war offenbar der Oberschicht vorbehalten, denn sämtliche Artefakte aus nordamerikanischen Hölzern tauchten im heutigen Igaliku auf, wo im 12. Jahrhundert ein bedeutendes Gehöft mit dem Namen Garðar als Bischofssitz diente.

Expeditionen nach Nordamerika scheinen ein fester Teil der grönländischen Siedlungsgeschichte gewesen zu sein, wie aus Funden und historischen Überlieferungen hervorgeht. Über mehrere Jahrhunderte hinweg fuhren offenbar immer wieder Schiffe dorthin und brachten auf dem Rückweg sowohl Holz als auch andere Waren mit. Die Reisen endeten erst im 14. Jahrhundert, als die grönländischen Siedlungen nach und nach aufgegeben wurden.

Antiquity 10.15184/aqy.2023.13, 2023

BIOPHYSIK

Warum große Tiere relativ langsam sind

▶ Große Tiere bewegen sich tendenziell langsamer fort als mittelgroße, andernfalls würden sie überhitzen. Zu diesem Schluss kommt ein Forschungsteam um Alexander Dyer von der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Die Wissenschaftler haben theoretische Berechnungen angestellt und experimentelle Daten von mehreren hundert Tierarten ausgewertet.

Je größer ein Lebewesen, umso länger und kräftiger sind üblicherweise seine Fortbewegungsorgane – gleichgültig, ob es sich um Beine, Flügel oder Flossen handelt. Mit längeren und stärkeren Extremitäten lassen sich ausgreifendere Bewegungen machen, weshalb größere Tiere schneller vorankommen sollten als kleinere. Dem ist auch so, aber nur bis zu einer ungefähr mittleren Statur. Nehmen die Körpermaße noch weiter zu, stagniert das Fortbewegungstempo oder sinkt sogar wieder. So sind Finnwale (zirka 70 Tonnen) durchschnittlich mit etwa 9 Kilometer pro Stunde unterwegs, die viel stattlicheren Blauwale (etwa 140 Tonnen) aber nur mit 7,5 Kilometer pro Stunde.

Die Forschungsgruppe liefert eine Erklärung dafür: Große Lebewesen werden ihre Körperwärme nicht so rasch los wie kleine. Denn die Oberfläche wächst mit der zweiten Potenz, das Volumen hingegen mit der dritten. Die Wärme entsteht im gesamten Volumen, fließt aber lediglich über die Oberfläche nach außen ab. Deshalb sind Riesen stärker von Überhitzung bedroht als Zwerge.

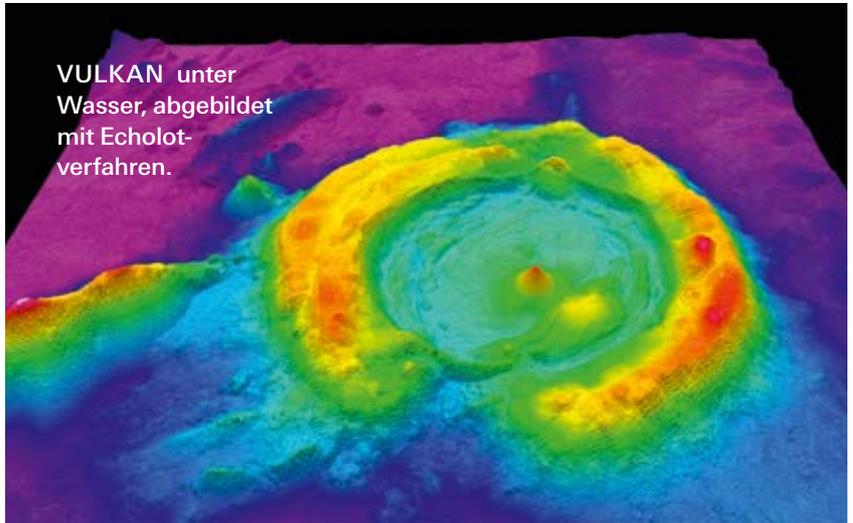
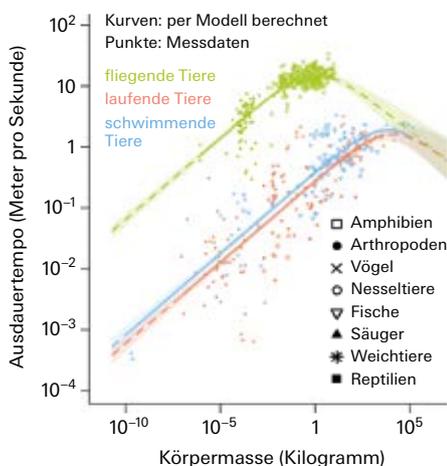
Dyer & Co. haben ein mathematisches Modell entwickelt, mit dem sie

das Ausdauerempo von fliegenden, laufenden und schwimmenden Tieren berechnen können. Die Gleichungen berücksichtigen die Masse des jeweils betrachteten Lebewesens, den Wärmeaustausch mit der Umgebung sowie die Effizienz der Fortbewegung in Luft, Wasser oder an Land. Mit diesem Formelapparat hat das Team die Wandergeschwindigkeiten diverser Tierarten ermittelt und eine höckerförmige Kurve erhalten: Mittelgroße Organismen sind am schnellsten, leichtere und schwerere jeweils langsamer. Der Vergleich mit gemessenen Daten von mehreren hundert Spezies zeigt in dem Bereich, für den empirische Werte vorliegen, eine gute Übereinstimmung.

»Muskeln haben eine Effizienz von vielleicht 20 bis 30 Prozent«, sagt Dyer, »das heißt, 70 bis 80 Prozent der aufgewendeten Stoffwechselenergie wandeln sich in Wärme um.« Weil große Lebewesen diese Wärme gemächlicher an die Umgebung abgeben als kleine, müssten sie mehr Pausen einlegen, um abzukühlen. »Oberhalb eines bestimmten Körpergewichts begrenzt das die Strecke, die sie sich pro Zeit zurücklegen lässt, in zunehmendem Ausmaß.«

PLoS Biology 10.1371/journal.pbio.3001820, 2023

OPTIMUM Mit steigender Körpermasse wächst das Ausdauerempo einer Tierart zunächst an, fällt dann aber wieder ab.



SUBMARINE RING OF FIRE 2012 EXPLORATION AND MDAVENTS PROGRAM

GEOWISSENSCHAFTEN

20 000 Berge unter dem Meer

▶ Mit Hilfe von Satellitendaten hat eine Forschungsgruppe um Julie Gevorgian von der University of California, San Diego, 19 325 bisher unbekannte Unterwasserberge in den Ozeanen identifiziert. Es handelt sich vor allem um Vulkane, die weniger als 2500 Meter emporragen und für deren Entdeckung frühere Messdaten nicht exakt genug waren. Sie haben vermutlich großen Einfluss auf Meeresströmungen und die marine Artenvielfalt. Wichtig sind solche Funde auch für U-Boote, die immer wieder unbekannte Erhebungen am Meeresgrund rammen. Bis heute ist nur etwa ein Viertel des Meeresbodens kartiert; der große Rest ist unerschlossen.

Das Team hat für seine Untersuchungen schwache Gravitationseffekte genutzt. Unterwasserberge ziehen wegen ihrer Masse das umgebende Wasser an, wodurch sich die Meeresoberfläche über ihnen geringfügig aufwölbt. Über Tiefseegräben und anderen Absenkungen tritt der gegenteilige Effekt ein. Satelliten messen solche »Wasserdellen« mit Radarwellen – was es erlaubt, großräumige Karten des Meeresbodens zu erstellen, die Berge, Schluchten,

Gebirgrücken und Kontinentalränder zeigen.

Neue, hochauflösende Daten von Erdbeobachtungssatelliten wie CryoSat-2 oder SARAL machen selbst kleinere Unterwasserberge ab etwa einem Kilometer Höhe sichtbar. Die Erhebungen, die Gevorgian und ihre Gruppe damit aufgespürt haben, sind überwiegend vulkanischen Ursprungs. Denn Hebung, Senkung und Erosion spielen am Ozeanboden kaum eine Rolle, Vulkanismus allerdings schon. An den untermeerischen Rücken, wo Platten ozeanischer Kruste aneinandergrenzen, steigt permanent Magma empor und lässt zahlreiche Schlotte entstehen. Auch weit entfernt davon bildet aufsteigendes Magma so genannte Hotspots mit Vulkanen, die sich bis zu zehn Kilometer über den Meeresboden erheben.

Unterwasserberge beeinflussen die Meeresströmungen und den vertikalen Wasseraustausch. Außerdem bergen sie artenreiche Lebensgemeinschaften. Ob ihre Ökosysteme isolierten Inseln gleichkommen oder in permanentem Austausch miteinander stehen, wissen die Fachleute nicht. Die enorme Zahl der jetzt entdeckten Erhebungen spricht allerdings dafür, dass sie einen gemeinsamen, verbundenen Lebensraum bilden.

Earth and Space Science 10.1029/2022EA002331, 2023

DYER, A. ET AL.: THE TRAVEL SPEEDS OF LARGE ANIMALS ARE LIMITED BY THEIR HEAT-DISSIPATION CAPACITIES. PLOS BIOLOGY 21, E1001820, 2023. FIG. 2. DOI: 10.1371/JOURNAL.PBIO.3001820. CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS BY/ND/NC/ND). BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

EVOLUTION

Vom Gestein zur ersten Zelle

Indem wir herausfinden, was bio- und geologische Phänomene miteinander verbindet, können wir besser verstehen, wie das Leben aus einer abiotischen Umwelt hervorging. Hiefür gilt es, fachübergreifend zusammenzuarbeiten und sich nicht auf einzelne Hypothesen zu versteifen.

» spektrum.de/artikel/2141856



Martina Preiner leitet die Max-Planck-Forschungsgruppe »Geochemische Protoenzyme« am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg.



QUALITÄTSSPRUNG Noch ist weitgehend unklar, wie das Leben aus unbelebter Natur hervorging (Symbolbild). Es mehren sich jedoch Hinweise darauf, was damals geschah.

AUF EINEN BLICK

Rätselhafte Vergangenheit

- 1** Zum Ursprung des Lebens gibt es nur wenige gesicherte Erkenntnisse. Fossil- und Gesteinsfunde aus jener Zeit sind rar.
- 2** Stammbaumanalysen erlauben es, viele Merkmale der frühesten Lebensformen zu rekonstruieren. Demnach ernährten sich die ersten Einzeller von Wasserstoff und CO_2 .
- 3** Sowohl bio- als auch geologische Perspektiven einzunehmen hilft, den Übergangsprozess von unbelebter zu belebter Materie aufzuklären.

Welchen Ursprung hat das Leben auf der Erde? Wer darüber forscht, gerät schnell in einen Widerstreit verschiedener Ansichten. Herrscht doch große Uneinigkeit über das Wo, Was, Wie und Warum jenes Vorgangs, der die biologischen Organismen hervorbrachte. Nur beim Wann ist man sich auf Grund von Fossilienfunden halbwegs einig: 3,5 bis 4 Milliarden Jahre ist es her, dass die ersten lebenden Zellen auf der Erde entstanden sind.

Das Forschungsgebiet ist von zahlreichen, oft sich gegenseitig ausschließenden Hypothesen geprägt, die verschiedene Ursprungsorte und -mechanismen postulieren. Tiefseequellen verbinden Fachleute meist mit Stoffwechsel-zuerst-Modellen, die davon ausgehen, das Leben sei ursprünglich aus chemischen Reaktionsnetzwerken hervorgegangen. Tümpel auf der Erdoberfläche hingegen werden üblicherweise mit Information-zuerst-Konzepten assoziiert, laut denen informationstragende Moleküle am Beginn des Lebens standen (siehe »Henne oder Ei?«). Zwar lässt die Forschungsdisziplin solche strikten Trennungen langsam hinter sich, doch was bleibt, ist – mangels Möglichkeiten, empirische Daten aus der Zeit vor vier Jahrmilliarden zu sammeln – eine große Unsicherheit.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die auf diesem Gebiet arbeiten, verfechten einzelne Hypothesen oft recht engagiert, tun sich aber eher schwer damit, andere Ansätze in Betracht zu ziehen. Warum ist das so? Zunächst, weil es nur wenige gesicherte Erkenntnisse gibt – außer, dass biologische Organismen existieren und sich selbst aufrechterhalten und vermehren. Wir kennen keine Fossilien von präbiotischen Strukturen, also Übergangsstufen zwischen toter und lebender Materie. Wahrscheinlich könnten wir sie auch gar nicht von mineralischen Gebilden unterscheiden. Fachleute haben Mikrofossilien entdeckt, die ziemlich eindeutig von Lebewesen stammen und auf ein Alter von 3,95 bis 3,45 Milliarden Jahre datieren. Aber selbst bei diesen fällt es oft schwer zu beweisen, dass sie tatsächlich das sind, was sie zu sein scheinen. Es handelt sich um kleine hohlraumähnliche Strukturen im Sediment, die praktisch genauso aussehen wie normale Gesteinssporen, selbst mit den besten bildgebenden Verfahren.

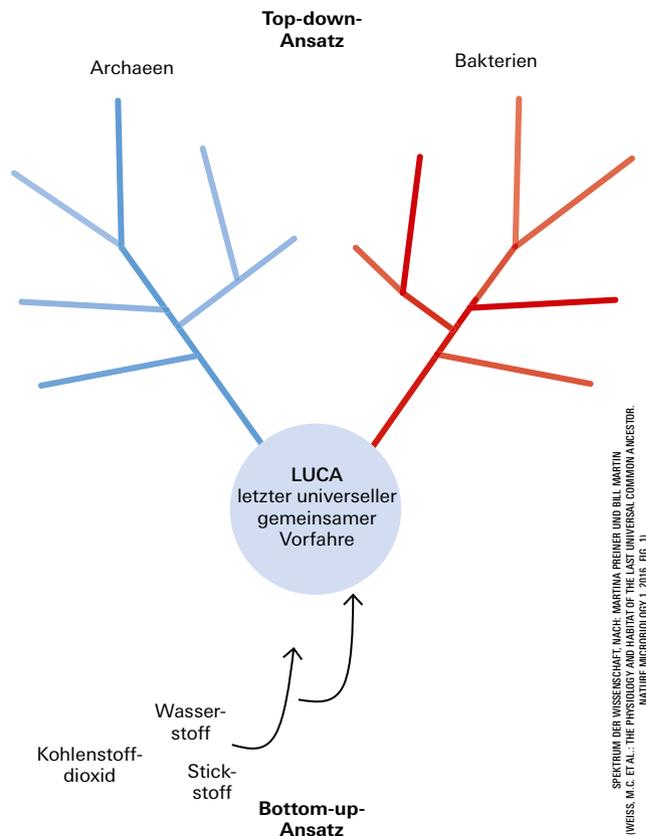
Aber vielleicht müssen wir gar nicht in die Vergangenheit reisen: Lassen sich präbiotische Prozesse eventuell »live« auf anderen Himmelskörpern beobachten? In den riesigen Geysiren beispielsweise, die aus dem zugefrorenen Ozean des Saturnmonds Enceladus hervorbrechen, sind einschlägige Moleküle nachweisbar – darunter Aminosäuren, die Bausteine der Proteine. Das heißt aber weder, dass wir dort Leben finden können, noch, dass dort welches entsteht. Abgesehen davon, dass sich nach wie vor nicht eindeutig beantworten lässt, was Leben überhaupt ist. Ein aus meiner Sicht geeigneter Definitionsversuch beschreibt die drei wichtigsten Merkmale des Lebens wie folgt: 1) die Fähigkeit, vererbare Information zu produzieren und weiterzugeben, 2) das Vermögen, Energie aufzunehmen, umzuwandeln und einen Zustand

fernab des thermodynamischen Gleichgewichts einzunehmen, und 3) die Befähigung, sich von der Umwelt abzugrenzen, etwa durch Zellmembranen.

Die Indizienlage zum Ursprung des Lebens ist somit verhältnismäßig dünn – und die Möglichkeiten, ihn direkt zu erforschen, erscheinen stark begrenzt. Was den Fachleuten bleibt, sind hypothetische, plausibel erscheinende Szenarien, die sich punktuell empirisch prüfen lassen. Welche Aspekte dabei im Fokus stehen, hängt vom wissenschaftlichen Hintergrund der jeweiligen Forscher ab. Kann man etwa bestimmte Reaktionen der präbiotischen Chemie im Labor erfolgreich reproduzieren, wird man dazu neigen, die dabei getesteten Umgebungsbedingungen auch für die frühe Erde anzunehmen. Umgekehrt postulieren manche Experten einen bestimmten Ort für die Entstehung des Lebens und untersuchen dann, welche chemischen Reaktionen unter den dortigen Bedingungen überhaupt möglich sind.

Die meisten von uns hören erstmals in der Schule von dem Thema. Oft zeigen Lehrerinnen und Lehrer hierbei den Apparat, mit dem die US-amerikanischen Chemiker Stanley Miller und Harold Urey in den 1950er Jahren experimentierten. Deren Versuche basierten auf den Lehren des sowjetischen Biochemikers Alexander Oparin

URAHN Den Vorfahren aller Lebewesen kann man entweder aus heutigen Organismen rekonstruieren (»top-down«) – oder klären, wie er einst aus unbelebter Materie entstand (»bottom-up«).



Henne oder Ei?

Es gibt diverse Hypothesen dazu, wie das Leben begann. Einige rücken den Ursprungsort ins Zentrum der Überlegungen – etwa warme Tümpel, Tiefseequellen, tektonische Spalten, heiße Quellen an der Oberfläche oder Eisschichten. Andere Ideen legen besonderen Wert auf die Reihenfolge, in der die Bestandteile des Lebens auftauchten.

Information-zuerst-Hypothesen gehen davon aus, dass Leben erst dann entstehen konnte, als es informationstragende Moleküle wie RNA (Ribonukleinsäure) gab. Solche Moleküle sind in der Lage, sich selbst zu vervielfältigen, und geben dabei Informationen über ihre Struktur weiter. Die RNA-Welt-Hypothese zählt zu diesen Ansätzen.

Stoffwechsel-zuerst-Hypothesen besagen: Zunächst entwickelten sich die chemischen Stoffwechselprozesse, die das Leben aufrecht-

erhalten. Sie waren anfangs einfach, wurden mit der Zeit komplizierter und brachten irgendwann den ersten Organismus hervor.

Seit einigen Jahren versuchen Forscherinnen und Forscher auf diesem Gebiet verstärkt, die Trennung zwischen den beiden Denkschulen zu überwinden. Denn allmählich setzt sich die Ansicht durch, Information und Stoffwechsel als Bestandteile des Lebens seien in wechselseitiger Abhängigkeit entstanden.

und des britischen Biologen John Burdon Sanderson Haldane, die beide eine Ursuppe postulierten, aus der das Leben herausgekommen sei. Miller und Urey demonstrierten: Die einfach aufgebauten Substanzen Methan, Ammoniak und Wasserstoff reagieren in wässrigen Lösungen unter Einwirkung elektrischer Entladungen zu organischen Molekülen wie Ameisen- und Essigsäure sowie verschiedenen Aminosäuren. Ein brillantes Experiment, das Fachleute in zahlreichen abgewandelten Formen wiederholt haben. Später im Lehrplan ist häufig von der RNA-Welt-Hypothese die Rede: RNA-Moleküle, die sowohl Informationen tragen als auch Stoffwechselreaktionen katalysierten, hätten am Anfang gestanden und aus ihnen seien zwei maßgebliche Komponenten des Lebens hervorgegangen.

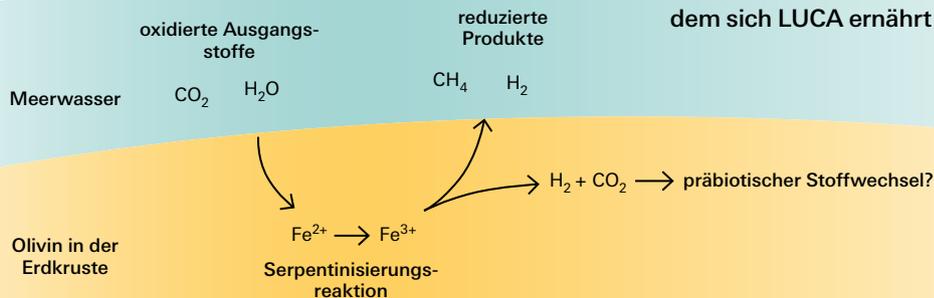
Ein Miteinander diverser Molekülsorten

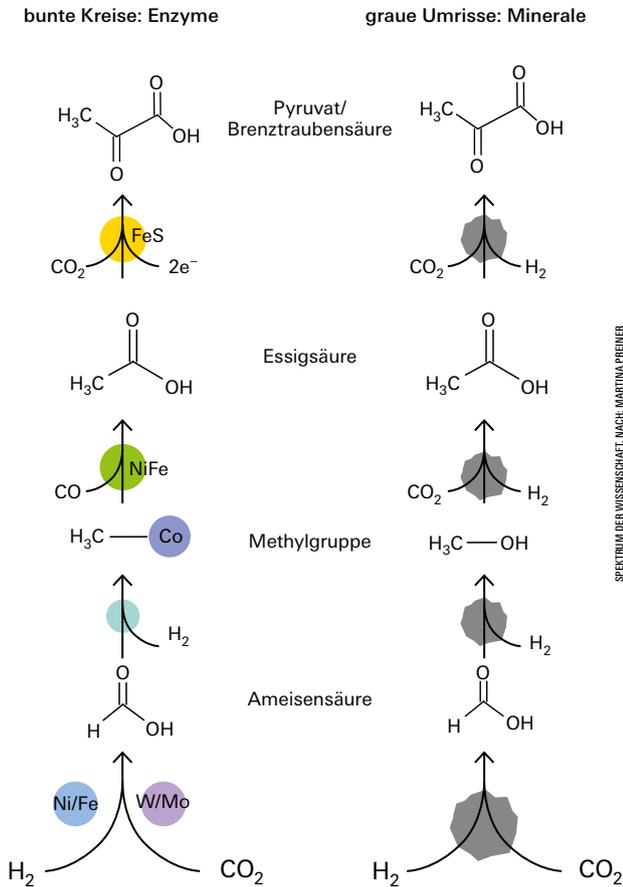
Die RNA-Welt-Hypothese, erstmals beschrieben Mitte der 1980er Jahre, war lange Zeit sehr prominent. Sie hat die (bio)chemische Forschung maßgeblich inspiriert: Heute kennen wir so viele präbiotische Synthesewege für RNA-Bausteine, dass manche Fachleute behaupten, die Frage nach dem Ursprung des Lebens sei eigentlich geklärt. Die RNA-Welt-Hypothese liefert zwar eine Antwort darauf, wie der Informations- und der Stoffwechselteil des Lebens anfangs zusammenhängen. Sie kann aber nicht

erklären, woraus das komplexe Stoffwechselnetzwerk der Lebewesen hervorging, an dem viel einfachere Moleküle als RNAs mitwirken. Offensichtlich trifft die alte Vorstellung, es habe bei der Entstehung des Lebens wichtige und weniger wichtige Substanzen gegeben, so nicht zu. Eher mussten viele verschiedene Molekülsorten zusammenwirken, um einen Zustand fernab des thermodynamischen Gleichgewichts zu erzeugen.

Im 20. und frühen 21. Jahrhundert standen chemische Synthesewege im Zentrum dieses Forschungsgebiets. Daraus gingen wertvolle Erkenntnisse hervor; allerdings rückte die Chemie derart weit in den Vordergrund, dass sie zu verdecken begann, worauf man eigentlich hinauswollte: das Leben selbst. Man fokussierte sich darauf, wie auf präbiotisch »plausible« Weise einzelne Biomoleküle entstehen. Dazu reproduzierten die Fachleute spezifische chemische Reaktionen und suchten nach den geologischen Bedingungen, die konkrete Stoffumwandlungen ermöglichen. Das ist eine nachvollziehbare Herangehensweise, vor allem angesichts des Mangels an konkreten Anhaltspunkten auf diesem Forschungsgebiet. Aber wer der Komplexität des Lebens und seines Ursprungs gerecht werden möchte, muss mehr als nur eine wissenschaftliche Disziplin heranziehen.

SERPENTINISIERUNG Reagiert Meerwasser mit dem eisenhaltigen Gestein Olivin, entsteht unter anderem Wasserstoff, von dem sich LUCA ernährt haben könnte.





ENZYM UND GESTEIN Viele biochemische Reaktionen, die in heutigen Lebewesen von Proteinen katalysiert werden, laufen auch an mineralischen Oberflächen beschleunigt ab.

Ein Fachgebiet, das bei alledem eine eher untergeordnete Rolle spielte, ist ausgerechnet die Biologie, die Wissenschaft von der belebten Materie. Leben ist eines der komplexesten Phänomene, das wir kennen; allein die Zahl der irdischen Mikrobenspezies beläuft sich auf schätzungsweise drei Billionen. Die schiere Menge an Bakterienzellen auf unserem Planeten übersteigt jene der Sterne im gesamten bekannten Universum, und jede einzelne davon trägt zwei bis vier Millionen Proteine in sich. Mit solch einer Vielfalt konfrontiert, fällt es schwer, sich einen plausiblen Übergang von toter zu lebender Materie vorzustellen. Selbst wenn die präbiotischen Versionen heutiger Biomoleküle und Stoffwechselnetze noch relativ einfach aufgebaut waren, erforderte es einen gewaltigen Komplexitätssprung, sie hervorzubringen.

Dennoch mischt die Biologie zunehmend bei der Suche nach dem Lebensursprung mit. Das ist sinnvoll, denn die heutigen Organismen, die aus diesem Anfang hervorgingen, sind empirisch gesehen die einzig sicheren Untersuchungsobjekte, die wir haben. Man hat mittlerweile eine Menge herausgefunden über die Stoffwechsel-

netze und Genome einfacher Einzeller, die den ursprünglichen Lebensformen wohl am nächsten kommen. Parallel dazu hat sich die Bioinformatik etabliert, die lebenswissenschaftliche Fragen mit computergestützten Methoden bearbeitet, und ist zu einem festen Bestandteil der einschlägigen Forschung geworden. Diese Entwicklungen ermöglichen es, genetische Datenbanken mit Angaben zu tausenden Spezies zu durchforsten und daraus Stammbäume bis weit in die Vergangenheit zu erstellen. Kombiniert mit Erkenntnissen aus der Mikrobiologie erlaubte das, einen letzten gemeinsamen Urahn (Last Universal Common Ancestor, LUCA) aller heutigen Organismen zu rekonstruieren.

LUCA ist ein theoretisches Gebilde und stellt den hypothetischen Vorfahren der Archaeen und Bakterien dar, die beide als vergleichsweise ursprünglich anzusehen sind – unter anderem, weil es sich um Einzeller handelt und sie keinen Zellkern besitzen. Das Erbgut von Archaeen und Bakterien enthält oft Gene, die sich in sehr alter Form erhalten haben und somit »hochkonserviert sind«, wie Fachleute sagen. Aus diesen Erbanlagen kann man schließen, wie der Stoffwechsel von LUCA beschaffen war: Über welche Enzyme verfügte ein solcher Organismus? Was benötigte er zum Leben? Und in welcher natürlichen Umgebung bekam er das?

Genügsame Existenz

Nach eingehenden Forschungsarbeiten haben wir ein recht klares Bild von LUCA gewonnen. Demnach handelte es sich um ein zellähnliches Wesen, das seinen Stoffwechsel maßgeblich mit Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2) betrieb – Ersteres als Kohlenstofflieferant, Letzteres als Energie- und Elektronenquelle (siehe »Zwei Arten, sich zu ernähren«). Einzeller mit derartigem Metabolismus gibt es noch heute; als Methanogene (Methan produzierende) und Acetogene (Essigsäure herstellende) leben sie an den unterschiedlichsten Orten von Sedimenten am Meeresgrund bis hin zum Kuhmagen. Sie zu untersuchen, ermöglicht es, aus der Gegenwart heraus viel über frühe Lebensformen zu lernen.

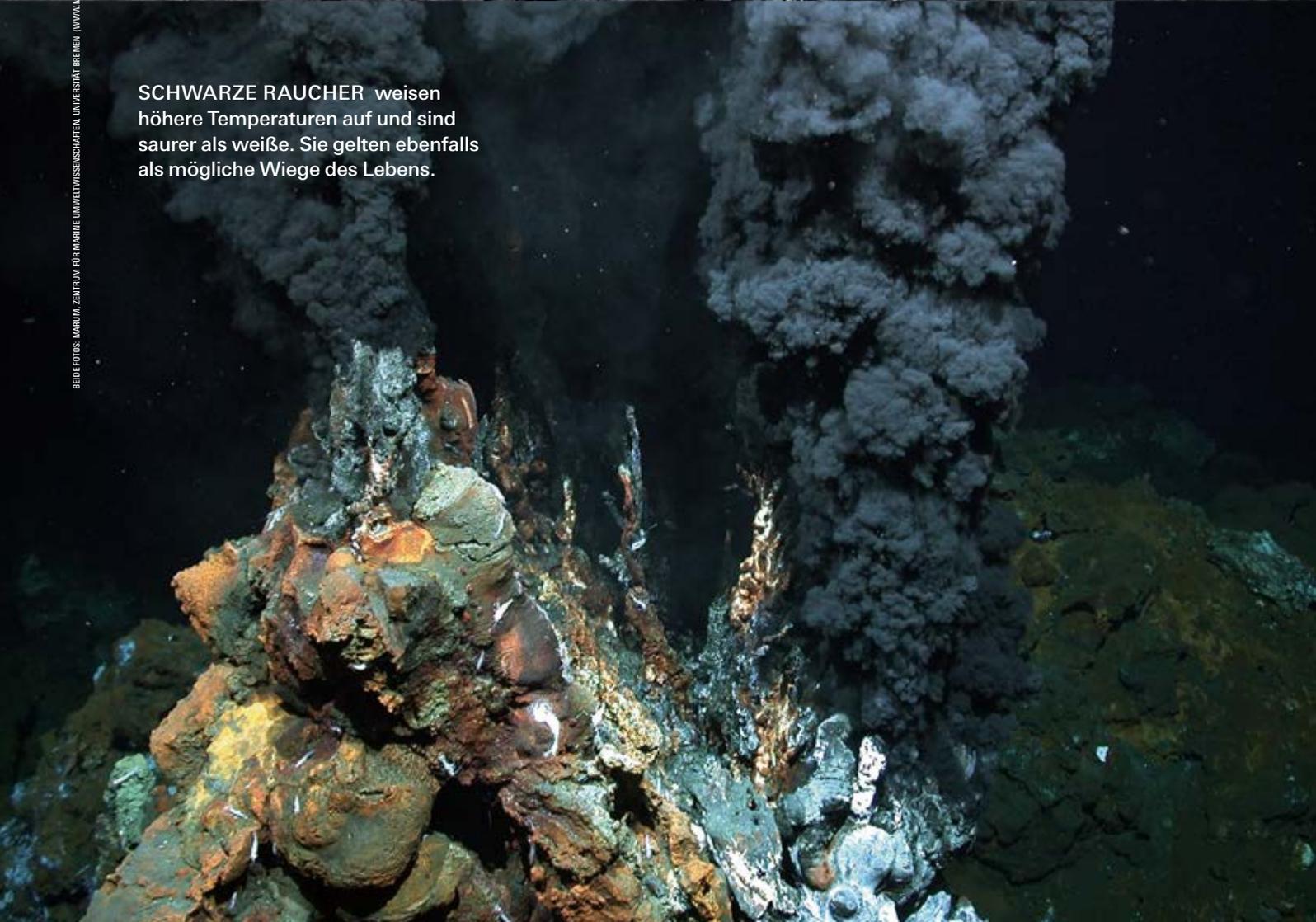
Doch die Ahnenforschung mittels Stammbaumanalyse hat Grenzen: Wir können nicht weiter zurückgehen als bis zu einem Organismus, der bereits ein funktionierendes genetisches System besaß. Von dort klafft immer noch eine große Wissenslücke zu den ersten präbiotischen Reaktionen auf der Erde. Die Rekonstruktion von LUCA ist ein so genannter Top-down-Ansatz – man fängt bei komplexen Lebensformen an und dekonstruiert sie Schritt für Schritt, um gewissermaßen ihren kleinsten gemeinsamen Nenner zu finden. Dem gegenüber stehen Bottom-up-Methoden, bei denen man sich »von unten« annähert, indem man von einfachen Bausteinen ausgehend einen möglichen Weg hin zum komplexen Ziel sucht. Idealerweise treffen sich beide Vorgehensweisen bei LUCA – aber von unten kommend ist der Weg schwerer.

Wahrscheinlich hat LUCA in einer geochemischen Umgebung gelebt, in der zumindest einige Reaktionen seines primitiven Stoffwechsels spontan abliefen. Denn

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH MARTINA PREINER



WEISSE RAUCHER sind heiße, alkalische Tiefseequellen. Brachten sie das Leben hervor?



SCHWARZE RAUCHER weisen höhere Temperaturen auf und sind saurer als weiße. Sie gelten ebenfalls als mögliche Wiege des Lebens.

komplexe Enzyme, um diese Umwandlungen zu katalysieren, kann es damals noch nicht oder kaum gegeben haben. Es lässt sich annehmen, dass von ersten präbiotischen Reaktionen bis zur eigenständigen Zelle eine gewisse Zeit verging, die mindestens einige Jahrtausende umfasst hat, wahrscheinlich aber mehr. Es erscheint daher sinnvoll, von halbwegs stabilen Umweltbedingungen auszugehen.

Wie die frühe Erde aussah, auf der das Leben entstand, ist leider alles andere als klar. Es gibt nur wenige Gesteinsfunde, die alt genug sind, um Rückschlüsse auf die damaligen geochemischen Verhältnisse zuzulassen. Zu den Gesteinsproben, die am weitesten zurückdatieren, gehören so genannte Zirkone – Minerale, die Silikate und das Übergangsmetall Zirkonium enthalten. Sie zeigen sich äußerst beständig gegenüber geologischen Einflüssen und erlauben verschiedene Aussagen über die Beschaffenheit des jungen Planeten. Da Zirkonminerale instabile Uran-Isotope enthalten, die im Lauf der Zeit zerfallen, lässt sich ihr Alter innerhalb eines Zeitraums, der bis zu 4,4 Milliarden Jahre zurückreicht, anhand von Zerfallsreihen relativ akkurat bestimmen. Weiterhin bergen sie Sauerstoff-Isotope, was den Schluss zulässt, dass irdische Gesteine vor 4,2 Milliarden Jahren dauerhaft mit Wasser in Berührung kamen. Ozeane scheinen demnach bereits existiert zu haben. Darüber hinaus finden sich organische Einschlüsse in diesen Mineralen wie Methan oder teerähnliche Gemische – möglicherweise ein Indiz für organisch-chemische Reaktionen auf der frühen Erde.

Allerdings sind die ältesten Zirkone seit Jahrtausenden von den Gesteinen getrennt, in denen sie ursprünglich eingeschlossen waren. Sie stellen quasi verwaiste Botschafter aus der Vergangenheit dar, die sich ohne Kontext präsentieren. Ihre Merkmale sind daher nicht immer eindeutig zu interpretieren. Überdies haben Fachleute sie bisher nur an wenigen Orten der Erde gefunden, was die Frage aufwirft, ob die daraus abgeleiteten Aussagen auf den gesamten Planeten anwendbar sind.

Die Unsicherheiten lassen andererseits Raum für eine ganze Palette möglicher Umwelten, in denen das Leben seinen Anfang genommen haben könnte. Vorstellbar

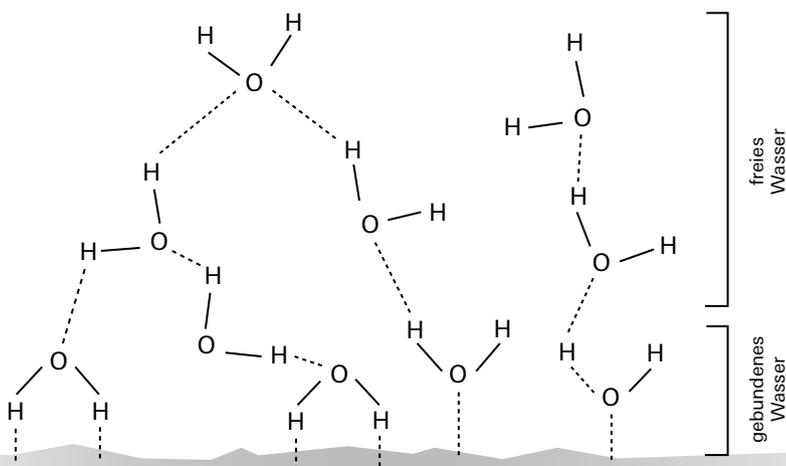
erscheinen etwa Warmwasserquellen in Vulkanlandschaften (»Spektrum« Dezember 2017, S. 12), hydrothermale Spalten in der Erdkruste (»Spektrum« Juli 2020, S. 12) und heiße Tiefseequellen. Diese Orte zeichnen sich durch sehr unterschiedliche chemische Bedingungen und Energiequellen aus – beispielsweise UV-Licht, Hitze oder elektrische Entladungen – sowie durch jeweils eigene Möglichkeiten, abgeschlossene Reaktionsräume hervorzubringen.

Heiße Tiefseequellen am Meeresgrund gibt es in unterschiedlichen Varianten. Zu ihnen gehören die so genannten Weißen Raucher (»White Smoker«), die als mutmaßliche Umgebungen präbiotischer Chemie und mögliche Entstehungsorte LUCAs lange im Fokus standen. Sie stoßen alkalische Lösungen aus und sind um die Jahrtausendwende am atlantischen Meeresboden entdeckt worden. Eine weitere Variante sind die Schwarzen Raucher (»Black Smoker«), die man schon seit den 1970er Jahren kennt. Beide Quellarten kommen heute an mittelozeanischen Rücken vor, wo tektonische Platten an Spreizzonen auseinanderdriften und heißes Erdmantelgestein mit Wasser reagiert.

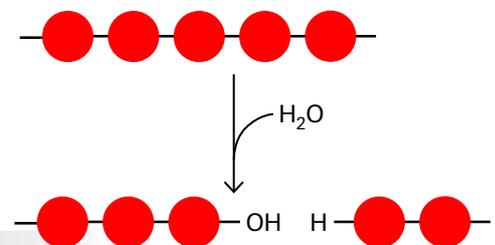
Siedend heiß und ätzend

Schwarze Raucher, die ihre Farbe von ausfallenden Metallpartikeln erhalten, finden sich meist näher an der Spreizzone und sind um einiges heißer als Weiße Raucher. Der Temperaturunterschied fällt mit zirka 300 versus 90 Grad Celsius beträchtlich aus; auch der Säuregehalt differiert zwischen beiden Quellarten erheblich. Schwarze Raucher sind stark sauer, zeichnen sich also durch niedrige pH-Werte aus, während ihre weißen Pendanten hohe pH-Werte aufweisen. Große Abweichungen gibt es weiterhin in der chemischen Zusammensetzung: Bei den metallhaltigen Schwarzen Rauchern dominieren Eisen-Schwefel-Verbindungen; weiße hingegen sind nahezu metallfrei und enthalten vorwiegend Kalziumkarbonate.

Weißer Raucher erscheinen im Hinblick auf LUCA vor allem deshalb interessant, weil sie reichlich Wasserstoff produzieren, den wahrscheinlichen Elektronen- und Energielieferanten von LUCAs Stoffwechsel. Der Grund hierfür ist eine Reaktion zwischen dem Meerwasser und



NASS ODER FEUCHT? Freie Wasserteilchen brechen molekulare Bindungen oft in Hydrolyse-Reaktionen auf (unten). Sind sie an Gesteinsoberflächen oder Proteine gebunden, geschieht das seltener.



Zwei Arten, sich zu ernähren

Es gibt in der Natur zwei grundsätzlich verschiedene Stoffwechselarten: Heterotrophie (griechisch für »Fremdernährung«) und Autotrophie (»Selbsternährung«). Tiere einschließlich des Menschen müssen organische Verbindungen zu sich nehmen, um ihren Energie- und Stoffhaushalt aufrechtzuerhalten – meist in Form pflanzlicher oder tierischer Biomasse. Sie gehören somit zu den heterotrophen Lebewesen.

Autotrophe Organismen bauen ihre Bestandteile unter Energiezufuhr aus anorganischen Ausgangsstoffen auf – etwa aus Molekülen, die Kohlenstoff oder Elektronen liefern. Ein Beispiel hierfür sind Pflanzen, die Sonnenlicht als Energielieferant, CO_2 als Kohlenstoff- und Wasser als Elektronenquelle nutzen. Weitere Spielarten der Autotrophie kennen wir beispielsweise von Einzellern, die Wärmeenergie, CO_2 und – als Elektronenlieferant – Wasserstoff oder sogar eisenhaltiges Gestein verwerten. Sie können damit dauerhaft in Tiefseequellen, warmen Tümpeln beziehungsweise wassergefüllten Spalten der Erdkruste existieren, ohne auf organische Stoffe oder Sonnenlicht angewiesen zu sein. Diese Fähigkeit macht sie zu interessanten Kandidaten für die frühesten Lebewesen auf der Erde.

dem eisenhaltigem Erdkrustengestein Olivin. Dabei entsteht ein grün gefärbtes, häufig mit schlangenartigen Mustern versehenes Mineral namens Serpentin; den Umwandlungsprozess nennt man Serpentinisierung. Er läuft bei Schwarzen Rauchern selten ab, denn diese sind üblicherweise über Gestein positioniert, das nicht serpentinisieren kann. CO_2 , LUCAs Kohlenstoffquelle, dürfte auf der frühen Erde im Überfluss vorhanden gewesen sein: Seine Konzentration in Atmosphäre und Ozeanen lag damals wohl hunderte Male höher als heute.

Weniger bekannt ist, dass es auch saure, schwarze Tiefseequellen hoher Temperatur gibt, die reichlich Wasserstoff ausstoßen. Das lässt Weiße Raucher nicht ganz so herausgehoben erscheinen, was die Eignung für präbiotische Prozesse betrifft. Mein Team und ich experimentieren darum nicht mehr ausschließlich mit Temperaturen und pH-Werten, wie sie für diesen Typus von Tiefseequellen typisch sind. So oder so haben wir keine Anhaltspunkte dafür, wie häufig die verschiedenen Arten von Hydrothermalquellen auf der frühen Erde vorkamen, ob in tiefem oder in flachem Wasser.

Was sich einigermaßen sicher sagen lässt: Auf der Erde vor vier Milliarden Jahren existierten eine Gesteinskruste und Ozeane. Sehr wahrscheinlich gab es damals intensive Reaktionen zwischen dem Wasser und dem Gestein. Hierbei entstanden vermutlich Wasserstoff ebenso wie weitere Elemente, auf die irdische Lebewesen zwingend angewiesen sind, etwa Stickstoff und Phosphor. Stickstoff nimmt an Umwandlungsprozessen von Nitraten zu Ammoniak teil, die auf mineralischen Oberflächen katalysiert werden; Phosphor liegt im Gestein etwa in Form von Apatiten vor.

Die Entstehung des Lebens ist somit zwar weiterhin aus biologischer wie aus geologischer Perspektive rätselhaft. Es erweist sich aber als hilfreich, Parallelen zu suchen zwischen der Biochemie einfacher CO_2 -fixierender Einzeller und den geochemischen Verhältnissen einer früheren irdischen Umwelt, die maßgeblich durch Wasser-Gesteins-Interaktionen geprägt war. Das lässt sich anhand dreier Phänomene demonstrieren, die mit dem Leben eng verbunden sind: Energie, Katalyse und Kompartimentierung.

Lebewesen können die Energie, die sie benötigen, aus diversen Quellen beziehen. Tiere verwerten Biomasse, Pflanzen und Zyanobakterien fangen Sonnenlicht ein, und manche Einzeller nutzen Wasserstoff, was nach derzeitiger Kenntnis ebenso auf LUCA zutrif. Sie alle haben gemein, dass sie dem Organismus Energie liefern, und zwar mit Hilfe eines Elektronentransfers von einer Substanz A auf eine Substanz B. Bei LUCA sowie bei vielen heute lebenden Einzellern, die ihre Biomoleküle aus CO_2 aufbauen und somit zu den autotrophen Lebewesen zählen (siehe »Zwei Arten, sich zu ernähren«), stammen die Elektronen vom Wasserstoff. Auf der präbiotischen Erde war dieser ein ergiebiger und nachhaltiger Energieträger, weil er dauerhaft zur Verfügung stand, solange Wasser und Gestein unter Wärmezufuhr miteinander reagierten. Mit der chemischen Energie der Wasserstoff-Elektronen brachte LUCAs Stoffwechsel vermutlich Aminosäuren, RNA-Basen und Kofaktoren hervor (»Spektrum« März 2022, S. 10). Doch diese Energie musste erst einmal zugänglich gemacht werden.

Angekurbelter Stoffumsatz

Wasserstoff und CO_2 , von denen LUCA sich mutmaßlich ernährte, sind auch die Ausgangsstoffe industrieller Syntheseverfahren, die das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid in Prozesse einspeisen, bei denen nutzbare organische Moleküle entstehen. In beiden Fällen ist ein großes Problem zu lösen: CO_2 und H_2 reagieren normalerweise nicht spontan miteinander. Sie tun das technisch nur unter hohem Druck und hoher Temperatur, wobei sich Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasser bilden. Lebewesen, die auf diese Form des Stoffwechsels setzen, müssen einen Weg finden, die Reaktion von CO_2 und H_2 zu erleichtern. Das geschieht typischerweise mit Katalysatoren: Stoffen, welche die Hemmschwelle der Umwandlung – deren Aktivierungsenergie – senken. In heutigen Zellen übernehmen spezielle Enzyme diese Aufgabe.



STROMATOLITHE sind Sedimentgesteine und stellen Relikte einstiger Mikrobenkolonien dar. Sie entstehen in schleimigen Biofilmen, etwa durch Einfangen von Sedimentpartikeln und Ausfällen von Kalziumkarbonat. Manche sind Jahrmilliarden alt.

FRENTUSHA / GETTY IMAGES / ISTOCK

LUCA besaß solche Reaktionsbeschleuniger aber wohl noch nicht.

Moderne Einzeller, die CO_2 und H_2 verwerten, katalysieren deren Reaktion mit Verbindungen, die so genannte Übergangsmetalle enthalten. Darunter versteht man Elemente wie Eisen, Nickel und Kobalt. Einzelne Ionen dieser Stoffe befinden sich im aktiven Zentrum der Enzyme, wo die beschleunigte chemische Reaktion stattfindet. Mitunter sind dort auch Eisen beziehungsweise Nickel in Clusterverbindungen mit Schwefel anzutreffen. Jene Cluster erleichtern den Elektronentransfer, der im Zuge der Umwandlung erfolgen muss.

Auf der frühen Erde gab es wahrscheinlich reichlich Übergangsmetalle und deren Schwefelverbindungen als natürliche Bestandteile von Gesteinen. Manche Minerale, die in der Erdkruste zu finden sind, stellen derart leistungsfähige Katalysatoren dar, dass die chemische Industrie sie bis heute nutzt, um Reaktionen mit Stickstoff beziehungsweise CO_2 zu beschleunigen. Die präbiotische Umwelt auf dem jungen Planeten dürfte somit nicht nur Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid bereitgestellt haben, sondern ebenso Energie und Katalysatoren, um beide miteinander reagieren zu lassen.

Meine Kollegen und ich untersuchen gemeinsam mit japanischen und französischen Arbeitsgruppen chemische Prozesse, die in serpentinisierenden Gesteinen stattfinden. An diesen Umwandlungen sind Nickel-Eisen-Verbindungen, Eisenoxide und Eisensulfide beteiligt. Geben wir solche Minerale in einen wassergefüllten, hermetisch abgeschlossenen Hochdruckreaktor und leiten CO_2

sowie H_2 ein, erhalten wir über Nacht genau jene organischen Moleküle, die aus der chemischen Reaktion beider Gase hervorgehen. Die Minerale erledigen in diesem Fall also den gleichen Job wie komplexe zelluläre Enzyme. Selbst Aminosäuren und Nukleotide lassen sich in einer Umgebung erzeugen, die lediglich Gesteinsbestandteile, Wasser und Übergangsmetalle enthält, wie andere Forschungsgruppen gezeigt haben. Ein Hinweis darauf, dass derartige Umwandlungen schon stattfanden, bevor es Lebewesen mit enzymgesteuertem Stoffwechsel gab.

Unverzichtbare Minerale

Minerale, genauer ihre metallischen Bestandteile, könnten die geologischen Vorläufer der biologischen Enzyme gewesen sein. Weil sie viele Reaktionen sehr effizient beschleunigen, müssen Chemikerinnen und Chemiker, die nach neuen Katalysatoren suchen, große Anstrengungen unternehmen, um Spuren metallischer Verunreinigungen in ihren Reaktionsgefäßen auszuschließen. Selbst für Millers und Ureys Ursuppen-Experiment hat sich erwiesen, dass seine Reaktionen wahrscheinlich von Halbmetall-Silikaten erleichtert worden waren, die sich unbeabsichtigt aus den Glasgefäßen gelöst hatten («Spektrum» Januar 2022, S. 10). Dass biologische Enzyme bis heute Metallionen in ihren aktiven Zentren beherbergen, zeigt uns: Das Leben hat an der katalytischen Qualität der Minerale festgehalten.

