

Spektrum

der Wissenschaft

Teilchen aus dem Nichts

Der Unruh-Effekt im Labor

9,30 € (D/A/L) · 14,- sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

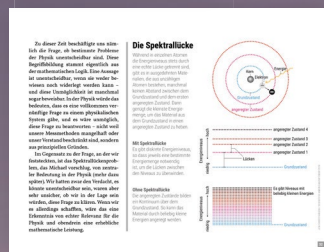
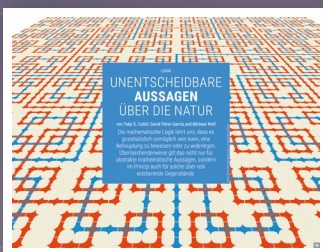
SINGVÖGEL **Wie sie ihren eigenen Gesang wahrnehmen**
ASTRONOMIE **Das letzte Aufbäumen sterbender Sterne**
2-D-STOFFE **Revolution in der Materialwissenschaft**



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)

Gesang der Vögel



Daniel Lingenhöhl
 Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

Zu meiner Lieblingslektüre gehören Expeditionsberichte – bevorzugt, wenn sie zu den letzten weißen Flecken der Erde führen: mit Uwe George von »GEO« zu den Tepuis im venezolanischen Regenwald, mit Jacques Cousteau in die Weltmeere oder mit dem US-Autor Don Stap in das peruanische Amazonasgebiet auf der Suche nach unbekannt Arten. Stap begleitet auf seiner Reise den leider viel zu früh verstorbenen Ornithologen Ted Parker, der eine Form von absolutem Gehör

besaß: Er konnte zahlreiche lateinamerikanische Vogelarten allein an ihren Lautäußerungen unterscheiden – mehrere tausend Spezies.

Parkers Wissen war so groß, dass er sogar anhand der gehörten Vogelgesänge in bestimmten Regionen voraussagen konnte, ob sich dort noch unbekannt Arten verbergen. Oft genug führte die Spur dieser Klänge tatsächlich zu Vögeln, die wissenschaftlich bislang nicht beschrieben waren. Ted Parker hatte sie herausgehört! Zusammen mit dem kongenialen Botaniker Alwyn Gentry verstarb Parker 1993 nach einem Flugzeugabsturz während einer Expedition in Ecuador.

Inzwischen erkennen Biologen reihenweise neue, so genannte kryptische, Vogelarten, die einander praktisch gleichen, aber völlig unterschiedliche Gesänge aufweisen. Dadurch können sie nicht miteinander kommunizieren und sich letztlich wegen dieser Barriere auch nicht fortpflanzen. Und das ist womöglich noch lange nicht alles. Denn