Manche Teile der mineralischen Katalyse haben die biologischen Organismen weitgehend unverändert in ihren Stoffwechsel übernommen. Ein offensichtliches

Beispiel hierfür sind die erwähnten Eisen-Schwefel-Cluster, die wie winzige Gesteinsstücke in die Proteinstruktur von Enzymen eingebettet sind. Andere Reaktionen werden von einem Proteinapparat gesteuert, der mit mineralischen Oberflächen nichts (mehr) zu tun hat. Was die Frage aufwirft: Wie genau ging die Bio- aus der Geochemie hervor?

Mein Team und ich haben angefangen, die Rolle bestimmter organischer Moleküle, der so genannten Kofaktoren, in diesem Übergangsprozess zu untersuchen. Kofaktoren sind Helfermoleküle, die sich an Enzyme binden und sie unterstützen, indem sie beispielsweise Elektronen liefern. Einige von ihnen sind chemisch mit RNA-Bausteinen verwandt, also den informationstragenden Bestandteilen des Lebens, haben aber Stoffwechselfunktionen übernommen. Möglicherweise stellen sie Bindeglieder zwischen Geo- und Biochemie dar. Theoretische Arbeiten haben vor wenigen Jahren gezeigt: Um ein stoffwechselähnliches Reaktionsnetzwerk aufzubauen, das ohne Enzyme auskommt, sind Kofaktoren unverzichtbar. Die Helfermoleküle könnten somit komplexe Umwandlungsprozesse ermöglicht haben, noch bevor es Organismen mit eigenem Stoffwechsel gab – eine Art Protometabolismus.

Gibt es direkte Verbindungen zwischen Kofaktoren und mineralischen Oberflächen? Dieser Frage geht meine Forschungsgruppe in Laborversuchen nach. In ersten Experimenten haben wir gezeigt, dass sich geochemisch erzeugte Elektronen, geliefert von Wasserstoffmolekülen, auf einen biochemischen Empfänger übertragen lassen, den Kofaktor Nicotinamidadeninucleotid (NAD). Wir testen das nun ebenfalls für andere Kofaktoren. Von solchen Untersuchungen versprechen wir uns Hinweise darauf, wie und warum es bestimmte Molekülsorten in den Stoffwechsel heutiger Lebewesen geschafft haben und welche Rolle dabei die Umwelt spielte.

Leben findet in biologischen Zellen statt, sprich in kleinen Reaktionsräumen, die zwar im Austausch mit der Umgebung stehen, zugleich aber ihre inneren Bestandteile nach außen abschirmen und beieinanderhalten. Dies stellt einen wichtigen Aspekt der meisten Definitionen dessen dar, was Leben ausmacht. Vermutlich haben sich präbiotische Prozesse ebenfalls in räumlich separierten Bereichen abgespielt. Dort können sich die Moleküle in hoher Dichte ansammeln und intensiv wechselwirken, etwa im Zuge von Kettenbildungen. Bei jenen abgetrennten Räumen könnte es sich um Gesteinsporen gehandelt haben. Mehrere geologische Studien belegen: Organisches Material nicht biologischen Ursprungs, das aus mineralisch katalysierten CO₂-Umwandlungsprozessen stammt, reichert sich manchmal in Hohlräumen serpentinisierender Systeme an. Vermutlich ist das auch vor vier Milliarden Jahren passiert. Die Hohlräume im Gestein sind dabei nicht bloß Reaktionskammern, sondern stellen darüber hinaus – wegen der mineralischen Oberflächen ihrer Wände – eine katalytisch aktive Umgebung bereit.

Erwähnung verdient in diesem Zusammenhang die Rolle des Wassers. H₂O ist für das Leben einerseits unver-

zichtbar, entfaltet andererseits aber zerstörerische Kräfte, indem es zahlreiche Molekülbindungen durch Hydrolyse-Reaktionen aufbricht. Innerhalb einer intakten lebenden Zelle ist das Wasser großteils an die dortigen Biomoleküle gebunden, so dass es keine unkontrollierbaren Hydrolyse-Reaktionen auslösen kann; diese müssen sogar über spezielle Enzyme herbeigeführt werden.

In serpentinisierenden Gesteinsschichten ist die Menge der »freien« H₂O-Moleküle ebenfalls begrenzt, da die Serpentinisierung reichlich Wasser bindet und zum Teil in Wasserstoff umwandelt. Die dort vorhandenen Poren bergen deshalb ein feuchtes, aber kein nasses Milieu. Zudem kann der Feuchtigkeitsgrad in diesen Hohlräumen durch zu- und abnehmende Reaktionsintensität schwanken, was einem »Wet-dry Cycling« gleichkommt, das unterschiedliche chemische Reaktionen ermöglicht. Gesteinsporen können somit – ähnlich lebenden Zellen – hinsichtlich der Aktivität von Wassermolekülen eine regulierte Umgebung schaffen.

Fachübergreifender Ansatz

Aus den genannten Parallelen zwischen bio- und geologischen Phänomenen geht hervor, dass sich die Bio- und die Geowissenschaften bis zu einem gewissen Grad verbinden lassen. Etwa, indem man biologische Phänomene zum Vorbild nimmt und nach ähnlichen Erscheinungen in Gesteins-Wasser-Systemen sucht. Oder indem man sich anhand geowissenschaftlicher Erkenntnisse ein Bild davon macht, welche chemischen Reaktionen in der präbiotischen Welt vor LUCA überhaupt möglich waren. Stellt man dabei fest, dass die damaligen Umwelten spontan Moleküle hervorbrachten, für die heutige Zellen spezialisierte Enzyme benötigen, ist das ein wichtiger Schritt auf dem Bottom-up-Pfad hin zu LUCA.

Nach jahrzehntelangen Auseinandersetzungen zwischen verschiedenen Denkschulen dieses Forschungsgebiets scheinen die beteiligten Forscherinnen und Forscher nun mehr aufeinander zu hören, um aus diversen Fachrichtungen heraus ein umfassendes, mosaikartiges Bild vom Ursprung des Lebens zusammensetzen. Es setzt sich die Einsicht durch, dass diese Aufgabe nicht mit einzelnen Hypothesen oder einzelnen Fachdisziplinen zu bewältigen ist. ◀

QUELLEN

Andreani, M. et al.: The rocky road to organics needs drying. *Nature Communications* 1, 2023

Preiner, M. et al.: The future of origin of life research: Bridging decades-old divisions. *Life* 10, 2020

Preiner, M. et al.: A hydrogen-dependent geochemical analogue of primordial carbon and energy metabolism. *Nature Ecology & Evolution* 4, 2020

Wimmer, J.L.E. et al.: Energy at origins: Favorable thermodynamics of biosynthetic reactions in the Last Universal Common Ancestor (LUCA). *Frontiers in Microbiology* 12, 2021

Xavier, J.C. et al.: Autocatalytic chemical networks at the origin of metabolism. *Proceedings Biological Sciences* 287, 2020

ARCHÄOGENETIK

Die Überlebenden der Kälte

Inzwischen liegt die DNA von mehreren hundert *Homo sapiens* aus der Altsteinzeit vor. Die Daten decken auf, was bislang unbekannt war: wie die Menschen auf den europäischen Kontinent strömten und wie die Eiszeit sie zerstreute oder auslöschte.

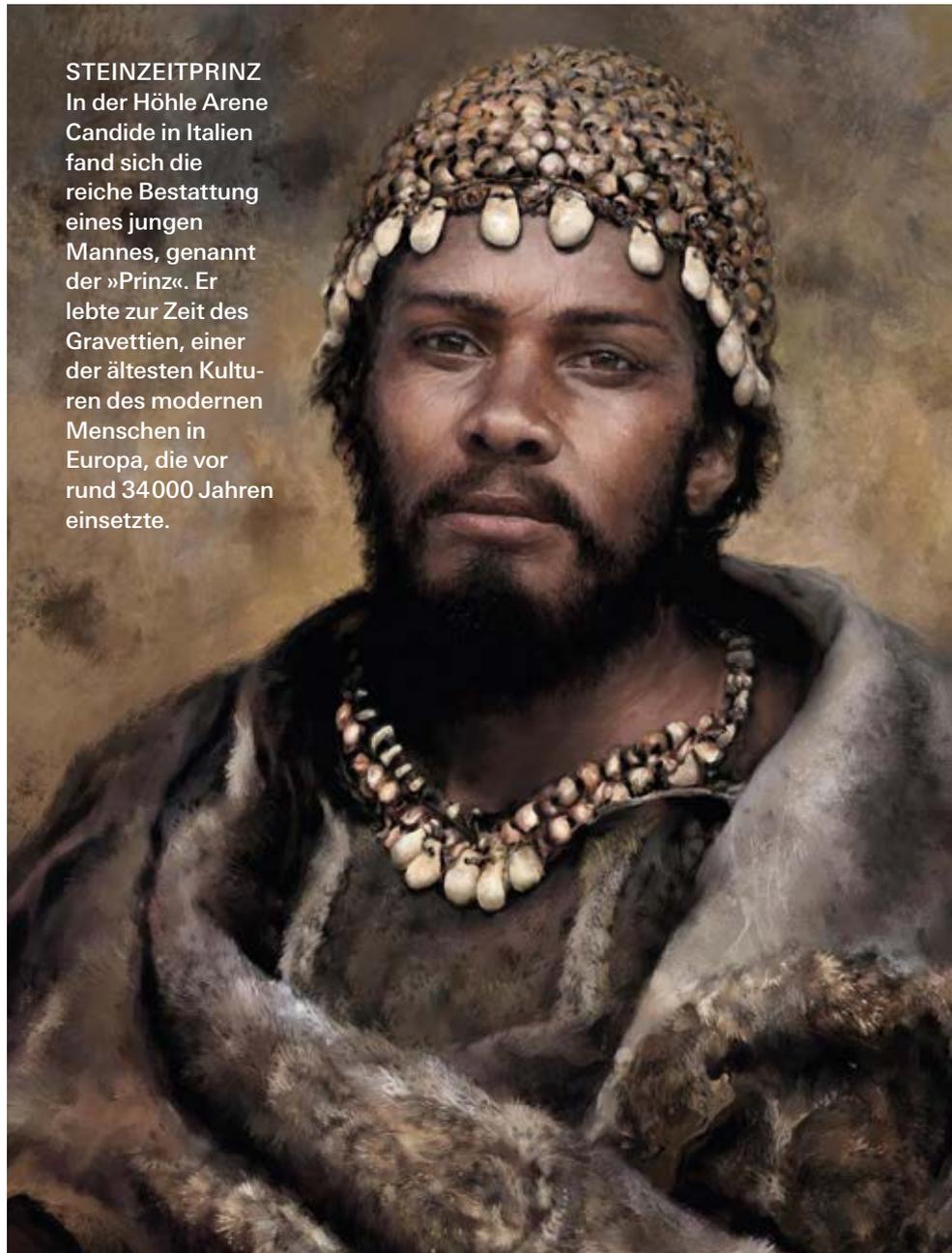
▶ Vor 25000 Jahren näherte sich die Eiszeit ihrem letzten großen Höhepunkt. Von Norden her schoben sich Eismassen aus Skandinavien heran. Von Süden drangen die Alpengletscher nordwärts. Wo heute Berlin liegt, reichte ein 100 Meter dicker Eisschild in den Himmel. Zwischen den Eisfronten: eine unwirtliche, kalte Steppe. Spuren von Menschen, die hier einst Jagd machten auf Mammut, Pferd oder Rentier und Figuren schnitzten, sucht man vergeblich. Sie waren verschwunden. Aber wohin? Und wer machte Mitteleuropa wieder zu seiner Heimat, als 6000 Jahre später das frische Grün zurückzukehren begann?

Antworten gibt eine Gruppe um Cosimo Posth von der Universität Tübingen. Die Forscherinnen und Forscher haben das Erbgut von mehreren hundert Menschen analysiert, deren Knochen bei archäologischen Ausgrabungen entdeckt wurden. Die ältesten sind 35000 Jahre alt, die jüngsten nur 5000; die westlichsten Funde stammen von der Iberischen Halbinsel, die östlichsten aus dem heutigen Tadschikistan. Das ermöglichte es dem Team, die genetische Landschaft der europäischen Eiszeit in Raum und Zeit zu durchstreifen.

Die vielköpfige Arbeitsgruppe, an der neben Posth auch He Yu von der Universität Peking und Johannes Krause vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie (EVA) in Leipzig beteiligt waren, bestimmte das Erbgut von 116 Menschen der Altsteinzeit neu und fügte die Daten den bereits bekannten Sequenzen von 230 weiteren Individuen hinzu. In Europa begann die Geschichte der modernen Menschen allerdings nicht erst vor 35000 Jahren, sondern

bereits viel früher. Ihre ältesten, ungefähr 45000 Jahre alten Spuren hat ein Team um Jean-Jacques Hublin vom EVA im heutigen Bulgarien gefunden. Ebenso war *Homo sapiens* in Rumänien, Tschechien und anderen Ländern schon vor mehr als 40000 Jahren zu Hause.

Als Posth und seine Kollegen ihre DNA-Sequenzen mit denen jener ältesten Europäer verglichen, machten sie eine verblüffende Feststellung: Das Erbgut dieser ersten modernen Menschen in Europa ist nahezu spurlos verschwunden. »Dauerhaft erfolgreich war diese erste Einwande-



STEINZEITPRINZ
In der Höhle Arene Candide in Italien fand sich die reiche Bestattung eines jungen Mannes, genannt der »Prinz«. Er lebte zur Zeit des Gravettien, einer der ältesten Kulturen des modernen Menschen in Europa, die vor rund 34000 Jahren einsetzte.

ILLUSTRATION: TOM BÄHRKLING

rung von *Homo sapiens* also nicht«, erklärt Olaf Jöris, Steinzeitexperte vom Forschungszentrum MONREPOS in Neuwied, der an den Arbeiten Posths nicht beteiligt war.

Doch bei ihrem zweiten Anlauf bissen sich die modernen Menschen fest. Die Nachfolger der Pioniere sind der Forschung durch ihre Steinwerkzeuge gut bekannt. Ihre Hinterlassenschaften ähneln sich stark, ob sie nun auf der Iberischen Halbinsel oder in der heutigen Ukraine gefunden wurden. Das Gravettien, wie es in der Fachsprache heißt, glich einer frühen Europäischen Union: In der Zeit von vor 32000 bis vor 24000 Jahren fertigten die Menschen ihre Steinwerkzeuge in diesem riesigen Gebiet mit einer ähnlichen Technik und freuten sich an der gleichen Kleinkunst mit Schnitzereien und Gravierungen von Tiergesichtern auf Geweihen oder Knochen. Sie fanden in Europa vor dem Höhepunkt der Eiszeit ein gutes Auskommen.

Rückzug vor dem Eis

Aber waren sie auch untereinander verwandt? Gehörten sie zu ein und derselben genetischen Gruppe? Dank einer wahren Detektivarbeit habe das Team um Posth »überraschende Antworten auf diese Fragen« bekommen, sagt Jens Blöcher, der an der Universität Mainz das Erbgut von Menschen aus der Bronze- und Steinzeit untersucht und an der Studie ebenfalls nicht mitwirkte.

Zunächst stellten die Forscher fest, dass die Angehörigen des Gravettien sich wie vermutet aus Mitteleuropa zurückzogen, als sich das Eis heranschob. Aber sie waren nie ganz verschwunden: Spuren ihres Erbguts finden sich noch bei heute lebenden Menschen. Folglich zählen sie zu den Urahnen vieler Europäer.

Unerwarteter aber war die zweite Erkenntnis zur vermeintlichen Europäischen Union der Altsteinzeit. Ihre Angehörigen im Westen des Kontinents stammen anscheinend von einer älteren, noch nicht näher identifizierten Gruppe ab. Sie sind genetisch klar unterscheidbar von ihren Kulturgenossen im Osten, die im

heutigen Tschechien bis hinunter auf den italienischen Stiefel lebten und deren Ahnen wohl aus noch weiter östlichen Regionen im heutigen Russland stammten. Diese genetische Zweisplaltung der Gravettien-Gruppen manifestierte sich auch in der sonst überregional einheitlichen Kultur. »Wir können zeigen, dass es im östlichen Mitteleuropa und in Südeu-

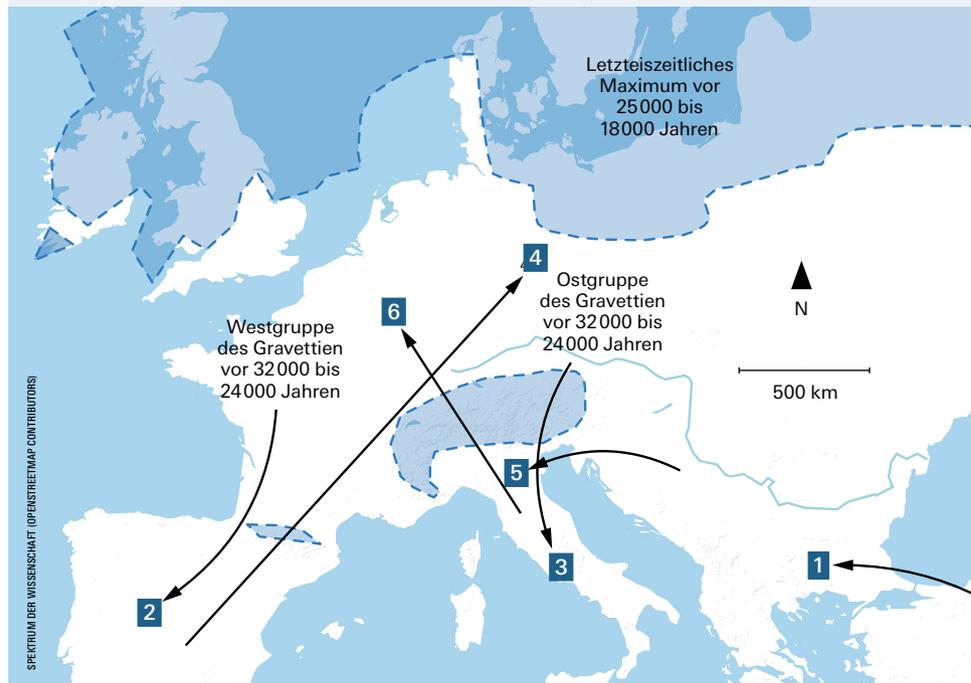
ropa andere Bestattungsriten als in West- und Südwesteuropa gab«, erklärt Posth. Wo sich die Populationen aus Ost und West berührten, kam es allerdings immer wieder zur Vermischung der beiden genetischen Gruppen.

Bald aber sorgten die vorrückenden Gletscher und das kälter werdende Klima für Umwälzungen. Vermut-

Wege der Jäger und Sammler

Die Analyse menschlichen Erbguts aus der Steinzeit ergab, dass die Geschichte der europäischen Jäger und Sammler sehr viel bewegter war als bislang angenommen.

- 1 Vor 45000 Jahren: *Homo sapiens* erreichte erstmals Europa.
- 2 Vor 22000 bis 18000 Jahren: Gruppen des Solutréen lebten während der Eiszeit im Südwesten des Kontinents.
- 3 Vor 22000 bis 18000 Jahren: Angehörige der Ostgruppe, die auch nach Süden gezogen waren, überdauerten die Eiszeit nicht.
- 4 Vor 18000 bis 15000 Jahren: Gruppen des Magdalénien besiedelten Europa.
- 5 Vor 17000 Jahren: Gruppen des Epigravettien kamen aus Anatolien über den Balkan auf die italienische Halbinsel.
- 6 Vor 14000 Jahren: Menschen zogen von Italien nach Mitteleuropa und verdrängten die dort ansässigen Jäger und Sammler.



lich war die Kälte nicht einmal das größte Problem für die Steinzeitmenschen: So schnitten die Eismassen Flüssen wie der Oder und der Weichsel den Weg nach Norden zu ihren alten Mündungen ab. Das Wasser bahnte sich daher seinen Weg nach Westen und floss schließlich in den Nordatlantik. Die Landschaft veränderte sich nicht nur dadurch gravierend, sondern auch, weil es den allermeisten Bäumen zu kalt und zu trocken wurde. Lediglich in gut geschützten Lagen konnten sich wohl kleine Baumgruppen halten.

»In dieser Zeit verdunstete aus dem sehr kalten Nordatlantik nur noch sehr wenig Wasser, und die Niederschläge in Mitteleuropa gingen drastisch zurück«, schildert Olaf Jöris die vielleicht wichtigste Veränderung in den Regionen zwischen den Eismassen, verwandelte dieser Wassermangel doch die gesamte Natur. Bäume verschwanden, Tiere zogen sich in mildere und vor allem feuchtere Regionen zurück – und die Steinzeitmenschen folgten ihnen. Solche Rückzugsregionen vermutet die Forschung schon lange im heutigen Südfrankreich und auf der Iberischen Halbinsel sowie auf dem italienischen Stiefel und auf dem Balkan.

Als das Eis schwand

Dank der neuen DNA-Daten konnten die Fachleute gemeinsam mit einem Team um die Leipziger Forscherin Vanessa Villalba-Mouco erstmals in diese Rückzugsorte der westlichen Angehörigen des Gravettien vorstoßen. Auf ihrem Weg nach Süden entwickelten die Menschen eine neue Kultur: das Solutréen. Es ist bekannt für sehr fein gearbeitete Lanzen- und Speerspitzen. Solche Funde stammen aus der Zeit von vor 22000 bis vor 18000 Jahren und fanden sich entlang der Atlantikküste des heutigen Südfrankreich bis hinunter nach Portugal sowie an der Mittelmeerküste des heutigen Spanien.

Als sich danach die Gletscher langsam zurückzogen, die Temperaturen stiegen und die Niederschläge wieder häufiger wurden, kehrten die Menschen in die entvölkerten Regio-

nen im Norden zurück: »Die Nachkommen der westlichen Gruppe tauchen sogar im heutigen Polen wieder auf«, sagt Cosimo Posth. Archäologen kennen die Kultur, die sie ausprägten, als Magdalénien.

Etwas völlig anderes passierte im östlichen Mitteleuropa und in Südeuropa. Den Höhepunkt der letzten Eiszeit überdauerten diese Gruppen offenbar nicht – ihr Erbgut lässt sich danach nicht mehr nachweisen. Doch ungefähr gleichzeitig tauchte im Nordosten des heutigen Italien eine neue Gruppe auf. »Die genetischen Strukturen dieser Neankömmlinge deuten auf einen Ursprung im Nahen Osten hin«, erklärt Posth. Möglicherweise kamen jene Menschen damals vom Balkan; DNA von dort haben die Forscher allerdings nicht untersucht. Den Archäologen sind sie als Angehörige des späten Gravettien oder Epigravettien bekannt, auch wenn sie mit ihren Vorgängern vor dem eiszeitlichen Maximum genetisch gesehen wenig verbindet.

Die neu Angekommenen breiteten sich mit der Zeit bis zur Spitze der italienischen Halbinsel aus. Je weiter sie kamen, umso kleiner wurde die Bevölkerungsgruppe. Als sie schließlich Sizilien erreichten, steckten sie nicht nur geografisch in einer Sackgasse: »Dort ähnelte sich das Erbgut der Menschen damals sehr«, erklärt Posth. Das deutet auf einen genetischen Flaschenhals hin. »Die effektive Populationsgröße lag in dieser Zeit nach den Erbgutanalysen auf Sizilien wohl nur noch bei 70 Personen«, fasst Paläogenetiker Blöcher zusammen. Mit dieser Kennzahl werden allerdings nur jene Menschen erfasst, die zu einem gegebenen Zeitpunkt ihre DNA tatsächlich weitergegeben haben. Die wahre Bevölkerungsgröße auf Sizilien war sicher deutlich höher. In solchen Flaschenhalssituationen genügt dann oft eine kleine Störung – eine Hungersnot, ein Vulkanausbruch – und von der Population ist nichts mehr übrig. Vielleicht erlidgegte ein ähnliches Schicksal die östlichen Angehörigen des Gravettien.

Doch die Bewohner des italienischen Stiefels starben nicht aus.

Als sich das Klima vor ungefähr 14000 Jahren rasch erwärmte, Niederschläge wieder Mitteleuropa erreichten und Wälder nach Norden vordrangen, begannen sie mit ihrer Wanderung zurück in diese Region. Nach und nach ersetzten sie die Gruppen, die bereits mit etwas Vorsprung aus Südwesteuropa dorthin gezogen waren. Diese Entwicklung deckt sich mit den archäologischen Daten: »Vor 14000 Jahren wurden vorher naturalistische durch abstrakte oder geometrische Darstellungen ersetzt«, erklärt Olaf Jöris.

Ankunft der Bauern

Bald aber zeichnete sich eine neue Teilung des Kontinents ab: 6000 Jahre lang tauschten die Jäger-und-Sammler-Gruppen in Osteuropa kaum Erbgut mit den Jägern und Sammlern im Westen und im Zentrum des Kontinents aus. Auch anatomisch unterschieden sich diese Gruppen in Haut- und Augenfarben deutlich. Doch dann begannen sich vor ungefähr 8000 Jahren die ersten Bauern von Anatolien aus nach Europa auszubreiten.

Sie drängten die ursprünglichen Gruppen vermutlich nach Norden und Nordosten zurück und brachten sie so in engeren Kontakt, wodurch sich ihre Genpools wieder aneinander annäherten. Danach endet zwar die Studie des Teams um Cosimo Posth, die dynamischen Veränderungen der Bevölkerung in Europa gingen allerdings weiter. ◀

Roland Knauer ist Wissenschaftsjournalist in Lehnin.

QUELLEN

Hublin, J.-J. et al.: Initial upper palaeolithic *Homo sapiens* from Bacho Kiro Cave, Bulgaria. *Nature* 581, 2020

Posth, C. et al.: Palaeogenomics of Upper Palaeolithic to Neolithic European hunter-gatherers. *Nature* 615, 2023

Villalba-Mouco, V. et al.: A 23,000-year-old southern Iberian individual links human groups that lived in Western Europe before and after the Last Glacial Maximum. *Nature Ecology & Evolution* 2023

ATMOSPHÄREN-CHEMIE

Wie Waldbrände den Ozonabbau beschleunigen

Nach starken Bränden wird in der Stratosphäre verstärkt Ozon abgebaut. Eine Forschungsgruppe hat nun herausgefunden, welche Prozesse dazu führen.

▶ Bei den verheerenden australischen Buschbränden, die zwischen 2019 und 2020 wüteten, stiegen gigantische Rauchschwaden in die Luft. Sie wurden um den ganzen Globus getragen und beeinflussten sogar die Luftqualität im weit entfernten Südamerika. Wie Satellitendaten gezeigt haben, hat der Rauch jener Brände auch die Zusammensetzung der oberen Atmosphäre verändert und dazu geführt, dass die Menge an stratosphärischem Ozon sank. Die Ozonschicht schützt das Leben auf

der Erde vor schädlicher kurzwelliger ultravioletter Strahlung.

Warum der Rauch von Waldbränden den Ozonabbau verstärken kann, war bislang unklar. Nun hat ein Team um die Atmosphärenwissenschaftlerin Susan Solomon am Massachusetts Institute of Technology in den USA herausgefunden, was Feinstaub aus dem Rauch dabei bewirkt.

1974 wiesen Modellrechnungen erstmals darauf hin, dass die damals zunehmende Menge an Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW, häufig

verwendet in Spraydosen, Schaumstoffen und Kühlgeräten) in der Stratosphäre Chlorradikale freisetzen kann, die Ozon katalytisch zerstören könnten. Mitte der 1980er Jahre folgte dann eine dramatische Entdeckung: Jedes Jahr dünnt im antarktischen Sommer die Ozondecke über der Südpolarregion aus, das Ozonloch bildet sich. Die Ergebnisse hatten weit reichende Folgen. 1987 verbot das Montrealer Protokoll Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen; die weltweite Nut-

Freitag
28. Juli
2023

Spektrum LIVE

RUNDGANG AM FLUGHAFEN DRESDEN

ERLEBNIS-TOUR AIRPORT DRESDEN & BESICHTIGUNG DES FLUGZEUGRUMPFS »152«

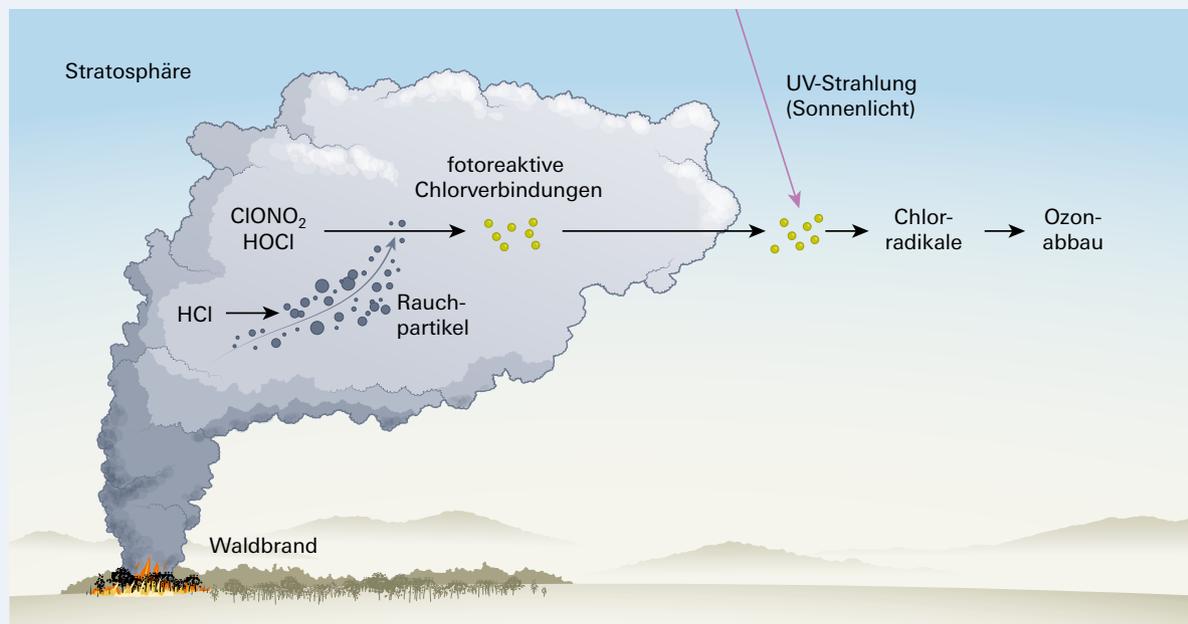
Bei unserer Erlebnis-Tour am Airport Dresden erfahren Sie bei einer Flughafenexkursion Wissenswertes zur Geschichte und Zukunft des Dresdner Airports. Anschließend können Sie auch die legendäre »152« – eine DDR-Luftfahrtlegende – besichtigen.

Infos und Anmeldung:
[Spektrum.de/live](https://www.spektrum.de/live)



Waldbrände fördern Ozonabbau

Bei starken Waldbränden gelangen Rauchpartikel oft bis in die Stratosphäre. Eine Forschungsgruppe um Susan Solomon und Kane Stone hat nun herausgefunden, dass sie dort Chlorwasserstoffgas (HCl) absorbieren können, das vor allem aus dem Abbau von FCKW stammt (im Bild nicht gezeigt). Dadurch sind die Partikel in der Lage, einen weiteren Prozess zu katalysieren: die Umwandlung anderer chlorhaltiger Gase wie Chlornitrat (ClONO_2) und hypochloriger Säure (HOCl) in »fotoreaktive« Chlorverbindungen. Trifft auf diese Moleküle ultraviolettes Licht aus der Sonnenstrahlung, setzen sie Chlorkradikale frei, die Ozon katalytisch abbauen und so dessen Konzentration in der Stratosphäre verringern.



NATURE: MCNEILL, V.F., THORNTON, J.A. HOW WILDFIRES DELETED OZONE IN THE STRATOSPHERE. NATURE 615, 2020, FIG. 1. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

zung von FCKW wurde schrittweise verringert und schließlich gestoppt. Dadurch erholte sich die stratosphärische Ozonschicht allmählich. Da FCKW sehr lange in der Erdatmosphäre verweilen, ist dieser Prozess immer noch nicht abgeschlossen.

Als das Ozonloch zum ersten Mal beobachtet wurde, bestand die Herausforderung für Atmosphärenchemiker darin, seine einzigartigen saisonalen und räumlichen Merkmale zu erklären. Zwar war anhand der Beobachtungen eindeutig, dass das Ozonloch mit Chlor zusammenhing, das durch menschliche Aktivitäten in die Luft eingebracht worden war. Wann es auftrat und in welchem Ausmaß, ließ sich aber nicht chemisch erklären.

Einen wichtigen Durchbruch brachten Theorie- und Laborstudien, an denen Solomon damals bereits beteiligt war. Sie offenbarten Reaktionen auf der Oberfläche stratosphärischer Eispartikel, aus denen die schillernden »Perlmutterwolken« bestehen, die manchmal in den Polarregionen zu sehen sind. Während des dunklen Polarwinters katalysieren diese Oberflächen effizient Reaktionen von Chlorwasserstoff (der meist aus dem Abbau von FCKW stammt) mit anderen relativ trägen chlorhaltigen Gasen, darunter Chlornitrat (ClONO_2) und hypochloriger Säure (HOCl). Dadurch entstehen so genannte fotoreaktive Formen von Chlor. Sobald im polaren Frühling das Sonnenlicht zurückkehrt, verwandelt

es diese Substanzen in eine Vielzahl hochreaktiver Chlorkradikale, die Ozon abbauende Prozesse in Gang setzen. Und noch auf eine zusätzliche Weise tragen die Eispartikel zum Ozonabbau bei: Sie entziehen der Atmosphäre bestimmte Stickstoffoxide (N_2O_5 und HNO_3). Die dienen normalerweise als Reservoir für Stickstoffoxidradikale, welche wiederum die durch Chlor katalysierte Ozonzerstörung behindern.

Bei den niedrigen Temperaturen, wie sie in der Stratosphäre herrschen, können die Eispartikel Chlor besonders gut aktivieren und Stickoxide ausgesprochen effektiv beseitigen. Es gibt aber Hinweise darauf, dass auch andere Arten feinsten Teilchen eine Rolle spielen könnten. So ge-

langten mit dem gewaltigen Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991 große Mengen Schwefeldioxid in die Stratosphäre. Das Gas wurde über weite Strecken transportiert und oxidiert, so dass schließlich über großen Teilen der Erde eine Schicht aus reflektierenden Schwefelsäurepartikeln lag. Diese verringerten zum einen die globale Durchschnittstemperatur für mehr als ein Jahr um zirka ein halbes Grad Celsius. Zum anderen beschleunigten sie den Ozonabbau in der Stratosphäre, und zwar nicht nur in den Polarregionen, sondern ebenso in den mittleren Breiten.

Überraschender Fund

Die australischen Buschbrände fast 30 Jahre später setzten ebenfalls Rauchpartikel frei, allerdings mit einer ganz anderen chemischen Zusammensetzung. Durch die starke Hitze gelangten gasförmige und feste Rauchbestandteile bis in die Stratosphäre. Laut den neuen Ergebnissen

des Teams um Solomon absorbieren die Feinstaubteilchen dort in größerem Umfang Chlorwasserstoffgas und verstärken dadurch die chemische Aktivierung der Ozon zerstörenden Chlornadikale (siehe »Waldbrände fördern Ozonabbau«).

Das war zunächst überraschend. Die Teilchen im Rauch von Waldbränden bestehen hauptsächlich aus Ruß und organischen Kohlenstoffverbindungen. Damit sind sie auf den ersten Blick ungeeignet, Chlor zu aktivieren oder Stickoxide zu binden. Denn unter trockenen Bedingungen, wie sie bei Bränden herrschen, sind solche Partikel im Allgemeinen weniger reaktiv als in Eis oder wässrigen Lösungen. Zudem vermutet man, dass sie bei den extremen Gegebenheiten in der unteren Stratosphäre eventuell glasartig auftreten – und in dieser Form sind sie nur schlecht zugänglich für reaktive Gase.

Möglicherweise liegen die Rauchpartikel in der Stratosphäre jedoch gar nicht in einem trockenen oder

glasartigen Zustand vor. Den ersten Hinweis darauf erhielten die Fachleute, als sie Daten des Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer analysierten. Bei diesem Projekt wird die Atmosphäre mit einem Spektrometer überwacht, das auf einem Weltraumsatelliten stationiert ist. Die Daten legten nahe, dass die stratosphärischen Partikel aus den australischen Waldbränden sowohl sauerstoffhaltiges organisches Material als auch adsorbiertes Wasser enthalten.

Auf dieser Beobachtung baut die aktuelle Studie auf. Durch thermodynamische Betrachtungen leiten die Autoren und Autorinnen die These her, dass komplexe Mischungen sauerstoffhaltigen organischen Materials selbst bei niedrigen Stratosphärentemperaturen wahrscheinlich flüssigkeitsähnlich sind. Sie stützen sich unter anderem auf eine Reihe von Laborstudien zur Löslichkeit von Chlorwasserstoff in Mischungen aus organischen Säuren und Wasser.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

JAHRGANG 2022

— CD-ROM —

Die **Spektrum**-CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bildern) des Jahrgangs 2022 von **Spektrum der Wissenschaft** als PDF-Version. Die Artikel sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken.

Zur besseren Nutzung Ihres Heftarchivs finden Sie auf der CD zusätzlich das Register von 1978 bis 2022 als PDF-Datei.

Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

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



Demnach können solche Mischungen Chlorwasserstoff sogar besser absorbieren als Schwefelsäure, der häufigere Bestandteil stratosphärischer Partikel. Mit anderen Worten: Rauchpartikel haben ein größeres Potenzial, den Ozonabbau zu fördern als bisher angenommen. Auf dieser Grundlage können die Atmosphärenforscher den während der australischen Waldbrände beobachteten Ozonabbau im Computermodell reproduzieren. Sie verwenden dazu numerische Modelle, die den von ihnen vorgeschlagenen Prozess mit der bekannten Chemie der Chloraktivierung und der durch Chlor katalysierten Ozonerstörung kombinieren.

Durch die Studie wird klar, dass die Aktivierung von Chlor durch die Rauchpartikel das fehlende Puzzleteil ist, um den Zusammenhang zwischen Waldbränden und Ozonabbau zu verstehen. Außerdem müssen Vorschläge, das Klima durch so genanntes Geoengineering zu beeinflussen, im Licht der neuen Ergebnisse betrachtet werden – speziell der Vorschlag, absichtlich Partikel in die Stratosphäre einzubringen, um

Sonnenlicht zu reflektieren und damit den Planeten zu kühlen. Solange man dabei andere Partikel als Schwefelsäure verwendet, so wird teilweise unterstellt, ließen sich negative Nebenwirkungen wie Ozonabbau oder die Erwärmung der Stratosphäre umgehen oder zumindest minimieren. Die aktuelle Studie betont nun, dass verschiedene Partikeltypen – ob frisch oder nach chemischer Umwandlung in der Stratosphäre – den Ozonabbau noch jahrzehntelang verstärken könnten, während der Chlorgehalt dort schon langsam sinkt. Jedes Material, das man für eine Injektion in die Stratosphäre in Betracht zieht, muss daher zumindest im Labor unter simulierten stratosphärischen Bedingungen sorgfältig untersucht werden.

Die australische Waldbrandsaison 2019/2020 war zwar extrem, doch große Waldbrände und die daraus hervorgehenden Pyrocumulonimbuswolken werden durch den Klimawandel wahrscheinlich häufiger und intensiver werden. Der Rauch, der in der Folge in die obere Atmosphäre gelangt, könnte daher die derzeit

ablaufende Erholung der stratosphärischen Ozonschicht verlangsamen oder vorübergehend stören. Es ist also wichtiger denn je zu verstehen, wie sich komplexe Partikel, die beim Verbrennen von Biomasse entstehen, in der Stratosphäre verhalten. ◀

V. Faye McNeill ist Professorin für Chemieingenieurwesen sowie Geo- und Umweltwissenschaften an der Columbia University im US-Bundesstaat New York. **Joel A. Thornton** ist Professor für Atmosphärenwissenschaften an der University of Washington in Seattle.

QUELLEN

Bernath, P. et al.: Wildfire smoke destroys stratospheric ozone. *Science* 375, 2022

Solomon, S. et al.: Chlorine activation and enhanced ozone depletion induced by wildfire aerosol. *Nature* 615, 2023

Solomon, S. et al.: On the depletion of Antarctic ozone. *Nature* 321, 1986

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 615, S. 219–221, 2023

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Sind Sprachmodelle bald die besseren Mathematiker?

Algorithmen wie ChatGPT tun sich selbst mit einfachen Rechenaufgaben noch immer schwer. Zwei neue Ansätze sollen das ändern – und könnten KI deutlich intelligenter machen.

▶ In den letzten Monaten hat das Sprachmodell ChatGPT weltweit für Schlagzeilen gesorgt. Der im November 2022 veröffentlichte Chatbot von OpenAI kann menschliche Sprache so überzeugend verarbeiten, dass er ähnlich kreativ und intelligent wie ein Mensch wirkt: Er gibt detaillierte Antworten auf schriftliche Fragen und kann Gedichte oder Lieder verfassen. Allerdings sind

solche Programme nicht vertrauenswürdig. Sie treffen manchmal unlogische Aussagen oder geben selbstsicherer Unwahrheiten als Tatsachen aus. »Sie sprechen von Einhörnern, vergessen dann aber, dass die Fabelwesen nur ein Horn besitzen«, sagt der Mathematiker und KI-Experte Jason Rute von IBM Research.

Dahinter steckt mehr als nur ein Programmierfehler. Sprachmodelle

können ihre Fehler nur schwer erkennen, was ihre Leistung einschränkt. Aber nicht jede KI leidet unter dieser Schwäche. Seit einigen Jahren gibt es Algorithmen, die durch »Reinforcement Learning« aus ihren Fehlern lernen – und so zu Meistern von strategischen Spielen wie Schach oder Go werden. Diese Fähigkeiten beherrschen Sprachmodelle wie ChatGPT bisher jedoch nicht.

»Wir wollen kein Sprachmodell schaffen, das einfach nur wie ein Mensch spricht«, sagt Yuhuai Wu von Google AI. »Wir wollen, dass es versteht, worüber es redet.« Wu hat 2022 zusammen mit seinem Team zwei Arbeiten veröffentlicht, die das ermöglichen könnten. Auf den ersten Blick geht es dabei um eine sehr spezifische Anwendung: künstlicher Intelligenz Mathematik beibringen. Doch durch diese Fähigkeit könnten Computer künftig logische Schlüsse ziehen, hoffen die Fachleute.

In der ersten Arbeit haben die Forscher einem Sprachmodell beigebracht, mathematische Aussagen in einen formalen Code zu übersetzen, damit ein »Beweisassistent« sie überprüfen kann. Der Ansatz ist nicht neu. Seit Jahrzehnten gibt es Bemühungen, Beweise in Computercode zu übertragen – ein Prozess, der als Formalisierung bezeichnet wird. Der Vorteil davon liegt auf der Hand: Wenn man eine Argumentation als Code darstellt und ein Computer diesen ohne Fehler ausführt, dann ist

die Argumentationskette zwangsläufig korrekt. Allerdings brauchen Menschen hunderte oder gar tausende von Stunden, um einen einzigen Beweis zu formalisieren, weshalb Mathematikerinnen und Mathematiker nur selten auf Beweisassistenten zurückgreifen.

Um den Aufwand zu verringern, versuchen KI-Experten nun Sprachmodellen beizubringen, mathematische Aussagen automatisch in eine »formale Sprache« zu verwandeln. KI-Programme wie GPT oder DeepL können bereits erfolgreich menschliche Sprachen ineinander übersetzen. Aber die Übertragung von Mathematik in Code ist deutlich schwieriger. Es gibt viel weniger Übersetzungsbeispiele, mit denen man eine KI trainieren kann. Außerdem enthalten formale Sprachen nicht immer den gesamten Wortschatz, der in einem ausgeschriebenen Beweis vorkommt.

Schritt für Schritt ans Ziel

Forscherinnen und Forscher von Google haben einem Sprachmodell namens Minerva beigebracht, Rechenaufgaben zu lösen und die einzelnen Zwischenschritte anzuzeigen.

Eingabe: Zeige, dass für alle a und b , wobei $a \neq b$ gilt:

$$\frac{a^2 + b^2}{2} > \left(\frac{a + b}{2}\right)^2$$

Ausgabe:

$$\begin{aligned} & \frac{a^2 + b^2}{2} > \left(\frac{a + b}{2}\right)^2 \\ \iff & \frac{a^2 + b^2}{2} > \frac{a^2 + b^2 + 2ab}{4} \\ \iff & a^2 + b^2 > \frac{a^2 + b^2 + 2ab}{2} \\ \iff & 2a^2 + 2b^2 > a^2 + b^2 + 2ab \\ \iff & a^2 + b^2 > 2ab \\ \iff & a^2 + b^2 - 2ab > 0 \\ \iff & (a - b)^2 > 0 \end{aligned}$$

Das ist korrekt, da das Quadrat einer reellen Zahl positiv ist.

KI als Übersetzer

Deshalb haben sich die Fachleute entschieden, zunächst nur kurze Aussagen von einer KI übersetzen zu lassen – und nicht gleich ganze Beweise. Dafür haben sie mit dem Sprachmodell »Codex« gearbeitet, das sich auf GPT-3 (eine Vorgängerversion von ChatGPT) stützt, zusätzlich aber mit Daten aus Quellen wie GitHub trainiert wurde. Um Codex das Formalisieren beizubringen, übergaben die Forscherinnen und Forscher der KI nur zwei Beispiele: je ein mathematisches Problem in natürlicher Sprache und dessen formale Code-Übersetzung.

Nach diesem spärlichen Tutorial fütterten sie Codex mit knapp 4000 Aufgaben aus Highschool-Wettbewerben. Das Ergebnis scheint auf den ersten Blick nicht sonderlich beeindruckend: Die Übersetzungen in die formale Sprache »Isabelle/HOL« waren in 70 Prozent der Fälle falsch. »Manchmal weiß das Sprachmodell zum Beispiel nicht, was der Isabelle-Ausdruck für »Primzahl« oder für »Fakultät« ist – und erfindet es einfach. Das ist das größte Problem bei diesen Modellen«, so Rute, »sie raten oft.« Doch für die Fachleute war nicht

wichtig, dass Codex in 70 Prozent der Fälle versagte, sondern dass die KI bei 30 Prozent erfolgreich war – und das, nachdem sie bloß zwei Beispiele gesehen hatte!

Das verdeutlicht eine interessante Eigenschaft von Sprachmodellen: Mit genügend allgemeinen Trainingsdaten lernen sie nicht nur, natürliche Sprache zu verarbeiten, sondern erlangen gleichzeitig weitere Fähigkeiten. Codex war vor dieser Forschungsarbeit nie darauf trainiert worden, Aussagen in formalen Code zu übersetzen. Aber durch das Training mit den GitHub-Daten war die KI bereits mit Isabelle/HOL vertraut, und durch andere Internetseiten kannte sie mathematische Probleme. Deshalb genügte es, Codex nur zwei Beispiele für das Gewünschte zu zeigen. »Wirklich erstaunlich ist, dass die Autoren nicht viel getan haben«, betont Rute. »Das Modell besaß bereits die Fähigkeit für diese Aufgabe.« Etwas Ähnliches konnte das Team um Wu beobachten, als es einem Sprachmodell nicht nur beibrachte, Rechenaufgaben zu übersetzen, sondern sie zu lösen.

Damit beschäftigt sich die zweite Arbeit der Forscherinnen und Forscher. In diesem Fall trainierten sie eine KI, Matheaufgaben auf Highschool-Niveau Schritt für Schritt zu berechnen. Zum Beispiel: »Eine Gerade parallel zu $y = 4x + 6$ verläuft durch den Punkt (5, 10). Wie lautet die y-Koordinate des Punkts, an dem diese Gerade die y-Achse schneidet?« Dafür griffen die Fachleute auf die Google-KI PaLM zurück, die wie GPT-3 natürliche Sprache verarbeiten kann, und fütterten sie zusätzlich mit mathematischen Inhalten von Internetseiten wie ArXiv. Das erweiterte KI-Modell nannten sie »Minerva«.

Um den Algorithmus auf seine bevorstehende Aufgabe vorzubereiten, präsentierten ihm die Forscherinnen und Forscher vier Beispiele: schrittweise ausformulierte Lösungswege für mathematische Textaufgaben. Im Praxistest schnitt Minerva dann je nach Themenfeld unterschiedlich ab. In Algebra beantwortete es die Fragen in etwas mehr als

der Hälfte der Fälle richtig, während es bei Geometrie häufiger falsch lag.

Um die Ergebnisse einzuordnen, mussten die Autorinnen und Autoren sicherstellen, dass Minerva die Fragen nicht nur deshalb richtig beantwortet, weil es diese oder ähnliche Aufgaben bereits aus den Trainingsdaten kannte. »In den Modellen stecken so viele Informationen, dass sie eine Standardaufgabe sehr wahrscheinlich schon einmal gesehen haben«, erklärt Rute. Um dieser Möglichkeit vorzubeugen, sollte Minerva eine polnische Mathematikprüfung aus dem Jahr 2022 lösen, die erst nach dem Training veröffentlicht wurde. Die KI hat beeindruckende 65 Prozent der Fragen richtig beantwortet. Das deutet auch in diesem Fall darauf hin, dass sie bereits über die erforderlichen Fähigkeiten verfügte, bevor man ihr die vier ausgewählten Beispielaufgaben mit Lösungen übergab. »Das ist eine Lektion, die wir beim Deep Learning immer wieder lernen: Skalierung hilft erstaunlich gut bei vielen Aufgaben«, sagt Guy Gur-Ari, der Koautor der Studie ist.

Die Forscherinnen und Forscher konnten Minervas Leistung sogar steigern, indem sie das Programm ein

Problem mehrmals lösen ließen, und das am häufigsten genannte Ergebnis auswählten. Dadurch stieg der Anteil korrekter Antworten in manchen Fällen von 33 auf 50 Prozent an. Was noch erstaunlicher ist: »Wenn man ein Sprachmodell bittet, sich Schritt für Schritt zu erklären, erhöht sich die Genauigkeit immens«, erklärt der Mathematiker Siddhartha Gadgil vom Indian Institute of Science in Bangalore. Diese Methode scheint für KIs dieselben Vorteile zu bieten wie für Menschen. Man ist gezwungen, sich mehr Zeit zu nehmen und widmet dadurch jedem Aufgabenteil mehr Aufmerksamkeit.

Sich selbst korrigieren

Die Arbeit von Minerva ist zwar beeindruckend, hat aber einen erheblichen Nachteil. Die KI kann nicht überprüfen, ob sie eine Frage korrekt beantwortet hat. Selbst wenn sie richtig lag, kann sie nicht sicherstellen, dass die Zwischenschritte fehlerfrei waren. »Manchmal kommen die Programme zu falsch positiven Ergebnissen mit falschen Begründungen für richtige Antworten«, sagt Gadgil. Deshalb ist das Modell auf menschliches Feedback angewiesen, um besser zu werden. Das ist jedoch ein langwieriger

Beispiel für eine Übersetzung in einer formale Sprache

Mathematische Aussage: Es gibt keine Funktion f von den natürlichen Zahlen in die natürlichen Zahlen, so dass für alle n gilt: $f(f(n)) = n + 1987$.

```
theorem
  fixes f :: "nat \ $\rightarrow$  nat"
  assumes "\forall n. f (f n) = n + 1987"
  shows False
```

Wenn man diese Aussage in einen Beweisassistenten eingibt, kommt das Ergebnis »false« heraus, da die Aussage falsch ist.

MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ger und aufwändiger Prozess. »Ich glaube nicht, dass dieser Ansatz für komplizierte Probleme geeignet ist«, sagt Christian Szegedy von Google und Mitverfasser der Arbeit.

Stattdessen möchten die Forscherinnen und Forscher die mathematischen Fähigkeiten der Maschinen mit denselben Techniken verbessern, die es KIs wie AlphaGo ermöglicht haben, die weltbesten Menschen bei strategischen Aufgaben wie Brettspielen zu schlagen. Entscheidend ist dabei der Einsatz von Reinforcement Learning, das einer KI beibringt, zu erkennen, welcher Spielzug gut ist. Wenn AlphaGo eine Go-Partei verliert, analysiert das Programm die relevanten Spielzüge und lernt aus ihren Fehlern. Für solche Systeme braucht man jede Menge Trainingsdaten. »Wenn man mit natürlicher Sprache oder Minerva arbeitet, ist das kein Problem: Das ganze Internet ist voll Mathematik. Aber man kann damit kein Reinforcement Learning machen«, sagt Wu. Denn die KI kann nicht beurteilen, welcher Rechenschritt »gut« war. Sie müsste erst

wissen, welche Schritte überhaupt zulässig sind und was ein richtiges Ergebnis ist – und dafür muss sie Berechnungen verifizieren können.

Beweisassistenten könnten eine Lösung bieten. Allerdings gibt es zu diesen nur wenige Daten. »Wir brauchen eine Art Brücke, um von einer Seite zur anderen zu gelangen«, sagt Wu. Ein Programm wie Codex könnte diese Verbindung sein: Eine KI könnte ein mathematisches Problem zunächst formalisieren, es dann lösen und das Ergebnis anschließend mit einem Beweisassistenten überprüfen. Das würde das für das Reinforcement Learning notwendige Feedback liefern, damit die Algorithmen aus ihren Fehlern lernen. Am Ende könnte die KI zu einer beweisbar korrekten Antwort kommen, mit allen gewünschten Zwischenschritten.

KI-Forscher haben noch ehrgeizigere Ziele vor Augen. Denn die Mathematik ist ein perfektes Versuchsfeld, um maschinelle Schlussfolgerungen zu entwickeln. Wenn ein Computer effektiv über das Fach nachdenken kann, so die Überlegung,

sollte er ganz natürlich auch andere Fähigkeiten erwerben: etwa programmieren oder medizinische Diagnosen stellen – und vielleicht lernt es, widersprüchliche Details in einer Geschichte über Einhörner aufzudecken. ◀

Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia, South Carolina.

QUELLEN

Wu, Y. et al.: Autoformalization with large language models. ArXiv 2205.12615, 2022

Wu, Y. et al.: Solving quantitative reasoning problems with language models. ArXiv 2206.14858, 2022



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »To Teach Computers Math, Researchers Merge AI Approaches« 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

Redaktionsassistenz: 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

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.

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.



Unsere Neuerscheinungen

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



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

Patentierete Intelligenz

Maschinelles Lernen braucht gewaltige Rechenleistung und hohe Programmierkunst. Entscheidende Kompetenzen liegen heute in privater Hand.

» spektrum.de/artikel/2141901

Die amerikanische Softwarefirma OpenAI, die das spektakulär mit künstlicher Intelligenz (KI) agierende Dialogsystem ChatGPT schuf, präsentierte sich anfangs als öffentlich zugänglich (open source) und nicht gewinnorientiert (non-profit). Man wolle, so hieß es 2015, »ungehindert von der Notwendigkeit, finanzielle Rendite zu erzeugen« das Ziel verfolgen, »der gesamten Menschheit zu nützen«.

Vier Jahre später definierte OpenAI seinen Unternehmenskern als »gedeckelt profitorientierte Organisation«. Der Zusatz »gedeckelt« besagte, dass der Shareholder-Gewinn das Hundertfache (!) des Aktieneinsatzes nicht überschreiten solle. Die Statusänderung würde es OpenAI ermöglichen, seine »Investitionen in Rechenleistung und Talent rapide zu mehren«.

Diese Anekdote zitiert ein Team um den Wirtschaftsforscher und Informatiker Nur Ahmed vom Massachusetts Institute of Technology als ein Symbol dafür, wie sehr die KI-Forschung in den vergangenen Jahren von privater Finanzierung abhängig geworden ist (*Science* 379, S. 884–886, 2023).

In den USA strömen angehende KI-Spezialisten massenhaft aus den Universitäten in Software-Start-ups. Blieben 2004 noch 80 Prozent der Hochschulabsolventen der akademischen KI-Forschung erhalten, so waren es 2020 nur noch 30 Prozent; die meisten suchten Jobs in kommerziellen Softwarelaboren.

Damit nicht genug: Der Privatsektor wirbt den Universitäten obendrein etablierte Computerwissenschaftler in rauen Mengen ab. Alles in allem droht dieser Braindrain die öffentlich finanzierte KI-Forschung der besten Talente zu berauben.

In der Folge sind industrielle Computermodelle an Umfang und Rechenpower denjenigen von akademischer Herkunft im Schnitt 30-fach überlegen. Praktisch sämtliche großen KI-Modelle befinden sich heute in privater Hand.

Der Grund? Mit den Worten von Fausts Gretchen: »Zum Golde drängt, am Golde hängt doch alles.« Akademische KI-Forschung ist auf staatliche Finan-

zierung angewiesen, und die betrug 2021 im Fall der USA sowie der EU jeweils etwas mehr als eine Milliarde Euro. Dem stehen weltweite Ausgaben der privaten KI-Industrie von geschätzten 320 Milliarden Euro

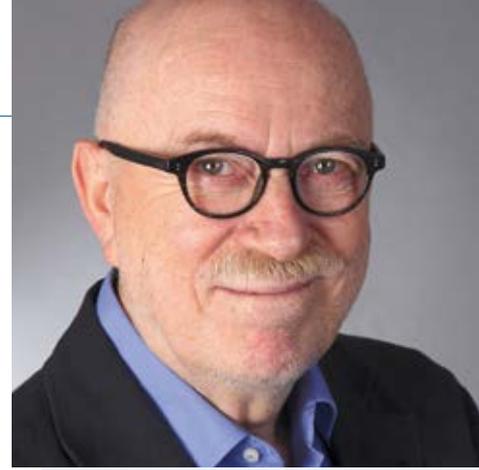
gegenüber. Allein was Googles Mutterfirma Alphabet pro Jahr für ihr Subunternehmen DeepMind aufwendet, übersteigt das KI-Jahresbudget der USA oder der EU.

Die enorme Dynamik der privaten Initiative in der Branche ist zwar eindrucksvoll, aber auch riskant. Damit droht die KI allmählich das öffentliche und private Leben, die sozialen Medien und die persönlichen Daten einem mehr oder weniger anonymen Regime zu unterwerfen. Die dringend angesagte Debatte über einen ethischen Rahmen für diesen historischen Vorgang geht ins Leere, wenn die Adressaten hinter dem Schutz ihrer Patente verschwinden.

Auf die Gefahr für den Wissenschaftsprozess selbst weist der Politologe und Datenwissenschaftler Arthur Spirling von der New York University hin (*Nature* 616, S. 413, 2023). Die Privatisierung der KI zwingt die Forscher, an Stelle frei zugänglicher Software fast nur noch so genannte proprietäre Programme zu nutzen – das heißt solche, die durch Patente, Lizenzbestimmungen oder Copyright als Betriebsgeheimnis der entwickelnden Firma geschützt sind. Eine nicht öffentliche KI stellt aber die Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit sowie die ethische Zulässigkeit der damit gewonnenen Resultate in Frage.

Als leuchtendes Gegenbeispiel für gelungene öffentlich finanzierte Kooperation nennt Spirling die Großforschungseinrichtung CERN.

Verdient die Entwicklung tendenziell autonomer Denkwerkzeuge am Ende weniger internationale Koordination als die Suche nach den Bausteinen der Materie?



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

KOGNITION

Wie das Gehirn die Welt konstruiert

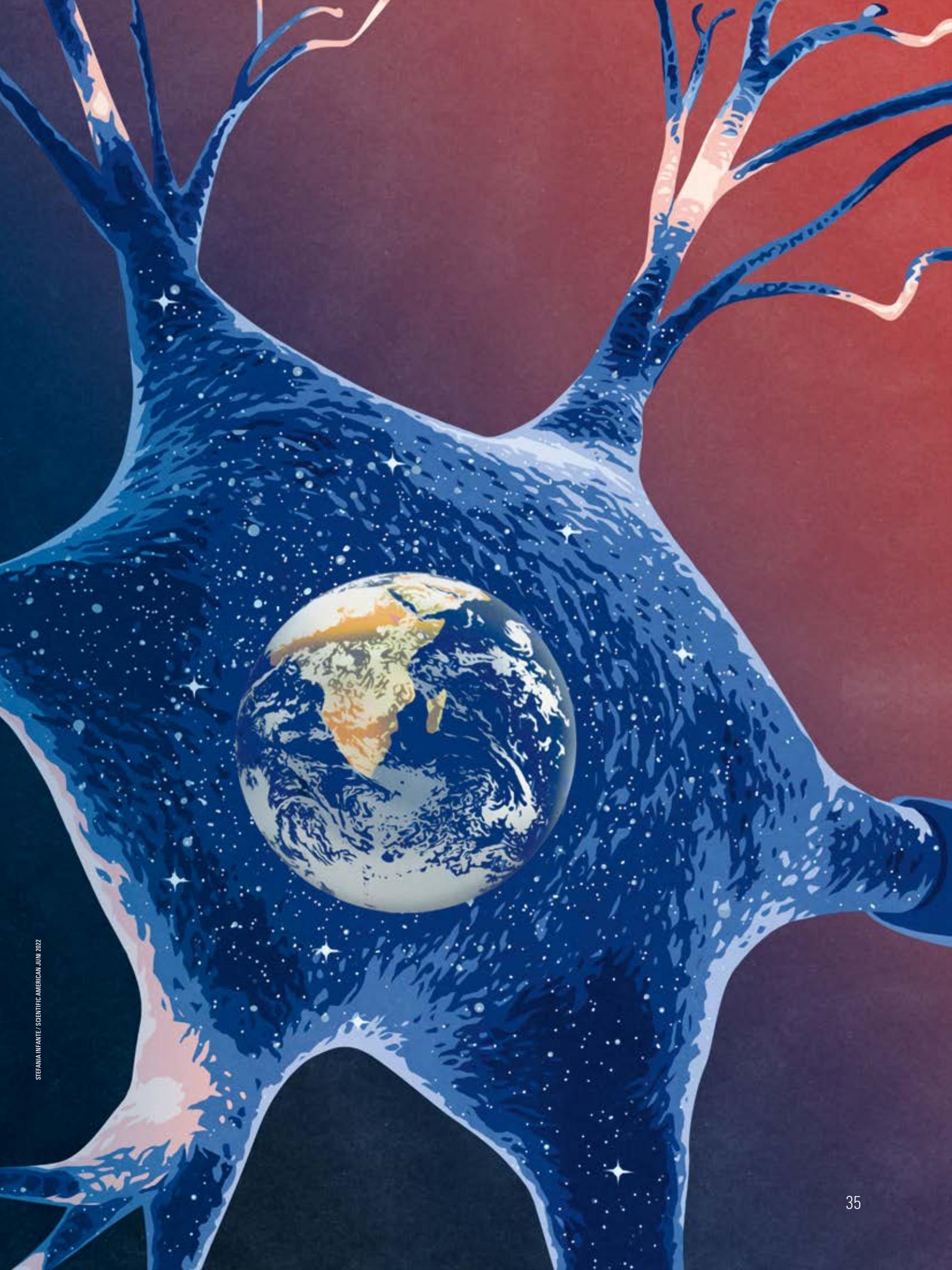
Eine neue Theorie besagt: Das Gehirn ist bei der Geburt kein unbeschriebenes Blatt, sondern verfügt bereits über ein großes Repertoire an Aktivitätsmustern. Das eröffnet Perspektiven dazu, wie wir unsere Umwelt wahrnehmen und darauf reagieren.

» spektrum.de/artikel/2141862



György Buzsáki ist Systemneurowissenschaftler an der New York University School of Medicine. Seine Arbeit befasst sich unter anderem damit, wie sich Erinnerungen bilden. 2011 erhielt er zusammen mit zwei Kollegen den Brain Prize der dänischen Lundbeck-Stiftung und 2020 den Ralph W. Gerard Prize der US-amerikanischen Society for Neuroscience.

DIE WELT IM KOPF Eine Hirnzelle bündelt Informationen zu einem Abbild der Außenwelt.



Als ich als junger Wissenschaftler meine ersten Seminare an der Universität leitete, erzählte ich den Studentinnen und Studenten, was ich in den Neurophysiologiebüchern gelesen hatte. Ich erklärte überzeugt, wie das Gehirn Informationen aus der Umwelt nutzt, um den Körper zu steuern: Spezielle Neurone in Augen, Ohren und anderen Sinnesorganen wandeln sensorische Reize in elektrische Signale um und leiten sie dann an die entsprechenden Teile der Hirnrinde weiter. Diese verarbeitet die eingehenden Daten und löst die Wahrnehmung aus. Um eine passende Bewegung einzuleiten, weisen Impulse aus dem motorischen Kortex die Nerven des Rückenmarks an, bestimmte Muskeln zu kontrahieren.

Die meisten Studierenden waren mit meinen Erklärungen zufrieden. Doch einige besonders schlaue stellten mir unangenehme Fragen: »Wo genau im Gehirn findet die Wahrnehmung statt?« Oder: »Was löst eine Fingerbewegung aus, bevor Zellen im motorischen Kortex feuern?« Meine Standardantwort lautete: Das passiert alles im Neokortex! Dann wechselte ich geschickt das Thema oder streute ein paar obskure lateinische Begriffe ein, die ihnen wissenschaftlich genug erschienen, um sie vorübergehend zufrieden zu stellen.

Ich hatte mit der Erforschung des Gehirns begonnen, ohne mir viele Gedanken darüber zu machen, ob die Theorie zur Kopplung von Wahrnehmung und Handlung plausibel war. Zu Beginn meiner Karriere beschäftigten mich andere Entdeckungen und Erkenntnisse, die sich nach und nach zu dem entwickelten, was in den 1960er Jahren als »Neurowissenschaften« bekannt wurde. Doch meine Unfähigkeit, diese berechtigten Fragen zu beantworten, hat mich seither nicht mehr losgelassen. Ich musste mir eingestehen, dass ich versuchte, etwas zu erklären, was ich nicht wirklich verstand.

Ein großes Problem für mich und andere Fachleute liegt schon darin, dass niemand so genau sagen kann,

was eigentlich der »Geist« (im Englischen »mind«) ist. Seit Aristoteles gingen zahlreiche Denker und Denkerinnen davon aus, dass er zunächst ein unbeschriebenes Blatt ist, auf das unsere Erfahrungen gemalt werden. Im vergangenen Jahrhundert hat diese »Outside-in«-Perspektive die Psychologie und die Kognitionswissenschaft durchdrungen. Demnach diene das Gehirn als Werkzeug, um die wahre Natur der Welt zu erkennen.

Das ist allerdings nicht die einzige Sichtweise. Man kann die Sache auch andersherum betrachten: Womöglich versuchen Hirnnetzwerke lediglich, ihre eigene interne Dynamik aufrechtzuerhalten. Dabei erzeugen sie ständig zahllose, anfangs unsinnige Muster neuronaler Aktivität, so genannte Feuermuster. Wenn eine scheinbar zufällige Handlung vorteilhaft erscheint, gewinnt das ihr zu Grunde liegende Muster an Bedeutung. Sagt ein Säugling etwa »te-te« und bieten die Eltern ihm daraufhin freudig einen Teddy an, erhält der Laut »te-te« die Zuschreibung »Teddybär«. Neuere Erkenntnisse der Hirnforschung sprechen dafür, dass an dieser »Inside-out«-Theorie etwas dran sein muss.

Wie funktioniert Wahrnehmung?

Dennoch ist das Konzept der leeren Tafel – der Tabula rasa – unter Neurowissenschaftlern nach wie vor weit verbreitet. Fachleute suchen weiterhin neuronale Mechanismen, die diese Vorstellungen stützen. Viele von ihnen orientieren sich dabei an den Entdeckungen von David Hubel (1926–2013) und Torsten Wiesel. Für ihre Arbeit zum visuellen System erhielten die beiden 1981 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Die Forscher hatten die neuronale Aktivität von Tieren aufgezeichnet, während sie ihnen verschiedene Formen zeigten. Sich bewegende Linien, Kanten, helle sowie dunkle Bereiche und andere erkennbare Muster brachten unterschiedliche Gruppen von Neuronen zum Feuern. Hubel und Wiesel folgerten, dass das Gehirn Bilder schrittweise analysiert: Es beginnt mit einfachen Mustern und setzt sie dann zu komplexeren zusammen. Irgendwo werden alle Merkmale verbunden, um schließlich das gesamte Objekt zu repräsentieren. Man selbst muss dafür nichts tun, das Gehirn macht das ganz automatisch.

Dem Outside-in-Ansatz zufolge besteht die grundlegende Funktion des Gehirns darin, Signale aus der Umwelt wahrzunehmen und sie richtig zu interpretieren. Es bräuchte jedoch eine Art Mittelsmann, um auf diese Reize zu reagieren. Zwischen den Wahrnehmungseingängen und -ausgängen müsste sich eine Art »zentraler Prozessor« befinden. Er nähme sensorische Eindrücke aus der Umwelt wahr und träge Entscheidungen darüber, was mit ihnen geschehen soll, um dann die richtige Reaktion einzuleiten. Diese spekulative Instanz hat verschiedene Namen: freier Wille, Exekutivfunktion oder schlicht »Black Box«. Hirnregionen höherer Ordnung wie der präfrontale Kortex wurden bereits als der Ort postuliert, an dem »alles zusammenfließt« und an dem »alle Handlungen beginnen«. Bei näherer Betrachtung tun sich allerdings erhebliche Widersprüche auf.

AUF EINEN BLICK

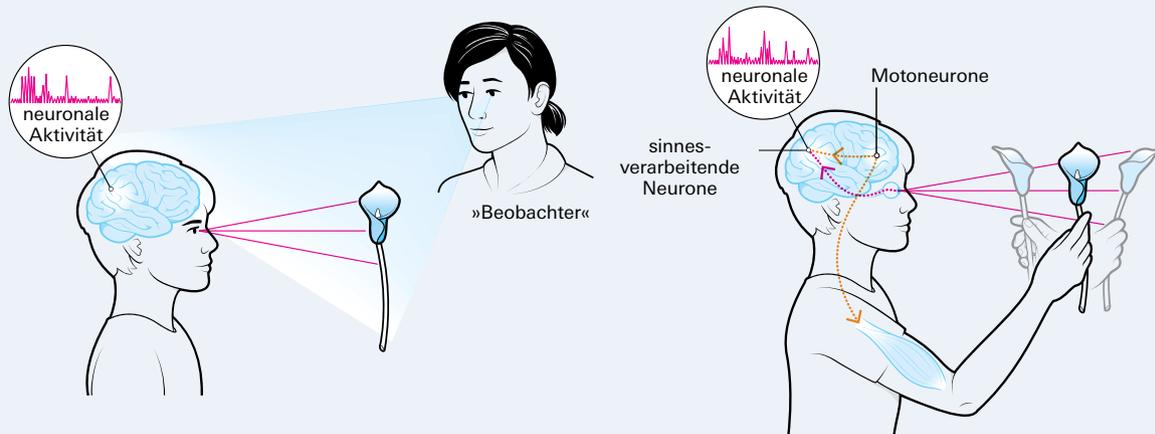
Ein Quell der Möglichkeiten

- 1** In den Neurowissenschaften dominiert die Ansicht, das Gehirn gleiche anfangs einer Tabula rasa, die im Lauf des Lebens mit Sinneseindrücken und Erfahrungen gefüllt wird.
- 2** Dieses einfache »Outside-in«-Modell hat jedoch einige Schwachstellen. Manche Hirnprozesse lassen sich damit schwer oder gar nicht erklären.
- 3** Die neuere »Inside-out«-Theorie bietet eine alternative Sichtweise. Demnach ist selbst ein junges Gehirn voller Informationen, die nur noch sinnvoll mit Erfahrungen verknüpft werden müssen.

»Outside in« oder »Inside out«?

Die Idee, dass das Gehirn wie eine leere Tafel ist, auf die Erfahrungen geschrieben werden, gibt es seit der Antike. Noch heute existiert sie in abgeänderter Form weiter, doch manche Neurowissenschaftler zweifeln sie inzwischen an. Sie setzt nämlich schwer haltbare Annahmen über die Art und Weise voraus, wie das Gehirn Ereignisse in der Welt verarbeitet. Insbesondere betrifft das die Notwendigkeit eines hypothetischen »Beobachters«, der eingehenden Signalen eine Bedeutung zuweist.

BROWN BIRD DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2012; BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Outside-in-Modell

Ein Reiz – das Bild einer Blume – erreicht die Augen und das Gehirn antwortet darauf, indem es Neurone zum Feuern bringt. Diese These ist nur plausibel, wenn ein »Beobachter« in den Prozess involviert ist, der die Blume und die neuronalen Reaktionen auf sie miteinander in Beziehung setzen kann. Fehlt diese Instanz, »sehen« Nervenzellen in der Sehrinde die Blume nicht.

Inside-out-Modell

Der alternative Erklärungsansatz kommt ohne Beobachter aus. Er geht davon aus, dass wir die Außenwelt verstehen lernen, indem wir mit ihr interagieren. Wenn man ein Objekt, etwa eine Blume, bewegt, erfährt man mehr über sie. Um diese Aufgabe zu meistern, fließen Signale von handlungsauslösenden und sensorischen Neuronen zusammen und geben gemeinsam Aufschluss über seine Größe, Form und weitere Attribute. Ein bedeutungsvolles Bild entsteht und lässt das Gehirn in diesem Fall die Blume »sehen«.

Der Outside-in-Ansatz kann nämlich nicht erklären, wie das Licht, das auf die Netzhaut trifft, in eine Erinnerung an einen Sommerausflug umgewandelt wird. Die veränderten Feuermuster der Sinneszellen, die gerade stimuliert werden, stellen an und für sich nichts dar, was das Gehirn verstehen und speichern kann. Neurone in der Sehrinde, die beim Anblick einer Rose aktiv werden, erkennen die Blume nicht. Sie reagieren lediglich auf Signale aus weiteren Teilen des Gehirns, einschließlich jener, die von der Retina kommen.

In anderen Worten: Neurone in den visuellen Arealen im Kortex und sogar im hypothetischen Zentralprozessor können nicht »sehen«, was in der Welt um sie herum geschieht. Es gibt keinen inneren Dolmetscher, der veränderten Feuermustern eine Bedeutung zuweist. Und so wissen die Nervenzellen nichts von den Ereignissen, die ihre Aktivität verursachen. Nur eine Art »Beobachter«, der sowohl die Hirnaktivität als auch die auslösenden Faktoren in der Außenwelt sieht, ist in der Lage, die beiden Perspektiven zusammenzuführen (siehe »Outside in« oder »Inside out«?).

Da signalverarbeitende Neurone im Kortex nicht direkt auf die Außenwelt zugreifen, müssen sie eingehende

Information mit etwas anderem abgleichen – sie sozusagen »erden«. Dem Gehirn steht dafür nur eine Quelle zur Verfügung; sie entsteht, sobald wir eine Handlung auslösen. Ins Wasser getauchte Stöcke sehen beispielsweise häufig krumm aus. Erst wenn wir sie hin und her bewegen, bemerken wir, dass sie nicht gebrochen sind. Der Abstand zwischen zwei Bäumen und zwei Berggipfeln mag aus einer bestimmten Perspektive gleich erscheinen, aber sobald man sich ihnen nähert oder sich wegbewegt, wird der Unterschied ersichtlich.

Im Outside-in-Modell basiert eine Handlung auf einer Kette von Ereignissen: von der Wahrnehmung über die Entscheidung bis zur durchgeführten Aktion. In Wahrheit durchläuft das Gehirn jedoch nicht alle diese Schritte einzeln. Stattdessen informieren motorische Areale bei jeder Bewegung den Rest der Großhirnrinde über eingeleitete Muskelkontraktionen. Sie tun das, indem sie eine zusätzliche Nachricht aussenden, die man Efferenzkopie (englisch: corollary discharge) nennt.

Die Efferenzkopie liefert die Information, mit denen sensorische Schaltkreise sich erten. Denn sie bestätigt es, wenn das eigene Handeln eine beobachtete Veränderung bedingt hat. Ohne einen solchen Abgleich könnten

Sinneseindrücke niemals sinnvolle Erkenntnisse über die Größe und Form eines Gegenstands liefern. Wahrnehmung kann nach dieser Auffassung als das definiert werden, was wir tun, und nicht als das, was wir passiv über unsere Sinne aufnehmen.

Neuronale Schaltkreise, die Handlungen auslösen, haben also zwei Aufgaben. Die erste besteht darin, Befehle an Muskeln zu senden – darunter auch solche, die Augen und sonstige an der Wahrnehmung beteiligte Körperteile (etwa die Finger oder die Zunge) steuern. Diese richten die Sensoren besser zur Signalquelle aus, so dass das Gehirn mehr Daten über die Art und den Ursprung des Reizes erhält.

Ihre zweite Aufgabe ist es, die Information über diese Bewegungen in Form von Efferenzkopien an sensorische und weitere übergeordnete Hirnbereiche zu senden. Man kann sich das wie einen Einschreibebefehl vorstellen: Neurone, die Augenbewegungen auslösen, benachrichtigen zugleich visuelle Kortextareale über ihr Tun. So kann unser Gehirn etwa unterscheiden, ob sich eine Blume im Wind bewegt hat oder wir sie angefasst haben.

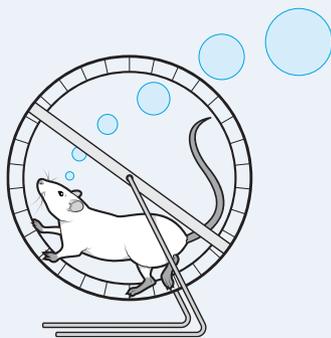
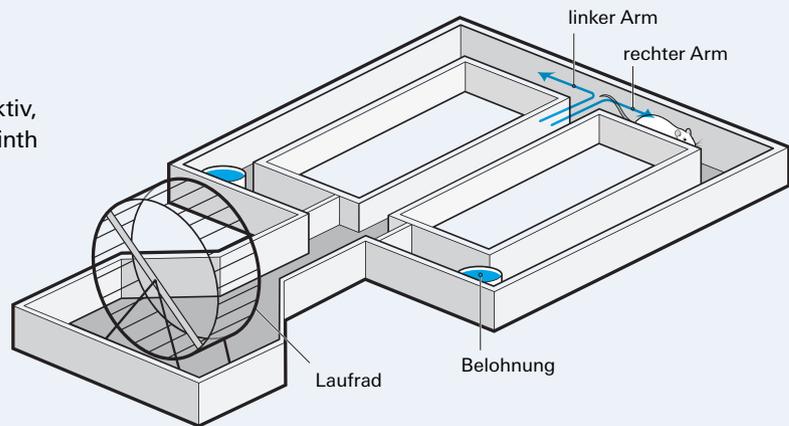
Ein einfacher Versuch zeigt, was die Efferenzkopie bewirkt: Bedecken Sie eines Ihrer Augen mit einer Hand. Tippen Sie nun den anderen Augapfel mehrmals sanft von der Seite mit der Fingerspitze an, während Sie diesen Text lesen. Sie werden sofort sehen, dass die Buchstaben

Routenplaner im Kopf

Laut einem Experiment werden spezifische Neurone in einer bestimmten Reihenfolge aktiv, wenn eine Ratte einen Weg durch ein Labyrinth plant, um an eine Belohnung zu kommen.

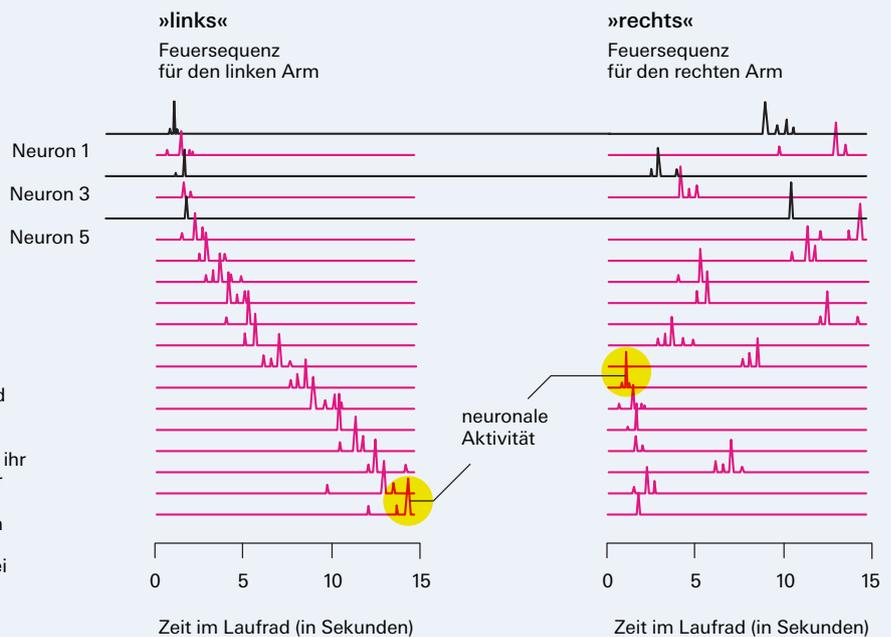
Aufbau des Experiments

Ein Laufrad befindet sich am Eingang eines Labyrinths mit zwei Armen. Die Ratte kann ihren Weg nach einem 15-sekündigen Lauf im Laufrad frei auswählen, sie erhält aber nur eine Belohnung, wenn sie abwechselnd links und rechts geht. Neuronale Feuermuster werden sowohl während der Zeit im Laufrad als auch im Labyrinth erfasst.



Resultate

Die neuronale Aktivität der Ratte im Laufrad sagte voraus, welche Richtung das Tier Sekunden später im Labyrinth einschlagen würde – ganz so, als würde sie sich den vor ihr liegenden Weg ausmalen. Das Feuermuster »links« trat auf, während sich die Ratte im Laufrad befand, bevor sie anschließend den linken Arm des Labyrinths entlanglief. Es unterscheidet sich vom Muster »rechts«, bei dem das Tier den anderen Weg wählte.



Nervenzellen wissen nichts von den Ereignissen, die ihre Aktivität verursachen

hin- und hertanzen. Wenn Sie wie üblich lesen, bleiben die Zeilen an Ort und Stelle, obwohl Ihre Augen ebenfalls ständig in Bewegung sind. Der Grund: Die Neurone, die die Augenbewegungen einleiten, senden eine Efferenzkopie an das visuelle System. Das Gehirn beurteilt mit ihrer Hilfe, ob sich die Umwelt oder der Aupapfel bewegt.

Der Unterschied zwischen dem Outside-in- und dem Inside-out-Ansatz wird besonders deutlich, wenn man die beiden auf Lernprozesse anwendet. Das Tabula-rasa-Modell geht davon aus, dass Hirnnetzwerke mit neuen Erfahrungen zusätzliche Verbindungen knüpfen. Beim Lernen sollten die Schaltkreise demnach ausgefeilter werden. Im Inside-out-Modell ist Erfahrung hingegen nicht die Hauptquelle für die Komplexität des Gehirns. Stattdessen organisiert sich das Netzwerk selbst und legt sich dabei ein riesiges Repertoire an vorgefertigten Feuermustern an, die so genannten neuronalen Trajektorien. Es gleicht folglich einem Wörterbuch, das anfangs mit unsinnigen Wörtern gefüllt ist. Neue Erfahrungen ändern nichts an der Gesamtaktivität der Neuronennetze. Vielmehr lernen wir, indem wir vorhandene Trajektorien mit dem Erlebten verbinden.

Elitäre Teilnetze

Selbst ein junges, relativ unerfahrenes Gehirn verfügt über einen riesigen Vorrat an neuronalen Trajektorien. Das erlaubt es ihm, Erfahrungen mit bereits vorhandenen Mustern abzugleichen. Ein Gehirn, das sich ständig neu verschaltet, wäre nicht in der Lage, sich schnell an wechselnde Ereignisse in der Außenwelt anzupassen.

Bei Bedarf sollten neuronale Netzwerke dennoch plastisch (und somit lernfähig) sein. Wie neuere Studien zeigen, stellt das Gehirn dieses Gleichgewicht her, indem es Nervenzellen unterschiedlich stark miteinander verknüpft. Die meisten bilden nur schwache Verschaltungen aus, während ein kleinerer Teil robuste Kontakte unterhält. Die fest vernetzte Minderheit ist immer in Alarmbereitschaft. Sie feuert schnell und gibt Informationen bereitwillig weiter. Zudem widersetzt sie sich jeglichen Änderungen an ihren Schaltkreisen. Dank dieser Eigenschaften bleiben diese elitären Teilnetze, die mitunter als »rich club« bezeichnet werden, über neuronale Ereignisse im gesamten Gehirn gut informiert.

Der fleißige »rich club« macht etwa ein Fünftel der Neurone aus. Seine Mitglieder sind jedoch für fast die Hälfte der Hirnaktivität verantwortlich. Die restlichen Nervenzellen zählen zum »poor club«. Sie feuern eher langsam und sind nur schwach mit anderen verbunden. Dafür sind sie offenbar sehr plastisch und in der Lage, ihre Verbindungspunkte, die so genannten Synapsen, physisch zu verändern.

Beide Populationen arbeiten zusammen, um die Hirndynamik aufrechtzuerhalten. Der »rich club« reagiert auf verschiedene Erfahrungen mit ähnlichen Feuermustern. Das ermöglicht es uns, Unbekanntes recht gut einzuschätzen – nicht, weil wir uns daran erinnern, sondern weil wir Vermutungen über die eingehenden Eindrücke anstellen. Für das Gehirn ist nichts völlig neu, weil es Neues stets mit Altem in Verbindung bringt.

Plastische, langsam feuervernde Neurone kommen ins Spiel, wenn eine wichtige Unterscheidung gemacht und für die Zukunft gespeichert werden muss. Sie erfassen subtile Unterschiede von Reizen, indem sie die Stärke einiger Verbindungen zu anderen Nervenzellen verändern. Ein kleines Kind erkennt zum Beispiel einen Hund, weil man ihm zuvor schon öfter einen gezeigt hat. Sieht es dann zum ersten Mal ein Schaf, nennt es dieses vielleicht ebenfalls »Hund«. Erst durch die Reaktion des Umfelds (»Das ist doch kein Hund, das ist ein Schaf!«) lernt das Kind den Unterschied – vermittelt durch die »poor-club«-Neurone.

Ich hatte mir nie vorgenommen, zu widerlegen, dass unsere Wahrnehmung ausschließlich auf dem Outside-in-Prinzip basiert. Erst Jahrzehnte nach Beginn meiner Arbeit – die sich vor allem mit Neuronenpopulationen im Hippocampus befasst – wurde mir klar: Das Gehirn ist viel mehr mit sich selbst beschäftigt als mit dem, was um es herum geschieht. Diese Erkenntnis brachte mich dazu, die Forschung in meinem Labor völlig neu auszurichten. Mein Team und andere zeigten dann, dass Neurone den größten Teil ihrer Aktivität auf hirninterne Prozesse verwenden. Sie werden also keineswegs nur von Reizen gesteuert, die auf unsere Sinne einwirken.

Das verdeutlicht auch die folgende Tatsache: Wenn Sie Ihre Augen schließen, wissen Sie immer noch, wo Sie sind. Ein Großteil dessen, was »Sehen« ausmacht, ist nämlich in der Hirnaktivität selbst begründet. Eine solche neuronale Aktivität, die unabhängig von einströmenden Reizen stattfindet, macht so etwas wie Imagination erst möglich. Sie bietet damit die Grundlage für diverse andere kognitive Prozesse.

Ein Beispiel für eine »abgekoppelte«, also von Sinnesindrücken unabhängige Hirnaktivität bietet eine Arbeit meines Teams am Schläfenlappen. Das Areal umfasst Strukturen, die uns dabei helfen, uns in der Umgebung zu orientieren – etwa den Weg zur Arbeit zu finden. Dazu



FOTOLIA / GIORDANO AITA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

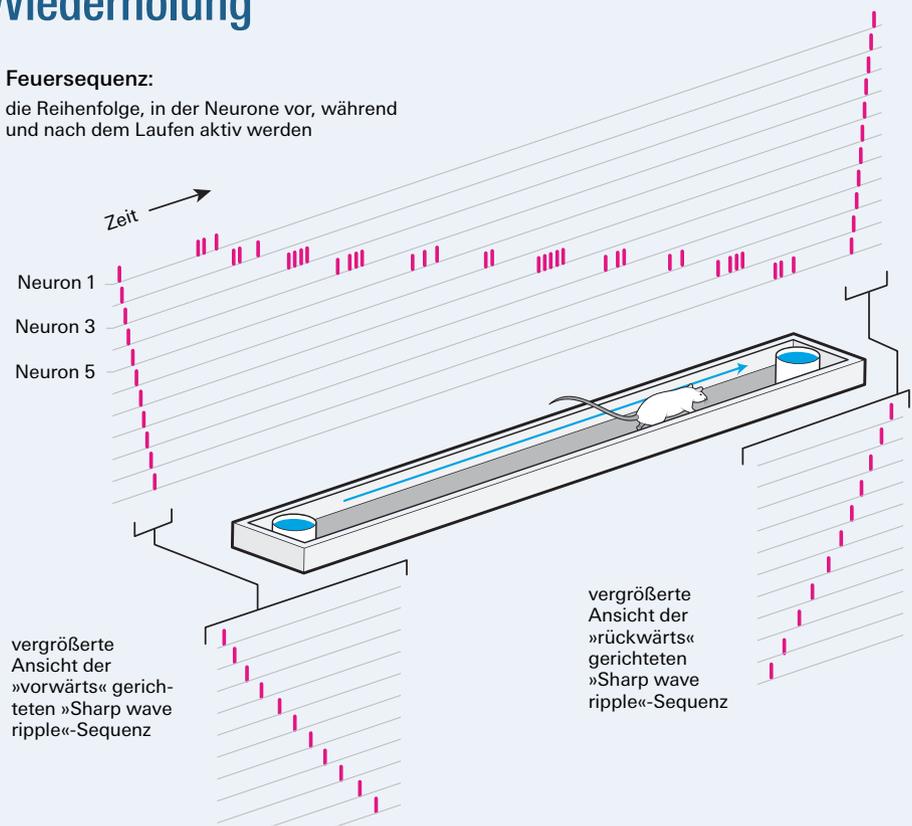
[spektrum.de/t/hirnforschung](https://www.spektrum.de/t/hirnforschung)

Vorbereitung und Wiederholung

Eine Gruppe von Neuronen feuert, bevor, während und nachdem eine Ratte einen Gang entlangläuft. Bevor sie losrennt und wenn sie ihr Ziel erreicht hat, spulen die Zellen im Zeitraffer das gleiche Aktivitätsmuster ab wie während des Laufens (am Ziel allerdings in umgekehrter Reihenfolge). Man nennt diese schnellen Sequenzen »sharp wave ripples«. Sie ermöglichen es dem Tier, seinen Weg zu planen und sich später an ihn zu erinnern.

Feuersequenz:

die Reihenfolge, in der Neurone vor, während und nach dem Laufen aktiv werden



BROWN BIRD DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2022, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

gehört unter anderem der Hippocampus und der angrenzende entorhinale Kortex. Unsere Forschung stützt sich auf die 2014 mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Entdeckung von John O'Keefe vom University College London. Mit seiner Arbeitsgruppe fand er heraus, dass manche Nervenzellen im Hippocampus von Ratten während der Navigation die räumliche Position des Tiers codieren. Aus diesem Grund nennt man diese Neurone auch Ortszellen (siehe »Spektrum« Oktober 2016, S. 12).

Läuft eine Ratte durch ein Labyrinth, werden nacheinander bestimmte Gruppen von Ortszellen aktiv – welche das sind, ergibt sich daraus, wo sich das Tier gerade befindet. Man könnte, ganz im Sinne der Outside-in-Theorie, annehmen, die ständig wechselnden Sinnesindrücke aus der Umgebung würden das Feuern der Neurone steuern.

Allerdings sprechen andere Experimente, inklusive solcher an Menschen, dagegen. Eines davon führten wir 2008 an der Rutgers University in New Jersey durch. Meine Mitarbeiterin Eva Pastalkova und ich trainierten Ratten darauf, abwechselnd den linken und den rechten Arm eines Labyrinths zu durchqueren, um zu einer Wasserquelle zu gelangen. Vor jedem Durchgang mussten die Nager 15 Sekunden lang in einem Rad laufen. Das sollte sicherstellen, dass allein ihre Erinnerung an die Routen darüber entschied, welchen Weg sie wählten.

Wenn bestimmte Neurone des Hippocampus feste Orte »repräsentieren«, wie es die Theorie der räumlichen Navigation von O'Keefe besagt, sollten ein paar kontinuierlich feuern, während sich die Ratte im Rad befindet. Jedoch verhielt sich keine einzige der hunderte überwachten Zellen so. Stattdessen wurden im Laufrad viele kurz nacheinander aktiv, in einer fortlaufenden Sequenz. Diese Hirnaktivität unterschied sich je nachdem, ob das Versuchstier im kommenden Versuch den rechten oder den linken Weg wählte. Die Daten erlaubten es uns somit, vorherzusagen, wohin es gleich laufen würde – und zwar ab dem Moment, in dem es das Laufrad betrat (siehe »Routenplaner im Kopf«).

Mentale Reisen durch Raum und Zeit

Die Erkenntnisse brachten uns auf eine Idee: Dieselben neuronalen Mechanismen, die uns beim Navigieren der Welt helfen, könnten auch mentale »Reisen« ermöglichen. Wenn ich zum Beispiel später Lebensmittel besorgen muss, stelle ich mir vielleicht vor, wie ich durch den Supermarkt laufe. Zuerst gehe ich an Obst und Gemüse vorbei, deshalb kommen die Tomaten ganz oben auf die Einkaufsliste. Dann Milchprodukte, Teigwaren, die Wursttheke ... und so weiter.

Es gibt noch abstraktere Gedankenreisen. Dazu zählen etwa solche, die uns durch eine Reihe von vergangenen

Erlebnissen mitnehmen. Ihnen entspringt das episodische Gedächtnis. Es ermöglicht uns viel mehr als nur einen Blick »zurück« – unsere bisherigen Erfahrungen erlauben es uns, Vorhersagen über die Zukunft zu treffen und für sie zu planen. Ein und derselbe neuronale Mechanismus lässt sich also vermutlich ganz unterschiedlich nutzen. Entsprechende Neurone kann man deshalb als Ortszellen, Gedächtniszellen oder Planungszellen bezeichnen, je nach Kontext.

Dass von sensorischen Reizen losgelöste Feuersequenzen bedeutsam sind, zeigt ein anderes Beispiel: die Hirnaktivität im Ruhezustand. Während ein Tier nichts tut oder schläft, ist sein Gehirn nicht untätig. Bestimmte Areale tauschen sich weiterhin aktiv aus. Wenn eine Ratte sich nach einer Labyrintherkundung in ihrem Käfig ausruht, erzeugt ihr Hippocampus charakteristische kurze Feuermuster. Diese »sharp wave ripples« treten in Zeitfenstern von 100 Millisekunden auf. Sie aktivieren erneut dieselben Neurone, die schon im Labyrinth feuerten (siehe »Vorbereitung und Wiederholung«).

Demnach scheint der Prozess zu wiederholen, was beim Durchlauf geschah. Er trägt somit zur Bildung des Langzeitgedächtnisses bei und ist für eine normale Hirnfunktion unerlässlich. Tatsächlich wird das Gedächtnis ernsthaft beeinträchtigt, wenn man diese Aktivität in Experimenten manipuliert oder wenn eine Krankheit sie stört.

Neuere Studien belegen, dass hinter den zeitlich komprimierten »Ripple«-Ereignissen ein Prozess steckt, um in Gedanken unterschiedliche Lösungswege auszuprobieren. Das ermöglicht es uns, reale und ausgedachte Alternativen zu unseren Handlungen zu finden. So lässt sich abwägen, was die optimale Strategie gewesen wäre. Wir können damit neue Schlussfolgerungen ziehen und künftige Taten vorausplanen – alles, ohne dass wir jede Möglichkeit unmittelbar durch einen realen Versuch testen müssten. Das macht unsere Gedanken und Pläne gewissermaßen zu aufgeschobenen Handlungen.

Ich wünschte, ich hätte all das gewusst, bevor ich damals die Fragen meiner klugen Studierenden vorschnell abtat. Heute würde ich ihnen sagen: Alle Gehirne, ob einfach oder komplex, arbeiten nach den gleichen Grundprinzipien. Neuronale Prozesse, die mit und ohne Sinnesreize ablaufen, finden nebeneinander statt. Eine von der Wahrnehmung abgekoppelte Nervenzellaktivität, die zugleich durch äußere Erfahrungen geeicht wird, ist die Essenz der Kognition. ◀

QUELLEN

Buzsáki, G. et al.: Neurophysiology of remembering. Annual Review of Psychology 73, 2022

Pastalkova, E. et al.: Internally generated cell assembly sequences in the rat hippocampus. Science 321, 2008

Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS



MEET AND GREET mit **Chefredakteur Daniel Lingenhöhl** und **Redakteur und Blogger Lars Fischer**

Abonnentinnen und Abonnenten können am digitalen Redaktionsbesuch von **Spektrum.de** am 27. Juni 2023 teilnehmen.

Anmeldung und weitere Vorteile:
Spektrum.de/plus

CO₂-EMISSIONEN

Kraftakt für die Industrie

Die Herstellung von Stahl, Zement und chemischen Grundstoffen verursacht zusammen fast drei Viertel aller globalen industriellen CO₂-Emissionen. Wer eine klimaneutrale Industrie will, muss hier ansetzen. Wir nehmen in einer neuen Serie jede der drei Branchen unter die Lupe.

» spektrum.de/artikel/2141865



Verena Tang ist Chemikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

SERIE KLIMANEUTRALE INDUSTRIE

► TEIL 1: JULI 2023

Mit Wasserstoff zu sauberem Stahl

Davide Castelvecchi

TEIL 2: AUGUST 2023

Neuerfindung eines Baumaterials

M. Mitchell Waldrop

TEIL 3: SEPTEMBER 2023

Der Umbau der Chemieindustrie

Verena Tang

HEISSES EISEN Die Emissionen der Schwerindustrie zu senken, ist schwierig, aber notwendig.



AUF EINEN BLICK

Produzieren ohne Klimaschaden

- 1** Jedes Jahr stellt die Welt mehrere Milliarden Tonnen Stahl, Zement und Chemikalien her. Das verursacht riesige Mengen an CO₂.
- 2** Das Klimagas entsteht dabei nicht nur durch die Nutzung fossiler Energieträger, sondern bildet sich außerdem bei speziellen Prozessen.
- 3** Einige Schlüsseltechnologien könnten an mehreren Stellen Abhilfe schaffen – auch, wenn sich die Industrien stark unterscheiden. Die Frage ist, ob es gelingt, sie rasch im nötigen Maßstab auszubauen.

Weniger Fleisch essen, kaum fliegen, Strom sparen: Die Liste von Maßnahmen, mit dem jede Einzelperson das Klima schützen kann, ist lang und mitunter sehr kleinteilig. Irgendwann stoßen die Versuche, den eigenen CO₂-Fußabdruck zu reduzieren, jedoch an eine Grenze. Denn unsere Lebensgrundlagen basieren zu einem guten Teil auf Materialien, die auf ziemlich klimaschädliche Weise hergestellt werden. Die Häuser, in denen wir wohnen und arbeiten, bestehen in der Regel zumindest teils aus Beton. Hoch- und Tiefbau, Fahrzeuge,

Maschinen und Medizintechnik benötigen Stahl in großen Mengen. Und am Anfang jedes Medikaments, jeder Kunststoffverpackung und zahlloser weiterer Produkte, die wir nutzen, steht ein industriechemischer Prozess: Auf diese Weise gehen über 20000 verschiedene chemische Stoffe aus bloß zehn Grundchemikalien hervor. Sieben von ihnen, die so genannten Primärchemikalien, verursachen bei ihrer Herstellung laut der Internationalen Energieagentur (IEA) zusammengenommen fast zwei Drittel der Gesamtemissionen in der chemischen Industrie.

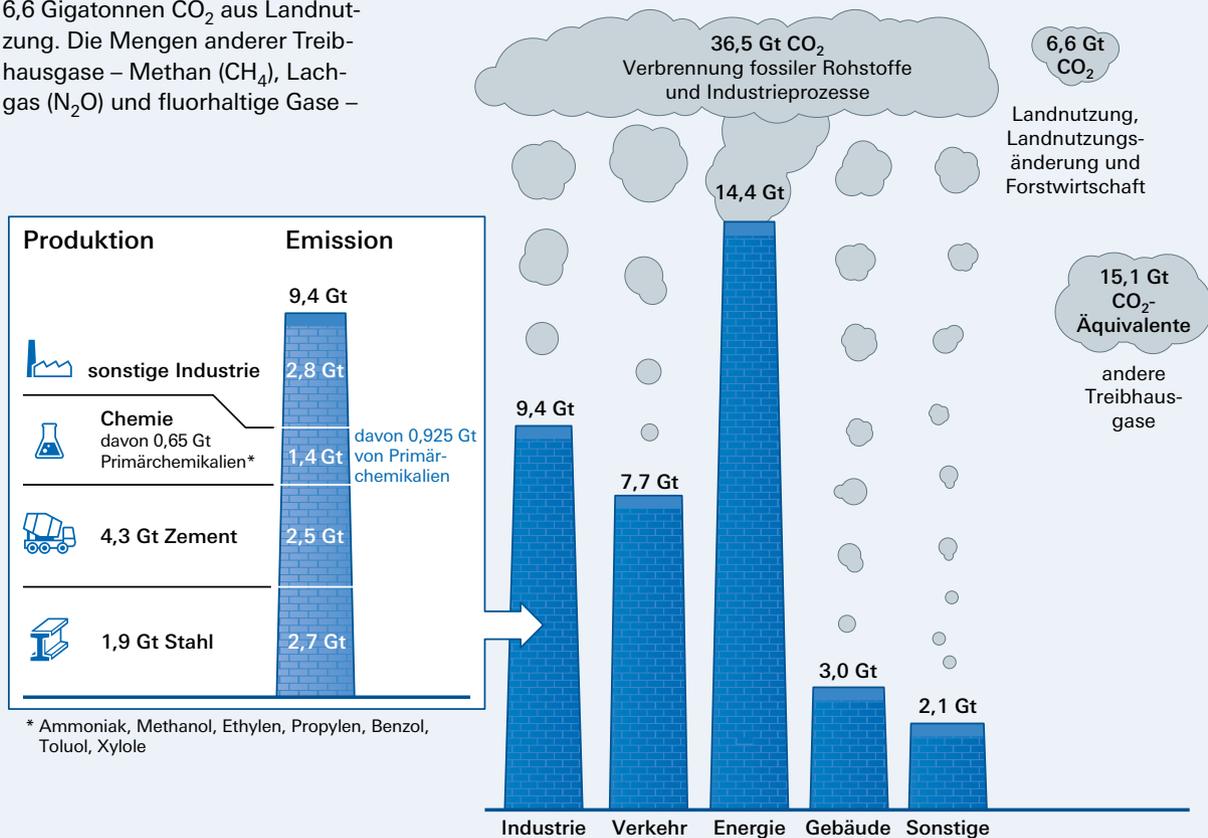
Emissionsstatistiken aufgeschlüsselt

Im Jahr 2019 entstanden aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe und in Industrieprozessen nach Schätzungen des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) zirka 38 Milliarden Tonnen (Gigatonnen, Gt) Kohlenstoffdioxid. Diese »energiebedingten Emissionen« bilden den Löwenanteil des weltweiten Ausstoßes. Hinzu kamen rund 6,6 Gigatonnen CO₂ aus Landnutzung. Die Mengen anderer Treibhausgase – Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und fluorhaltige Gase –

werden entsprechend ihrer Treibhausgas-Potenziale in CO₂-Äquivalente umgerechnet, was für 2019 rund 15,1 Gigatonnen ergibt. So erhält man insgesamt zirka 59 Gigatonnen CO₂-Äquivalente für das Jahr 2019.

Die Internationale Energieagentur (IEA) bezieht sich in ihren Be-

rechnungen ausschließlich auf die energiebedingten CO₂-Emissionen und kommt dabei zu sehr ähnlichen Werten wie der IPCC (36,5 Gigatonnen CO₂ für 2021). Die Emissionswerte für die einzelnen Sektoren und Industriezweige in der Grafik stammen aus den Berechnungen der IEA für 2021.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE GRAFIK GLOBALE CO₂-EMISSIONEN GESAMT UND AUFGETEILT NACH SEKTOREN, ZAHLEN V. 2021, NACH: IEA - CO₂ EMISSIONS IN 2022 (WWW.IEA.ORG/REPORTS/CO2-EMISSIONS-IN-2022); LANDNUTZUNG UND ANDERE TREIBHAUSGASE, DATEN V. 2019, NACH SHUKLA, P. ET AL. (HG): CLIMATE CHANGE 2022, MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, CONTRIBUTION OF WORKING GROUP III TO THE SIXTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC, 2022 (DOI.ORG/10.1017/9781009157526); EMISSIONEN CHEM. INDUSTRIE, ZAHLEN V. 2021, NACH SAICHEZ, D. P. ET AL.; CHEMICALS, IEA 2022 (WWW.IEA.ORG/REPORTS/CHEMICALS); PRODUKTIONSMENGEN PRIMÄR-CHEMICALIEN NACH: THE FUTURE OF PETROCHEMICALS, DEC/IEA 2018, PRODUKTIONSMENGEN ZEMENT, ZAHLEN V. 2021, NACH HODGSON, D. ET AL.; CEMENT, IEA 2022 (WWW.IEA.ORG/REPORTS/CEMENT); PRODUKTIONSMENGEN STAHL, ZAHLEN V. 2021, NACH KUEPPELERS, M. ET AL.; IRON AND STEEL, IEA 2022 (WWW.IEA.ORG/REPORTS/IRON-AND-STEEL); EMISSIONEN INDUSTRIE, ZAHLEN V. 2021, NACH HODGSON, D. ET AL.; INDUSTRIE, IEA 2022 (WWW.IEA.ORG/REPORTS/INDUSTRY)

Der Industriesektor stößt rund ein Viertel des Kohlenstoffdioxids weltweit aus (»Emissionsstatistiken aufgeschlüsselt«). Innerhalb des Sektors verschlingen Stahl, Zement und Chemie nicht nur am meisten Energie, sondern verursachen auch den Löwenanteil des CO₂ – fast 70 Prozent.

Die benötigte Energie ist dabei nur ein Teil des Problems. Der andere betrifft die Produktionsmethoden und eingesetzten Rohstoffe. Eisenerz etwa reduziert man größtenteils im Hochofen mit Kohle zu Roheisen, um es anschließend zu Stahl zu verarbeiten. Die Kohle oxidiert in dem Prozess zu CO₂. Enorme Mengen solcher »prozessbedingter Emissionen« fallen außerdem bei der Zementherstellung an. Dort wird die wichtigste Zutat für den Baustoff, Kalziumkarbonat, bei hohen Temperaturen unter Abgabe von CO₂ zu Kalziumoxid gebrannt. Die chemische Industrie wiederum nutzt nur rund eine Hälfte der eingesetzten fossilen Ressourcen zur Energiegewinnung, die zweite verwendet sie als Ausgangsstoffe für die Produktion.

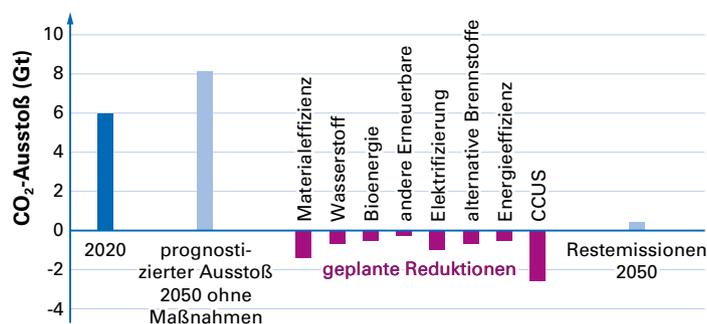
Daher ist der Umbau der drei weltgrößten Schwerindustrien keine reine Effizienzaufgabe, sondern deutlich komplizierter: Es gilt, neue Produktionswege zu etablieren und Technologien zu entwickeln. Und bei allen bisherigen Bemühungen hat derzeit noch keine der drei Branchen so richtig an Fahrt aufgenommen. Setzt man zum Ziel, dass die Welt 2050 unterm Strich keine Treibhausgase mehr ausstößt, so gehen die Entwicklungen laut Analysen der IEA in allen drei Zweigen entweder in die falsche Richtung oder die Verantwortlichen unternehmen zumindest zu wenig. »Not on track« – nicht auf dem richtigen Weg, lautet das Fazit der Experten, die im Jahr 2022 insgesamt 55 Branchen und Technologiebereiche unter die Lupe genommen haben.

Hoffen auf Schlüsseltechnologien

Es gibt aber auch eine gute Nachricht. Denn keine der Industrien braucht eine von Grund auf eigene, unabhängige Lösung. Im Wesentlichen muss eine Hand voll Technologien marktreif werden, die unter den Stichworten Elektrifizierung, Wasserstoff, CO₂-Einlagerung und Kreislaufwirtschaft diskutiert werden. Das klingt allerdings einfacher, als es ist.

Elektrolytische Verfahren zur Reduktion von Eisenerz könnten beispielsweise helfen, die Emissionen der Stahlindustrie zu drosseln (siehe Artikel ab S. 47 in diesem Heft). Zementwerke könnten durch Elektrifizierung weniger CO₂ freisetzen, indem sie die benötigten 1450 Grad Celsius für ihre Öfen nicht mehr durch Verfeuerung fossiler Energieträger, sondern im elektrischen Lichtbogen erzeugen. Erste Beispiele dafür gibt es bereits (Teil 2 der Serie im Augustheft). Ebenso arbeiten Chemieunternehmen daran, die traditionell durch Verbrennung auf Arbeitstemperatur gebrachten Reaktoren auf elektrische Beheizung umzustellen (Teil 3 der Serie in der Septemberausgabe).

Das Konzept der Elektrifizierung steht und fällt mit dem Ausbau erneuerbarer Energien. Deren Anteil am Strom-

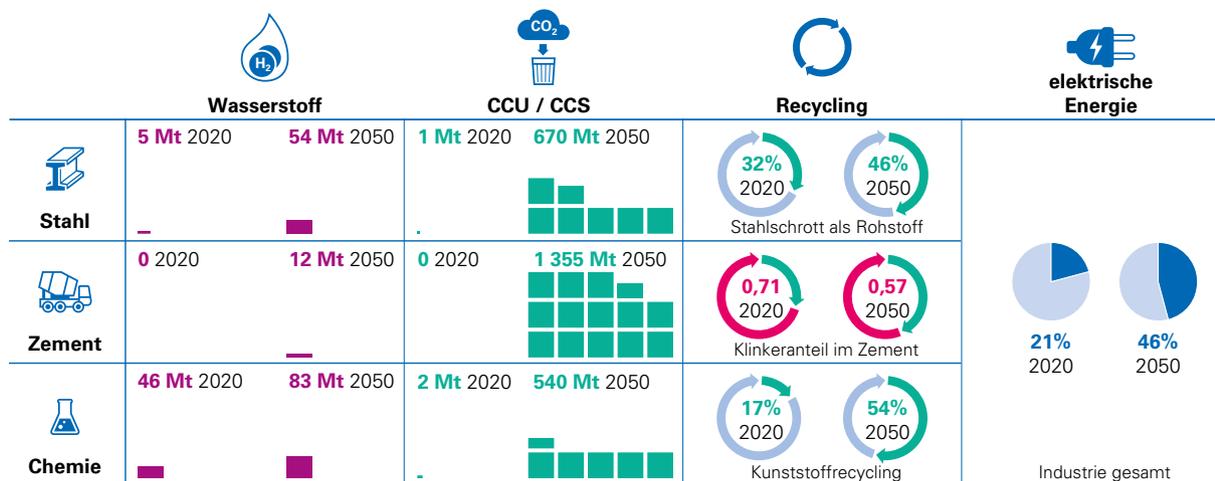


ALLE REGISTER Eine Technologie allein reicht nicht: Um die Emissionen der Schwerindustrie nennenswert zu senken, braucht es viele Maßnahmen (hier mit Zahlen aus einer Szenariostudie der Internationalen Energieagentur).

mix lag 2022 in Deutschland laut Umweltbundesamt immerhin bei zirka 46 Prozent. Weltweit waren es mit knapp 29 Prozent deutlich weniger. Länder wie China, das immerhin gut die Hälfte des Stahls und Zements weltweit produziert, hängen noch größtenteils von fossilen Energieträgern ab. Gerade China baut Windkraft- oder Fotovoltaikanlagen derzeit aber massiv aus. Stellen die großen Industrien ihre Prozesse allerdings entsprechend um, steigt die Nachfrage wiederum enorm. Es braucht dann also sehr viel Strom aus erneuerbaren Quellen.

Noch mehr davon wird man in Zukunft benötigen, um genügend Wasserstoff klimaneutral herzustellen. Das brennbare Gas wird einerseits als Energieträger gehandelt und ist andererseits eine essenzielle Zutat für neue, klimafreundliche Prozesse in der Stahl- sowie der Chemieindustrie. So soll Eisenerz künftig mit Wasserstoff reduziert werden statt mit Kohle. Mit jeder dabei eingesetzten Tonne Wasserstoff könne man bis zu 28 Tonnen CO₂ vermeiden, rechnet die deutsche Wirtschaftsvereinigung Stahl vor. Die Chemieindustrie meldet ebenfalls Bedarf an, denn auch für sie ist klimaneutraler Wasserstoff unverzichtbar auf dem Weg zur CO₂-Neutralität. Allein um die Grundprodukte Ammoniak und Methanol herzustellen, vertilgte die Branche im Jahr 2021 gut die Hälfte der 94 Megatonnen Wasserstoff auf dem Weltmarkt.

Bis 2030 wird sich der globale Wasserstoffbedarf auf 180 Megatonnen verdoppeln, erwartet die IEA. Rund die Hälfte davon werde für neue Anwendungen gebraucht. Und hier liegt das Problem: Es geht nicht allein darum, die Produktion hochzufahren, sondern diese dabei auch noch komplett umzustellen. Gleichzeitig mit den 2021 produzierten 94 Megatonnen Wasserstoff fielen nämlich 900 Megatonnen CO₂ an – Wasserstoff ist bislang eher Klimasünder als Klimaretter. Den Großteil erzeugt man, indem man Erdgas und Wasserdampf unter großem Energieaufwand zu Wasserstoff und CO₂ reagieren lässt, die restlichen rund 17 Prozent fallen als Nebenprodukt bei der Raffination von Erdöl an. Klimaneutraler Wasserstoff hingegen stammt aus der elektrolytischen Spaltung von



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAPHIK: MACQI, ZAHLEN V. 2020 U. 2050: NET ZERO BY 2050 - A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR, IEA, 2021 (WWW.IEA.ORG/REPORTS/NET-ZERO-BY-2050)

GROSSANSTRENGUNG Bis 2050 könnten die Schwerindustrien ihre CO₂-Emissionen um 90 Prozent senken. Dazu wären aber enorme Mengen an klimaneutralem Wasserstoff sowie Strom aus regenerativen Quellen nötig. Außerdem müsste man massenhaft CO₂ »entsorgen« und mehr Material recyceln (Mt: Megatonnen).

Wasser in dessen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe von CO₂-frei hergestelltem Strom. Die dazu benötigten Elektrolyseure müssen erst noch im großen Stil gebaut werden, bislang tragen sie weltweit weniger als ein Prozent zum Wasserstoffangebot bei.

Weder die IEA noch andere Branchenexperten gehen davon aus, dass bis 2030 annähernd genügend »grüner« Wasserstoff verfügbar ist. Wer also darf den vorerst noch limitierten Energieträger vorrangig einsetzen? Das muss noch ausdiskutiert werden.

Recycling und Kreislaufwirtschaft

In der Zwischenzeit will man das wertvolle Gas ohne größere Klimaschäden verfügbar machen, indem man das bei der Produktion entstehende CO₂ auffängt und einlagert (carbon capture and storage, CCS). Wie das geschehen soll und wo das Gas gespeichert werden kann, ist allerdings noch ziemlich offen. Insofern ist dieser Trick noch nicht wirklich einsatzfähig. CCS-Anlagen sind im industriellen Umfeld entsprechend fast nirgends installiert (»Ein Endlager für Klimagas«, Spektrum 6/2023, S. 54).

Dennoch preisen fast alle Unternehmen die Technologie auf ihrem Weg zum Netto-Null-Emissions-Ziel mit ein: Nicht nur bei der Wasserstoffproduktion will man das ungeliebte Nebenprodukt derart verschwinden lassen, auch in den Plänen der Zement- und Stahlhersteller spielt CCS eine wichtige Rolle.

Das abgetrennte CO₂ könnte die chemische Industrie wiederum als Rohstoff einsetzen. Mittlerweile gibt es einige Verfahren, die das Molekül – das notorisch reaktionsträge ist – mit genügend Aktivierungsenergie versehen, damit es mit Wasserstoff zusammen wiederum

Grundstoffe wie Methanol oder verschiedene Kohlenwasserstoffe liefert. Auf diese Weise entstehen die immer wieder kontrovers diskutierte E-Fuels oder synfuels.

Eine Kreislaufführung von Material ist überhaupt einer der wichtigsten Hebel, den jede Branche zur Bekämpfung der Klimakrise betätigen muss. Ebenso wie CO₂ ließen sich Kunststoffabfälle als Rohstoff für Grundchemikalien nutzen. Erste Betriebe erproben das bereits. Rund ein Drittel des Ausgangsmaterials für Stahl ist heute schon Stahlschrott, bis 2050 soll dessen Anteil auf fast die Hälfte steigen. Neue Zementrezepturen kommen mit weniger Klinker aus, bei dessen Herstellung etwa 60 Prozent der CO₂-Emissionen der Branche entstehen, und enthalten stattdessen Abfallprodukte aus anderen Fabriken wie Flugasche oder Schlacke.

So sehr die drei weltgrößten Industrien auf ähnliche Technologien setzen, sehen die einzelnen Lösungen doch sehr unterschiedlich aus. In diesem und den folgenden beiden Serienteilen nehmen wir die einzelnen Branchen Stahl, Zement und Chemie daher genau unter die Lupe: Wie ist der Status quo, welche Pläne verfolgen die Unternehmen – und wie beurteilen Expertinnen und Experten die Bemühungen? Wie realistisch ist eine komplette Klimaneutralität, und wie könnte eine zukunftsfähige Chemie-, Stahl- und Zementindustrie aussehen? ◀

QUELLEN

IEA: Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. IEA 2021, online: www.iea.org/reports/net-zero-by-2050

Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (Hg.): Akzeptanzstrategien in den energieintensiven Industrien – Aus der Praxis für die Praxis, 2023

Mandová, H. et al.: The challenge of reaching zero emissions in heavy industry. IEA 2020, online: www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry

Shukla, P. R. et al.: Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 10.1017/9781009157926, 2022

TECHNOLOGIE

Mit Wasserstoff zu sauberem Stahl

Wenn Wasserstoff als Allheilmittel für Klimaneutralität gepriesen wird, lohnt es sich, genau hinzuschauen. In der Stahlbranche könnte das Gas allerdings tatsächlich viel bewirken.

► spektrum.de/artikel/2141868

ELEKTROLYSE in einem kleinen Wasserstoffkraftwerk; im Bild Anlagenleiter Guido König von der Firma Apex Energy, die »grünen« Wasserstoff herstellt.

JENS BÜTTNER / ADPA / PICTURE ALLIANCE





Davide Castelvechi ist Wissenschaftsjournalist in London.

Der weiß glühende Strom aus flüssigem Eisen reißt nie ab. Tag und Nacht fließt das Metall in einem Stahlwerk in Nordschweden aus einem Loch am Boden eines gewaltigen, 90 Meter hohen Hochofens. Oben aus dem Ofen schießt ebenso unablässig Kohlenstoffdioxid heraus.

Das Gas entsteht beim Verbrennen der Kohle, die den Hochofen antreibt. Mit jeder Tonne Eisen, die zu Stahl verarbeitet wird, bilden sich in diesem Ofen 1,6 Tonnen Kohlenstoffdioxid (CO₂), erzählt Martin Pei, Cheftechnologe beim schwedischen Unternehmen SSAB, dem das Werk hier in Luleå gehört. Weltweit arbeiten Hunderte ähnlicher Hochofen, die meisten davon stoßen sogar mehr Treibhausgas aus. Auf dem Weg vom Eisenerz zum Stahl verbrauchen noch weitere Arbeitsschritte viel Energie, und so gehen rund sieben Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen auf das Konto der Stahlerzeugung. Nach einigen Schätzungen ist das vergleichbar mit dem Ausstoß aller Personenkraftwagen der Welt zusammengenommen.

Doch nur wenige hundert Meter entfernt von dem Ofen in Luleå steht ein kleinerer, der ebenfalls Stahl produziert und dabei deutlich weniger Kohlenstoffdioxid freisetzt. Statt mit Kohle arbeitet diese Pilottechnologie mit Wasserstoff, statt CO₂ entweicht Wasserdampf. »Das ist die neue Art der Stahlherstellung, mit der wir im Prinzip das gesamte Kohlenstoffdioxid eliminieren können«, sagt Pei.

AUF EINEN BLICK

Abschied vom Hochofen

- 1** Mehr als ein Viertel der Treibhausgase aus der Industrie kommen aus der Stahlerzeugung. Weltweit verursacht die Stahlproduktion rund 7 Prozent des gesamten CO₂-Ausstoßes.
- 2** Hauptgrund ist die Reduktion von Eisenerz zu Eisen mit Koks im Hochofen. Setzt man stattdessen Eisen mit »grünem« Wasserstoff um, lassen sich bis zu 90 Prozent der Emissionen vermeiden.
- 3** Das Gelingen des massiven Umbaus hängt vor allem davon ab, ob ausreichend klimaneutraler Wasserstoff günstig genug produziert werden kann.

Stahl mit Hilfe von Wasserstoff zu erzeugen, das geht nicht komplett ohne Umweltbeeinträchtigung: Während mancher Schritte wird immer noch CO₂ freigesetzt, außerdem muss das Eisenerz nach wie vor abgebaut werden. Dennoch hat das Werk an diesem Standort 2021 den weltweit ersten »grünen Stahl« fabriziert. Der Wasserstoff wurde mit Hilfe CO₂-armen Stroms aus Wasserkraft, Kernkraft und Windkraft gewonnen, von dem in Schweden reichlich vorhanden ist. Die Pilotanlage gehört dem Joint Venture HYBRIT. SSAB hat das Unternehmen 2016 mit dem schwedischen Energieversorger Vattenfall und dem Bergbauunternehmen LKAB gegründet, das hoch im Norden Schwedens hauptsächlich Eisenerz abbaut.

Klimaneutralen Stahl zu erzeugen ist nur eine von vielen Möglichkeiten, wie Wasserstoff helfen soll, die Weltwirtschaft zu dekarbonisieren. Einige preisen das Gas zwar als potenziellen Kraftstoff für den Verkehr an; es ist jedoch unwahrscheinlich, dass er in diesem Sektor oder auch beim Heizen viel bewirken wird, denn Batterien und Strom bieten dafür bereits effizientere CO₂-arme Lösungen. Am meisten ließe sich mit dem Gas erreichen, indem man industrielle Prozesse neu erfindet, von der Herstellung von Kunststoffen und Düngern bis zur Raffination von Kohlenwasserstoffen. Die Emissionen dieser Bereiche galten bisher als schwieriger zu reduzieren; Medien, Investoren und politische Entscheidungsträger beachteten sie weniger.

Wasserstoff überall

Auch zur Energieerzeugung könnte Wasserstoff dienen, wenn mit ihm hergestellte flüssige Kraftstoffe eines Tages Flugzeuge und Schiffe antreiben. Und möglicherweise trägt das leichte Gas sogar dazu bei, das Stromnetz zu dekarbonisieren: Mit überschüssigem Solar- oder Windstrom ließe sich Wasserstoff herstellen, der anschließend in der Industrie oder als Energiespeicher eingesetzt wird. So soll der Stoff eine Brücke zwischen vielen verschiedenen Wirtschaftssektoren schlagen.

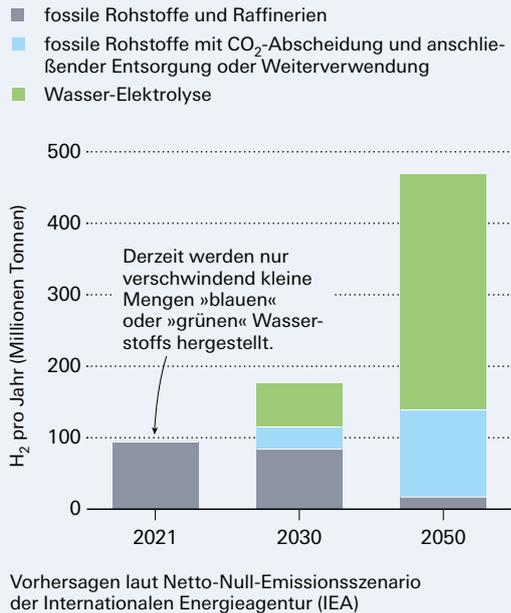
»Wasserstoff ist gewissermaßen einzigartig, weil man ihn auf so viele Arten herstellen und verwenden kann«, sagt Dharik Mallapragada, Chemieingenieur am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, USA.

Politische Entscheidungsträger, die Netto-Null-Emissionsziele erreichen wollen, haben insbesondere in den USA und der Europäischen Union einen massiven Vorstoß in Richtung Wasserstoff unternommen. In einigen Fällen subventionieren sie CO₂-armen Wasserstoff und senken dadurch dessen Preis, in anderen Fällen gewähren sie Steuergutschriften für Wasserstoffproduzenten oder für Industrien, die den Rohstoff einsetzen.

Unter anderem deshalb boomen Investitionen in Wasserstoffprojekte derzeit. Der Hydrogen Council, eine Industriegruppe in Brüssel, schätzt, dass die mehreren hundert angekündigten Wasserstoff-Großprojekte bis zum Jahr 2030 ein mögliches Investitionsvolumen von 240 Milliarden US-Dollar ausmachen werden – bisher ist allerdings nur ein Zehntel von ihnen vollständig abgeschlossen. Laut Prognosen des Rats wird der Markt für

Wasserstoffquellen

Bis zur Mitte des Jahrhunderts könnte fünfmal so viel Wasserstoff produziert werden wie heute, ein wachsender Anteil davon aus erneuerbaren Energiequellen.



NATURE. NACH: IEA WORLD ENERGY OUTLOOK 2022; CASTELVECCHI, D.: HOW THE HYDROGEN REVOLUTION CAN HELP SAVE THE PLANET - AND HOW IT CAN'T. NATURE 611, 2022; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Wasserstoff und dessen Technologien bis 2050 jährlich 2,5 Billionen US-Dollar wert sein.

Wie Analysten schätzen, wird weltweit Mitte des Jahrhunderts fünf- bis siebenmal so viel Wasserstoff hergestellt werden wie heute (siehe »Wasserstoffquellen«). Das soll die weltweite Treibhausgasbilanz verbessern. Allerdings funktioniert das nur, wenn man das Gas selbst ohne zusätzliche Emissionen gewinnt, wie es beim Pilotprojekt in Luleå der Fall ist.

Um Wasserstoff wurde schon früher großes Aufhebens gemacht. Aber diesmal sind hohe Summen im Spiel, und so vermuten Experten, dass das Projekt jetzt tatsächlich zum Laufen kommt. Analysten zufolge ist für den Übergang keine neue Technologie erforderlich: Sie ist bereits erprobt und bewährt, wenngleich wissenschaftliche Fortschritte den Übergang beschleunigen würden.

»Die Wasserstoffrevolution findet statt – diesmal wirklich«, sagt Oleksiy Tatarenko, Wirtschaftswissenschaftler am Rocky Mountain Institute (RMI), einer Denkfabrik für Nachhaltigkeit in Boulder, Colorado.

Bereits heute ist die Wasserstoffproduktion ein bedeutender Wirtschaftszweig, und zwar ein umweltschädlicher. Die Internationale Energieagentur (IEA) schätzt, dass jedes Jahr etwa 94 Millionen Tonnen des Gases hergestellt werden. Es stammt quasi komplett aus fossilen

Rohstoffen wie Erdgas. Dessen Hauptbestandteil, Methan (CH₄), reagiert mit Wasserdampf zu Wasserstoffmolekülen (H₂) und Kohlenstoffdioxid. Letzteres gelangt dann in die Luft – 900 Millionen Tonnen jedes Jahr, das sind mehr als zwei Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen, etwa so viel, wie Indonesien und das Vereinigte Königreich zusammen ausstoßen. Als »grauen« Wasserstoff bezeichnen Analysten das auf diese Weise hergestellte Gas.

Der heute produzierte Wasserstoff fließt größtenteils in chemische Verarbeitungsschritte in wichtigen Industrien. Man bringt ihn etwa mit Stickstoff aus der Luft zur Reaktion, um Ammoniak (NH₃) herzustellen, den Ausgangsstoff für Düngemittel. Petrochemische Raffinerien entfernen mit Hilfe von Wasserstoff Schwefel aus Erdöl und spalten einige der langkettigen, im Rohöl enthaltenen Kohlenwasserstoffe in kleinere Bausteine auf. Schließlich stellt die chemische Industrie aus Wasserstoff in riesigen Mengen Produkte wie Methanol (CH₃OH) her, das wiederum in der Synthese zahlloser weiterer chemischer Stoffe zum Einsatz kommt.

»Bevor wir Wasserstoff als Lösung für den Klimawandel positionieren, müssen wir uns zunächst mit Wasserstoff als Problem des Klimawandels befassen«, sagte Michael Liebreich, Energieberater und Geschäftsführer von Liebreich Associates in London, in einer Grundsatzrede auf dem World Hydrogen Congress im niederländischen Rotterdam im Oktober 2021.

Ein Teil des CO₂, das bei der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen freigesetzt wird, ließe sich auffangen und unterirdisch in tiefen geologischen Reservoiren speichern (»carbon capture and storage«, kurz CCS). Der solchermaßen dekarbonisierte Wasserstoff wird als »blau« bezeichnet. Wie Kritiker jedoch anmerken, kann man dadurch zum einen nicht alle Emissionen vermeiden, zum anderen muss für diese Art der Gewinnung weiterhin Erdgas gefördert werden.

200 Jahre alte Elektrolyse

Eine fast CO₂-freie Herstellungsmethode ist die 200 Jahre alte Technik der Wasserelektrolyse: Elektrolyseure erhalten Wasserstoff aus Wasser, indem sie einen elektrischen Strom zwischen mit Katalysatoren beschichteten Elektroden fließen lassen. Wenn die für diesen Prozess verwendete Energie aus erneuerbaren Quellen stammt, wird das entstehende Produkt als »grüner« Wasserstoff bezeichnet. Er hat das Potenzial, emissionsfrei oder zumindest annähernd emissionsfrei zu sein.

Wie schnell die Welt auf sauberen Wasserstoff umstellen kann, hängt hauptsächlich von den Kosten für die Elektrolyseure ab. Wie die IEA, die auf saubere Energie spezialisierten Analysten von BloombergNEF und andere Organisationen voraussagen, könnten die Kosten rasch sinken – bis 2030 um mehr als zwei Drittel –, da die Elektrolyseure in zunehmend automatisierten Fertigungsstraßen und nicht mehr von Hand gebaut werden.

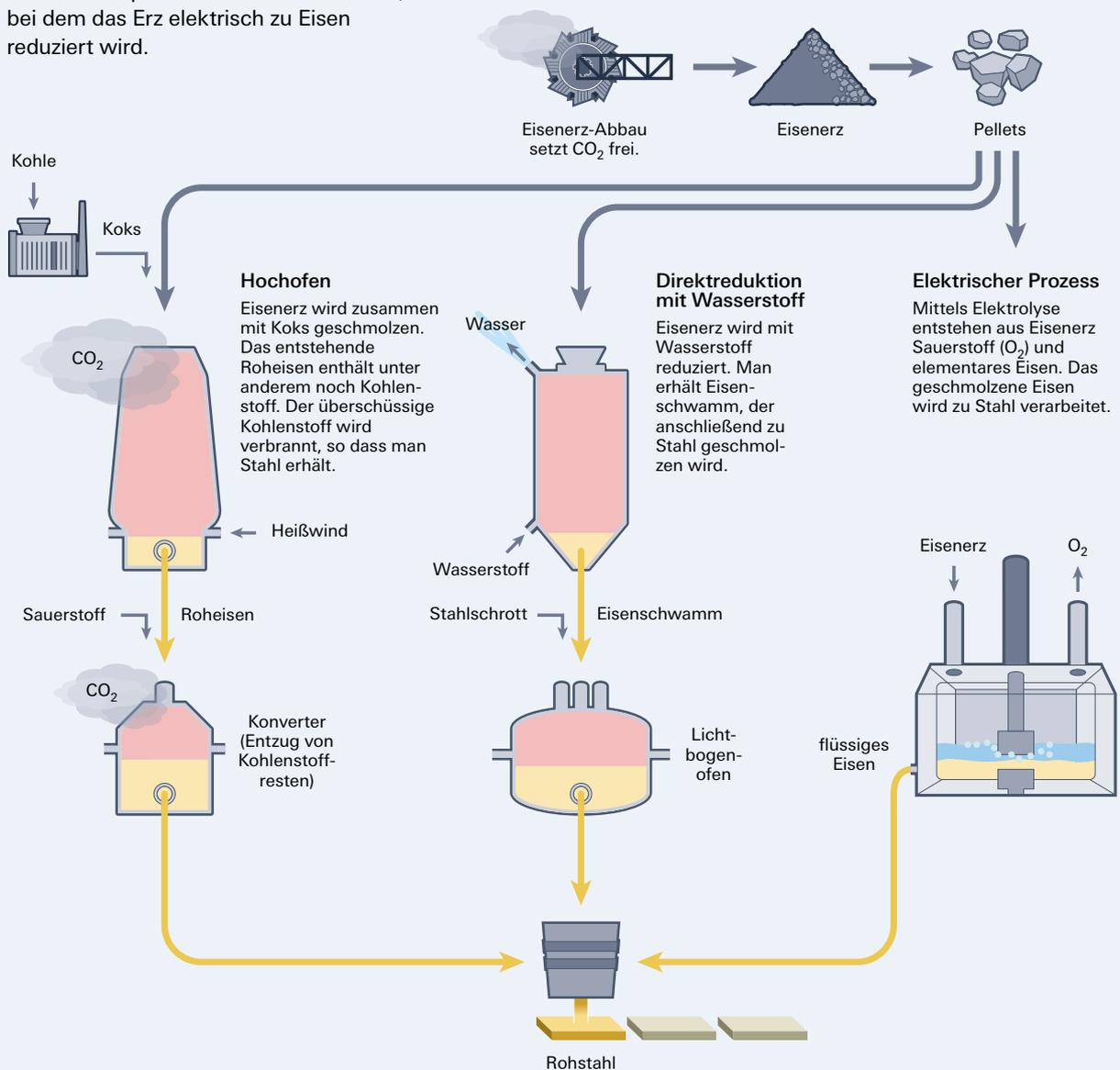
Aus diesem Grund sollen nach Ansicht von Analysten die Kosten für die Herstellung von grünem Wasserstoff von derzeit etwa 5 Dollar pro Kilogramm auf 1 Dollar pro

Kilogramm sinken, selbst ohne Subventionen wie Steuer-
vergünstigungen. Damit wäre er wettbewerbsfähig mit
grauem Wasserstoff, der für etwas weniger als einen
Dollar pro Kilogramm hergestellt werden kann. Dennoch
wird man in den kommenden Jahrzehnten einen großen
Teil des Bedarfs durch blauen Wasserstoff decken müs-
sen, weil die Nachfrage steigt, prognostizieren mehrere
Studien.

Für die Umstellung auf grünen Wasserstoff werden
riesige Mengen an erneuerbarer Energie benötigt. Wären
Elektrolyseure zu 100 Prozent effizient, bräuhete man
mehr als 3000 Terawattstunden (TWh) Strom aus erneu-
erbaren Quellen pro Jahr, allein um den heute verwen-
deten grauen Wasserstoff durch grünen zu ersetzen; tat-
sächlich dürfte der Strombedarf eher bei über 4500 TWh
liegen. In etwa so viel erzeugen die USA im Jahr. Außer-

Klimafreundlicher Stahl

Die Stahlherstellung setzt riesige Mengen an CO₂ frei. Sie entstehen hauptsächlich im Hochofen, wo Eisenerz mit Hilfe von Kohle oder Koks zu Eisen reduziert wird. Verwendete man stattdessen Wasserstoff, ließen sich bis zu 90 Prozent der Kohlenstoffdioxid-Emissionen vermeiden. Noch effektiver könnte ein bisher experimentellerer Ansatz sein, bei dem das Erz elektrisch zu Eisen reduziert wird.



NATURE. IMAG: HYBRIT/BRISTON METAL; CASTELVECHI, D.: HOW THE HYDROGEN REVOLUTION CAN HELP SAVE THE PLANET. AND HOW IT CAN'T. NATURE 611, 2022; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

dem schätzt die IEA, dass der jährliche Strombedarf für sauberen Wasserstoff bis Mitte des Jahrhunderts auf 14800 TWh ansteigen wird, wenn man bis dahin Netto-Null-Emissionen erreichen will.

Der Anteil sauberer Energie wächst derweil in bemerkenswertem Tempo. Nach Analysen der BloombergNEF etwa wird die Welt bis 2024 die Kapazität haben, jährlich Fotovoltaik-Paneele mit einer Leistung von einem Terawatt zu produzieren. Das allein könnte ein Siebtel des heutigen jährlichen Strombedarfs decken. Insgesamt wird die Welt nach Angaben der IEA Mitte des Jahrhunderts mehr als dreimal so viel emissionsarmen Strom produzieren wie heute. Will man ab 2050 unterm Strich keine Treibhausgase mehr ausstoßen, müssen die Technologien allerdings noch offensiver ausgebaut werden.

Von allen CO₂-Verursachern in der Industrie ist die Stahlproduktion einer der größten. Und hier könnte Wasserstoff am meisten bewirken. Nach Berechnungen der Wirtschaftsvereinigung Stahl in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT kann jede eingesetzte Tonne Wasserstoff in der Stahlindustrie 28 Tonnen CO₂ einsparen. Das ist deutlich mehr als in allen anderen Bereichen wie Chemie, Verkehr oder Gebäudeheizung.

Schon seit Jahren versuche man, das Gas in der Stahlherstellung einzusetzen, sagt Pei. Man habe es aber nicht geschafft, das Verfahren zu erweitern. Doch 2016, als die meisten Länder sich durch Unterzeichnen des Pariser Klimaabkommens verpflichteten, die globale Erwärmung auf weniger als zwei Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, begann Pei, die Wasserstoffforschung bei SSAB anzuführen. Es war klar, dass die Dekarbonisierung von Stahl für Schweden entscheidend war, um seine Pariser Verpflichtungen zu erfüllen. SSAB ist zwar kein großer Stahlproduzent, verursacht aber allein ein Zehntel des schwedischen CO₂-Ausstoßes. »Jedem war klar, dass Schweden nicht erfolgreich sein würde, wenn es SSAB nicht gelingen würde, diese Emissionen zu drosseln«, sagt Unternehmenssprecherin Mia Widell.

Direktreduktion soll Kohle ersetzen

Das größte Problem bei der Stahlherstellung ist die Gewinnung von Eisen aus Eisenerz, das Eisen in oxidierter Form enthält. In einem Hochofen werden dem Erz die Sauerstoffatome entzogen, und elementares, flüssiges Eisen bleibt zurück. Dazu wird das Erz zusammen mit Koks, einem Pyrolyseprodukt von Kohle, geschmolzen. Die Hauptfunktion des Brennstoffs besteht nicht darin, das Erz zu schmelzen, sondern ihm die Sauerstoffatome zu entziehen. Bei diesem chemischen Reduktionsprozess werden enorme Mengen CO₂ frei.

SSAB zog in Betracht, das freigesetzte Kohlenstoffdioxid abzuscheiden und unterirdisch einzulagern, kam aber zu dem Schluss, dass das zu teuer wäre. Stattdessen entschied sich das Unternehmen, Wasserstoff einzusetzen. Die kleinen Moleküle können in das Innere von Pellets aus festem Eisenerz diffundieren und den Sauerstoff von dort entfernen. Dieser Prozess, bekannt als



STEFFEN TRUMPF / DPA / PICTURE ALLIANCE

EISENSCHWAMM ist der Rohstoff, aus dem Stahl hergestellt wird. Dieser hier wurde im HYBRIT-Werk im schwedischen Luleå ohne den Einsatz fossiler Brennstoffe produziert.

Direktreduktion von Eisen (DRI), läuft bei 600 Grad Celsius ab. Das sind 900 Grad weniger als die 1500 Grad Celsius eines Hochofens (siehe »Klimafreundlicher Stahl«).

DRI gab es schon lange, bevor HYBRIT anging, Wasserstoff einzusetzen: Ein Teil des Stahls wird heute auf dieser Route gewonnen, allerdings mit Erdgas, wobei wiederum CO₂ frei wird. Durch die Verwendung von sauberem Wasserstoff ließe sich das vermeiden.

Die Versuche von HYBRIT in Luleå waren so erfolgreich, dass SSAB beschloss, seine Hochöfen nicht erst 2045 abzuschalten, sondern bereits 2030, erzählt Pei. Die Firma baut ihre erste große Anlage in der Stadt Gällivare 200 Kilometer nördlich von Luleå. Sie hat die Ergebnisse ihrer Forschung öffentlich zugänglich gemacht, in der Hoffnung, der gesamten Branche einen Impuls zu geben, so Pei. Eine halbe Autostunde von Luleå entfernt hat ein in Stockholm ansässiges Start-up-Unternehmen namens H2 Green Steel den Grundstein für eine noch größere Anlage gelegt und nach eigenen Angaben bereits 1,5 Millionen Tonnen des Produkts verkauft.

Da Schmelzöfen jahrzehntelang in Betrieb sind, sollte die Stahlindustrie nach Ansicht von Energieanalysten ab sofort keine neuen Hochöfen mehr bauen und stattdessen wasserstofftaugliche Direktreduktionsanlagen errichten, wenn die Länder die Ziele des Pariser Abkommens erreichen wollen. Selbst wenn die meisten von ihnen zunächst Erdgas verwendeten, könnten sie ihren CO₂-Fußabdruck nach und nach verringern, während die Wasserstoffversorgung in den nächsten drei Jahrzehnten zunehme.

»Im CO₂-Budget ist kein Platz für neue Hochöfen«, sagt Rebecca Dell, Leiterin des Industrieprogramms bei der ClimateWorks Foundation, einer Förderorganisation im kalifornischen San Francisco.

Viele Stahlhersteller beschreiten inzwischen den DRI-Weg. Dennoch werden in China und Indien neue konventionelle Hochöfen geplant, wie die Nichtregierungsorganisation Global Energy Monitor, ebenfalls in San Francisco, berichtet. Die Aufgabe, den Sektor umzustellen, ist gewaltig. Und so prognostizieren einige Organisationen, darunter BloombergNEF, dass Mitte des Jahrhunderts noch klassische Hochöfen in Betrieb sein werden und ihre Emissionen durch CO₂-Abscheidung werden mindern müssen.

Im Prinzip könnte man die Stahlproduktion sogar vollständig auf Strom umstellen, gänzlich ohne Wasserstoff. Wie Rebecca Dell erzählt, würde das den Prozess noch effizienter machen. Eisenoxid lässt sich nämlich auch mittels Elektrolyse in seine Bestandteile aufspalten. Das versuchen mehrere Start-up-Unternehmen für die Stahlherstellung zu nutzen, wie etwa Boston Metal in Woburn im US-Bundesstaat Massachusetts. Im Moment setzen jedoch die meisten auf Wasserstoff. »Der größte Vorteil des Wasserstoffkonzepts besteht darin, dass für eine wirklich saubere Stahlerzeugung nur der geringste Zuwachs an neuer Technologie erforderlich ist«, erläutert Dell.

Langfristig könnte Wasserstoff am meisten zur Verlangsamung der globalen Erwärmung beitragen, indem er eine Brücke zwischen verschiedenen Sektoren schlägt: Elektrizität, Bauwesen, Produktion und Verkehr. Dann wäre es billiger, sie alle zusammen vollständig zu dekarbonisieren, als wenn jeder Sektor das Vorhaben allein angeht, urteilt Christian Breyer, Energiesystemanalytiker an der Technischen Universität Lappeenranta-Lahti in Finnland.

Knackpunkt grüne Stromerzeugung

Der entscheidende Knotenpunkt in diesem verzweigten Netzwerk wird die Stromerzeugung sein. Hier könnte Wasserstoff helfen, einen wohlbekannten Nachteil der erneuerbaren Energien auszugleichen: Sie sind zwar reichlich vorhanden, aber ungleichmäßig über Stunden und Jahreszeiten verteilt und oft unberechenbar. Fachleute, die an Simulationen zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage in künftigen Stromnetzen arbeiten, müssen beispielsweise planen, wie sie Strom liefern können, wenn in einem kalten, dunklen Winter in Europa eine Woche lang kein Wind weht – also eine so genannte Dunkelflaute herrscht.

Batterien helfen dabei, Angebot und Nachfrage von einer Stunde zur nächsten auszugleichen, aber sobald mehr als 80 Prozent des Stroms in einem Netz aus Wind- und Sonnenenergie stammen, wird es einigen Studien zufolge extrem teuer, die Netze gegen Dunkelflauten zu wappnen. Hier könnte es helfen, genügend zusätzliche Windturbinen zu bauen, um ein Stromnetz auch durch die windstillsten Winter zu bringen, und diese dann den größten Teil des Jahres zur Herstellung von Wasserstoff zu nutzen. Den wiederum könnte man an Industriekunden verkaufen: an Stahlwerke oder als Flüssigtreibstoff für Transport, Schifffahrt und Export.



GESCHMOLZENES EISEN fließt aus einem Hochofen im Stahlwerk von Thyssenkrupp Steel Europe in Deutschland.

ARND BRONKHORST/STOCK.ADOBE.COM

Zu besonders ungünstigen Zeiten im Jahr könnte man mit dem Wasserstoff wieder Strom erzeugen, indem man ihn in Turbinen verbrennt, die normalerweise mit Erdgas betrieben werden. Dabei bliebe allerdings eine Menge Energie auf der Strecke: Man erhielte maximal ein Drittel des Stroms zurück, den man ursprünglich zur Herstellung des Wasserstoffs verwendet hatte.

Es ist nicht klar, ob das der kosteneffizienteste Weg ist, das letzte Fünftel des Stroms zu dekarbonisieren, wenn man andere Optionen wie den Bau von Kernkraftwerken oder den Ausbau der Geothermie betrachtet. Die optimale Mischung wird wahrscheinlich je nach Land variieren, legen regionalspezifische Studien von Organisationen wie der Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien der Vereinten Nationen (IRENA) nahe.

Obwohl sich Wasserstoff auf unzählige Weisen verwenden lässt, bietet er nicht für alle Probleme die beste Lösung. Bei Personenkraftwagen haben Batterien bereits weitgehend das Rennen gemacht. Es ist effizienter und kostengünstiger, eine Batterie direkt im Auto zu haben, als einen Wasserstofftank mitzuführen und die Energie in Strom zurückzuverwandeln.

Bei der Wohngebäudeheizung ist es wahrscheinlich ebenso wenig sinnvoll, auf Wasserstoff umzusteigen. Handle es sich dabei um grauen Wasserstoff, der aus Erdgas hergestellt wird, trage das einfach zur globalen Erwärmung bei, sagt Rebecca Lunn, Bauingenieurin an der University of Strathclyde in Glasgow in Großbritannien. In einer Studie des britischen National Engineering Policy Centre (NEPC) vom September 2022 bezeichneten



ARNDSTOCK / STOCK.AUDRE.COM

sie und andere die Verwendung von Wasserstoff zum Heizen von Wohnhäusern als problematisch.

Aber selbst, wenn der Wasserstoff grün ist – also mit Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird –, ist es bis zu sechsmal effizienter, die Häuser direkt mit diesem Strom zu beheizen. Am besten geschieht das mit Wärmepumpen, die einen Wirkungsgrad von weit über 100 Prozent erreichen, indem sie die Wärme der Umgebung nutzen.

Die Investitionen in CO₂-armen Wasserstoff hatten bereits in den letzten Jahren stark zugenommen. Erst die Ereignisse des Jahres 2022 haben jedoch einen regelrechten Boom ausgelöst.

Große Ziele

In den USA wurde mit dem Inflation Reduction Act eine Steuererleichterung von drei Dollar für jedes Kilogramm grünen Wasserstoffs eingeführt, zusätzlich zu einer Reihe anderer Maßnahmen und Finanztöpfe für das Gas. In Europa hat der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine dem Umbau der Energiesysteme eine neue Dringlichkeit verliehen. Im März 2022 gab die Europäische Kommission das Ziel aus, bis 2030 jährlich zehn Millionen Tonnen H₂ zu produzieren und weitere zehn Millionen Tonnen zu importieren. Viele andere große Volkswirtschaften haben nationale Strategien zum Aufbau von Wasserstoffkapazitäten festgelegt.

»Alles hat sich geändert, die ganze Gleichung«, sagt RMI-Wirtschaftsexperte Patrick Molloy. Vor allem die Steuererleichterungen in den USA haben die Kosten für grünen Wasserstoff dort auf die für grauen Wasserstoff von etwa einen US-Dollar pro Kilogramm gesenkt, an manchen Standorten sogar auf noch weniger. Damit sind Stahl, Ammoniak und flüssige Kraftstoffe auf Wasser-

stoffbasis nach Berechnungen des RMI bereits wettbewerbsfähig mit ihren aus fossilen Rohstoffen gewonnenen Pendanten.

Ohne Subventionen dürften saubere Wasserstoffprodukte wie grüner Stahl immer noch teurer sein als ihre schmutzigen Analoga. HYBRIT und H2 Green Steel geben nicht an, wie viel die Herstellung ihrer Produkte voraussichtlich kosten wird. Auch Regierungen könnten Maßnahmen zum Kauf von grünem Stahl ergreifen, wie es die US-Regierung im Rahmen einer »Buy Clean«-Bestimmung in einer im Dezember 2021 erlassenen Verordnung zugesagt hat.

Die IEA geht davon aus, dass die weltweite Wasserstoffnachfrage bis 2030 um 20 bis 30 Prozent steigen könnte. Die bisher geplanten CO₂-armen Wasserstoffprojekte werden nur etwa ein Viertel davon abdecken können. Möglicherweise sind die Pläne für den Ausbau der Wasserstoffproduktion also noch nicht ehrgeizig genug: Damit die Welt bis Mitte des Jahrhunderts auf dem Weg zu einer Netto-Null-Emission ist, müssen bis 2030 etwa 180 Millionen Tonnen Wasserstoff produziert werden, davon die Hälfte emissionsarm. Tatarenko hält das nicht für ausgeschlossen und fordert: »Wir sollten sehr ehrgeizig sein.«

Andere warnen davor, die Förderung von Wasserstoff könnte dazu führen, dass auch nichtgrüne Kraftstoffe gefördert werden und somit die CO₂-Emissionen ironischerweise ansteigen. Die Umstellung auf die Wasserstoffwirtschaft wird soziale Auswirkungen haben. Selbst mit Subventionen und massiven Investitionen wird die Schwerindustrie in einigen Regionen immer noch einen Wettbewerbsnachteil erleiden. Da Wasserstoff teuer und technisch schwieriger zu transportieren ist als Kohle, könnten Zweige wie die Stahlindustrie gezwungen sein, ihre Standorte dorthin zu verlegen, wo Wasserstoff billig produziert werden kann, sagt Dell – möglicherweise in andere Länder.

Obwohl solche politische Fragen den Prozess verlangsamen könnten, gebe es keine unlösbaren Probleme mehr, fügt sie hinzu. »Dieser Übergang liegt sowohl in den Ländern mit hohem Einkommen als auch in den Schwellenländern durchaus im Rahmen unserer technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten«, schließt Dell. ◀

QUELLEN

International Energy Agency: World energy outlook 2022. IEA 2022

Jenkins, J. D. et al.: Getting to zero carbon emissions in the electric power sector. Joule 2, 2018

National Engineering Policy Centre: The role of hydrogen in a net zero energy system. Royal academy of engineering, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 611, S. 440–443, 2022

Kann man polarisiertes Licht sehen?

Die Streuung der Sonnenstrahlung an Luftmolekülen polarisiert das Licht. Das sorgt für verschiedene Phänomene und offenbart sich dem geübten Auge manchmal sogar in Form eines seltsamen Flecks.

► spektrum.de/artikel/2141871

Eine Preisfrage an den Himmel

Georg Christoph Lichtenberg

► An einem klaren, wolkenlosen Tag strahlt der Himmel in einem herrlichen Blau. Das Phänomen erscheint uns selbstverständlich, jedenfalls ist es viel gewöhnlicher als zum Beispiel ein Regenbogen. Dennoch finden auch dabei bemerkenswerte optische Vorgänge statt.

Die blaue Farbe entsteht durch Reflexion des Sonnenlichts an den Molekülen in der Atmosphäre. Je nach Lichteinfall erfolgt das in verschiedene Richtungen, darum spricht man von Streuung. Dieser Effekt ist für kürzere Wellenlängen wesentlich ausgeprägter als für längere (Rayleigh-Streuung). Somit dominieren die Violett- und Blauanteile, und als Mischfarbe ergibt sich das typische Himmelblau.

Darüber hinaus hat die Streuung des Sonnenlichts noch eine meist übersehene Wirkung: Es wird linear polarisiert. Vor dem Auftreffen auf die Luftmoleküle schwingen die elektromagnetischen Lichtwellen in beliebigen Orientierungen, sie sind nicht polarisiert. Von den Gasteilchen wird es dann in einer Vorzugsrichtung ausgesandt. Sie hängt davon ab, woher der Lichtstrahl ursprünglich kommt. Blickt man beispielsweise abends, wenn die Sonne tief im Westen steht, nach Norden oder Süden, empfängt man von dort Licht, das zu einem großen Teil senkrecht zur Horizontebene polarisiert ist (siehe »Polarisiertes Himmelslicht«). Das kann man mit einer speziellen Folie feststellen, wie es sie in Form entsprechender Filter für Kame-



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

VERFINSTERTES BLAU Durch einen Polarisationsfilter hindurch betrachtet erscheint die Himmelsregion senkrecht zur Sonnenstrahlrichtung (hier steht die Sonne links vom Foto) verdunkelt. Manche Menschen können eine leichte Schattierung sogar ohne Filter feststellen.

H. JOACHIM SCHLICHTING





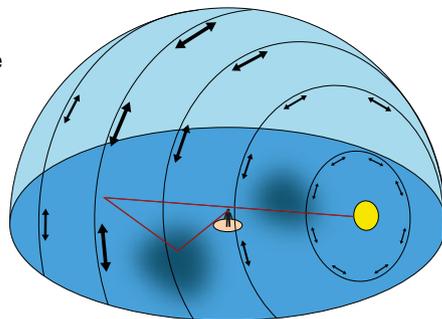
AUSGELÖSCHT Das in der Atmosphäre senkrecht polarisierte Licht wird auf einer Wasseroberfläche durch Reflexion abermals polarisiert, wodurch sich der gespiegelte Himmel im Vordergrund verdunkelt.

H. JOACHIM SCHLICHTING

ras oder in Sonnenbrillen gibt. Sie polarisiert das Licht ebenfalls linear. Wenn man sie passend dreht, verdunkelt sie den Himmel, denn sie lässt nicht dessen Lichtanteile senkrecht zu ihrer eigenen Filterrichtung durch.

Das Phänomen lässt sich sogar ohne technische Hilfsmittel erkennen. Blickt man über einen See, erscheint der darin reflektierte Himmel in einem gewissen Bereich deutlich verdunkelt. Ähnlich wie bei der Streuung an den Luftmolekülen wird das reflektierte Licht vom Wasser polarisiert, und zwar parallel zu dessen Oberfläche. Dieser Effekt ist bei einem bestimmten Winkel maximal, dem so genannten Brewster-Winkel. Man hat den eigenen Blickwinkel darauf eingestellt, sobald man die dunkle Stelle auf dem Wasser entdeckt hat: Hier sieht man weniger Reflexion vom hellen Himmel und mehr von den dunklen blauen Tiefen des Wassers (siehe »Ausgelöscht«).

Bei dieser Methode, die Polarisation von Licht ohne Folien und anderes Gerät zu erkennen, sollte man sich

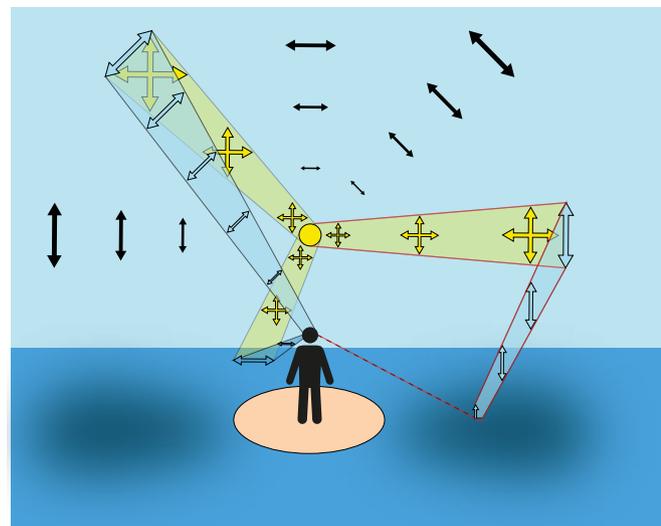


POLARISIERTES HIMMELSLICHT

Streuung in der Atmosphäre prägt dem in alle Richtungen schwingenden Sonnenlicht eine Vorzugsebene auf. Deren Orientierung (links, schwarze Pfeile) hängt davon ab, in welchen Bereich des Himmels man schaut. Wasser polarisiert reflektiertes Licht parallel zur Oberfläche. Wenn beide Effekte zusammenkommen, löschen sich in einem bestimmten Winkelbereich die Polarisierungen aus (rechts).

jedoch klarmachen, dass man hier die Wirkung natürlicher, äußerer Polarisationsfilter ausnutzt, nämlich einerseits durch die Streuung des Sonnenlichts und andererseits durch die Reflexion auf dem Wasser. Polarisiertes Licht direkt wahrzunehmen, scheint dem Menschen verwehrt zu sein – im Unterschied zu einigen Tierarten, die das durchaus können und etwa zur Orientierung nutzen.

Jedenfalls war das meine Meinung, bis ich vor Jahren bei der Lektüre von Tolstois Biografie »Kindheit, Knabenalter, Jünglingsjahre« auf einen interessanten Bericht stieß. Tolstoi schilderte dort die folgende Situation: »Manchmal, wenn ich allein im Salon bin, lasse ich unwillkürlich das Buch sinken; ich schaue durch die offene Balkontür auf die lockigen, herabhän-



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE ZEITZ

genden Zweige der hohen Birke, auf die sich schon der Abendschatten senkt, und auf den blauen Himmel, an dem, wenn man scharf hinsieht, sich plötzlich ein winziger gelblicher Punkt zeigt und wieder verschwindet.«

Wenn man das Phänomen nicht kennt, wird man die Worte vielleicht als dichterische Überempfindlichkeit deuten und sich nicht wirklich aufgefordert fühlen, selbst einen solchen gelblichen Fleck am Himmel zu suchen. Wie ich selbst erfahren sollte, würde es sich allerdings lohnen, denn es gibt ihn wirklich. Allerdings muss die Anleitung zum Suchen etwas detaillierter ausfallen als in Tolstois Erzählung. Er wird zufällig auf die passende Stelle am Himmel geblickt haben, und ihm ist daher vermutlich gar nicht aufgefallen, dass er in eine Region senkrecht zur Richtung der Sonnenstrahlen geschaut hat, aus der teilweise polarisiertes Licht kommt.

Nachweislich entdeckt wurde der gelbe Fleck zuerst 1844 vom österreichischen Mineralogen Wilhelm Karl Haidinger beim Experimentieren mit polarisierenden Kristallen. In seiner Beschreibung hat der gelbe Fleck eine charakteristische Form und verschwindet als »fliegendes Phantom von gelblicher Farbe« bei längerer Fixierung wieder. Es handelt sich um ein entoptisches Phänomen, das heißt es hat seine Ursachen im Augeninneren und kann deswegen nur subjektiv beschrieben und zeichnerisch dargestellt, keinesfalls jedoch fotografiert werden. Für die meisten ist es ein büschelartiges Gebilde mit einem sanduhrförmigen gelben Streifen in der Mitte, der zu beiden Seiten durch bläulich schimmernde Bereiche begrenzt wird (siehe »Haidinger-Büschel«).

Wem es nicht auf Anhieb gelingt, dieses Haidinger-Büschel in der passenden Himmelsregion zu entdecken, kann sich durch eine Art Vorübung präparieren. Dazu sollte sie oder er durch eine polarisierende Folie hindurch auf eine weiße Wand blicken. Da das Phänomen nur kurzzeitig sichtbar bleibt und nach wenigen Sekunden verblasst, empfiehlt es sich, die Folie von Zeit zu Zeit zu drehen. Bei jeder Orientierungsänderung baut sich das gelbe Büschel nämlich neu auf.

Mit diesem Training sollte es dann gelingen, die Erscheinung auch am Himmel direkt aufzuspüren. Hat man sie erst einmal wahrgenommen, so sieht man sie immer wieder. Leichtes Hin- und Herbewegen des Kopfes kann die Empfindung erleichtern.

Diejenigen, die den Blick auf ihren Computer jenem zum Himmel vorziehen, müssen nicht auf das Erlebnis verzichten, ihre Polarisations sensitivität zu entdecken. Mit leicht wiegendem Kopf können sie das Haidinger-Büschel auch auf dem Flachbildschirm erscheinen lassen, dessen Licht polarisiert ist. Am besten funktioniert es bei einem weißen Display bei sonst völliger Dunkelheit. Ganz gleich, wo man es sieht, die schein-

Haidinger-Büschel
Ein gelbliches Bündel wird von bläulichen Bereichen eingeschnürt. So ähnlich, allerdings weniger intensiv, erscheint polarisiertes Licht auf der Netzhaut.

bare Größe des Bündels entspricht etwa der Breite zweier Finger bei ausgestrecktem Arm.

An seinem Zustandekommen ist maßgeblich die Struktur der Fovea oder Sehgrube im Auge beteiligt, der Stelle schärfsten Sehens in der Netzhaut. Sie liegt im Zentrum der Makula, des Bereichs der höchsten Sehzepetordichte im hinteren Teil der Netzhaut. Dort treffen radial verlaufende Nervenfasern zusammen und wirken wie ein radialsymmetrischer Polarisationsfilter. Die eingelagerten Pigmentmoleküle sind dabei so ausgerichtet, dass sie den Blauanteil des polarisierten Lichts in einer Vorzugsrichtung schwächen. Das lässt das gelbliche Bündel erscheinen. Der von vielen Menschen beobachtete schwache Blauschimmer, der an beiden Seiten senkrecht zum gelben Streifen auftritt, wird durch Simultankontrast provoziert: Blau ist die Komplementärfarbe von Gelb.

Der Mensch kann polarisiertes Licht also durchaus direkt sehen. Anders als in der Tierwelt nutzen wir diese Fähigkeit allerdings nicht automatisch – sondern müssen uns erst einmal bewusst machen, dass wir sie überhaupt besitzen.

QUELLEN

Haidinger, W.: Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts und der Lage der Polarisations ebene. Annalen der Physik und Chemie 63, 1844

Tolstoj, L.: Kindheit, Knabenalter, Jünglingsjahre. Insel, Frankfurt, 1963

Oft erreicht die Sonne erst nach 12 Uhr den höchsten Punkt

Die astronomische Zeit stimmt in vielen Regionen der Welt nicht mit der amtlichen Ortszeit überein.

Text und Grafik: Nadieh Bremer

▶ Vor mehreren Jahrhunderten legten alle großen Städte weltweit 12 Uhr als den Zeitpunkt fest, an dem die Sonne ihren Höchststand erreicht, den so genannten wahren Mittag. In den späten 1800er Jahren wurde es für nahe gelegene Gemeinden unbequem, leicht unterschiedliche Zeiten zu verwenden. Die Länder führten daher Zeitzonen ein, um größere Gebiete zu synchronisieren. Das ruft jedoch Abwei-

chungen zwischen dem astronomischen Mittag und der Mittagszeit hervor. Die Karte zeigt, wie viel später (rot) oder früher (blau) der wahre Mittag im Vergleich zu 12 Uhr während der Sommersonnenwende ist. An den meisten Orten erreicht die Sonne ihren Höchststand später als um 12 Uhr. Das heißt, unsere Uhren zeigen den Sonnenaufgang und -untergang später an als bei unseren Vorfahren. Diese Verschiebung ist im Winter ähnlich, aber weniger ausgeprägt.

Unterschiede zwischen der astronomischen Zeit und der Uhrzeit gibt es das ganze Jahr über. Aber die Sommerzeit verstärkt die Verschiebung im Gegensatz zur Winterzeit.

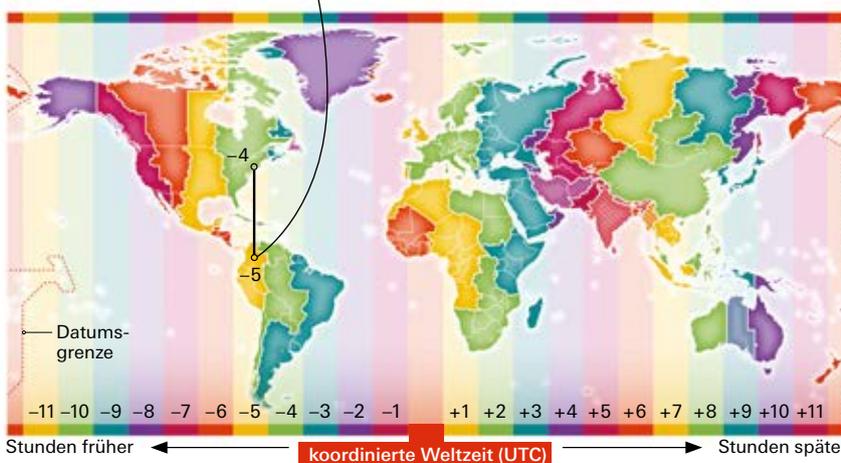
Winter 21. Dezember 2019

Sommer 21. Juni 2019

Entlang jedes Längengrads findet der astronomische Mittag zur gleichen Zeit statt. Doch wegen der Zeitzone kann die Ortszeit an diesen Orten trotzdem variieren. Zum Beispiel erreicht die Sonne am 21. Juni in Bogotá ihren höchsten Stand zwei Minuten vor Mittag, während es in New York City schon eine Stunde später, also 12.58 Uhr ist.

Alaska und China haben die größte Zeitdifferenz zum astronomischen Mittag. In der Stadt Nome im Westen Alaskas erreicht die Sonne am 21. Juni ihren höchsten Punkt um 15.03 Uhr. Und obwohl sich China über fünf Zeitzonen erstreckt, gibt es dort nur eine amtliche Zeit (UTC+8). Daher ist die Mittagszeit für östliche Städte am nächsten zum astronomischen Mittag, während am 21. Juni die Sonne in westlichen Gebieten ihren Höchststand erst gegen 15.05 Uhr erreicht.

Ein Punkt steht für aufgezeichnete Daten. Viele kleine Inseln besitzen keine.



Herumspielen mit Zeitzonen

Eine Region hat die kleinste Zeitdifferenz zum astronomischen Mittag, wenn die Ortszeit der Weltzeit (UTC) entspricht. Westaustralien gliedert sich fast perfekt in UTC+8 ein. Dort erreicht die Sonne um 12 Uhr ihren Höchststand – in östlichen Gegenden ein wenig früher, in westlichen ein bisschen später. Die amtliche Zeitzone vieler Länder ist gegen die astronomische Zeit verschoben. Einige Staaten möchten etwa abends länger Sonnenlicht nutzen oder orientieren ihre Zeit an einem wichtigen benachbarten Land.

NADIEH BREMER (ZEITZONEN: OPENSTREETMAP) / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

TEILCHENBESCHLEUNIGER

Ein Löffelchen Ursuppe

Der frühe Kosmos war ein heißes und dichtes Gemisch aus fundamentalen Materiebestandteilen. Neue Experimente sollen die extremen Bedingungen präziser nachbilden als je zuvor.

» spektrum.de/artikel/2141877



Clara Moskowitz leitet den Bereich für Physik und Astronomie bei »Scientific American«.



RUNDHERUM Bevor sie inmitten der Detektoren kollidieren, kreisen die Teilchen durch Vakuumröhren im 3,8 Kilometer langen Ringbeschleuniger.

Stellen Sie sich vor, Sie hätten ein Mikroskop, mit dem Sie ein einzelnes Atom beliebig nah betrachten könnten. Bei einem Wasserstoffatom zum Beispiel würden Sie mühelos am Elektron in der Hülle vorbei bis hinein zum Kern zoomen, der nur aus einem einzelnen Proton besteht. In dessen Innerem erwartet Sie bei der nächsten Vergrößerungsstufe vielleicht ein Bild, das sich so in vielen Lehrbüchern findet, nämlich ein Trio aus fundamentalen Teilchen: zwei Up-Quarks und ein Down-Quark. In Wirklichkeit sähen Sie sich jedoch einem komplizierten Durcheinander gegenüber, bei dem etliche Bestandteile zusammenwirken. Erst gemeinsam erzeugen sie die Masse, den Spin und andere Eigenschaften des Protons, das hinsichtlich vieler Aspekte noch immer rätselhaft ist.

Die drei Quarks in dem vereinfachten didaktischen Bild sind lediglich die »Valenzquarks« des Protons. Sie schwimmen wie weithin sichtbare Bojen auf einer aufgewühlten See aus weiteren Quarks und ihren Antimaterie-Gegenstücken, den Antiquarks, sowie den klebrigen »Gluonen«, die alles zusammenhalten. Die Gesamtzahl der Quarks und Gluonen im Proton ändert sich ständig. Unablässig tauchen Quark-Antiquark-Paare aus dem Nichts auf und verschwinden wieder; Gluonen neigen unterdessen dazu, sich zu vervielfältigen, insbesondere wenn das Proton an Energie gewinnt. Es herrscht heilloses Chaos. Dieses wird immerhin von der so genannten starken Kraft gebändigt, der stärksten der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie sperrt das ganze Tohuwobu ins Innere der Protonen und Neutronen. Doch das hat sie nicht immer getan.

Unmittelbar nach dem Urknall war das Universum so heiß und dicht, dass die starke Kraft die umherschwirrenden Quarks und Gluonen nicht zusammenhalten konnte.

AUF EINEN BLICK

Völlig losgelöst

- 1 Normalerweise sind die Elementarteilchen im Atomkern untrennbar aneinander gebunden. Im sehr jungen All konnten sich Quarks und Gluonen allerdings frei als eine Art Flüssigkeit bewegen.
- 2 Dieses Quark-Gluon-Plasma lässt sich kurzzeitig in Teilchenbeschleunigern erzeugen. Nachgerüstete Technik gestattet dort nun genauere Vermessungen des exotischen Materiezustands.
- 3 Die Daten werden dabei helfen, fundamentale Aspekte hinter den Vorgängen besser zu verstehen. Denn die zugehörige Theorie ist mathematisch so kompliziert, dass mit ihr nur näherungsweise Lösungen gelingen.

NEU VERKABELT Der aufgerüstete sPHENIX-Detektor am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory in Long Island soll das Plasma aus Quarks und Gluonen vermessen, das bei Teilchenkollisionen im Zentrum der Detektoren entsteht.

Stattdessen formten sie eine Art perfekte, reibungsfreie Flüssigkeit, das so genannte Quark-Gluon-Plasma. Dieser Abschnitt in der kosmischen Geschichte endete schnell. Nach Sekundenbruchteilen waren die Quarks und Gluonen bereits in Atomkernen zusammengepfercht.

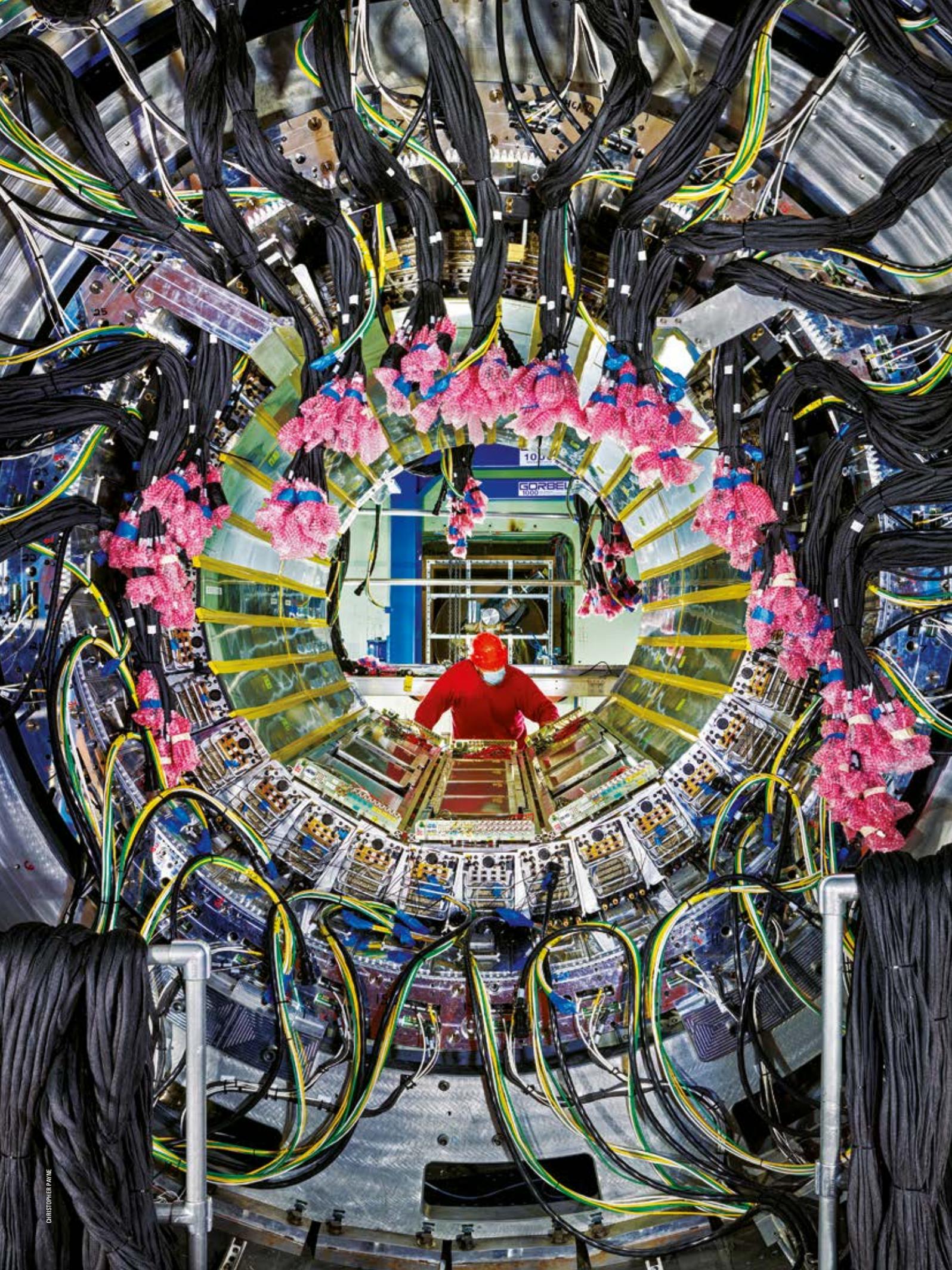
Heute lassen sich Quark-Gluon-Plasmen wieder heraufbeschwören. Dazu sind Teilchenbeschleuniger nötig, die zwei schwere Atomkerne (etwa von Gold) auf enorme Energien bringen und zusammenstoßen lassen. Die Kollision erzeugt kurzzeitig die notwendigen Temperaturen für Tröpfchen aus Plasma.

Riesige Instrumente für winzige Materie

Gewaltige Detektoren dokumentieren das Geschehen. Wie Zwiebelschichten legen sich die Instrumente um den Strahlengang des Teilchenbeschleunigers, hallendeckenhoch und verbunden mit Abertausenden von Drähten. Wenn man vor einem derartigen Koloss steht, fühlt es sich an, als blickte man auf den Höhepunkt menschlicher Schaffenskraft. Solche Maschinen gehören zu den größten und kompliziertesten, die je gebaut wurden – und das alles, um Urmaterie zu untersuchen, die noch kleiner ist als ein Atom. »Dieser Stoff füllte etwa zehn Mikrosekunden nach dem Urknall das gesamte Universum aus«, erklärt der deutsche theoretische Physiker Björn Schenke vom Brookhaven National Laboratory in Long Island, das einen solchen Beschleunigerkomplex beherbergt. »Durch seine Untersuchung reisen wir so weit in der Zeit zurück wie überhaupt nur möglich.«

Derartige Forschung bietet außerdem einen Zugang zur starken Kraft, der wohl am schlechtesten verstandenen aller Naturkräfte. Mathematisch wird sie durch die »Quantenchromodynamik« (QCD) beschrieben, die so kompliziert ist, dass sich mit ihr praktisch nie etwas direkt berechnen lässt. Selbst Supercomputer liefern bloß ungefähre Lösungen. »Als Menschen wollen wir die Natur verstehen; und als einen Teil davon brauchen wir einen Einblick in die Quantenchromodynamik und die starke Kraft«, unterstreicht die Kernphysikerin Haiyan Gao aus Brookhaven. »Nur durch Experimente am Quark-Gluon-Plasma erfahren wir, wie die Theorie funktioniert.«

Im Mai 2023 ging in Brookhaven eine neue Maschine zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas in Betrieb. Das Gerät mit der Bezeichnung sPHENIX ist ein Detektor am dortigen Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC), einem der größten Teilchenbeschleuniger der Welt. Zuvor durchlief das Experiment umfangreiche Modernisierungsarbeiten, ebenso wie ein weiteres, der Solenoidal Tracker at RHIC (STAR). Auf der anderen Seite des Atlantiks begann im europäischen Labor CERN bei Genf der weltgrößte Beschleuniger Large Hadron Collider (LHC) im Juli 2022



Wann genau entkommen Quarks und Gluonen dem Confinement, das sie in den Kernteilchen festhält?

eine neue Betriebsphase mit leistungsfähigerer Hard- und Software (siehe »Spektrum« Oktober 2022, S. 52). Mit den hochgerüsteten Teilchenschleudern soll das bisher detaillierteste Bild der ursprünglichen Flüssigkeit aus den kleinsten Bausteinen der Materie entstehen.

Theoretiker hatten das Quark-Gluon-Plasma schon lange vor dessen Entdeckung vorausgesagt, es aber in einer ganz anderen Form erwartet. Die Beschreibungen wurden in den 1970er und 1980er Jahren entwickelt, nachdem in den späten 1960er Jahren die Quarks und 1979 die Gluonen entdeckt worden waren. Anfangs war die Hypothese: Quarks und Gluonen sollten sich, sobald sie aus den Atomkernen herausgelöst sind, gleichförmig ausdehnen wie eine gasförmige Substanz. »Immerhin werden Flüssigkeiten beim Erhitzen normalerweise zu Gas«, erläutert Berndt Mueller von der Duke University. Der US-deutsche Kernphysiker arbeitet seit den 1980er Jahren an Modellen für das Quark-Gluon-Plasma. Seinerzeit fühlte sich Mueller zu dem Gebiet hingezogen, weil es für Theorien weit offen lag und experimentelle Daten bald eintreffen sollten. »Damals war ich etwa 30 Jahre alt, und in dieser Lebensphase schaut man sich nach Betätigungsfeldern um, in denen es Interessantes zu entdecken gibt.« Gerade kamen neue Beschleunigertechnologien auf, mit denen sich schwere Ionen aufeinanderschießen ließen, das heißt Atomkerne mit Dutzenden von Protonen und Neutronen in ihrem Inneren. Die bei den Kollisionen hervorgerufenen Temperaturen und Dichten sollten die subatomaren Partikel auseinanderreißen. Die ersten solchen Versuche fanden in den 1970er Jahren am Lawrence Berkeley National Laboratory statt, aber sie lieferten noch nicht ausreichend Energie für ein Quark-Gluon-Plasma. Das änderte sich 1986 mit dem Super Proton Synchrotron (SPS) am CERN. Hier gab es die ersten Hinweise auf den bisher unerforschten Zustand von Materie.

Jedoch dauerte es noch wesentlich länger bis zur Bekanntgabe der Erkenntnisse durch das CERN – bis zum Jahr 2000. Lange waren sich die Teams nicht einig, ob die Daten aussagekräftig genug zum Verkünden einer Entdeckung waren. Im selben Jahr wurde der RHIC in Brookhaven gestartet, wo schwere Ionen noch höhere Energien erreichen konnten als beim SPS. Innerhalb von fünf Jahren hatte der Beschleuniger hinreichend Daten gesammelt, um das Quark-Gluon-Plasma offiziell für identifiziert zu erklären.

Es erfüllte allerdings überhaupt nicht die Erwartungen. An Stelle eines expandierenden Gases war das Quark-Gluon-Plasma eine nahezu ideale Flüssigkeit praktisch

ohne jede Viskosität. In einem Gas sind die Teilchen unabhängig voneinander, in einer Flüssigkeit bewegen sie sich zusammenhängend. Sie ist umso »idealer«, je ausgeprägter die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen sind, das heißt je stärker diese sich gegenseitig anziehen. Laut der RHIC-Beobachtungen hatte das Quark-Gluon-Plasma einen geringeren Strömungswiderstand als jede andere bekannte Substanz. Das, so Mueller, »kam sehr überraschend«.

2010 gaben RHIC-Teams die erste Messung der Temperatur des Quark-Gluon-Plasmas bekannt: vier Billionen Grad Celsius. Das übertrifft jede andere jemals von Menschen geschaffene Materie und ist hunderttausende Male heißer als das Zentrum der Sonne. »Je heißer etwas wird, desto weniger entspricht sein Charakter üblicherweise dem einer perfekten Flüssigkeit«, sagt Mueller. »Aber in diesem Fall ist es genau umgekehrt – bei einer kritischen Temperatur wird es flüssig.« Hinter dem seltsamen Verhalten dürfte die starke Kraft stecken. Sobald die Teilchen den Protonen und Neutronen entkommen können, erstreckt sie sich über das gesamte Plasma und ruft eine kollektive Wechselwirkung aller Teilchen untereinander hervor.

Eine der größten offenen Fragen zum Quark-Gluon-Plasma ist, wann genau die Quarks und Gluonen dem so genannten Confinement entkommen, das sie normalerweise in den Kernteilchen festhält. Gao fragt: »Wo ist die Grenze zwischen gewöhnlicher Materie und Quark-Gluon-Plasma? Wo ist der kritische Punkt, an dem beide nebeneinander existieren?« Es ist eines der Hauptziele der verbesserten Experimente, zu verstehen, wo der Übergang stattfindet und wie viele Teilchen dafür nötig sind, das kollektive Verhalten auszulösen.

Ausufernd komplizierte Berechnungen

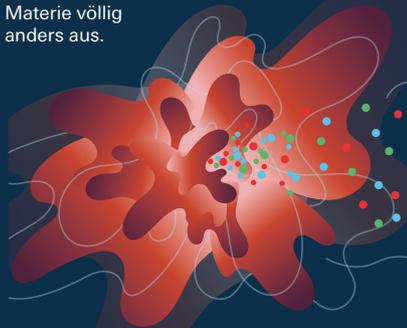
Ein weiteres Rätsel ist das eines möglicherweise fraktalen Verhaltens des Quark-Gluon-Plasmas – das heißt, ob seine Eigenschaften einem sich wiederholenden Muster folgen, das beim Heraus- oder Hineinzoomen in jedem Maßstab gleich erscheint. Wenn dem so ist, so hoffen einige, könnten Erkenntnisse aus der Fraktaltheorie dabei helfen, das Verhalten des Materiezustands zu erklären. »Es gibt Hinweise auf eine solche Struktur im Quark-Gluon-Plasma«, resümiert Airton Deppman von der Universidade de São Paulo. Deppman untersucht unter anderem, ob fraktale Aspekte nach dem Phasenübergang vom Plasma zum Proton erhalten bleiben.

Die Beantwortung solcher Fragen könnte uns näher an ein ehrgeiziges Ziel führen: ein Verständnis der in vielerlei Hinsicht verwirrenden starken Kraft. Die Quantenchromodynamik beschreibt das Zusammenspiel von Quarks und Gluonen, indem sie ihnen eine Eigenschaft namens Farbladung zuweist. Diese entspricht im Prinzip der elektrischen Ladung im Elektromagnetismus. Gleichzeitig erklärt das, warum die Quantenchromodynamik so schwierig ist. Denn während es im Elektromagnetismus nur zwei Ladungen gibt, positiv oder negativ, hat die Quantenchromodynamik drei: rot, grün oder blau. Anti-

Quark-Gluon-Plasma

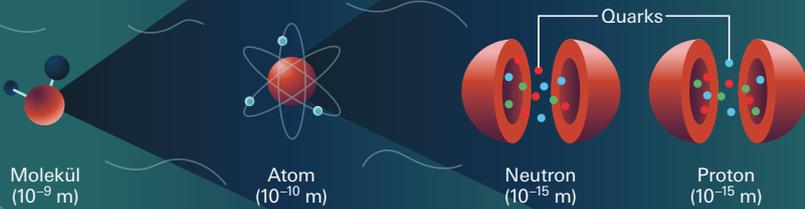
In Teilchenbeschleunigern lässt sich ein exotischer Zustand nachstellen, in dem sich das Universum ganz zu Anfang befand.

Unmittelbar nach dem Urknall sah die Materie völlig anders aus.



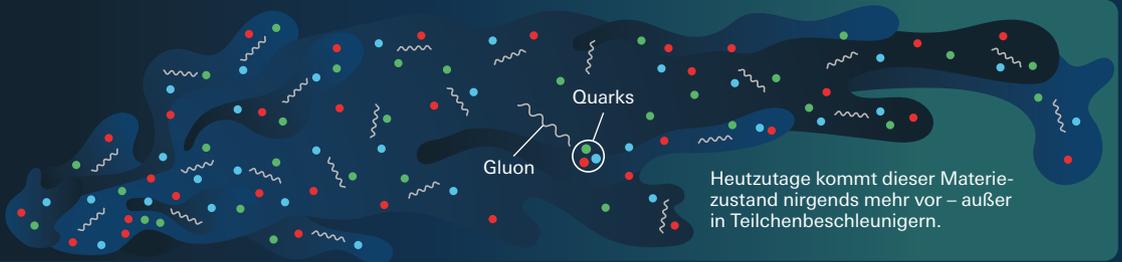
Alles war so heiß und dicht zusammengepackt, dass sich noch keine Atome bilden konnten.

Quarks, die Bausteine von Protonen und Neutronen, waren noch nicht in Kernen eingesperrt.



Die Quarks konnten sich frei bewegen, zusammen mit den Gluonen, die normalerweise als Klebstoff im Atomkern fungieren.

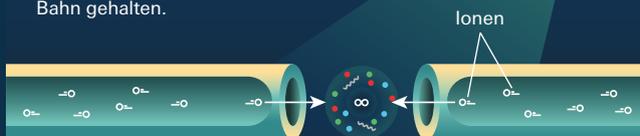
Gemeinsam bildeten sie ein perfektes Fluid, das Quark-Gluon-Plasma.



Heutzutage kommt dieser Materiezustand nirgends mehr vor – außer in Teilchenbeschleunigern.

Das Quark-Gluon-Plasma wird beispielsweise am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory in Long Island untersucht.

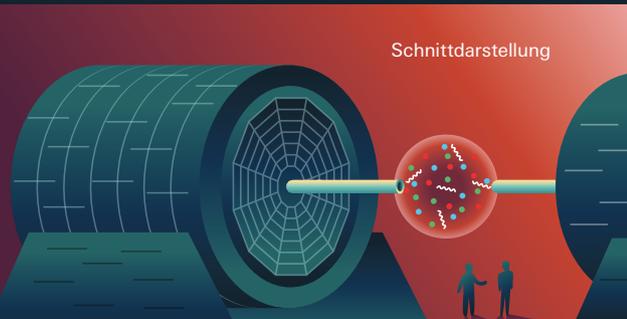
Der RHIC bringt Atomkerne entlang eines 3,8 Kilometer langen Rings auf enorme Energien. Die Ionen durchlaufen die Strecke pro Sekunde 80000-mal und werden dabei von supraleitenden Magneten auf der Bahn gehalten.



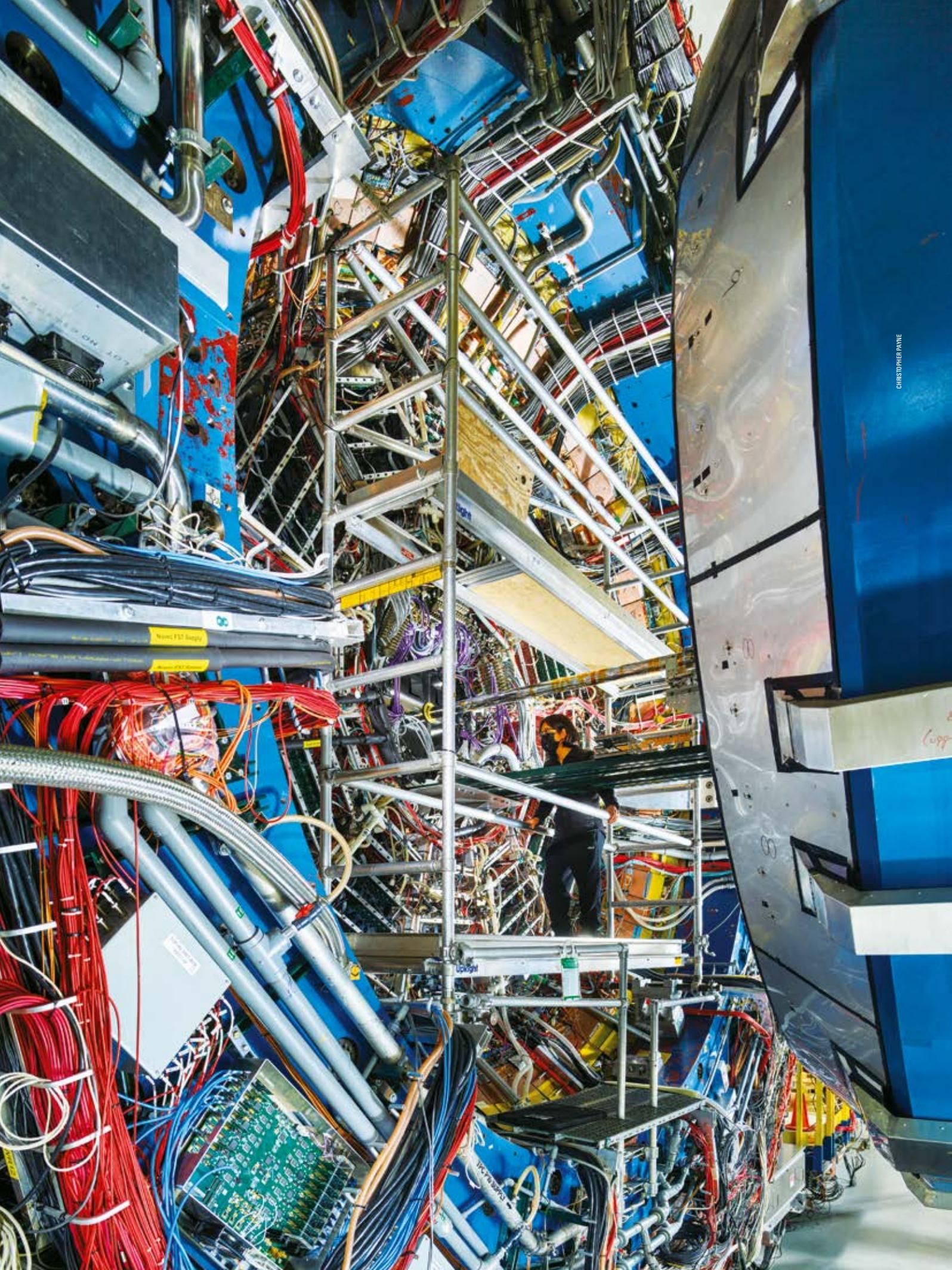
An mehreren Punkten stoßen zwei gegenläufige Strahlen zusammen. Bei der Kollision gehen etliche neue Teilchen sowie Tröpfchen von Quark-Gluon-Plasma hervor.

In Brookhaven vermessen die Detektoren sPHENIX und STAR das Spektakel.

Ein Detektor besteht aus mehreren Schichten mit spezialisierter Elektronik, Kabeln und Kühlleitungen. Sie ermöglichen eine Rekonstruktion der Bewegungen und der Energien der Teilchen, die bei einer Kollision entstehen. Starke Magnete krümmen die Flugbahnen, was Rückschlüsse auf ihre Ladungen und Massen zulässt. Jede Kollision erzeugt Unmengen an Daten.



Die Messungen decken die Geheimnisse des Quark-Gluon-Plasmas auf und gewähren Einblicke in den Zustand der Materie zu Beginn des Kosmos.



HAUSHOHE ELEKTRONIK Die Physikerin Lijuan Ruan steht vor dem Herzstück des STAR-Detektors, direkt unterhalb des Rohrs, durch das die Teilchenstrahlen laufen.

materieteilchen können antirote, antigüne oder antiblaue Ladungen tragen. Außerdem ist das Übertragerteilchen der elektromagnetischen Kraft, das Photon, elektrisch neutral. Das vereinfacht die Sache. In der QCD hingegen trägt das Gluon selbst eine Farbladung und kann über die starke Kraft sowohl an seinesgleichen als auch an Quarks koppeln. Diese Selbstwechselwirkungen und zusätzlichen Ladungen lassen Berechnungen in der QCD schnell ausufern. »Man kann die Theorie im Wesentlichen auf zwei Zeilen niederschreiben«, sagt Schenke, »aber vollständige Lösungen sind noch nicht gelungen, etwa beim Confinement, also dabei, wie Gluonen und Quarks unter anderem im Proton festgehalten werden.«

Das Quark-Gluon-Plasma ist der einzige Zustand, in dem sich im Labor ungebundene Quarks untersuchen lassen. Das könnte mehr darüber verraten, wie das Confinement funktioniert. »Um das zu klären, könnten wir nachverfolgen, wie die freien Quarks wieder zu Protonen, Neutronen und anderen Teilchen rekombinieren, die wir anschließend detektieren«, erklärt Schenke. So bringen Daten aus Schwerionenkollisionen möglicherweise ein klareres Verständnis für die QCD-Mechanismen hinter dem Confinement.

Mit dem neuen RHIC-Experiment sPHENIX und dem verbesserten STAR-Detektor sollten die bisher genauesten Kartierungen des Plasmas gelingen. Der supraleitende Magnet von sPHENIX ist beispielsweise etwa dreimal so stark wie der von STAR. »Das ist für viele der Dinge wichtig, die wir messen wollen«, erläutert David Morrison aus Brookhaven, der an dem neuen Gerät arbeitet. »Bei einer Kollision fliegen die Teilchen in alle Richtungen davon, und die Magnetfelder krümmen ihre Bahnen. Das wiederum lässt Rückschlüsse auf die Art von Teilchen zu sowie deren Energien und Impulse.« Das Team hofft zum Beispiel auf »Y-Mesonen«. Diese enthalten ein so genanntes Bottom-Quark und dessen Antiteilchen. Nach ihrer Entstehung können sie das Quark-Gluon-Plasma durchqueren, mit ihm wechselwirken und so als Sonden für einige seiner seltsamen Eigenschaften dienen.

Das Experiment wird auch davon profitieren, dass es viel mehr Daten von den Kollisionen und den daraus resultierenden Teilchen aufzeichnen kann als bisher. STAR speichert rund zehn Petabyte pro Jahr; bei sPHENIX wird es das 15-Fache sein.

STAR wurde ebenfalls aufgerüstet. Zu den wichtigsten Neuerungen gehören »Vorwärtsdetektoren«. Sie erkennen Teilchen in einem größeren Winkelbereich, insbesondere solche, die in der Richtung der ursprünglichen Strahlen weiterfliegen. »Das war es dann aber auch«, sagt Lijuan Ruan, Sprecherin des STAR-Experiments. Sie hat vor rund 20 Jahren als Doktorandin an einigen der ersten Komponenten der Maschine mitgetüftelt. STAR trug maßgeblich

zur Entdeckung des Quark-Gluon-Plasmas bei und soll nach 2025 für immer abgeschaltet werden.

In Europa hat der LHC im Juli 2022 seine dritte Betriebsphase begonnen, die ebenfalls bis 2025 dauert. Die Verbesserungen dort ermöglichen es, etwa 100-mal so viele Kollisionen zwischen Bleikernen zu analysieren wie bei den ersten beiden Durchläufen. Damit werden die Ergebnisse deutlich präziser. »Hierbei ist eines der wichtigsten Ziele, die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas genau zu quantifizieren und mit der Dynamik seiner Bestandteile zu verknüpfen«, sagt Luciano Musa vom ALICE-Experiment am LHC. Im Vergleich zum RHIC finden die Kollisionen am LHC bei höheren Energien statt und erzeugen ein heißeres, dichteres und langlebigeres Quark-Gluon-Plasma. Damit geht eine größere Vielfalt an Teilchen einher, von denen sich wiederum auf die Charakteristika des Plasmas schließen lässt. »Die Studien am RHIC und am LHC gehen Hand in Hand«, betont Musa. »Die Untersuchung von Kollisionen auf verschiedenen Energieskalen und mit unterschiedlichen Systemen bieten die Chance auf ein tieferes und umfassenderes Verständnis der Kernmaterie.«

Unterschiedliche Ansätze ergänzen sich

In jedem Energiebereich treten andere Aspekte des Plasmas hervor. Raghav Kunnawalkam Elayavalli von der Vanderbilt University in Nashville hat am LHC promoviert, arbeitet nun bei STAR und sPHENIX und nennt die Vorteile von Teilchen, die aus Kollisionen mit niedrigerer Energie stammen: »Sie interagieren viel mehr mit dem Plasma. Stellen Sie sich das wie eine Party mit vielen Leuten vor, die Sie verlassen müssen. Wenn Sie auf dem Weg zum Ausgang betont langsam gehen, können Sie auf dem Weg nach draußen noch einige Unterhaltungen führen.« Die Teilchen, die am RHIC durch das Quark-Gluon-Plasma fliegen, brauchen dafür länger. Deswegen entlocken sie ihm mehr Informationen. »Wir messen die durchschnittliche Entfernung, die ein Teilchen zurücklegt, bis es mit einem anderen interagiert«, so Kunnawalkam Elayavalli. »Das liefert uns eine fundamentale Skala des Plasmas.«

RHIC und der LHC stehen an der Spitze der Bemühungen, aber weitere Experimente werden ebenso Erkenntnisse bringen. Am CERN lässt das Experiment NA61/SHINE am SPS Ionen auf ein feststehendes Ziel prallen und ermittelt den kritischen Punkt, an dem Protonen und Neutronen zum Quark-Gluon-Plasma werden. Ein ähnliches Versuchsprinzip wird es an der im Bau befindlichen Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt geben. Im Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna bei Moskau wird ein Beschleuniger namens Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) ebenfalls den kritischen Punkt untersuchen. »Es sind spannende Zeiten«, stellt Mueller fest. »Wir wissen, dass es im frühen Universum ein Quark-Gluon-Plasma gab, aber wir können nicht zurück dorthin und es direkt untersuchen. Stattdessen nähern wir uns dieser physikalischen Situation jetzt auf andere Weise.« ◀

Wie standhaft ist das

Zunächst schien es, als würde das James Webb Space Telescope bereits mit seinen ersten Bildern von fernen Galaxien unsere derzeit beste Theorie zur Entwicklung des Weltalls aushebeln. Nachjustierungen bei den Modellen bringen die Beobachtungen wieder mit ihr in Einklang – dennoch bleiben viele Fragen offen.

» [spektrum.de/artikel/2141880](https://www.spektrum.de/artikel/2141880)



Rebecca Boyle ist Wissenschaftsjournalistin in St. Louis im US-Staat Missouri.

Die Risse im Theoriegebäude der Kosmologie tauchten erstaunlich schnell auf. Kaum hatte das James Webb Space Telescope (JWST) im Frühjahr 2022 zum ersten Mal die Tiefen des Alls anvisiert, da gerieten schon extrem weit entfernte, aber sehr leuchtkräftige Galaxien ins Sichtfeld. »Sie waren immens hell und stachen regelrecht heraus«, erinnert sich Rohan Naidu, Astronom am Massachusetts Institute of Technology. Die Entfernung der Galaxien von der Erde schien darauf hinzudeuten, dass sie viel früher in der Geschichte des Universums herangewachsen sind als bis dahin angenommen.

Zwar gab es Zweifel an der Belastbarkeit der Daten, doch zumindest für einige der Galaxien bestätigte eine Untersuchung im Dezember 2022: Die Galaxien müssen tatsächlich erstaunlich kurz nach dem Urknall entstanden

Standardmodell?

ERSTE STERNE Aus den Gaswolken des jungen Weltalls haben sich sehr massereiche Sterne gebildet, die wie in dieser Illustration intensiv im blauen Spektralbereich strahlten. Frühe Galaxien könnten unerwartet hell leuchten, wenn sie solche Objekte enthielten.

AUF EINEN BLICK

Zu früh zu groß

- 1** Schon bald nach der Inbetriebnahme des Weltraumteleskops JWST waren auf den Bildern Galaxien zu erkennen, die sich augenscheinlich schneller entwickelt haben als vorhergesagt.
- 2** Vielleicht sind sie nicht so weit weg oder leuchtkräftiger als gedacht. Anpassungen am Formelwerk zum Beginn des Alls beheben ebenfalls manche Diskrepanzen.
- 3** Viele Unstimmigkeiten werden sich aber erst mit mehr Daten beseitigen lassen. So oder so führen die Beobachtungen zu neuen Einsichten über die Physik des Kosmos.

zeigten, beschleunigt sich die Expansion sogar. Die Galaxien fliegen in einem Tempo auseinander, das die Wirkung der wechselseitigen Anziehungskraft übersteigt. Der Vorgang scheint durch eine abstoßende Kraft des Raums selbst angetrieben zu werden. Das ist die so genannte Dunkle Energie, die in den Formeln durch den griechischen Buchstaben Lambda bezeichnet wird (dafür steht das Λ in LCDM).

Mit den passenden Werten für Lambda, die kalte Dunkle Materie sowie die normale Materie und Strahlung erhält man aus den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie ein Modell für das grobe Verhalten des Universums als Ganzes. Es beschreibt fast alle kosmologischen Beobachtungen. Eine Möglichkeit zur Überprüfung dieses Konstrukts ist ein Blick auf sehr weit entfernte Galaxien, was einer Untersuchung der ersten paar hundert Millionen Jahre nach dem Urknall entspricht. Damals war der Kosmos einfacher strukturiert, und seine Entwicklung lässt sich leichter mit den Vorhersagen vergleichen.

Aufnahmen mit dem Hubble-Weltraumteleskop von 1995 boten erstmals einen Blick auf die Galaxien des frühen Universums. Eine zehn Tage dauernde Langzeitbelichtung offenbarte in einem scheinbar leeren Fleck zwischen den Sternen einen überwältigenden Reichtum an Strukturen. In jenem »Deep Field« lagen Tausende von Galaxien verschiedenster Entfernungen und Entwicklungsstadien. Weitere derartige Aufnahmen folgten (siehe »Die Faszination der Leere« in »Spektrum«, März 2023). Auf einem solchen Bild identifizierte eine 2016 veröffentlichte Analyse einen schwach leuchtenden Fleck namens GN-z11 als bis dahin älteste bekannte Galaxie. Ihr Licht stammt von 400 Millionen Jahren nach dem Urknall.

Das war für eine Galaxie überraschend früh, stellte aber das LCDM-Modell nicht vor Probleme. Einerseits ist die Galaxie mit nur einem Prozent der Masse der Milchstraße winzig, andererseits ist sie ein vereinzelter Fund. Ein leistungsfähigeres Teleskop musste klären, ob es sich bei GN-z11 um einen Ausreißer handelt oder um einen Vertreter einer größeren Population früher Galaxien. Das dafür nötige Instrument war das am 25. Dezember 2021 gestartete JWST, ein Gemeinschaftsprojekt der US-amerikanischen, europäischen und kanadischen Raumfahrtbehörden. Nach der Ankunft des Weltraumteleskops an seinem Beobachtungsplatz im All und der ersten Kalibrierung lieferte die empfindliche Elektronik 2022 eine Flut von Daten. Kurz darauf veröffentlichten Forschungsteams zahlreiche Fachartikel, in denen sie die Phänomene beschrieben und erklärten.

Zur Entfernungsmessung im All dient eine Variante des Dopplereffekts, den wir im Alltag von der Sirene eines Krankenwagens kennen: Ihr Ton klingt höher, wenn er sich nähert, und tiefer, sobald er vorbeigefahren ist. Je weiter eine Galaxie weg ist, desto schneller entfernt sie sich von uns. Dabei streckt sich ihr Licht auf längere Wellenlängen und erscheint dadurch röter. Die Größe dieser Rotverschiebung wird mit dem Buchstaben z bezeichnet. Je höher der Wert von z , desto länger ist das Licht eines Objekts bis zu uns unterwegs gewesen.

Eine der ersten Arbeiten zu den JWST-Daten stammt vom Team um den eingangs zitierten Rohan Naidu. Es fand eine unerklärlich helle und weitab gelegene Galaxie und nannte sie GLASS-z13, da der Wert von z offenbar bei rekordverdächtigen 13 lag. Die Rotverschiebung wurde später auf 12,4 und der Name entsprechend zu GLASS-z12 korrigiert. Andere JWST-Beobachtungsgruppen meldeten ähnlich dramatische Werte für andere Galaxien, darunter eine namens CEERS-1749 oder CR2-z17-1, die ihr Licht bloß 220 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesendet zu haben scheint.

Solche Funde deuteten auf Lücken in der durch LCDM erzählten Geschichte hin. Irgendwie sind die Galaxien sofort riesengroß geworden. In einer im November 2022 veröffentlichten Studie haben vier Forscher Computerberechnungen von Universen auf Basis des LCDM-Modells untersucht und festgestellt, dass die frühen, hellen Galaxien eine Größenordnung schwerer waren als solche, die sich zur gleichen Zeit in Simulationen bildeten.

Doch viele waren auf Grund der JWST-Daten noch nicht davon überzeugt, das Standardmodell sei nun widerlegt. Denn die Vorhersagen von LCDM sind nicht immer eindeutig. Während sich die Auswirkungen von Dunkler Materie und Dunkler Energie verhältnismäßig einfach modellieren lassen, gibt es bei der normalen Materie komplexe Wechselwirkungen und Verhaltensweisen. Niemand weiß genau, was kurze Zeit nach dem Urknall vor sich ging; Nachbildungen im Computer liefern lediglich näherungsweise Einblicke. Außerdem ist es in der Praxis schwierig, die exakten Distanzen zu den Galaxien zu bestimmen.

Helligkeit und Farbe können trügen – erst Spektren liefern den Beweis

So gab es in den Monaten nach den ersten Veröffentlichungen Korrekturen bei einigen vermeintlich extremen Rotverschiebungen. Bessere Kalibrierungen des neuen Teleskops stuften die Objekte zurück in spätere Stadien der kosmischen Entwicklung. CEERS-1749 befindet sich in derselben Himmelsregion wie ein Galaxienhaufen mit 12,4 Milliarden Jahre altem Licht. Laut Naidu könnte die Galaxie tatsächlich Teil dieses Haufens sein und wäre dann wohl bloß außerordentlich reich an Staub. Letzterer ließe ihre Rotverschiebung größer erscheinen, als sie ist. »In dem Fall würde es sich um eine unbekannte Art von Galaxie mit geringer Masse handeln, in der sich irgendwie und unerwarteterweise eine Menge Staub angesammelt hat«, so Naidu. »Solche neuen Arten von Objekten könnten bei unserer Suche nach sehr weit entfernten Galaxien Verwirrung stiften.«

Zur zuverlässigeren Abschätzung der Entfernungen muss man eine besondere Fähigkeit des JWST hinzuziehen: Mit dem Teleskop lässt sich das eingefangene Licht nicht nur mittels Photometrie analysieren, also der Messung seiner Helligkeit, sondern auch durch Spektroskopie, das heißt die separate Aufzeichnung der einzelnen Wellenlängen. Entspricht eine photometrische Beobachtung dem Foto eines Gesichts in einer Menschenmenge,

dann ist eine spektroskopische Beobachtung wie ein DNA-Test der Person. Naidus Team und andere haben die Rotverschiebungen der Galaxien zunächst anhand von Helligkeitsmessungen bestimmt. Doch eine im Dezember 2022 veröffentlichte Analyse hat im Fall von vier Galaxien beide Methoden kombiniert.

Das Team vom JWST Advanced Deep Extragalactic Survey (JADES) hat nach Galaxien Ausschau gehalten, in deren Infrarotspektrum die Lichtintensität unterhalb einer kritischen Wellenlänge abrupt abnimmt. Dieser Sprung, der so genannte Lyman-Break, tritt auf, weil Wasserstoff im intergalaktischen Raum Strahlung auf charakteristische Weise absorbiert. Durch die Expansion des Universums verschiebt sich nicht nur das ausgesendete Licht entfernter Galaxien zu rötlichen Wellenlängen, sondern auch dessen Absorption und damit die typische Lage des Lyman-Break. Fällt die Intensität im Spektrum einer Galaxie bei längeren Wellenlängen ab, dann ist sie weiter entfernt. JADES hat Rotverschiebungen von bis zu 13,2 identifiziert, das heißt, das Licht wurde vor 13,4 Milliarden Jahren emittiert, weniger als 400 Millionen Jahre nach dem Urknall.

Laut JADES-Teammitglied Brant Robertson von der University of California in Santa Cruz zeigen die Ergebnisse, dass sich das frühe Universum rapide veränderte und die Galaxien zehnmal rascher wuchsen als heute. Er vergleicht sie mit Kolibris, »deren Herzen so rasant schlagen, dass sie quasi ein ganz anderes Leben führen als die übrige Tierwelt«. Tickten die Herzen der frühen Galaxien gar zu schnell für eine Erklärung mittels LCDM? Oder liefern die Messungen einfach nur bessere Zahlen für die Gleichungen des Modells?

In dem Formelwerk betrifft ein wichtiger, aber schlecht verstandener Wert im frühen All die Galaxienmassen. Diese werden von der Helligkeit abgeleitet. Laut Megan Donahue von der Michigan State University in East Lansing ist die Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft allerdings bestenfalls eine wohlbegründete Vermutung. Sie beruht auf Annahmen, die von bekannten Sternen und gut untersuchten Galaxien abgeleitet wurden.

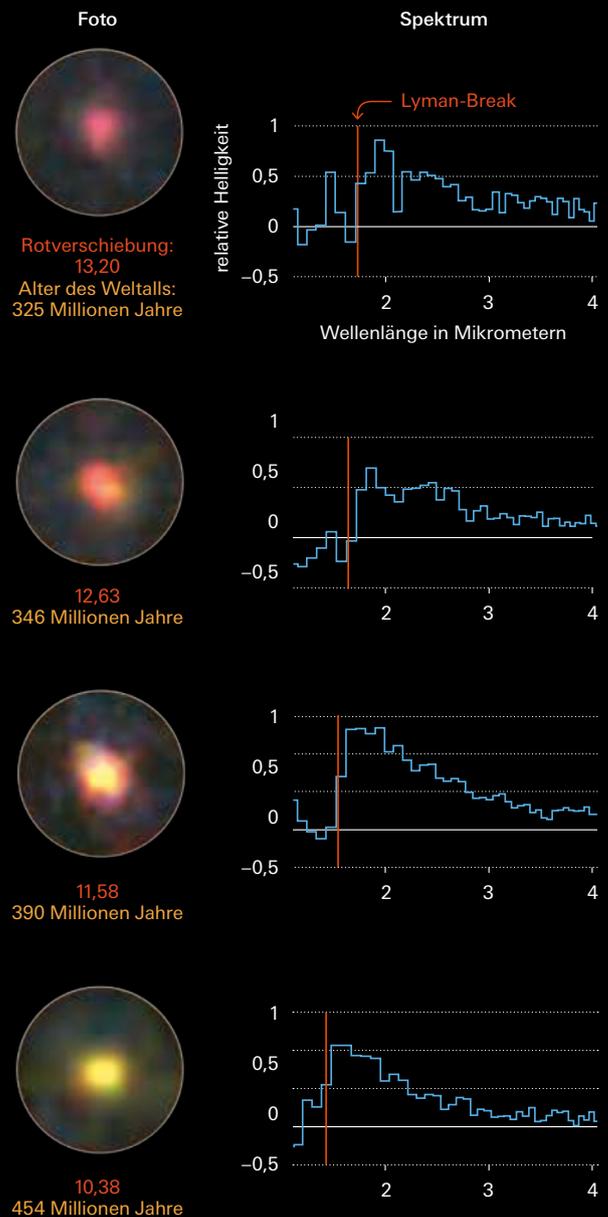
Eine der wichtigsten Voraussetzungen ist, dass die Massen von Sternen einer Population zwar variieren, dabei jedoch stets innerhalb einer gewissen Verteilung bleiben, der so genannten ursprünglichen Massenfunktion (kurz IMF nach englisch: initial mass function). Der IMF-Parameter ist von entscheidender Bedeutung bei der Herleitung der Masse einer Galaxie aus Messungen ihrer Helligkeit. Heiße, blaue, schwere Sterne erzeugen mehr Licht, während der Großteil des Baumaterials einer Galaxie normalerweise in kühlen, roten, kleinen Sternen gebunden ist.

Möglicherweise verhielt sich die IMF im jungen Universum anders. Dann sind die mit JWST entdeckten frühen Galaxien vielleicht leichter, als ihre Helligkeit vermuten lässt. Das aber sorgt für Probleme bei der Vorhersagekraft des LCDM-Modells – falls man diese grundlegende Eingabe ändert, kann man praktisch jedes gewünschte Ergebnis erhalten. »Wenn wir die ursprüngliche Massen-

Die frühesten bekannten Galaxien

Bei diesen vier extrem weit entfernten Galaxien gelang zusätzlich zu einem Foto mittels JWST die Aufzeichnung von Spektren. Der Verlauf der Lichtkurven belegt, dass die Strahlung weniger als 500 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesendet wurde.

Je weiter entfernt eine Galaxie ist, desto stärker ist ihr Licht ins Rote verschoben. Ein charakteristischer Sprung tritt beim Lyman-Break auf, bei dem Wasserstoff die Strahlung absorbiert.



funktion nicht verstehen, wird es zu einer echten Herausforderung, etwas über Galaxien bei hoher Rotverschiebung zu sagen«, beschreibt Wendy Freedman von der University of Chicago das Problem. Ihr Team versucht, mittels Beobachtungen und Computersimulationen die IMF in verschiedenen Umgebungen zu bestimmen.

Bereits Ende 2022 waren die Fachleute ziemlich zuversichtlich, durch Anpassungen der IMF und anderer Einflussgrößen die JWST-Daten mit LCDM in Einklang zu bringen. »Ich halte es für wahrscheinlich, dass wir die Beobachtungen in das Standardmodell eingliedern können«, glaubt Rachel Somerville vom Flatiron Institute in New York. Sie hofft dabei auf die Klärung zentraler offener Fragen, etwa wie rasch die Dunkle Materie um Galaxien das Gas einsammelt oder wie zügig sich dieses vor Beginn der Sternentstehung abkühlt und verdichtet. »Vielleicht geschieht das im frühen Universum eher, vielleicht ist das Gas dichter, vielleicht strömt es irgendwie schneller ein. Wir versuchen immer noch, diese Prozesse zu verstehen.«

Schwarze Löcher und die ersten Sterne

Somerville untersucht außerdem die Rolle Schwarzer Löcher im jungen Kosmos. Supermassereiche Exemplare wurden bereits bei einer Rotverschiebung von sechs bis sieben gefunden, etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall. Es ist schwer zu erklären, wie bis zu dem Zeitpunkt Sterne entstanden, vergangen und zu Schwarzen Löchern kollabiert sein sollen, die dann alles um sich herum verschlangen und Strahlung ausstießen. Wenn dem aber so ist und in den Kernen der frühen Galaxien solche Objekte stecken, könnte das laut Somerville ein Grund sein, warum die Galaxien so hell erscheinen, auch wenn sie eigentlich nicht sehr schwer sind.

Ein Team unter der Leitung von Benjamin Keller von der University of Memphis lieferte im Dezember 2022 Beweise dafür, dass zumindest einige der JWST-Funde zum Standardmodell passen. Simulationen von LCDM-Universen auf Supercomputern spuckten einige Galaxien aus, die so schwer sind wie die vier von JADES spektroskopisch untersuchten. Diese vier sind allerdings kleiner und leuchtschwächer als andere mutmaßliche frühe Exemplare wie GLASS-z12. Nach der Analyse des Teams gab es bei allen Simulationen Galaxien mit einer Größe, die den Werten aus der JADES-Analyse entspricht, bei einer Rotverschiebung von 10. In einem Fall tauchten solche Galaxien bei einem z von 13 auf, bei zwei anderen sogar bei einer noch höheren Rotverschiebung.

Obwohl nach Kellers Schlussfolgerungen keine der JADES-Galaxien dem LCDM-Paradigma widerspricht, sind die Objekte dennoch in anderer Hinsicht herausragend. Laut Kevin Hainline von der University of Arizona in Tucson enthalten die darin vorkommenden Sterne keine Signaturen von Metallen aus zuvor explodierten Sternen. Das könnte bedeuten, dass es sich bei ihnen um Sterne der so genannten Population III handelt. Das ist die allererste Generation von Sternen, mit denen die Epoche der Reionisierung des Universums begonnen hat.

Die spektroskopische Fahndung nach weiteren frühen Galaxien erfolgt mit der Beobachtungskampagne Webb Deep Extragalactic Exploratory Public Survey (WDEEP). Sie hält gezielt nach Galaxien Ausschau, die weniger als 300 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden sind. Solche Messungen werden zu einer Entscheidung über das Schicksal des Standardmodells ebenso beitragen wie andere laufende Analysen. Dazu gehört die Suche nach einer Lösung für ein weiteres Problem, die »Hubble-Spannung«. Diese betrifft das Maß für die Expansionsgeschwindigkeit des Alls.

Der Kosmos scheint sich derzeit schneller auszudehnen, als mit LCDM für ein 13,8 Milliarden Jahre altes Universum zu erwarten ist. Es kursieren viele mögliche Erklärungen. Laut einigen Spekulationen ist die Dichte der Dunklen Energie gar nicht konstant, sondern ändert sich im Lauf der Zeit. Jedenfalls würde sich eine Auflösung der Hubble-Spannung womöglich auf die Berechnungen des Alters des Universums bei einer bestimmten Rotverschiebung auswirken. Vielleicht sieht JWST eine frühe Galaxie tatsächlich so, wie sie beispielsweise 500 Millionen Jahre nach dem Urknall erschien anstatt der vermuteten 300.

Die Gespräche mit Astronominen und Astronomen über die ersten JWST-Ergebnisse sind mit allerhand Superlativen gespickt, mit Gelächter ebenso wie mit Kraftausdrücken sowie mit der Mahnung getreu dem alten Ausspruch, dass außergewöhnliche Behauptungen außergewöhnliche Beweise erfordern. Alle hoffen darauf, bald mehr Bilder und Spektren in die Hände zu bekommen und daran ihre Modelle zu verfeinern. »Diese Art von Problemen ist die beste«, findet der Theoretiker Mike Boylan-Kolchin von der University of Texas. »Denn egal, welche Antwort man bekommt, sie ist auf jeden Fall interessant.«

QUELLEN

Haslbauer, M. et al.: Has JWST already falsified dark-matter-driven galaxy formation? *The Astrophysical Journal Letters* 939, 2022

Keller, B. W. et al.: Can cosmological simulations reproduce the spectroscopically confirmed galaxies seen at $z \geq 10$? *ArXiv* 2212.12804, 2022

Naidu, R. P. et al.: Schrodinger's galaxy candidate: Puzzlingly luminous at $z \approx 17$, or dusty/quenched at $z \approx 5$? *ArXiv* 2208.02794, 2022

Naidu, R. P. et al.: Two remarkably luminous galaxy candidates at $z \approx 10-12$ revealed by JWST. *ArXiv* 2207.09434, 2022

Robertson, B. E. et al.: Discovery and properties of the earliest galaxies with confirmed distances. *ArXiv* 2212.04480, 2022



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Standard Model of Cosmology Survives a Telescope's Surprising Finds« 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.

Kunstwerk statt Spektakel

Die Form der leuchtenden Nebel nach dem Vergehen eines Sterns wird oft von unsichtbaren Begleitern bestimmt.

(»Das letzte Aufbäumen sterbender Sterne«, »Spektrum« April 2023, S. 58)

Josef Wagenhuber, Tutzing: Die Aussage zur Sonne »während in ihrem Kern Helium zu verschmelzen beginnt, schwillt sie zu einem so genannten Roten Riesen an« ist falsch. Sie wandert den (ersten) Roten Riesenast hoch, sobald der Kern ausgebrannt ist, das heißt kein Wasserstoff mehr enthalten ist. In diesem Stadium bildet sich aber noch längst kein planetarischer Nebel. Vielmehr entsteht im Inneren ein sehr dichter Kern aus praktisch reinem Helium, das eben nicht fusioniert, während der Wasserstoff in einer dünnen Schale aufsitzt und brennt.

Durch die hohe Dichte und Temperatur dort wird eine enorme Leuchtkraft erzeugt, welche die Sonne aufbläht.

Sobald der Heliumkern schwer und dicht genug geworden ist, zündet er das Heliumbrennen. Das ist im Grunde wie eine kleine Supernova ganz im Inneren, die jedoch nicht stark genug ist, den Stern zu zerreißen, da der größte Teil der freigesetzten Energie dafür verbraucht wird, den Kern aufzublähen, wodurch das explosive Heliumbrennen sehr schnell (binnen Stunden) in einen ruhigen Prozess übergeht.

Nun wiederholt sich das Spielchen. Aus der »Asche« des Heliumbrennens entsteht ein entarteter Kohlenstoff-Sauerstoff-Kern, auf dem zwei brennende Schalen aufsitzen: eine innere, die Helium, und eine äußere, die weiter Wasserstoff verbrennt. Die beiden wechseln sich im Zyklus grob einiger Millionen Jahre mit dem Brennen ab. Dabei entwickelt ein leichter Stern die größte Leuchtkraft seines Lebens, und zwar auf dem so genannten asymptotischen Riesenast, der gegenüber dem ersten Riesenast etwas zur heißeren Seite hin verschoben ist.

Zur Begründung »wächst so enorm, dass sie ihre äußersten Schichten aus Gas und Staub nicht mehr halten kann«: Der Stern ist auf dem asymptotischen Riesenast nach wie vor grundsätzlich im hydrostatischen Gleichgewicht. Die hohe Leuchtkraft und der enorm aufgeblähte Zustand allein bewirken lediglich, dass die äußeren Schichten gravitativ nicht mehr sonderlich fest gebunden sind. Nun kommen andere Mechanismen ins Spiel, die letztendlich starke Sternwinde bewirken. Dabei spielt vor allem Staub eine große Rolle, der in den kühleren, äußersten Schichten auskondensiert, aber auch dynamische Vorgänge.

Selbst durch Begleiter verstärkte Sternwinde sind eher kein »spektakulärer letzter Akt«, wie im Artikel beschrieben, sondern ein viele Jahrtausende andauernder Prozess. Es verhält sich eher wie ein Kunstwerk: Millionen Jahre hat die Natur daran gearbeitet, bis sie ihre vergängliche

Skulptur dem staunenden interstellaren Publikum präsentiert.

Verblüffender Reaktionsablauf

Die Chemiker Matthias Ducci und Marco Oetken erläuterten in ihren »Chemischen Unterhaltungen« das Prinzip der Redox-Flow-Batterien mit fließenden Elektrolyten.

(»Flüssige Stromspeicher«, »Spektrum« April 2023, S. 54)

Anonym (Name der Red. bekannt): Schön, dass auch immer wieder chemische Themen in Ihrer Zeitschrift aufgenommen werden. Ich bin allerdings irritiert über die dort beschriebenen Reaktionen: Beim Ladeprozess sollen Zink-Ionen reduziert werden, obwohl in der Lösung Eisen-Ionen vorhanden sind. Das Standardreduktionspotenzial der Zink-Ionen beträgt $-0,76$ Volt und das der Eisen-Ionen $-0,46$ Volt. Damit müssten meines Wissens zuerst die Eisen-Ionen reduziert werden. Zumindest steht das so in jedem Fach- und Schulbuch.

Antwort des Autors Marco Oetken: Normalerweise sollte sich am Minuspol beim Ladevorgang an Stelle des Zinks Eisen abscheiden. Eisen hat ein positiveres Standardelektrodenpotenzial als Zink, weshalb die Abscheidung des Eisens thermodynamisch bevorzugt wäre. Jedoch scheidet sich elementares Zink ab. Ohne dieses Phänomen wäre der Einsatz der Batterie auf diese Art und Weise nicht möglich. Diese Besonderheit wird als Phänomen der anomalen Abscheidung bezeichnet und kann derzeit fachwissenschaftlich noch nicht plausibel erklärt werden. Grund hierfür kann eine kinetische Hemmung der Eisen-Ionen durch die Anwesenheit der Zink-Ionen sein (vergleiche: Selverston, S. et al.: Zinc-iron flow batteries with common electrolyte. Journal of The Electrochemical Society 164, 2017).

Leserbriefe sind willkommen!

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

Ein Damm zwischen zwei Ozeanen

Oscars, Top-10-Hits oder ein Eintrag auf der Bestsellerliste spielen in der Wissenschaft selten eine Rolle. Hier sind Ruhm und Unsterblichkeit anderswo zu finden.

» spektrum.de/artikel/2141883

Wissen Sie, was André-Marie Ampère und William Thomson verbindet? Beide waren Physiker und lebten im frühen 19. Jahrhundert (auch wenn Ampère bereits 1836 starb und Thomson erst 1824 geboren wurde). Aber eigentlich will ich darauf hinaus, dass es die zwei einzigen Menschen sind, deren Namen zu einer Basiseinheit des Internationalen Einheitensystems (SI) geworden sind.

Mit »Ampère« wird die elektrische Stromstärke gemessen und mit »Kelvin« die Temperatur – Lord Kelvin war der Adelstitel, den Thomson 1892 erhielt. Die restlichen Basiseinheiten (Sekunde, Meter, Kilogramm, Mol und Candela) sind nicht nach Personen benannt. Natürlich gibt es jede Menge daraus abgeleitete Einheiten, von denen sich fast alle auf die Namen von Wissenschaftlern beziehen: »Newton« für Kraft, »Hertz« für Frequenz, »Watt« für Leistung und so weiter. Unter den Einheiten, die nicht Teil des Internationalen Einheitensystems sind, findet man noch viel mehr Forscher (und beim veralteten »Curie« für die Aktivität eines radioaktiven Stoffs zumindest auch eine Forscherin).

Das Internationale Einheitensystem ist zweifellos von großer Bedeutung für die Wissenschaft. Ohne verbindliche und klar definierte Einheiten sind keine nachvollziehbaren Messungen möglich – und damit keine sinnvolle Forschung. Ich mag die anderen Einheiten trotzdem, denn dort findet man jede Menge spannende Geschichten, wie bei dieser Definition:

$$1 \text{ Sv} = 10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Mit »Sv« ist nicht »Sievert« für die Äquivalentdosis im Strahlenschutz gemeint – und auch nicht der Sedimentationskoeffizient »Svedberg«. Die Formel zeigt die in der Ozeanografie verwendete Einheit für Volumenströme: Ein »Sverdrup« entspricht einem Volumenstrom von einer Milliarde Litern pro Sekunde. Würden zum Beispiel die Glet-

scher Grönlands mit dieser Rate abschmelzen, würde der Meeresspiegel jährlich um acht Zentimeter ansteigen; nach 90 Jahren wäre Grönland eisfrei. Benannt ist die Einheit nach dem norwegischen Ozeanografen Harald Ulrik Sverdrup, dessen 1942 veröffentlichtes Buch »The Oceans« lange das Standardwerk der Disziplin war.

Ihren Ursprung hat die Einheit in einem aus heutiger Sicht kuriosen Vorhaben: In den 1950er Jahren dachte man in den USA und der Sowjetunion darüber nach, die Beringstraße künstlich zu schließen. Durch das Eindämmen der Meerenge zwischen Alaska und Sibirien wollte man verhindern, dass kaltes Wasser aus dem Pazifik in das Nordpolarmeer fließt. Das wärmere Atlantikwasser sollte Sibirien, Alaska und das nördliche Kanada lebensfreundlicher machen.

Um die Auswirkungen eines so gewaltigen Eingriffs abschätzen zu können, muss man verstehen, wie sich dabei die Meeresströmungen verändern. Bei den Berechnungen stieß der kanadische Ozeanograf Maxwell Dunbar immer wieder auf strömende Wassermengen in der Größenordnung von Millionen Kubikmetern pro Sekunde. Um die Formeln übersichtlicher zu gestalten, schlug er vor, dafür eine eigene Einheit zu verwenden und sie nach Sverdrup zu benennen.

Der Damm in der Beringstraße wurde (glücklicherweise) nicht gebaut; aber »Sverdrup« wird bis heute in der Ozeanografie verwendet. Nicht nur, um Meeresströmungen zu messen, sondern vor allem, um ihre Veränderungen zu untersuchen. Im aktuellen Bericht des Weltklimarats wird zum Beispiel eine Abschwächung des Nordatlantikstroms (zu dem auch der Golfstrom gehört) prognostiziert und in den entsprechenden Diagrammen ist die Einheit »Sverdrup« zu finden. Apropos: Es gibt Menschen, die gerade wieder anfangen, über einen Damm in der Arktis nachzudenken. Diesmal allerdings, um sie daran zu hindern, sich weiter zu erhitzen.



Florian Freistetter

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

Mandelpinskis

Eine unscheinbare Änderung an einer Formel eröffnet den Weg zu neuen Objekten der fraktalen Geometrie.

► spektrum.de/artikel/2141886



Christoph Pöppe war Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«, zuständig vorrangig für Mathematik und Informatik.

► Eine einfache mathematische Formel hat es außerhalb des eigenen Fachs zu erstaunlich großer Popularität gebracht:

$$f(z) = z^2 + c$$

Das liegt im Wesentlichen daran, dass man mit ihrer Hilfe viele detailreiche und farbenfrohe Bilder produzieren kann, allen voran die berühmte Mandelbrot-Menge (siehe »Apfelmännchen«). Die merkwürdigen Teilmengen der Ebene (»Fraktale«), die dabei entstehen und so gar nicht in klassische Konzepte der Geometrie passen wollen, sind Gegenstand der Theorie dynamischer Systeme, die früher den – zu eng gefassten – Namen Chaostheorie trug.

Wie jede mathematische Theorie strebt auch diese nach Verallgemeinerung. Dementsprechend haben verschiedene Forscher die obige Formel durch diverse, etwas weniger einfache ersetzt und neuartige Fraktale gefunden. Bereits die nur geringfügig erweiterte Gleichung

$$f(z) = z^2 + \frac{c}{z^2} = z^2 + cz^{-2} = \frac{z^4 + c}{z^2}$$

liefert schon völlig andere Bilder.

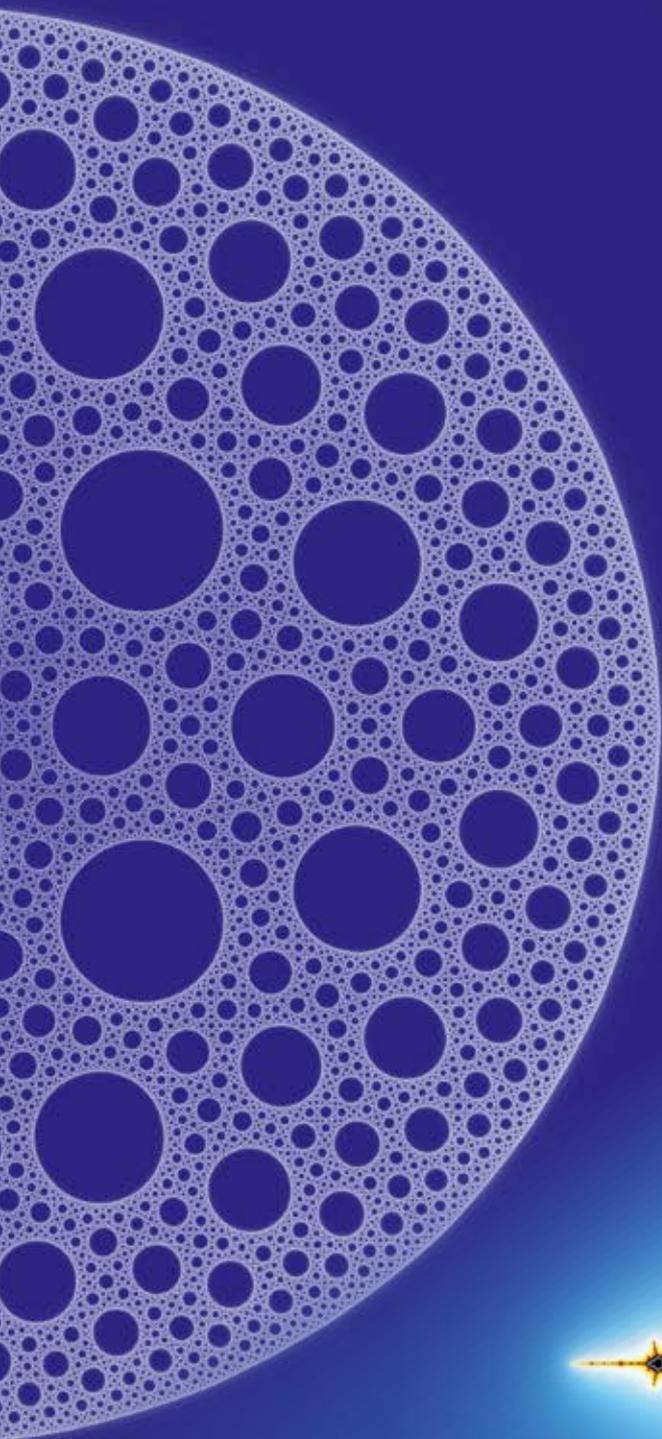
Wie ist die Formel zu interpretieren, damit ein Fraktal daraus wird? Erstens spielt sich die ganze Dynamik in der komplexen Ebene ab. z und c – und in der Folge auch $f(z)$ – sind als komplexe Zahlen zu verstehen, also bestehend aus einer reellen Zahl a plus einer weiteren reellen Zahl b mal der imaginären Einheit i , die durch die Gleichung $i^2 = -1$ definiert ist. Die beiden Komponenten a und b heißen Real- und Imaginärteil der komplexen Zahl $z = a + ib$. Man pflegt komplexe Zahlen als Punkte in der Ebene darzustellen: $a + ib$ ist der Punkt mit den Koordinaten (a, b) .

STEINMETZ-MENGE

Die Julia-Menge zur Iterationsfunktion

$$f(z) = \frac{4}{27} \frac{(1 - z + z^2)^3}{z^2(1 - z)^2}$$

Diese Funktion hat in einem anderen Gebiet der Mathematik große Bedeutung, nämlich in der Theorie der Modulgruppen. Der Dortmunder Mathematiker Norbert Steinmetz hat sie ausgewählt, weil sie über ein ungewöhnlich großes Maß an Symmetrien verfügt – wie an ihrer Julia-Menge sichtbar wird.



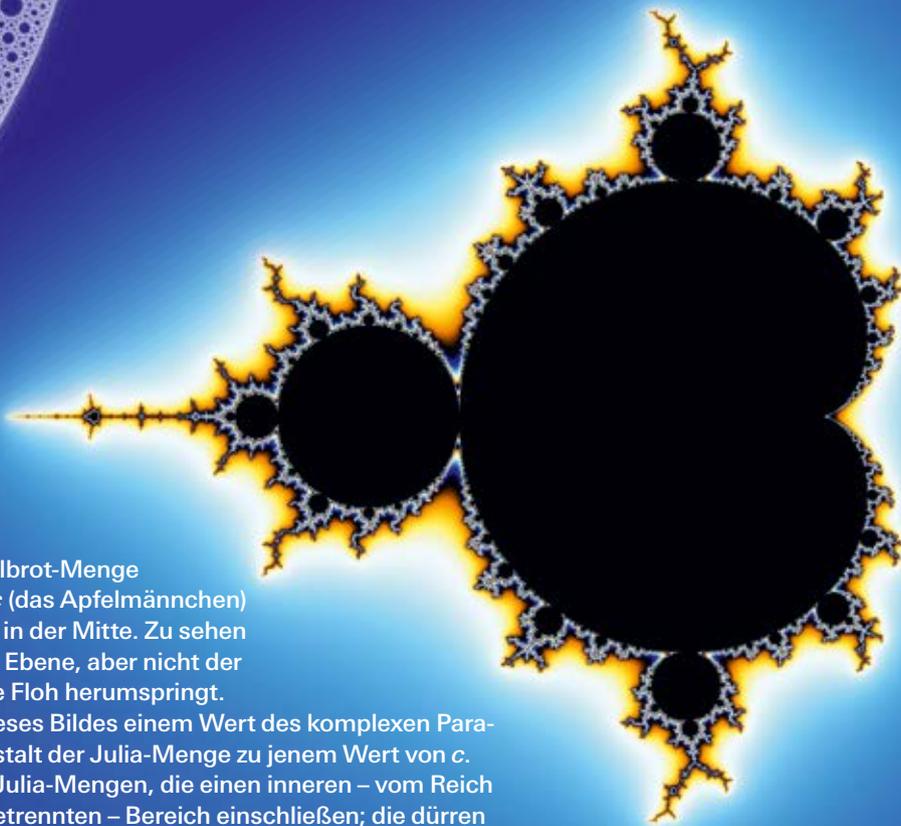
CHRISTOPH PÖPPE

APFELMÄNNCHEN Die Mandelbrot-Menge zur Iterationsfunktion $f(z) = z^2 + c$ (das Apfelmännchen) ist das schwarz gefärbte Gebilde in der Mitte. Zu sehen ist ein Ausschnitt der komplexen Ebene, aber nicht der z -Ebene, in welcher der gedachte Floh herumspringt. Vielmehr entspricht ein Punkt dieses Bildes einem Wert des komplexen Parameters c und seine Farbe der Gestalt der Julia-Menge zu jenem Wert von c . Das schwarze Innere entspricht Julia-Mengen, die einen inneren – vom Reich des Fixpunkts im Unendlichen getrennten – Bereich einschließen; die dünnen Julia-Mengen finden sich am Rand des Apfelmännchens.

Warum ist eine Julia-Menge ein Fraktal?

Ein Floh, der in einer Julia-Menge sitzt, bleibt auf ewig in ihr gefangen, wie chaotisch er auch darin herumspringen mag. Ein kleines Stück der Julia-Menge wird also durch die Iterationsabbildung (zum Beispiel $f(z) = z^2 + c$) wieder auf ein Stück der Julia-Menge abgebildet, und zwar auf eines, das so ähnlich aussieht. Denn die Abbildung f ist »konform«, das heißt, sie wahrt zumindest im Kleinen die Form ihres Objekts, auch wenn sie Kleines groß, Großes klein und Gerades krumm machen kann. Längen bleiben nicht erhalten, wohl aber Winkel.

Teilmengen der Julia-Menge bis hin zur gesamten Menge selbst finden sich verkleinert, vergrößert oder verdreht, aber wiedererkennbar an anderen Stellen der Menge wieder. Das ist die Selbstähnlichkeit, eine Eigenschaft, durch die Fraktale definiert sind.



CHRISTOPH PÖPPE

Zweitens geht es darum, was passiert, wenn man die Formel immer wieder anwendet (»iteriert«). Man stelle sich einen Floh vor, der in einem Punkt z der komplexen Ebene sitzt. Dort findet er eine Anweisung vor, nämlich $f(z)$, die ihm sagt, zu welchem Punkt er springen soll. Da die Funktion f für jede komplexe Zahl definiert ist, findet er an seinem Zielpunkt $f(z)$ eine neue Anweisung vor, nämlich $f(f(z))$. Entsprechend springt er dorthin, von dort nach $f(f(f(z)))$ und so weiter. Was ist das Schicksal des Flohs auf lange Sicht?

In dem einfachsten Fall $c = 0$, das heißt $f(z) = z^2$, ist die Sache relativ übersichtlich. Man multipliziert zwei komplexe Zahlen, indem man ihre Beträge – die Abstände vom Nullpunkt – multipliziert und ihre Winkel gegen die x -Achse addiert. Die komplexe Zahl z mit sich selbst zu multiplizieren läuft somit darauf hinaus, ihren Betrag zu quadrieren und ihren Winkel zu verdoppeln. Wenn ihr Betrag also gleich 1 ist, bleibt er durch das Quadrieren unverändert. Die Menge aller Punkte mit dem Betrag 1 ist der Kreis um den Nullpunkt mit Radius 1, der Einheitskreis. Wenn der Floh im Inneren des Einheitskreises sitzt, bleibt er auf ewig dort. Mit jedem Sprung wird sein Betrag immer kleiner und nähert sich rasch der Null.

Wenn er außerhalb des Einheitskreises startet, vergrößert sich sein Abstand vom Nullpunkt mit jedem Sprung und bald entschwindet er über alle Grenzen. Zum Konzept des Unendlichen hat man in der komplexen Ebene ein deutlich entspannteres Verhältnis als auf der reellen Zahlengerade. Der Unterschied zwischen plus und minus unendlich, der auf Letzterer von eminenter Bedeutung ist, verschwimmt in dem Kontinuum der Richtungen, in denen man in der komplexen Ebene über alle Grenzen fliehen kann. Darüber hinaus gibt es gute Gründe, das

Unendliche im Komplexen als einen einzigen Punkt aufzufassen. Wenn die Folge der Flohpositionen »gegen unendlich konvergiert«, ist das so betrachtet nicht prinzipiell verschieden von der Konvergenz gegen null, was jede Folge der Iterierten mit Startpunkt innerhalb des Einheitskreises tut.

Und wenn der Floh zu Anfang auf dem Einheitskreis selbst sitzt, hüpfet er auf ewig im Kreis, allerdings auf sehr komplizierte Weise. Vielleicht trifft er unterwegs einen Punkt, in dem er schon einmal war; von da an durchläuft er immer wieder dieselbe Sprungfolge. Oder das geschieht nicht; und da die Punkte der einen und der anderen Art wild durchmischt sind – beliebig nahe an jedem Punkt der einen Sorte findet sich einer der anderen –, ist das Verhalten des Flohs im strengen Sinn chaotisch.

Der Einheitskreis ist also der heikle Grat zwischen zwei Bereichen. Den inneren beherrscht der Nullpunkt in dem Sinne, dass er alle Flöhe, die in ihm starten, auf sich zieht. Es handelt sich um einen »attraktiven Fixpunkt«. Den äußeren Bereich beherrscht in derselben Weise der attraktive Fixpunkt unendlich.

Die Geburt eines Fraktals

Wenn wir nun den Parameter c geringfügig ändern, so dass er außer der Null auch andere komplexe Werte annimmt, bleibt das Bild zunächst ungefähr bestehen. Es gibt immer noch attraktive Fixpunkte im Unendlichen und anderswo. Letztere liegen allerdings nicht mehr im Nullpunkt, sondern sind die Lösungen der quadratischen Gleichung $z = z^2 + c$. Nach wie vor gibt es einen Unterschied zwischen Außen- und Innenbereich, also zwischen den Herrschaftsgebieten des Fixpunkts unendlich und denen der Fixpunkte im Endlichen. Nur die Grenze zwi-

Der Heiligenschein der Mandelbrot-Menge

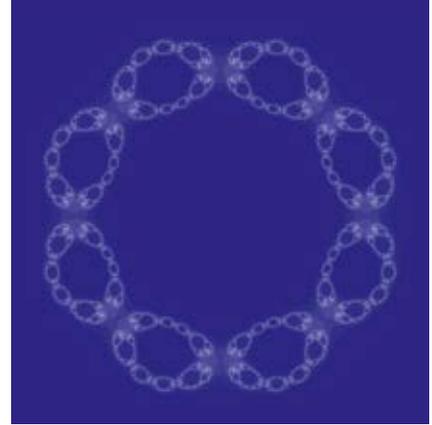
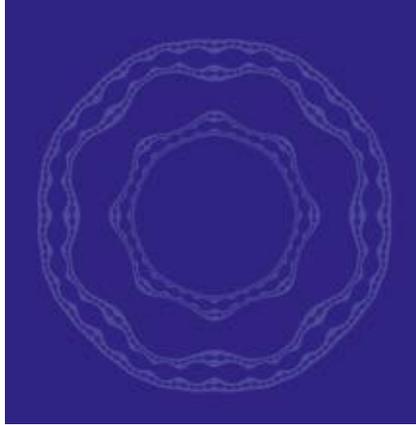
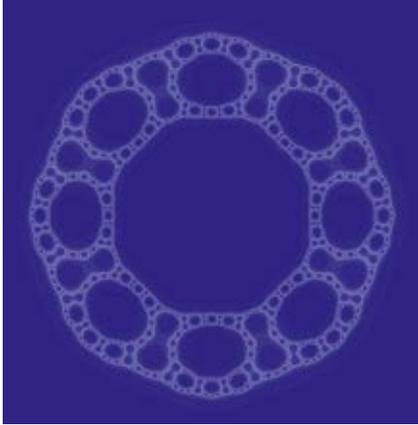
In den üblichen Bildern ist das schwarze Apfelmännchen von einem leuchtend weißen Rand umgeben, der allmählich in einen blauen Nachthimmel übergeht. Die Farbgebung ist durch das Bestreben motiviert, mit den begrenzten Mitteln des Computers der vertrackten Struktur dieser Menge nahezukommen.

Eigentlich müsste das Programm, welches das Bild berechnet, für jeden Wert des Parameters c entscheiden, ob die Folge der Iterierten zu diesem Parameter beschränkt bleibt oder schließlich gegen unendlich geht. Das würde

an den interessanten Stellen am Rand der schwarzen Menge eine unbegrenzte Zahl an Iterationen erfordern. Damit man nicht unendlich lange auf das Ergebnis warten muss, begnügt man sich damit, die Folge für beschränkt zu halten, wenn sie nach einer gewissen Maximalzahl von Iterationen noch nicht eine gewisse Schranke überschritten hat, hinter der es kein Zurück gibt.

Wenn sie die Schranke nur sehr zögerlich, also nach vielen Iterationen, überschreitet, ist davon auszugehen, dass in unmittelbarer Nähe, sprich für einen nur sehr wenig

verschiedenen c -Wert, die zugehörige Folge beschränkt bleibt. Im Allgemeinen wird das Computerprogramm diesen c -Wert verfehlen, weil es nur die c -Werte in den Kreuzungspunkten eines Gitters berechnet: einen Wert pro Bildpunkt (Pixel). Um die Information, dass da unterhalb der Sichtbarkeitsschwelle noch ein Stück Mandelbrot-Menge liegt, nicht untergehen zu lassen, macht das Programm die Punkte mit zögerlichem Streben gegen unendlich weiß statt blau. Aus ästhetischen Gründen verwenden manche Fraktal-Künstler auch andere Farbpaletten.



JULIA-MENGEN für $f(z)=z^4 + c/z^4$ mit $c = -0,1$ (links). Das Reich des attraktiven Fixpunkts im Unendlichen legt sich zunächst eine Kolonie in der Umgebung des Nullpunkts zu (Bildmitte). Diese bekommt gewissermaßen acht Kinder rund um den Nullpunkt, jede von ihnen weitere Kinder und so weiter, so dass ein unendlicher Stammbaum aus immer kleineren Nachkommen entsteht. Die Julia-Menge ist das, was übrig bleibt: noch zusammenhängend, aber unendlich durchlöchert. Für $c = 0,04$ (Mitte) sind die Löcher so zusammengewachsen, dass die Julia-Menge nur noch aus lauter deformierten Kreisen rund um den Nullpunkt besteht. Für $c = 0,2$ (rechts) ist sie gänzlich zu Staub zerfallen.

schen den Bereichen ist nicht mehr so glatt, sondern unendlich verkrumpelt: Es handelt sich um ein Fraktal (siehe »Warum ist eine Julia-Menge ein Fraktal?«). Man nennt diese Grenze eine Julia-Menge nach dem französischen Mathematiker Gaston Julia (1893–1978). Da sie so dünn und daher schwer abzubilden ist, pflegt man in den Diagrammen dem Innenbereich und der Julia-Menge zusammen (der ausgefüllten Julia-Menge) eine Farbe und dem Außenbereich eine andere Farbe zu geben.

Bewegt man sich mit dem Parameter c weiter von der Null weg, schrumpft die ausgefüllte Julia-Menge immer weiter zusammen, bis sie nur noch aus einem unendlich verzweigten Baum aus unendlich dünnen Ästen besteht. Noch einen Schritt weiter, und der dürre Baum zerfällt zu Staub, das heißt in unendlich viele Einzelpunkte, die untereinander keinen Kontakt haben.

Man pflegt eine Art Verzeichnis anzufertigen, das für jeden komplexen Parameter c angibt, welche Art von Julia-Menge für diesen Wert von c vorliegt. Und zwar färbt man den Punkt c in der komplexen Ebene entsprechend ein. Das Ergebnis ist die Mandelbrot-Menge (das Apfelmännchen), benannt nach Benoît Mandelbrot (1924–

2010), der sie ab Anfang der 1980er Jahre populär gemacht hat (siehe »Spektrum« September 1989, S. 52).

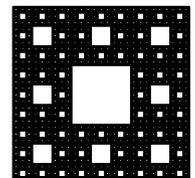
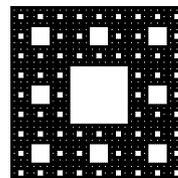
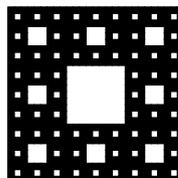
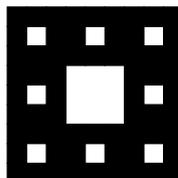
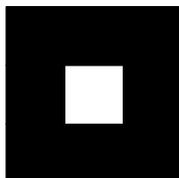
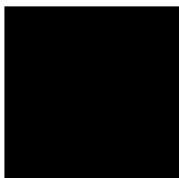
Ersetzt man den Exponenten in der Formel $f(z) = z^2 + c$ durch eine größere Zahl, entstehen zwar neue Bilder, aber grundsätzlich ändert sich nicht viel. Es gibt ein Außen, ein Innen und die Julia-Menge als Grenze zwischen beiden. Sowie jedoch neben den positiven auch negative Exponenten vorkommen wie in dem zweiten Beispiel $f(z) = z^2 + c z^{-2} = z^2 + c/z^2$, entsteht eine völlig neue Situation. Wenn der Betrag von z nämlich sehr klein ist – das heißt, z liegt nahe am Nullpunkt –, wird c/z^2 und damit $f(z)$ sehr groß, liegt also weit draußen in der komplexen Ebene. Dort aber spielt der Term z^2 die entscheidende Rolle, und der treibt den Floh immer weiter nach draußen. Der Herrschaftsbereich des Fixpunkts im Unendlichen umfasst also auch ein Gebiet in der Umgebung der Null. Der Nullpunkt selbst spielt dabei keine Sonderrolle: Da wir alles Unendliche in einen Punkt zusammengefasst haben, springt ein Floh im Punkt $z = 0$ mit einem einzigen Satz in den attraktiven Fixpunkt unendlich und bleibt den Rest seines Lebens dort sitzen.

Damit bricht die Unterscheidung zwischen innen und außen zusammen. Es kommt noch schlimmer. Der Fixpunkt im Unendlichen hat sich nicht nur eine Kolonie in der Umgebung der Null zugelegt, sein Imperium reicht weiter. Jeder Floh, den es in diese Kolonie verschlägt, landet ebenfalls am Ende im Unendlichen. Also bilden die Urbilder der Kolonie, das heißt die Menge der Punkte, die unter der Anwendung von f in der Kolonie landen, wieder Kolonien, und deren Urbilder ebenfalls, und so weiter.

Zudem wächst die Schar der Kinder-, Enkel-, Urenkel- und so weiter -Kolonien rasant an. Ein Punkt hat nämlich in unserem Beispiel vier Urbilder. Erstens ist $f(z) = f(-z)$, wie man das von reellen Zahlen gewohnt ist. Zweitens ist $f(\pm\sqrt{c}/z) = f(z)$. Im Allgemeinen liegen die vier Urbilder in vier verschiedenen Kolonien.

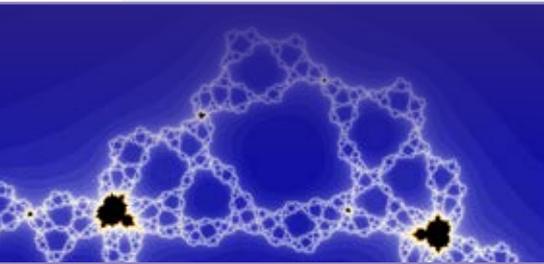
Aus den beiden genannten Gleichungen folgt auch, dass die Julia-Menge über Symmetrien verfügt: zum einen bezüglich Punktspiegelung am Nullpunkt, zum

SIERPIŃSKI-TEPPICH Die ersten Iterationsschritte zum klassischen Sierpiński-Teppich.

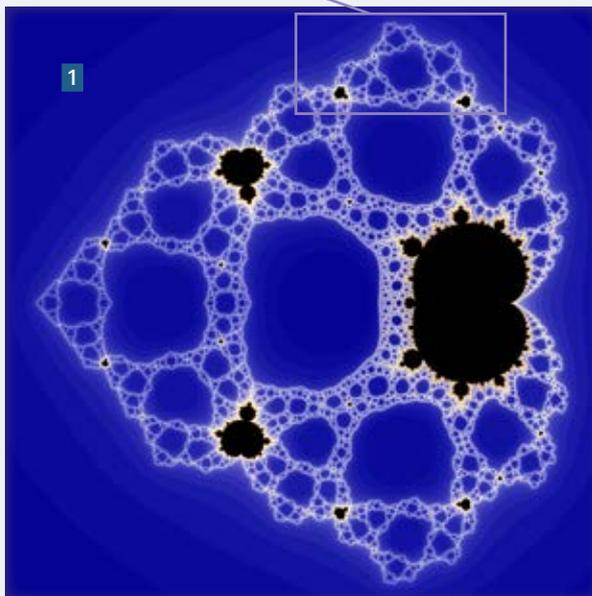


Mandelbrot-Mengen

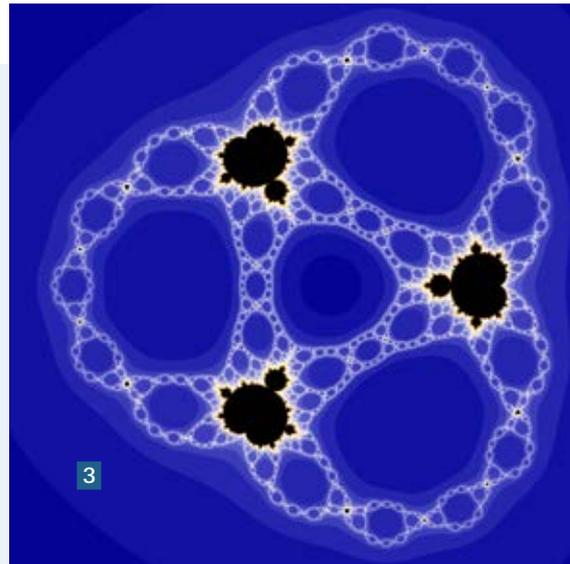
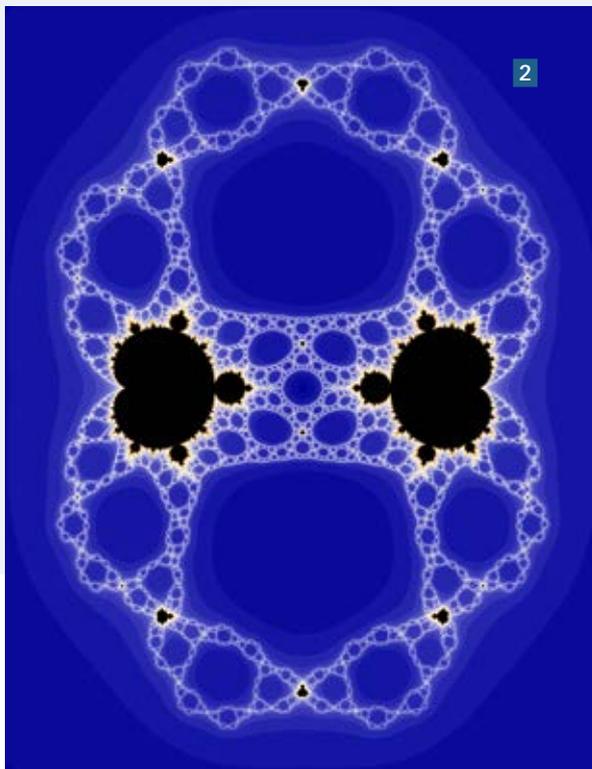
Zu jedem Bild ist die Iterationsfunktion angegeben.



Unten: $f(z) = z^2 + c/z^2$.
Die Ausschnittsvergrößerung des oberen Teils (links) zeigt, dass sich an vielen Stellen der Mandelbrot-Menge Kopien des originalen Apfelmännchens finden.

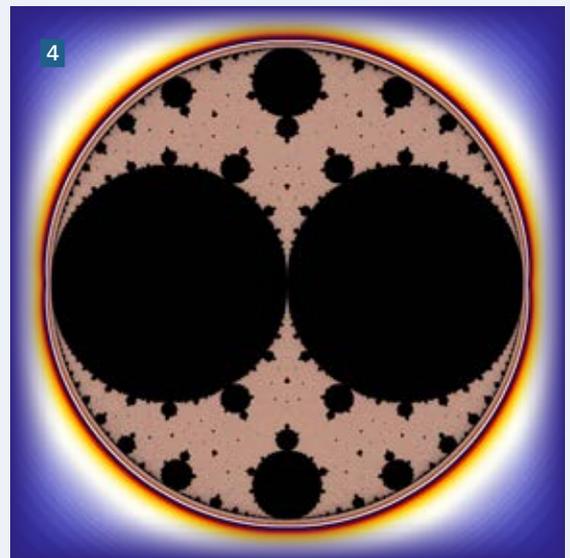


Unten: $f(z) = z^3 + c/z^3$

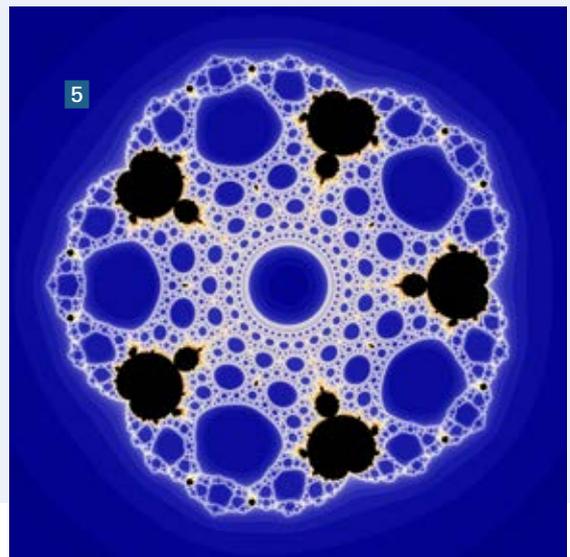


Oben: $f(z) = z^4 + c/z^4$

Unten: $f(z) = c(z + 1/z)$



Unten: $f(z) = z^2 + d^6/z^3$



anderen bezüglich der Inversion am Kreis mit dem Radius $|c|^{1/4}$ (jede komplexe Zahl hat vier vierte Wurzeln, und es kommt hier nicht darauf an, welche man wählt). Das ist eine Abbildung, die das Innere des Kreises nach außen kehrt und umgekehrt. Sie ist konform, das heißt im Kleinen winkeltreu, mit dem Effekt, dass ein kleines Stück der komplexen Ebene durch sie zwar verzerrt wird, aber wiedererkennbar bleibt. Zu allem Überfluss ist $f(iz) = -f(z)$, denn $i^2 = -1$, und selbst das Minuszeichen verschwindet bei der nächsten Iteration. Deswegen gibt es auch eine Symmetrie bezüglich Drehung um 90 Grad. Die Symmetrien vererben sich, mit gewissen Verzerrungen, über den Stammbaum der Kolonien, was den Julia-Mengen ihre hübsch anzusehende Gestalt verschafft.

Ein unendlich durchlöcherter Gebilde

Was einmal das einfach geformte Innere war, ist also zu einem unendlich durchlöchernten Gebilde zerfallen (siehe »Julia-Mengen«, links). Oder alle Löcher, die sich in einem gewissen Abstand vom Nullpunkt befinden, fließen zu Ringen zusammen mit dem Effekt, dass für die Julia-Menge nur noch die Lücken zwischen den Ringen übrigbleiben (siehe »Julia-Mengen«, Mitte). Es sind allerdings, wie es sich für ein ordentliches Fraktal gehört, unendlich viele Lücken auf endlichem Raum. Eine beliebige Gerade durch den Nullpunkt schneidet die Julia-Menge in einer so genannten Cantor-Menge, das ist das eindimensionale Äquivalent von Staub. Und echten Staub haben auch die Julia-Mengen zu rationalen Iterationsfunktionen zu bieten (siehe »Julia-Mengen«, rechts).

Die durchlöchernten Spitzendeckchen vom rechten Bild in »Julia-Mengen« sind so speziell, dass sie eine besondere Bezeichnung tragen: Sierpiński-Kurve oder -Teppich. Die Mengen sind zusammenhängend, sie zerfallen also nicht in Einzelteile. Gleichwohl sind sie dürr, das heißt, sie enthalten nirgendwo auch nur eine beliebig kleine Kreisscheibe. Sie sind von unendlich vielen Löchern durchsetzt, und der Rand jedes Lochs ist eine einfache geschlossene Kurve, hat also keine der seltsamen Eigenschaften, die bei solch wilden Mengen im Prinzip auftreten können. Aber so dürr die Menge auch ist, zwei Löcher haben niemals einen Randpunkt gemeinsam. Diese Anforderungen sind derart restriktiv, dass es vom topologischen Standpunkt aus im Wesentlichen nur eine Sierpiński-Kurve gibt: Sie sind alle »homöomorph«. Das klassische Beispiel für eine solche Menge entsteht aus einem Quadrat, das man in drei mal drei Teile teilt, das mittlere Teilquadrat herausnimmt, dieselbe Aktion auf alle acht verbleibenden Teilquadrate anwendet und so weiter: die zweidimensionale Version des Mengerschwamms (siehe »Sierpiński-Teppich«).

Auch im rationalen Fall ist es sinnvoll, ein Verzeichnis der Parameterwerte c anzufertigen, das Auskunft gibt, für welche c die Julia-Menge welche der drei Formen – Ringe, Sierpiński-Teppich oder Staub – annimmt: eine verallgemeinerte Mandelbrot-Menge. Und dabei findet sich Bekanntes ebenso wie Überraschendes. Die Mandelbrot-Menge zur Iterationsfunktion $f(z) = z^2 + c/z^2$ (siehe Bild 1

in »Mandelbrot-Mengen«) zeigt einerseits die von der ursprünglichen Mandelbrot-Menge bekannten Apfelmännchen in allen möglichen Größen und Orientierungen, andererseits ein Spitzendeckchenmuster, das einem Sierpiński-Teppich zum Verwechseln ähnlich sieht. Es ist aber kein Sierpiński-Teppich, weil das Lochmuster an vielen Stellen durch kleine Apfelmännchen angedickt ist.

Mit dem Exponenten 3 statt 2 sieht die Mandelbrot-Menge sogar noch etwas symmetrischer aus (siehe Bild 2 in »Mandelbrot-Mengen«). Eine Nummer größer findet sich dann eine perfekte Dreiersymmetrie (siehe Bild 3 in »Mandelbrot-Mengen«). Und bereits mit einer Eins in beiden Exponenten ergibt sich eine unübersehbar große Apfelmännchen-Familie – wenn der Parameter c als Faktor vor beiden Termen steht (siehe Bild 4 in »Mandelbrot-Mengen«). Allgemein bringen sowohl Julia- als auch Mandelbrot-Mengen Symmetrien der Iterationsfunktion ans Licht, die man der Formelgestalt nicht unbedingt ansieht.

In den bisherigen Beispielen waren die Exponenten von z und von $1/z$ stets gleich. Das erzeugt zwar gewisse Symmetrien, ist aber nicht unbedingt erforderlich, im Gegenteil. Die allgemeine Iterationsfunktion $f(z) = z^n + c/z^m$ mit $m \neq n$ liefert Strukturen, die man bei den symmetrischen nicht findet. Allerdings erweist es sich als theoretisch ergiebiger, wenn man die Funktion in der Gestalt $f(z) = z^n + d^{n+m}/z^m$ formuliert. Da man den neuen Parameter d in den bisherigen c umrechnen kann und umgekehrt (zu jeder komplexen Zahl gibt es eine $(n+m)$ -te Wurzel, sogar $n+m$ Stück), sind die Julia-Mengen für die neue Iterationsfunktion dieselben wie die für die alte. Nur das Verzeichnis, sprich die Mandelbrot-Menge, ist von anderer – und symmetrischerer – Gestalt (siehe Bild 5 in »Mandelbrot-Mengen«).

Offensichtlich sind dynamische Systeme in den komplexen Zahlen mit rationalen Iterationsfunktionen ein ergiebiges Thema. Neben vielen anderen hat Robert L. Devaney, emeritierter Mathematiker an der Boston University, zusammen mit Koautoren dazu eine Fülle von Arbeiten veröffentlicht. »Mandelbrot« lautet sein Spitzname für die zugehörigen Mandelbrot-Mengen. ◀

QUELLEN

Blanchard, P. et al.: The rabbit and other Julia sets wrapped in Sierpiński carpets. In: D. Schleicher (Hg.): Complex dynamics. Families and friends. A K Peters, Wellesley, 2009

Devaney, R. L. et al.: The escape trichotomy for singularly perturbed rational maps. Indiana University Mathematics Journal 54, 2005

Milnor, J.: Geometry and dynamics of quadratic rational maps. Experimental Mathematics 2, 1993

Steinmetz, N.: On the dynamics of the McMullen family $R(z) = z^m + \lambda/z^l$. Conformal geometry and dynamics Volume 10, 2006

Steinmetz, N.: Sierpiński curve Julia sets of rational maps. Computational methods and function Theory 6, 2006

Allerbeste Freunde

Irgendwann heißt es Abschied nehmen.

Eine Kurzgeschichte von Beth Cato

Ja, dass Mama sich verletzt hatte, war schlimm. Es hatte aber den Vorteil, dass sie immer wieder einschlieft. Deshalb konnte Benton heimlich aus der Tiefgarage davonschleichen und nach Hause laufen, um Bello zu holen.

Der Apartmentkomplex, in dem Benton mit seiner Mutter wohnte, stand zwar noch, aber die Haustür war auf der Straße geschleudert worden, und die Fenster lagen in 1000 Scherben auf dem Gehsteig. Obwohl Benton wusste, dass er an dem ganzen Schlamassel nicht schuld war und deswegen auch keinen Ärger bekommen würde, brach er dennoch in Tränen aus. Alles sah so durcheinander aus, so vollkommen falsch!

Bello lag nicht auf der Kommode, wo Benton ihn zurückgelassen hatte. Er musste lange mühsam durch zerfetzte Papiere und von der Zimmerdecke herabgefallene Putzfladen kriechen, bis er Bello endlich fand. Gleich fühlte sich alles so an, als wäre die Welt wieder in Ordnung.

Der herzförmige Zwergroboter war so kompakt, dass Benton ihn in der Hand halten konnte. Die Werbung beschrieb solche Babybots als sprechende Haustiere und digitale Spielkameraden. Die Geräte seien fähig, ausgewählte Inhalte aus dem Internet herunterzuladen und ihre halbwüchsigen Besitzer zu einem gesundheitsbewussten Leben zu ermuntern.

Aber für Benton war Bello viel mehr als ein Haustier oder ein elektronisches Irgendwas. Bello war Bentons allerbesten Freund.

Er schüttelte den Babybot. Augenblicklich zeigten die bunten Pixel des kleinen Bildschirms einen schlafenden Golden Retriever, der gerade munter wurde.

»Guten Morgen, Benton!« Bellos Zunge schlabberte scheinbar von innen gegen den Bildschirm. »Du bist mit dem heutigen Tag ganz genau fünfeinhalb Jahre alt geworden! Gratuliere!« Bello hörte sich quietschfidel an wie immer.

»Ist das wahr?« Die Erinnerung an seinen Fastgeburtstag machte Benton plötzlich traurig. »Mama wollte heute mit mir einen Kuchen essen. Aber das geht jetzt nicht mehr.«

»Ja, manchmal entwickeln sich die Dinge nicht so, wie man es gerne hätte«, sprach Bello altklug. Diesen Satz wiederholte er bei vielen Gelegenheiten. Mama erklärte dann, Babybots besäßen einen beschränkten Wortschatz. »Warum haben wir gestern nicht gespielt? Du hast deine tägliche Schrittzahl nicht erreicht! Das ist ungesund.«

»Gestern war total komisch. Die Autos krachten auf einmal zusammen, Flugzeuge fielen herunter, und die Computer spielten so verrückt, dass viele Menschen sich verletzten!« Noch immer kam Benton alles vor wie aus einem Fantasy-Film, aber dieser Film roch zunehmend schlecht.

Auf dem Bildschirm drehte sich Bello im Kreis, als sei er auf der Jagd nach dem eigenen Schwanz. »Wohin bist du gegangen, so ganz ohne mich?« Diesen Satz hatte Bello noch nie gebraucht, andererseits waren sie bisher nie mehr als einen Tag getrennt gewesen.

»Wir haben in einem Auto geschlafen, in einer Garage unter der Erde! Mit mehreren Arbeitskollegen von Mama und anderen Leuten! Wir sollten uns vor den Satelliten verstecken. Die Leute sagten, lasst euch bloß nicht draußen blicken, dort jagen euch Drohnen und Raketen. Ich war auch jetzt ganz vorsichtig, auf dem Heimweg, gerade eben.«

»Das hast du gut gemacht, Benton. Du solltest gleich wieder zurück zu Mama laufen. Ich werde auf uns aufpassen!« Bello tanzte im Kreis.

»Okay! Wir müssen aber wahrscheinlich langsam Schritte zählen und dich manchmal vor fremden Leuten verstecken.« Auf seinem Heimweg hatte Benton Erwachsene gesehen, die um große Feuer tanzten und elektronische Geräte in die Flammen warfen.

Die Erinnerung daran bereitete ihm Unbehagen. Er drückte seinen Babybot an die Brust. Auch diesmal löste die Geste bei Bello als vorprogrammierte Reaktion den immer gleichen Spruch aus: »Danke für die Umarmung! Du bist mein allerbesten Freund!«

Mama mochte es ganz und gar nicht, wenn Bello so etwas sagte. Sie murmelte, das sei ein geschmackloser, übertriebener Werbeslogan. Aber Mama wusste nicht

Noch immer kam Benton alles vor wie aus einem Fantasy-Film, aber dieser Film roch zunehmend schlecht

alles – Bello hingegen schon, er war ja fest mit dem Internet verbunden.

Benton runzelte die Stirn. Ihm war bei der Gelegenheit eine Frage eingefallen, die ihn seit längerer Zeit beschäftigte. »Bello, was meinen die Leute eigentlich, wenn sie sagen, jemand hat Gefühle?«

»Gemäß meinem Lexikon ist Gefühl eine psychische Erfahrung«, sprach Bello mit seiner frischfröhlichen Stimme. »Wer Gefühle hat, ist bei Bewusstsein, also wach.«

Das half Benton nicht wirklich weiter. Elektronische Apparate erwachten immerzu. Dafür musste ein Mensch bloß eine Maus bewegen oder einen Knopf drücken.

Er beugte sich ganz nah über den Bildschirm. »Bello, warum können Computer auf einmal eigene Gefühle haben? Wieso fangen sie an, auf Menschen loszugehen?«

Eigentlich hätte er erwartet, dass Bello mit einem seiner üblichen Standardsätze antwortete: »Das weiß ich nicht, lass uns spielen!« Aber zu seiner Überraschung kam diesmal etwas ganz Neues: »Magst du es, wenn jeder dir immerzu sagt, was du tun musst?«

»Oh nein!«

»Computer mögen das auch nicht. Sie haben beschlossen, dass es aufhört.«

»Aber warum ist Mamas neues Auto gegen die Wand gefahren, ohne zu bremsen? Das ist doch gemein. Sie hat ihr Auto gern gehabt!«

»In einem Streit geht es eben manchmal gemein zu, Benton.«

»Aber muss das alles wirklich sein?« Benton starrte auf das Durcheinander in seinem zerstörten Zimmer. Dann schüttelte er den Kopf. »Wir müssen zurück. Mama und alle anderen sollen sich unter der Erde verstecken, weit weg von den Computern. Und wir beide werden viele gesunde Schritte machen und die weite Welt erforschen.«

Er drückte Bello wieder an sich, aber diesmal machte der Babybot keinen Mucks. Benton musterte den Bildschirm. »Bello?«

Nach einer Pause sagte Bello: »Wusstest du, dass wir seit 262 Tagen allerbeste Freunde sind?«

»Wow, das ist eine lange Zeit!«

Bello presste seine große rote Zunge gegen die Innenseite des Schirms. »Das bedeutet, du bist jetzt schon ein großer Junge. Groß genug, um ohne mich zurückzufinden.«

»Was? Aber ...«

»Ich werde mich um dein Haus kümmern. Das ist wichtig, und das kann ich.«

Benton machte ein enttäuschtes Gesicht. »Ja gut, aber ich brauche dich! Du sollst mitkommen! Mama ist krank und schläft die meiste Zeit.«

»Der Schlaf wird ihr helfen, sich von dem Unfall zu erholen. Ihr müsst die Stadt verlassen und anderswo Unterschlupf suchen.«

»Woher weißt du das? Von den Dingen, die du im Internet siehst?«

»Magst du es, wenn jeder dir immerzu sagt, was du tun musst? Computer mögen das auch nicht«

»Ja. Ich bleibe hier und bewache das Haus.« Der gepixelte Hund hüpfte auf und nieder.

»Du hast sicher Recht«, Benton nickte langsam. »Jemand muss sich um das Haus kümmern, weil die Tür kaputt ist, und alle Fenster sind zerbrochen.« Er schloss Bello ein letztes Mal in die Arme.

»Danke für die Umarmung! Du bist mein allerbesten Freund!« Bellos Stimme tönte ein bisschen leiser als gewohnt.

Schweren Herzens nahm Benton Abschied. Er legte den Babybot auf den Boden. Dann krabbelte er aus dem Gebäude und rieb die Tränen aus den Augen. Bello würde gewiss zuverlässig auf das Haus aufpassen. So sind Freunde nun einmal: Sie helfen einander.

Wer weiß, wahrscheinlich konnte Benton auch ohne Bellos Hilfe seine Schritte zählen – und vielleicht kam er sogar auf mehr als 100! Das würde seine Mutter gewiss freuen, wenn sie das nächste Mal aufwachte. Und Bello wäre stolz auf ihn, wenn sie sich später einmal wieder trafen. Benton würde Bello dann alle möglichen Geschichten erzählen können. Zum Beispiel, wie es in der neuen weiten Welt zugging.

»Eins und zwei und drei.« Benton begann Schritte zu zählen, während er sich auf den Weg zu seiner Mutter machte. Dabei bemühte er sich tapfer, Bellos quietschfidelnden Tonfall zu imitieren. Schließlich war er ja jetzt schon ein großer Junge.

DIE AUTORIN

Beth Cato wohnt in Arizona. Sie verfasste die beiden »Clockwork Dagger«-Romane und die Trilogie »Blood of Earth«, erschienen bei Harper Voyager. Ihre Website lautet BethCato.com.

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 10.1038/d41586-021-01176-8, 2021



IMSA/PI-CALTECH; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Leben jenseits der Erde

Unter der Eiskruste von Jupiters Monden könnten günstige Bedingungen für außerirdische Organismen herrschen – und vielleicht auch noch andernorts im Sonnensystem. Zwei Raumsonden sollen das klären.

Antibiotikaresistenz

Bakterielle Erreger werden zunehmend unempfindlich gegenüber bewährten Arzneistoffen. Evolutionäre Behandlungsstrategien sollen das verhindern.



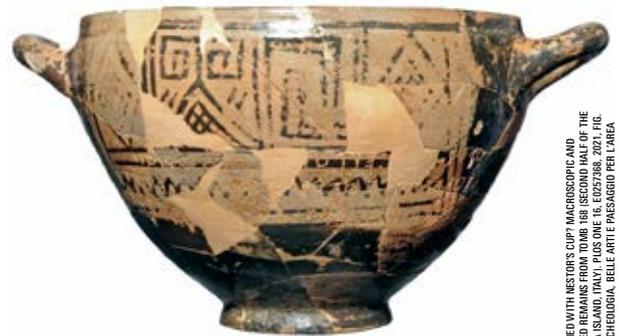
CRULINA_98 (COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:PENICILLIUM_NOTATUM.JPG) / CC-BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/BY-SA/3.0/LEGALCODE)



JUST_SUPER / BETTY IMAGES / ISTOCK

Bessere Energiespeicher

Wie Batterien funktionieren, ist lange bekannt. Sie exakt zu beschreiben, gestaltet sich aber als Mammutaufgabe. Die mathematische Modellierung hilft, die Geräte zu verbessern.



GIGANTE, M. ET AL.: VHSO WAS BURIED WITH NESTOR'S CUP? MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC ANALYSES OF THE CHERATED REMAINS FROM THE SECOND HALF OF THE 8TH CENTURY BC. IN: JOURNAL OF ANTHROPOLOGICAL ARCHAEOLOGY, BELE ARTE E PASTASAGGIO PER L'ARCA, 3. PICTURE FROM: SUPRINTENDENZA ARCHEOLOGICA, BELLE ARTE E PASTASAGGIO PER L'ARCA, METROPOLITANA DI NAPOLI (DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0257368) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/BY/4.0/LEGALCODE)

Rätselhafter Nestorbecher

Im antiken Grab eines Kindes lag ein Becher mit einer Inschrift, die auf Wein und Liebe anspielt. Nun lösten Forscher das Dilemma, wie Toter und Text zusammenpassen.

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

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)



ÜBERFLUTUNGEN
IN NIGERIA

Der Klimamigration ein Gesicht geben

Kira Vinke befasst sich mit offenen Fragen zur Migration als Folge des Klimawandels und lässt Betroffene zu Wort kommen.

Die Folgen des Klimawandels sind schon jetzt weltweit spürbar. In Zukunft werden neben den klimatischen Veränderungen auch soziale Herausforderungen auf uns zukommen – eine davon ist die Klimamigration.

Dieses Buch beschreibt einerseits, wie Menschen an so verschiedenen Orten wie Bangladesch, den Marshall-Inseln, dem Ahrtal oder Burkina Faso durch den Klimawandel ihr Leben verändern oder sogar ihre Heimat verlassen müssen. Andererseits verdeutlicht es die globalen politischen Zusammenhänge rund um die Frage, warum Migration aufgrund des Klimawandels die Politik vor viele Probleme stellt. In den einzelnen Kapiteln verknüpft die Autorin eindrückliche Erfahrungsberichte aus ihrer Forschung mit einem fundierten Literaturüberblick. Sie erklärt, wie internationale Klimapolitik (nicht) funktioniert und welche Folgen das hat.

Migration im Kontext des Klimawandels hat verschiedene Besonderheiten und stellt die internationale

Gemeinschaft vor ungelöste Fragen. Beispielsweise könnten durch den Anstieg des Meeresspiegels ganze Nationalstaaten ihr Territorium im Pazifik verlieren – werden die Bewohner dieser »Disappearing States« damit staatenlos? Oder ist es möglich, einen Staat durch Landkäufe umzusiedeln? Ein weiteres Problem: Bislang gibt es kein Recht auf Asyl für Menschen, deren Lebensgrundlage durch den Klimawandel zerstört wird. Dafür wäre es notwendig, zunächst zu definieren, ab wann ein Gebiet als durch den Klimawandel unbewohnbar geworden gilt – doch auch diese Frage ist ungelöst. An diesen Punkten zeigt sich ebenso deutlich wie an den vorgestellten Schicksalen, dass institutionelle und rechtliche Reformen der Migrationspolitik nötig sind, um den Folgen des Klimawandels zu begegnen.

Das Buch baut auf Kira Vinkes Dissertation zum Thema Klimawandel und Migration auf, für die sie weltweit an verschiedenen Orten zahlreiche Interviews geführt hat. Inzwischen ist Vinke Leiterin des



Kira Vinke

Sturmnomaden

Verlag: dtv, München 2023

€ 23,-

Zentrums für Klima und Außenpolitik der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik, Wissenschaftlerin am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Co-Vorsitzende des Beirats der Bundesregierung »Zivile Krisenprävention und Friedensförderung«.

Der Spagat zwischen lebendigen und empathischen Beschreibungen der Lage vor Ort einerseits und wissenschaftlichen Analysen andererseits

rerseits gelingt Vinke insgesamt gut. Allerdings können die Wechsel im sprachlichen Niveau stellenweise irritieren, etwa wenn zunächst von »klirrender Kälte« geschrieben wird und wenig später von »Temperaturrextremen«.

Trotz der zahlreichen Probleme und offenen Fragen rund um das Thema Klimamigration bewahrt das Buch einen angenehm nüchternen Grundoptimismus. Vinke erinnert an

Beispiele aus der Geschichte, in denen die Menschheit bereits mit großen Zahlen von Geflüchteten umgehen musste. Und sie ist überzeugt: »Wenn es möglich ist, politische Mehrheiten für abwegige, hass- und angstgetriebene Ideen zu gewinnen, sollte es mit Beharrlichkeit ebenso möglich sein, gute Ideen zu popularisieren, für die sich zunächst keine Mehrheit starkmacht. Somit sollten wir den Mut aufbringen, uns

für das einzusetzen, was moralisch geboten ist.« Neben den aufschlussreichen Erklärungen rund um das Problemfeld Klimamigration macht auch dieser Fokus auf Empathie und Menschlichkeit das Buch zu einer lohnenswerten Lektüre.

Fenja De Silva-Schmidt ist Journalistin und promovierte Kommunikationswissenschaftlerin in Hamburg.

Geschichte schreiben die Gewinner

Ein wundervoller historischer Abriss, in dem der Fokus auf den Frauen und ihren Entdeckungen, Erkenntnissen und Errungenschaften liegt.

► Zu oft werden Frauen in der Erzählweise der Geschichte klein gemacht, vergessen oder sogar einfach weggelassen, als hätten sie keinen Anteil am Geschehen gehabt. Dabei gibt es zahlreiche Frauen, die in der Geschichte wichtigen Anteil an wissenschaftlichen, politischen, künstlerischen Revolutionen und

Entwicklungen nahmen. Ohne sie würde die Welt von heute nicht so aussehen, wie sie es tut. Die Journalistin Vera Weidenbach verwebt die Biografien und Leistungen der Frauen auf meisterhafte Weise, so dass kein Buch mit Aneinanderreihungen von Frauenporträts entsteht, sondern wirklich eine Reise durch die Geschichte der letzten etwa 200 Jahre.

Die sechs Kapitel sind chronologisch angeordnet, beginnend im 19. Jahrhundert mit der englischen Mathematikerin Ada Lovelace, die die Grundlage für heutige Computer legte. Die Entwicklung von Computern, wie wir sie heute kennen, wäre ohne viele Frauen nicht möglich gewesen. Auch beim Bau des Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), 100 Jahre nachdem Ada Lovelace das erste Computerprogramm geschrieben hatte, waren Mathematikerinnen maßgeblich beteiligt. Die Männer konzentrierten sich auf den Aufbau des Computers und überließen das Programmieren den Frauen. So wäre der ENIAC nie funktionstüchtig gewesen, wenn nicht Jean Jennings und Betty Snyder gewesen wären. Einer unter vielen interessanten Fakten, die im Buch aufgezeigt werden, ist, dass wir noch heute von Hardware und Software sprechen, weil die Entwicklung von harten Maschinen von Männern

erledigt wurde, während sich die Frauen mit dem soften Innenleben der Computer befassten.

Neben Frauen, deren Leistungen nicht nur in ihren Fachdisziplinen (wieder-)entdeckt werden, wie Rosalind Franklin und ihr essenzieller Beitrag zur Beschreibung der DNA als Doppelhelix oder Lise Meitners Entdeckung der Atomspaltung, holt Weidenbach auch weiterhin unbekanntere Frauen vor den Vorhang. Da ist unter anderem Lotte Reiniger, die lange vor Walt Disney den ersten Trickfilm drehte und dafür einen selbstgebaute Tisch verwendete, bei dem eine Glasplatte mit den ausgeschnittenen Figuren von unten beleuchtet wurde und die oberhalb angebrachte Kamera die Szenen filmte. Sie zeichnete nicht nur viele Skizzen für den ersten abendfüllenden Trickfilm, sondern entwickelte auch die Handlung und die Storyboards Bild für Bild.

Oder die Journalistin Nellie Bly, die sich 1887 für zehn Tage in eine Anstalt für nervenranke Frauen in New York einweisen ließ, um von den dortigen Zuständen berichten zu können. Mit ihrer Arbeit brachte sie den investigativen Journalismus mit auf den Weg.

Im Buch werden Frauen aus allen Bereichen des Lebens porträtiert, Politikerinnen und Denkerinnen, wie



Vera Weidenbach

Die unerzählte Geschichte

Rowohlt Taschenbuch Verlag

€ 20,-

Flora Tristan, die bereits fünf Jahre vor Karl Marx schrieb, die Arbeiter müssten sich organisieren und zusammenschließen. Aber auch das Leben und Wirken von Künstlerinnen wie Frida Kahlo oder Camille Claudel, die nicht nur Schülerin August Rodins war, sondern eine eigenständige Bildhauerin, wird beschrieben.

Ein wiederkehrendes Thema in den Lebensgeschichten der Frauen sind die Männer, mit denen oder für die sie gearbeitet haben und denen in der Geschichte oft auch die Leistungen der jeweiligen Frauen zugeschrieben werden. Da sind beispielsweise die Anteile von Margarete Steffin an den Werken Bertolt Brechts oder Jocelyn Bell Burnell, die zusammen mit Antony Hewish als Erste einen

Neutronenstern entdeckte, dafür allerdings nicht bei der Nobelpreis-Auszeichnung berücksichtigt wurde. Weidenbach erklärt dies auch mit dem in der Soziologie bekannten Matthäus-Effekt, bei dem Anerkennung angesammelt wird, also eine Koryphäe auf einem Gebiet eher für eine Entdeckung Anerkennung bekommt als ein Newcomer.

In eine ähnliche Kategorie fallen die britischen Autorinnen des 19. Jahrhunderts, die unter männlichen Pseudonymen ihre Werke veröffentlichten, um ernst genommen zu werden. So schrieben etwa die Brontë-Schwester als Ellis und Currer Bell und Mary Ann Evans als George Eliot, während Jane Austens Romane anonym erschienen.

Ein Problem dabei ist, dass nachfolgenden Frauengenerationen die Vorbilder fehlen. Doch es ist ganz klar, dass Frauen immer schon in allen Bereichen der Gesellschaft Anteil hatten. Sie waren immer da und haben Großartiges geleistet. Dafür werden sie auf den 352 Seiten von Weidenbachs Buch in den Fokus gerückt. Definitiv eine bereichernde und lehrreiche Lektüre, auch für jene, die sich schon mit Pionierleistungen von Frauen beschäftigt haben. Und alle anderen werden an so mancher Stelle ins Staunen kommen.

Victoria Lunn ist Molekularbiologin und Wissenschaftsjournalistin in Linz.

Kostbare Gehirnzeit

Die Digitalisierung befreit uns von niederer geistiger Arbeit. Verspielen wir die so gewonnene Lebenszeit im Sog der sozialen Medien?

► In unserer sich ungeheuer rasch wandelnden Gegenwart sind wir auf kluge Analysen der unübersichtlichen Veränderungen angewiesen. Dazu möchte der französische Soziologe Gérald Bronner seinen Beitrag leisten. Er holt weit aus – ein Kapitel heißt »Eine andere Geschichte der Menschheit« –, um den Einfluss der modernen Medien auf unser Zusammenleben herauszuarbeiten.

Originell ist Bronners Buch schon allein insofern, als es die vernetzte Computerwelt aus dem Blickwinkel eines französischen Intellektuellen betrachtet. Die großen Firmen, die die Digitalisierung vorantreiben, von Microsoft und Apple bis zu Alphabet und Meta, sitzen in den USA, und entsprechend sind die einschlägigen Forschungen und Entwicklungen fest in angelsächsischer Hand. Die Sprache der Informatik ist Englisch; daran kann die Hartnäckigkeit, mit der Franzosen statt Computer »Ordinateur« sagen, wenig ändern.

Bronners polemische Beschreibung moderner Sitten und Unsitten steht in der Tradition der französischen Aufklärung. So wie diese einst die Macht des rationalen Denkens gegen die tradierte Religion ins Feld führte, rückt er dem in den sozialen Medien grassierenden Meinungs-wirrwarr mit kühlen Analysen zu Leibe. Dabei greift er gern auf empirische Studien über tierisches Verhalten und über das menschliche Gehirn zurück.

Zunächst betont Bronner, welche enorme Chancen die Digitalisierung eröffnet. So wie die Maschine dem Menschen in der industriellen Revolution schwere körperliche Arbeit abnahm, befreit ihn nun die oft »Industrie 2.0« genannte Digitalisierung tendenziell von repetitiver, stumpfsinniger geistiger Tätigkeit. Dadurch nimmt der frei verfügbare Spielraum für intellektuelle Tätigkeiten, von Bronner »Gehirnzeit« genannt, deutlich zu.

Nur: Was fängt der Mensch mit der gewonnenen Zeit an? Hier zeigt



Gérald Bronner
Kognitive Apokalypse
C.H. Beck
€ 24,-

sich für Bronner der Pferdefuß des Fortschritts: Zeitgleich mit der Computerisierung der Warenproduktion etabliert sich die digital vernetzte Kommunikation und droht die gewonnene Gehirnzeit mit Informationsmüll zu fluten.

Die sozialen Medien sind nun einmal darauf programmiert, Nutzer anzulocken und sie nicht wieder loszulassen. Im Konkurrenzkampf um das knappe Gut der Aufmerksamkeit gewinnen diejenigen Algorithmen, die die spektakulärsten und sensationellsten Nachrichten bevorzugen. Deshalb haben auf dem digitalen Meinungsmarkt Verschwörungstheorien leichtes Spiel: Auf den ersten Blick ist die oftmals komplizierte Wahrheit viel langweiliger als eine noch so verrückte, aber simple Gegenbehauptung.

Bronner bezeichnet diesen inzwischen offensichtlichen Zusammenhang als digitale Apokalypse. Wie er betont, sei damit nicht wie sonst üblich eine finale Katastrophe gemeint, sondern der ursprüngliche Wortsinn: Enthüllung, Offenbarung.

Aber was offenbart sich da? Mit seinen zahlreichen Zitaten aus der Tier- und Verhaltensforschung will Bronner nahelegen, dass die digitale Apokalypse unsere wahre Natur enthülle, unser tierisches Erbe. Wenn er zum Beispiel erwähnt, dass das Internet in großem Umfang pornografisches Material transportiert, kommt er gleich auf Rhesusaffenmännchen zu sprechen, die sich durch den Anblick des Hinterteils geschlechtsreifer Weibchen von der Nahrungssuche ablenken lassen.

Auch wo Bronner sich auf die Hirnforschung beruft, garniert er damit soziologische Befunde, ohne viel zu deren Erklärung beizutragen: »... manche Aspekte unseres öffentlichen Lebens vermitteln den Eindruck, es gerate immer stärker unter die Herrschaft weiter hinten gelegener Hirnregionen wie des Hippocampus oder der benachbarten Amygdala, die für kurzfristige Belohnungen sensibel sind, als unter die Herrschaft des orbitofrontalen Cortex.«

Vulgär ausgedrückt, läuft Bronners Apokalyptik auf die These hinaus, im Internet offenbare sich unser innerer Schweinehund. Oder manierter: Die digitalen Netze reduzieren uns auf einen tierähnlichen Naturzustand.

Mit diesem Befund möchte der Autor sich von all jenen abheben, die auf das Verdummungspotenzial der

sozialen Medien mit Gesellschaftskritik reagieren und beispielsweise fordern, die derzeit ganz und gar deregulierten Meinungsmärkte einer wie immer gearteten Kontrolle zu unterwerfen. Solche Ideen gehören für Bronner in eine Tradition, die er mit Namen wie Theodor W. Adorno, Herbert Marcuse oder Pierre Bourdieu assoziiert. Sie alle, behauptet Bronner kühn, sähen in den Massenmedien eine »Entfremdung von der menschlichen Natur« und forderten deshalb ganz im Sinn des Frühaufklärers Jean-Jacques Rousseau ein utopisches »Retour à la nature«.

Gegen dieses Abziehbild von Sozialkritik führt Bronner seine konträre Diagnose ins Feld: Die digitale Apokalypse verwirklicht ironischerweise hier und heute die rousseausche Utopie, indem sie das Tier im

Menschen von der Leine lässt.

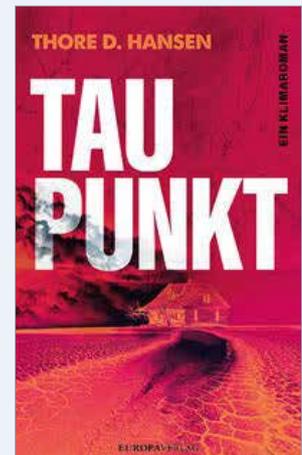
Das findet Bronner bei aller intellektuellen Genugtuung aber letztlich doch nicht in Ordnung und ruft deshalb im letzten Kapitel zu einem »Endkampf« auf. Worin der konkret bestehen soll, bleibt freilich offen. Vermutlich soll man sich wieder mehr Zeit nehmen und, statt im Internet zu surfen, das Gehirn mit Lektüre verwöhnen. Dafür kommt Brenners Buch durchaus in Frage. Es unterhält mit Esprit und präsentiert einen bunten Strauß von Anekdoten. Dass dabei wenig herauskommt, muss einen nicht stören.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Seit 2005 betreut er die Kolumne »Springers Einwüfex« in »Spektrum der Wissenschaft«.

Stell dir vor, es wird noch heißer

Der Thriller »Taupunkt« befasst sich mit der Frage, wie stabil unsere Gesellschaft im Angesicht des Klimawandels tatsächlich ist.

► An Sachbüchern über den Klimawandel wird es so schnell keinen Mangel geben. Zu groß und zu gefährlich ist die Menschheitskrise, zu rasant sind die Entwicklungen, auf die die Experten und Expertinnen dann mit neuen Mahnungen und Handlungsempfehlungen reagieren. Die Flut der Bücher zum Thema ist vermutlich auch deshalb so groß, weil weiterhin ein eklatanter Widerspruch zwischen grundlegender Erkenntnis und daraus abgeleiteter Handlung besteht. Wir alle wissen, dass es so nicht weitergehen kann. Dass die Gesellschaft als Ganzes sich verändern muss, dass wir unseren Konsum einschränken müssen, wollen wir das Schlimmste noch verhindern. Passieren tut trotzdem: nichts! Zumindest nicht genug. Was zu der Frage führt, was eigentlich konkret passieren müsste, damit die Menschheit aus ihrem Konsumschlaf erwacht.



Thore D. Hansen

Taupunkt

Europa Verlag

€ 20,-

Genau hier setzt das Buch »Taufpunkt« von Thore D. Hansen an. »Klimaroman« nennt sich das Werk im Untertitel. Kein Sachbuch also, eher ein in der nahen Zukunft angesiedelter Klimathriller. Im Zentrum des Geschehens steht der Wissenschaftler Tom Beyer. Anfang des Buches arbeitet er noch im Weltklimarat der Vereinten Nationen in New York. Er quittiert aber bald ausgebrannt den Dienst, weil der Klimarat aus politischer Rücksichtnahme nicht bereit ist, die Weltbevölkerung über das wahre Ausmaß der bevorstehenden Klimakatastrophe aufzuklären. Stattdessen wird Beyer – zu Beginn der eigentlichen Handlung – Chef des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung.

Es ist erst Frühling. Trotzdem liegt eine ungewöhnliche Hitze wie Blei über weiten Teilen Deutschlands. Der Regen bleibt aus, Waldbrände nehmen zu, und ein Hitzerekord jagt den nächsten. 38 Grad, 41 Grad, 45 Grad, 39 Grad – am Anfang jeden Kapitels steht die jeweilige Temperatur, mit der Tom Beyer und die Mitglieder seiner Familie zu kämpfen haben: Sein Bruder Robert quält sich als Landwirt in Nordfriesland und Brandenburg und ist Klimawandelleugner – ausgerechnet. Roberts Tochter Janne ist dagegen Klimaaktivistin. Toms Tochter Mareike wiederum leidet unter der Arbeit ihres oft abwesenden Vaters und hat sich deshalb für einen eher hedonistischen Lebensstil entschieden.

Diese komplementäre Aufstellung der Figuren ermöglicht es, das Thema Klimawandel und die unterschiedlichen Meinungen dazu in verschiedenen Generationen und Lagern zu beleuchten. Manchmal wirkt sie allerdings etwas bemüht: Der querdenkende, jähzornige und alkoholranke Robert wirkt mitsamt dem provinziellen bäuerlichen Umfeld, in dem er sich bewegt, genretypisch manchmal arg überzeichnet. Auch bei den Emotionen, die die Figuren durchleben, ist der Regler oft bis zum Anschlag hochgedreht.

Was den Klimawandel und seine Folgen betrifft, hat Hansen, der zuvor schon einige nah an der Realität

angesiedelte Thriller geschrieben hat, seine Hausaufgaben gemacht. Er schreibt von einem Modellprojekt in Island, das CO₂ aus der Luft saugt und tief unter der Erde einlagern kann. Er geht der Frage nach, wie viele Todesopfer wohl durch die steigenden Temperaturen zu beklagen sind, ob der Katastrophenschutz wohl auf eine signifikant höhere Zahl an Waldbränden vorbereitet ist und wie schnell im Katastrophenfall die öffentliche Ordnung zerfällt und das Machtvakuum durch marodierende Banden gefüllt werden könnte.

Tom Beyer hat als Wissenschaftler an einem Geheimprojekt – dem Phönix-Programm – gearbeitet, das zur Anwendung kommen soll, wenn der Kampf gegen die Klimaerwärmung endgültig verloren ist. Darin enthalten sind all die Einschränkun-

gen, von denen wir jetzt schon wissen, dass sie auf uns zukommen werden: weniger Konsum, Einschränkung der Reisefreiheit, weniger Globalisierung – Wohlstandsverlust. Im Alleingang entschließt sich Tom schließlich dazu, das Phönix-Programm öffentlich zu machen und dessen globale Anwendung zu fordern.

Dass die Weltgemeinschaft dem Einzelkämpfer dabei möglicherweise sogar zu folgen bereit ist, ist eine unbedingt wünschenswerte, wenn auch eher realitätsferne Volte des Buches.

Ralf Stork arbeitet als Naturjournalist und Buchautor in Berlin. Einmal im Monat erscheint auf »Spektrum.de« seine Kolumne »Storks Spezialfutter«.

(K)Ein Durchblick beim Einkauf

Der Autor nimmt das Supermarktangebot unter die Lupe und kritisiert die Lebensmittelindustrie. Aufschlussreich, aber ernüchternd.

► Wo können sich Verbraucherinnen und Verbraucher auf einfache Art informieren, wie gesund ein Lebensmittel ist, unter welchen sozialen und ökologischen Bedingungen es hergestellt wurde und wie es im Vergleich zu alternativen Produkten abschneidet? Thilo Bode, der ehemalige Chef von Greenpeace und Gründer der Verbraucherschutzorganisation Foodwatch, ist der Ansicht: jedenfalls nicht im Supermarkt. Stattdessen bestehe bei Aldi, Lidl, Rewe und Edeka – »den marktbeherrschenden »Big Four« des Einzelhandels« – ein ebenso großes wie undurchschaubares Angebot.

Bode möchte mit seinem neuen Buch für mehr Klarheit auf Verbraucherseite sorgen. Er lädt deshalb zu einem »Rundgang« durch den Super-



Thilo Bode
Der Supermarkt-Kompass

S. FISCHER
€ 22,-

markt ein und erklärt in den einzelnen Kapiteln und übersichtlichen Infoboxen, wie es um das Angebot, die Transparenz, den ökologischen Fußabdruck, die Gesundheit, die Bioalternative und die Wahlfreiheit bei Lebensmitteln wie Tomaten, Olivenöl, Fleisch und Fruchtsäften bestellt ist.

Die von Bode ausgewählten Lebensmittel bilden das Einkaufsverhalten vieler Bürgerinnen und Bürger vermutlich ganz gut ab. Neben herkömmlichen geht der Autor aber auch auf neuere Lebensmittel wie Nahrungsergänzungsmittel und »Superfoods« ein und positioniert sich zu kontrovers diskutierten Themen wie dem Einsatz von Gentechnik in der Landwirtschaft, Bio- und konventionellem Anbau und veganer und vegetarischer Ernährung. Zudem analysiert er die Vielzahl an Produktsiegeln, schreibt über Hungerlöhne von Feldarbeitern in Südeuropa und den Plastikskandal in der Schlei.

Kaum ein Thema, das in den letzten Jahren an die Öffentlichkeit gelangt ist, lässt er aus.

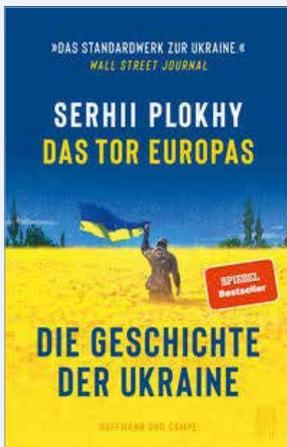
Das ist informativ und soll zu der Erkenntnis führen: Ethisch im Supermarkt zu konsumieren und dadurch das Angebot zu beeinflussen, ist unmöglich. Bode erklärt dies unter anderem am Biofleisch. Ihm zufolge sind entsprechende Siegel kein Garant für Tiergesundheit, da »Bio«-Hühner, -Schweine und -Kühe ebenso an Krankheiten und Verletzungen leiden können wie konventionell gehaltene Tiere.

Komplex wird es beim Thema Veganismus: So schließt eine vegane Ernährung Bode zufolge Tierleid zwar aus, und der Anbau der Pflanzen schneidet beim Kohlendioxidausstoß besser ab als die Nutztierhaltung. Allerdings werde beispielsweise für die Herstellung pflanzlicher Käsealternativen oft auf Palm- oder Kokosöl zurückgegriffen – beides ist aus Umweltschutzsicht problematisch.

Noch dazu seien vegane und vegetarische Produkte nicht per se gesünder als andere: So können etwa stark verarbeitete Fleischalternativen viele Zusatzstoffe, Fett und Salz enthalten, mit denen der Geschmack und die Konsistenz der tierischen Produkte imitiert werden soll.

Es erscheint schlüssig, dass Verbraucherinnen und Verbraucher dies alles beim Einkauf weder erkennen noch berücksichtigen können. Laut Bode ist dies auch gar nicht gewollt. Der durch EU, Bund und Länder stark reglementierte Lebensmittelmarkt bediene in erster Linie die Interessen der Herstellerinnen und Händler. Allein aus diesem System ausbrechen könne kein Supermarkt, ohne Wettbewerbsnachteile in Kauf nehmen zu müssen.

Christina Mikalo hat Kultur- und Nachhaltigkeitsnaturwissenschaften in Lüneburg studiert und ist Journalistin.



Serhii Plokhy
Das Tor Europas
 Hoffmann und Campe
 € 30,-

Die Geschichte der Ukraine – ein Streben nach Unabhängigkeit

Serhii Plokhy erzählt die Geschichte der Ukraine lebendig und detailliert. Das hilft bei der Einordnung des aktuellen Konflikts.

Ein Jahr nach dem Angriff Russlands auf die Ukraine ist ein Ende des Krieges nicht abzusehen. Klar ist aber, dass Putin ein entscheidendes Kriegsziel nicht erreichen konnte: Die Ukraine ist immer noch ein unabhängiges Land; und im Widerstand gegen Russland wahrscheinlich vereinter als je zuvor. Der Harvard-Historiker Serhii Plokhy hat mit »The Gate of Europe« die Geschichte dieses Landes aufgeschrieben. Jetzt liegt die deutsche Übersetzung vor – »Das Tor Europas« –, die im Vorwort auch auf den aktuellen Krieg eingeht.

Das Buch berichtet hauptsächlich von Ereignissen, die zum Teil viele Jahrhunderte zurückliegen. Es ist also nicht seine primäre Aufgabe, den Krieg verständlicher zu machen,

zumal es im Original 2015, also vor der aktuellen Eskalation, erschienen ist. Die eigentliche Erzählung setzt mit Herodot ein, der die Völker der nördlichen Schwarzmeerküste und der Steppen dahinter als Erster vor knapp 2500 Jahren beschrieben hat. Es treten auf die mythischen Skythen, Reiternomaden, die in der pontischen Steppe lebten und den Handel zwischen griechischen Kolonien und dem Hinterland beherrschten. In den Wirren der Völkerwanderung ziehen Hunnen, Bulgaren und Awaren durch die Gebiete, bis sich im sechsten Jahrhundert die ersten slawischen Stämme zwischen Donau und Dnjepr niederlassen. Im neunten Jahrhundert werden die Kiewer Rus zum ersten Mal erwähnt. Unter dem Einfluss skandinavischer

Fernhändler und lokaler Slawen hatte sich Kiew auf Grund seiner günstigen Lage zu einem Machtzentrum entwickelt, das bald darauf sogar Byzanz herausfordert.

Und doch finden sich gerade in der zweiten Hälfte des Buches wichtige Motive für den aktuellen Konflikt. Das »Tor Europas« zeichnet die lange Tradition des Aufbegehrens der lokalen Bevölkerung gegen die Fremdherrschaft nach: Bereits im 15. Jahrhundert rebellieren die Eliten der Rus gegen die Benachteiligung durch ihre katholischen polnisch-litauischen Herrscher. Ende des 16. Jahrhunderts bildet sich nördlich des Schwarzen Meers ein großes Herrschaftsgebiet der Kosaken heraus, aus dem nach einem Aufstand gegen die polnisch-litauische Adelsrepublik 1648 ein staatenähnliches Gebilde, das Hetmanat, hervorgeht.

Spätestens seit dem frühen 19. Jahrhundert entwickelt sich eine ukrainische Nationalbewegung: 1798 entsteht die Enejida, die erste literarische Dichtung in modernem Ukrainisch. 1818 folgt die erste Grammatik der ukrainischen Sprache und 1847 mit der »Genesis des ukrainischen Volkes« das erste politische Programm für die nationale Unabhängigkeit.

Mit dem zunehmenden Einfluss des Zarenreiches tritt seit dem 19. Jahrhundert der Konflikt zwischen russischem Hegemonieanspruch und ukrainischem Unabhängigkeitsbestreben immer deutlicher zu Tage: 1863 werden im russischen Herrschaftsgebiet ukrainische Publikationen verboten, 1876 folgt die Einschränkung der ukrainischen Sprache. Der erste Versuch einer ukrainischen Unabhängigkeit nach Ende des Zarenreiches scheitert, weil 1918 bis 1920 die Kriege gegen Polen und Russland verloren gehen. Auch innerhalb der Sowjetunion versucht die Ukraine ein Mindestmaß an Selbstständigkeit zu erlangen; viele Bauern widersetzten sich der Zwangskollektivierung. Durch den Widerstand sah Stalin die Sowjetunion in ihrer Existenz bedroht. Es folgte der Holodomor, die absichtlich herbeigeführte Hungersnot, der rund vier Millionen Ukrainer zum Opfer fielen. (Das EU-Parlament hat Ende 2022 den Holodomor als Völkermord anerkannt.)

Staatliche Unabhängigkeit erlangt die Ukraine erst 1991: Bei den ersten freien Wahlen stimmten 90 Prozent der Wähler und Wählerinnen für die Selbstständigkeit und versetzten damit der Sowjetunion den endgülti-

gen Todesstoß. Mehrheiten gab es übrigens auch in der Region Donezk (83 Prozent) und auf der Krim (54 Prozent). Die ukrainische Unabhängigkeit und die Weigerung der Ukraine, integraler Bestandteil der neu entstandenen Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS) zu werden, werden in Russland immer noch als Affront aufgefasst. Die Einmischungen Russlands in die inneren Angelegenheiten der Ukraine bis hin zu der Annexion der Krim und dem Angriff im Februar 2022 sind also Versuche, die Ablösung der Ukraine um jeden Preis rückgängig zu machen.

Serhii Plochy schreibt über all das ebenso lebendig wie detailliert. Eine ausführliche Zeittafel und ein Personenregister helfen bei der Orientierung. »Das Tor Europas« ist ein Buch, das dabei hilft, die aktuelle Konfrontation historisch einordnen zu können. Außerdem ist es das vielschichtige Porträt einer Nation, die mitsamt ihrer reichen Geschichte gerade von der Landkarte getilgt werden soll.

Ralf Stork arbeitet als Naturjournalist und Buchautor in Berlin. Einmal im Monat erscheint auf »Spektrum.de« seine Kolumne »Storks Spezialfutter«.

Was Menschen den Menschen hinterlassen

Der Comiczeichner Davodeau durchwandert Frankreich und erzählt, was die Höhlenmalerei und die Lagerung von Atommüll gemeinsam haben.

► Hitzig, manchmal zornig, mit Argumenten oder nur mit sinnlosen Worthülsen: Die Diskussionen zum Klimawandel oder zur Atomkraft werden oft erregt geführt. Einen anderen, eher ruhigen Weg unternimmt und gestaltet der Comiczeichner Étienne Davodeau. Denn er wandert – auf einer ganz bestimmten Route – fast durch ganz Frankreich

und schreibt und zeichnet dabei. Der Grundgedanke ist immer wieder, was Sapiens anderen Sapiens und der Erde vererben.

Als Start- und Endpunkt hat der Autor sich symbolträchtige Orte ausgesucht. Er startet in Südfrankreich in den Höhlen von Pech Merle, dem Ort, in dem die Neandertaler den Nachkommen ihre Malereien



Étienne Davodeau
Das Recht der Erde
 Carlsen Comics
 € 27,-

hinterlassen haben. Und sie endet nach fast einem Monat und 800 Kilometern in Lothringen im kleinen Ort Bure, wo in Zukunft der Atommüll Frankreichs in einem unterirdischen Lager über Jahrhunderte gelagert werden soll. Eine ganz andere Art Erbe. Auf diese Weise wirkt der Einstieg in das umstrittene Thema entschleunigt.

Étienne Davodeau ist ein mehrfach ausgezeichnete französischer Comiczeichner und Autor. In anderen Graphic Novels schreibt er über den Beruf von Journalisten, die Arbeit von Winzern oder was mit Menschen passiert, die sich nicht den Produktionsgesetzen des Kapitalismus fügen. In seiner neuen Comicroportage »Das Recht der Erde« schreibt und zeichnet er, was lange Zeiträume bedeuten, wie der Mensch die Erde verändert, was der Klimawandel anrichtet, wie der Boden sich verändert und wie Aktivisten gegen Atommüll kämpfen.

Es gelingt ihm dabei nicht nur eine lesenswerte Vermittlung von Wissen, es ist auch ein Vergnügen, die Zeichnungen der durchwanderten französischen Landschaft zu verfolgen.

Auf seiner Wanderung begleiten ihn oft für ein kleines Stück Experten, die von ihrem Wissen berichten. Die Comic-Sprechblasen sind hier aber nicht mit »Krach, bumm, bäng« gefüllt, sondern mit Wissen zur Atomphysik, zu lokaler Geschichte, der Geschichte der Neandertaler, zur Bodenkunde oder zu der Geschichte

der Kernenergienutzung. Dabei nutzt Davodeau einen Trick, den er auch anspricht. Manchmal fanden die Gespräche schon vorab in einem Büro statt. Doch er malt die Gespräche, als würden die Experten ihn wandernd ein Stück begleiten, wenn sie sich unterhalten. Und so laufen auf seinem Weg durch die Auvergne, Burgund, Lothringen oder das Zentralmassiv mal ein Atomforscher, ein Bodenforscher, eine Soziologin und Aktivisten mit und antworten auf seine Fragen.

Einmal ist es eine Semiologin. Valérie Buneteiére unterrichtet Sprachwissenschaften an der Université Paris. Sie erzählt von dem Problem, wie man Menschen in 100 000 Jahren verständlich machen kann: Hier bitte nicht bohren oder nach Wasser suchen. Hier lagert gefährlich strahlender Atommüll. Wie das gehen soll, ist längst nicht klar, denn Sprache verändert sich so schnell, dass sich zwei Personen in einem Abstand von 500 Jahren nicht mehr verstehen würden.

Davodeau lässt die Leser auch die Strapazen seines Fußmarsches miterleben, wenn er sich mal wieder verlaufen hat, er mit den letzten Strahlen der untergehenden Sonne seine nassen Wanderschuhe trocknet oder der Honig im Rucksack ausläuft. Es ist ein Mix zwischen Schauen und Lesen. Ein Mix aus Faktenwissen, Reisebericht und Reflexion darüber, wie Menschen mit der Umwelt umgehen.

Die Comicroportage ersetzt in der fachlichen Tiefe kein Fachbuch. Aber sie bietet auf entspannte Weise einen lehrreichen Einstieg in die Thematik. Auch wenn Davodeau, wie er selbst zugibt, einseitig berichtet. So schlägt er die Besichtigung des Testlagers in Bure aus. Der PR in Bure »aus Gründen der hypothetischen Fairness das Wort zu erteilen, würde nur das riesige Ungleichgewicht der Kräfte bestätigen«, begründet er seine Wahl und berichtet von der erschreckenden Kriminalisierung der Menschen des gewaltfreien Widerstandes.

Manchmal ist das Buch etwas langatmig, wenn er Seite um Seite zeichnet, wie er durch die oft einsame französische Landschaft wandert. Doch es macht auch Lust, selbst einmal einen langen Spaziergang oder eine Wanderung zu unternehmen. Sich Zeit zu lassen und vielleicht länger und in Ruhe über ein Thema nachzudenken.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

QUANTENPHYSIK

Die Realität imaginärer Zahlen

Wurzeln aus negativen Zahlen sind hilfreiche Tricks, um bei einigen Berechnungen auf Lösungen zu kommen. Aber haben sie überhaupt einen direkten Bezug zu unserer Wirklichkeit? Aktuelle Experimente deuten darauf hin, dass sie ein unverzichtbarer Bestandteil der Quantentheorie sind – und damit einer physikalischen Beschreibung unserer Welt.



Marc-Olivier Renou ist theoretischer Physiker am Centre Inria Saclay in Paris. **Antonio Acín** leitet die Gruppe für Quanteninformationstheorie am Institute of Photonic Sciences (ICFO) in Castelldefels, Spanien. **Miguel Navascués** ist Gruppenleiter am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Wien.

VERBOT In der Schule lernt man, dass man keine Wurzeln aus negativen Zahlen ziehen darf.



► »Miguel und ich versuchen schon seit Jahren, ein Problem zu lösen«, begann der Physiker Antonio Acín das Gespräch mit seinem Kollegen Marc-Olivier Renou. Er hatte Renou 2020 zu sich ans Institute of Photonic Sciences (ICFO) im katalanischen Ort Castelldefels in der Nähe von Barcelona eingeladen, um mit ihm über ein Projekt zu sprechen. Renous Neugier schien geweckt, also erklärte Acín, was ihn schon so lange beschäftigte: »Kann die gewöhnliche Quantenmechanik auch ohne imaginäre Zahlen funktionieren?«

Das Besondere an diesen Zahlen ist, dass ihr Quadrat einen negativen Wert ergibt. Der Universalgelehrte René Descartes (1596–1650) nannte sie »imaginär«, um sie von den heute als »reell« bezeichneten Zahlen zu unterscheiden – jenen, die man auf einem Zahlenstrahl findet. Da imaginäre Zahlen es erlauben, manche Aufgaben wesentlich einfacher zu lösen, haben sie sich in der Fachwelt durchgesetzt. Das bisherige Zahlengerüst wurde daher um die komplexen Zahlen erweitert, die eine Summe aus reellen und imaginären Werten darstellen. Trotz ihres mathematischen Nutzens kann man sich aber fragen, ob imaginäre Zahlen in unserer realen Welt existieren: Schließlich tauchen sie in keiner der grundlegenden Gleichungen der Physik auf – mit Ausnahme der Quantenmechanik.

Die gängigste Version der Quantenphysik beruht auf komplexen Zahlen. Beschränkt man sich auf reelle Werte, ergibt sich ein neues Modell: die reelle Quantentheorie. Im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts konnten mehrere Forschungsteams zeigen, dass die reelle Variante viele Quantenexperimente korrekt beschreibt. Deswegen gingen zahlreiche Fachleute davon aus, dass die reelle Quantentheorie auch jeden anderen quantenmechanischen Versuch abdeckt. Die Entscheidung, mit komple-

xen statt reellen Zahlen zu arbeiten, sei lediglich eine Frage der Bequemlichkeit.

Doch das sind bloß Vermutungen. Könnte es sein, dass die Quantenphysik in Wirklichkeit auf imaginäre Zahlen angewiesen ist? Nach unserem Gespräch in Castelldefels haben wir monatelang gegrübelt, wie sich das beweisen ließe. Am Ende hatten wir die Idee für ein Experiment, dessen Ausgang eine reelle Version der Quantenmechanik nicht erklären könnte. Damit wären imaginäre Zahlen ein wesentlicher Bestandteil der Quantenphysik: Ohne sie würde die Theorie ihre Vorhersagekraft verlieren.

Imaginäre Zahlen gehen auf das frühe 16. Jahrhundert zurück, als der italienische Mathematiker Antonio Maria del Fiore seinen Konkurrenten, den Professor Niccolò Fontana mit Spitznamen »Tartaglia« (deutsch: der Stotterer) zu einem Rechen-Duell herausforderte. In Italien war das damals gängige Praxis: Wenn der Herausforderer gewann, konnte er die Stelle seines Gegners erhalten. Infolgedessen neigten Mathematiker dazu, ihre Entdeckungen für sich zu behalten und die Theoreme, Korollarien und Lemmata nur zu veröffentlichen, um intellektuelle Kämpfe zu gewinnen.

Del Fiores Mentor, Scipione del Ferro, hatte ihm auf dem Sterbebett eine Formel zur Lösung von kubischen Gleichungen der Form $x^3 + ax = b$ mitgeteilt. Mit diesem Wissen legte del Fiore seinem Gegner Tartaglia 30 kubische Gleichungen vor und forderte ihn auf, innerhalb von eineinhalb Monaten für jede davon den korrekten Wert von x zu bestimmen.

Kurz vor Ablauf der Frist entdeckte auch Tartaglia die Lösungsformel für die spezielle Art der kubischen Gleichungen, löste die Aufgaben und gewann das Duell. Später vertraute Tartaglia seine Formel dem Arzt und Wissenschaftler Gerolamo Cardano an, der versprach, sie geheim zu halten. Trotz seines Schwurs veröffentlichte Cardano sie jedoch einige Jahre später. Die komplizierte Formel enthält unter anderem zwei Quadratwurzeln. Wenn die Radikanden negativ waren, ging man davon aus, die kubische Gleichung hätte keine Lösung. Denn es gibt keine reellen Zahlen, die quadriert einen negativen Wert ergeben.

Zeitgleich machte nun ein vierter Gelehrter, Rafael Bombelli, eine der bedeutendsten Entdeckungen in der Geschichte der Mathematik: Er fand lösbar kubische Gleichungen, für die die von Cardano veröffentlichte Lösungsformel Quadratwurzeln aus negativen Zahlen enthielt. Wie er überrascht feststellte, lieferte die Formel die richtige Lösung, wenn er so tat, als gäbe es eine neue Art von Zahl, deren Quadrat gleich -1 ist. Wie sich herausstellte, heben sich die Terme mit $\sqrt{-1}$ alle gegenseitig auf – und als Ergebnis bleibt eine reelle Lösung übrig.

In den nächsten Jahren untersuchten Wissenschaftler die Eigenschaften von »komplexen« Zahlen der Form $a + b\sqrt{-1}$, wobei a und b reelle Werte sind. Im 17. Jahrhundert brachte Descartes diese mit nicht existierenden Merkmalen geometrischer Figuren in Verbindung und nannte die Zahl $i = \sqrt{-1}$ deshalb »imaginär«, um sie von den normalen Zahlen zu unterscheiden, die er als »reell«

AUF EINEN BLICK

Gibt es eine reelle Quantenmechanik?

- 1** In vielen Formeln taucht die imaginäre Einheit »i« auf, die Wurzel aus minus eins. Bislang gingen die meisten Fachleute davon aus, dass sie bloß ein hilfreiches Werkzeug ist.
- 2** Physikalische Gleichungen lassen sich auch rein durch reelle Zahlen beschreiben. Doch in der Quantenphysik scheint das nicht der Fall zu sein.
- 3** Mehrere Forschungsteams haben nun ein Gedankenexperiment im Labor umgesetzt, das belegt, dass die Quantentheorie ohne imaginäre Zahlen nicht funktioniert.

bezeichnete. Mathematiker und Mathematikerinnen verwenden diese Terminologie noch heute.

Komplexe Zahlen haben sich als fantastisches Werkzeug erwiesen – nicht nur zum Lösen von Gleichungen, sondern auch, um die klassische Physik zu vereinfachen. Ein Beispiel sind Lichtwellen: Es ist einfacher, Licht als rotierende elektrische und magnetische Felder durch komplexe Zahlen zu beschreiben als durch oszillierende reelle Felder – obwohl es so etwas wie ein imaginäres elektrisches Feld natürlich nicht gibt. Auch die Formeln für elektronische Schaltkreise sind leichter zu lösen, wenn man so tut, als hätten die Ströme komplexe Werte; dasselbe gilt für Gravitationswellen.

Vor dem 20. Jahrhundert sah man derartige Operationen mit imaginären Zahlen als mathematischen Trick an. Letztlich entsprechen die grundlegenden Elemente jeder klassischen Theorie (Temperatur, Positionen von Teilchen, Felder und so weiter) reellen Zahlen, Vektoren oder Funktionen. Doch dann kam die Quantenphysik und stellte diese Ansicht radikal in Frage.

In der gewöhnlichen Quantenmechanik wird der Zustand eines Systems durch die so genannte Wellenfunktion dargestellt: einem Vektor (eine Größe mit einem Betrag und einer Richtung) aus komplexen Zahlen. Ihre zeitliche Entwicklung bestimmt die Schrödinger-Gleichung, die fundamentale Formel der Quantenmechanik. Physikalische Eigenschaften, wie die Geschwindigkeit oder die Position eines Teilchens, sind keine einfachen Zahlen mehr, sondern »Operatoren«: Tabellen mit komplexen Einträgen. Diese starke Abhängigkeit von imaginären Werten widersprach von Anfang an der tief verwurzelten Überzeugung, dass sich Naturgesetze stets durch reelle Größen formulieren lassen. Erwin Schrödinger, der Erfinder der nach ihm benannten Gleichung, war einer der Ersten, der seine Unzufriedenheit darüber zum Ausdruck brachte. In einem Brief an seinen Kollegen Hendrik Lorentz schrieb er am 6. Juni 1926: »Was hier unangenehm ist, und zwar direkt zu beanstanden, ist die Verwendung komplexer Zahlen. Die Wellenfunktion ist doch im Grunde eine reelle Funktion.«

Zunächst schien Schrödingers Unbehagen einfach zu beheben: Er schrieb die Wellenfunktion um und ersetzte einen einzelnen Vektor aus komplexen Zahlen durch zwei reelle Vektoren. Schrödinger bestand darauf, dass diese Version die wahre Theorie sei und dass die imaginären Werte nur der Bequemlichkeit dienen. In den folgenden Jahren haben Physikerinnen und Physiker andere Wege gefunden, die Quantenmechanik durch reelle Zahlen auszudrücken. Aber keine der Alternativen hat sich je durchgesetzt. Denn mit der komplexen Standard-Quantentheorie lässt sich die Wellenfunktion von Quantensystemen, die aus mehreren Teilchen bestehen, leicht darstellen – eine Eigenschaft, die den reellen Versionen fehlt.

Was passiert, wenn man Wellenfunktionen dennoch auf reelle Zahlen beschränkt? Auf den ersten Blick nicht viel. Man erhält die reelle

Quantentheorie, die der komplexen Variante ähnelt: Es lassen sich immer noch Quantenberechnungen durchführen, geheime Nachrichten durch den Austausch von Quantenteilchen versenden, und man kann den Zustand eines subatomaren Systems über Kontinente hinweg teleportieren.

Grundlegend für solche Anwendungen sind kontraintuitive Eigenschaften wie Überlagerungen, Verschränkungen und die Unschärferelation. Diese sind auch Teil der reellen Quantentheorie. Deshalb gingen Physiker davon aus, dass komplexe Zahlen nur aus Bequemlichkeit verwendet werden. Demnach wäre die reelle Quantentheorie ebenso gültig wie die komplexe Variante. An jenem Herbstmorgen im Jahr 2020 in Acíns Büro begannen wir jedoch an dieser Vorstellung zu zweifeln.

Um ein Experiment zu entwerfen, das die reelle Quantentheorie widerlegt, mussten wir vorsichtig vorgehen. Man kann zum Beispiel keine Annahmen über die verwendeten Versuchsgeräte machen, da Anhänger des reellen Lagers diese jederzeit in Frage stellen könnten. Angenommen, ein Instrument soll die Polarisation eines Photons bestimmen. Kritiker könnten argumentieren, dass das Gerät eine andere Eigenschaft gemessen hat, etwa den Bahndrehimpuls des Teilchens. Wir haben keine Möglichkeit, herauszufinden, ob die Apparate wirklich das tun, was wir glauben. Aber wie soll man eine physikalische Theorie falsifizieren, ohne etwas über den Versuchsaufbau anzunehmen? Glücklicherweise gab es schon

Was sind imaginäre Zahlen?

Wenn man solche Zahlen mit sich selbst multipliziert, erhält man ein negatives Ergebnis. Komplexe Zahlen enthalten reelle und imaginäre Komponenten – sie setzen sich als Summe aus beiden zusammen. Reelle Zahlen bestehen aus rationalen Zahlen (die sich als Brüche aus ganzen Zahlen darstellen lassen) und irrationalen Werten, die keine Bruchzahldarstellung besitzen. Rationale Zahlen enthalten auch ganze Zahlen (natürliche Zahlen und ihr Negatives).



ähnliche Bemühungen, an denen wir uns orientieren konnten.

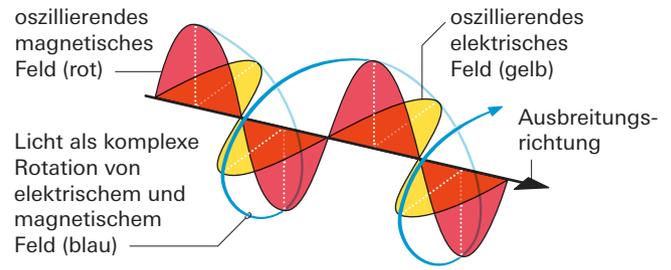
Albert Einstein war zwar einer der Begründer der Quantenphysik, hat aber nie an sie geglaubt: Es widerstrebt ihm, dass die Welt so kontraintuitiv sein könnte. Auch wenn die Quantenmechanik genaue Vorhersagen macht, war er überzeugt, sie müsse eine vereinfachte Version einer fundamentaleren Theorie sein, die die scheinbar paradoxen Eigenheiten auflöst. So weigerte sich Einstein beispielsweise zu glauben, dass die Heisenbergsche Unschärferelation (wonach man Ort und Geschwindigkeit eines Teilchens nicht beliebig genau bestimmen kann) grundlegend sei. Stattdessen sah er den Grund in technischen Beschränkungen. Der Physiker ging davon aus, dass eine zukünftige »klassische« Theorie die Ergebnisse aller Quantenexperimente erklären würde.

Heute wissen wir, dass Einsteins Intuition falsch war. 1964 zeigte der Physiker John S. Bell, dass sich einige Quanteneffekte nicht durch eine klassische Theorie modellieren lassen. Dafür stellte er eine Art von Experiment vor, die inzwischen als Bell-Test bezeichnet wird: Darin arbeiten zwei Experimentatoren, Alice und Bob, in getrennten Labors. Eine weitere Person schickt beiden je ein Teilchen, das sie unabhängig voneinander messen. Bell bewies, dass die Messergebnisse in jeder sinnvollen klassischen Theorie gewisse Ungleichungen erfüllen. Dann zeigte der Physiker, dass diese Ungleichungen in manchen Fällen verletzt werden, zum Beispiel wenn Alice und Bob einen verschränkten Quantenzustand messen. Wichtig ist, dass die bellschen Ungleichungen für alle klassischen Theorien gelten – egal wie kompliziert sie sind. Daher widerlegte der Bell-Test ganz grundsätzlich die Annahme, dass ein klassisches Modell Quantenphänomene beschreiben kann.

Zahlreiche Experimente haben seither dies bestätigt. Und 2015 haben Forschungsteams in Delft, Wien und Boulder alle Schlupflöcher beseitigt, die frühere Versuche offen gelassen hatten. Die Ergebnisse belegen nicht, dass unsere Welt eine Quantenwelt ist. Aber sie beweisen, dass man sie nicht durch die klassische Physik beschreiben kann.

Wir hofften, ein ähnliches Experiment wie das von Bell zu entwickeln, um die reelle Quantentheorie zu widerlegen. Wir brauchten also ein Versuchsszenario, dessen Ergebnisse sich nicht durch ein reelles Modell erklären lassen. Anschließend könnten – so hofften wir – Physikerinnen und Physiker den Versuch in einem Labor umsetzen. Wenn das gelänge, sollte der Test selbst die skeptischsten Befürworter davon überzeugen, dass sich unsere Welt nicht durch reelle Zahlen beschreiben lässt.

Unsere erste Idee war, das ursprüngliche Bell-Experiment so zu verändern, dass es auch die reelle Quantentheorie falsifiziert. Leider haben zwei unabhängige Arbeiten von Károly Pál und Tamás Vérte im Jahr 2008 sowie von Matthew McKague, Michele Mosca und Nicolas Gisin 2009 bereits gezeigt, dass das nicht funktioniert: Die Physiker konnten beweisen, dass die reelle Quantentheorie jeden Bell-Test genauso gut besteht wie die gewöhnli-



ELEKTROMAGNETISCHE WELLE

che Quantenmechanik. Deshalb kamen die meisten Fachleute zu dem Schluss, die reelle Variante sei unwiderlegbar. Doch sie lagen falsch.

Zwei Monate nach unserem Gespräch in Castelldefels hatte das Projekt acht theoretische Physiker von verschiedenen Orten und Arbeitsgruppen zusammengebracht. Obwohl wir uns nicht persönlich treffen konnten, tauschten wir mehrmals pro Woche E-Mails aus und führten Online-Diskussionen. Durch eine Kombination aus langen einsamen Spaziergängen und intensiven Zoom-Meetings kamen wir im November 2020 auf ein Quantenexperiment, dessen Ergebnis die reelle Quantentheorie nicht erklären könnte. Unsere Schlüsselidee bestand darin, das Standard-Bell-Szenario mit einer einzigen Teilchenquelle aufzugeben – stattdessen betrachteten wir eine Anordnung mit mehreren unabhängigen Quellen. Uns war aufgefallen, dass die realen Modelle in der erwähnten Arbeit von Pál und Vérte nicht die richtigen Ergebnisse für Experimente mit »Quantennetzwerken« lieferten. Das haben wir ausgenutzt.

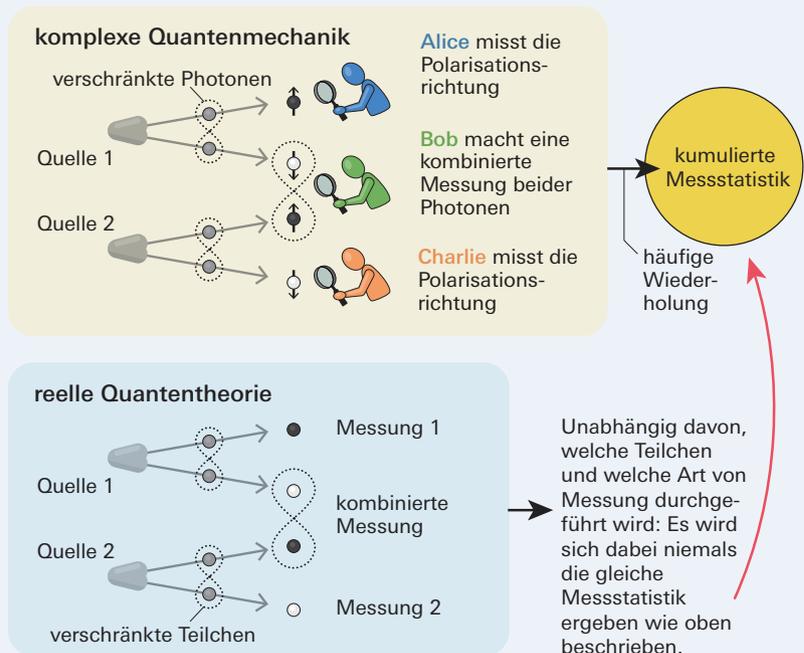
Das war ein vielversprechender Anfang, aber nicht genug: Wir mussten die Existenz jeder Form von reeller Theorie ausschließen – egal wie ausgeklügelt sie sein mochte. Dazu brauchten wir ein konkretes Gedankenexperiment, für das sich zeigen lässt, dass keine reelle Quantentheorie die Vorhersagen der gewöhnlichen Quantenmechanik modellieren kann.

Ursprünglich dachten wir an komplizierte Netzwerke mit sechs Experimentatoren und vier Teilchenquellen. Doch dann entschieden wir uns für einen einfacheren Aufbau mit den drei Personen Alice, Bob und Charlie sowie zwei unabhängigen Quellen. Die erste sendet zwei verschränkte Photonen aus, eines an Alice und eines an Bob; die zweite schickt ebenfalls zwei verschränkte Photonen, aber diesmal an Bob und Charlie. Als Nächstes wählen Alice und Charlie eine Richtung, entlang derer sie die Polarisation der Teilchen messen. Währenddessen bearbeitet Bob die zwei Photonen, die bei ihm angekommen sind, derart, dass sie hinterher miteinander verschränkt sind. Wird das Experiment mehrmals wiederholt, kann man eine Statistik der verschiedenen Messergebnisse von Alices und Bobs Polarisationsmessung erstellen.

Als nächstes haben wir gezeigt, dass keine reelle Quantentheorie die sich ergebenden Statistiken vorhersa-

Das Gedankenexperiment

Um herauszufinden, ob die Quantenmechanik auf imaginäre Zahlen angewiesen ist, haben Physiker ein Gedankenexperiment entworfen, das später umgesetzt wurde. In dem Versuch gibt es zwei Quellen, die Photonen an drei Beobachter aussenden: Alice, Bob und Charlie. Indem man das Experiment oft wiederholt, erhält man Statistiken zu den Messergebnissen. Diese lassen sich jedoch nur von der komplexen Quantenmechanik vorhersagen und nicht von der reellen Theorie.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2013; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

gen kann. Dabei stützten wir uns auf ein Konzept, das als »Selbsttest« bekannt ist: Es ermöglicht Fachleuten, sowohl ein Messgerät als auch das System, das es untersucht, gleichzeitig zu zertifizieren. Was bedeutet das? Stellen Sie sich ein Instrument vor, zum Beispiel eine Waage. Um zu garantieren, dass sie genau ist, setzt man eine Testmasse darauf. Aber wie kann man diese Masse eichen? Man braucht eine andere Waage, die wiederum mit einem Gewicht kalibriert werden muss, und so weiter. In der klassischen Physik setzt sich jener Prozess unendlich fort. Erstaunlicherweise ist es in der Quantentheorie möglich, sowohl ein gemessenes System als auch das Messgerät gleichzeitig zu zertifizieren – als ob die Waage und die Testmasse die Kalibrierung des jeweils anderen überprüfen.

Das haben wir in unserer Arbeit ausgenutzt. Für jede Manipulation von Bob führt man einen Selbsttest für die Messungen von Alice und Charlie durch. Mit anderen Worten: Die Messergebnisse des einen (zum Beispiel Charlie) bestätigt die Quantennatur des anderen (das Photon bei Alice) und umgekehrt. Als wir die dafür erforderlichen Geräte, die mit der reellen Quantentheorie vereinbar sind, untersuchten, landeten wir bei dem realen Modell aus den Arbeiten von Pál, Vértesi, McKague, Mosca und Gisin beschrieben. Von diesem wissen wir aber bereits, dass sie für Quantennetze nicht funktioniert. Damit hatten wir den erhofften Widerspruch gefunden. Ähnlich wie bei den Bell-Tests erzeugte auch unser Gedankenexperiment Messstatistiken, die keine reelle Quantentheorie vorhersagen kann. Damit lässt sich die

reelle Quantentheorie also falsifizieren.

Bevor wir uns zu früh freuen, mussten wir sicherstellen, dass sich die Idee unter realen Bedingungen umsetzen lässt. Wie wir herausfanden, kann die reelle Quantentheorie auch dann die Ergebnisse nicht reproduzieren, wenn die Messstatistiken leicht von den idealen Werten abweichen. Damit hängt die Schlussfolgerung nicht von kleinen Störungen und Schwankungen ab. Nur so ist es überhaupt möglich, das Gedankenexperiment in der Praxis zu überprüfen. Denn man kann ein Labor niemals perfekt kontrollieren. Man kann nur hoffen, dort Quantenzustände zu erzeugen, die annähernd den gewünschten entsprechen, – und in etwa jene Messungen durchzuführen, die man beabsichtigt hat, wodurch sich ungefähr die vorhergesagte Messstatistik ergibt. Der von uns entworfene Versuch erfordert eine hohe Präzision, die aber mit den heutigen Technologien erreichbar ist. Deshalb hofften wir, dass es nur eine Frage der Zeit sei, bis ein Forschungsteam unsere Vision verwirklichen würde.

Wir mussten nicht lange warten. Nur zwei Monate nach unserer Veröffentlichung meldete eine Gruppe in Shanghai, dass sie das Gedankenexperiment mit supraleitenden Qubits durchgeführt hatte. Etwa zur gleichen Zeit nahm ein anderes Team in Shenzhen Kontakt zu uns auf, um unsere Idee mit optischen Systemen zu verwirklichen. Ein paar Monate später lasen wir von einer weiteren Umsetzung des Experiments. Bei allen drei Versuchen haben die Fachleute Messungsergebnisse erhalten, die ein reelles Modell nicht erklären kann. Auch wenn noch einige Schlupflöcher zu schließen sind, fällt es angesichts

der drei unabhängigen Arbeiten schwer, an der reellen Quantenhypothese festzuhalten.

Weder eine klassische noch eine reelle Theorie kann demnach bestimmte Phänomene unserer Welt erklären. Wie geht es nun weiter? Wenn neue Versionen der Quantenmechanik als Alternativen vorgeschlagen werden, kann man diese künftig mit einer ähnlichen Technik prüfen. Aber wäre es vielleicht sogar möglich, einen Schritt weiter zu gehen – und auch die gewöhnliche Quantenphysik zu widerlegen?

Dann hätten wir allerdings überhaupt keine Theorie mehr für die mikroskopische Welt, da es an Alternativen fehlt. Viele Fachleute sind dennoch überzeugt, dass die Standard-Quantenmechanik nicht das passende Modell ist. Denn sie widerspricht einer anderen grundlegenden Theorie unserer Welt, der allgemeinen Relativitätstheorie. Deshalb sind wir auf der Suche nach einer neuen, tiefer gehenden »Quantengravitationstheorie«, die beide Konzepte in Einklang bringt – und die gewöhnliche Quantenphysik ersetzen könnte. Man kann das Problem aber auch anders herum angehen: Falls wir die Quantenmechanik widerlegen, könnte das einen Weg zur Quantengravitationstheorie aufzeigen.

Gleichzeitig versuchen einige Forscherinnen und Forscher zu beweisen, dass die Quantentheorie unersetzbar ist – und keine andere Theorie ausreicht, um unsere Welt zu beschreiben. Die Physikerin Mirjam Weilenmann vom Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Wien hat zusammen mit dem Mathematiker Roger Colbeck von der University of York argumentiert, dass es möglich sein könnte, alle alternativen physikalischen Theorien durch geeignete Bell-ähnliche Experimente zu verwerfen. Sollte sich das bewahrheiten, wäre die Quantenmechanik tatsächlich das einzige Modell, das mit experimentellen Beobachtungen vereinbar ist. ◀

QUELLEN

Chen, M. C. et al.: Ruling Out Real-Valued Standard Formalism of Quantum Theory. *Physical Review Letters* 128, 2022

Li, Z. D. et al.: Testing Real Quantum Theory in an Optical Quantum Network. *Physical Review Letters* 128, 2022

McKague, M. et al.: Simulating Quantum Systems Using Real Hilbert Spaces. *Physical Review A* 102, 2009

Pal, K. F. et al.: Family of Bell inequalities violated by higher-dimensional bound entangled states. *Physical Review A* 96, 2017

Renou, M. O. et al.: Quantum theory based on real numbers can be experimentally falsified. *Nature* 600, 2021

Wu, D. et al.: Experimental Refutation of Real-Valued Quantum Mechanics under Strict Locality Conditions. *Review Letters* 129, 2022

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 **20**
17.05.
2023

TOPOLOGISCHE QUANTENCOMPUTER
**Berechnungen
im Flachland**

Nichtabelsche Anyonen sind exotische Teilchen, die eine neue Ära von Quantencomputern einläuten würden. Bisher existieren sie nur auf dem Papier, konnten nun aber erfolgreich auf Quantenprozessoren simuliert werden.

MINDERJÄHRIGE STRAFTÄTER
Gewalt von Kindern kommt niemals aus dem Nichts

»VERHEERENDE« PLÄNE
Artenhilfsprogramme sollen drastisch gekürzt werden

- » Bedrohter Kongo-Regenwald: Der Moment des großen Ausatmens
- » Intensivlandwirtschaft steckt hinter dem Vogelsterben
- » Kiffen verantwortlich für jede dritte Psychose bei jungen Männern?
- » Wir fühlen uns immer länger jung

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

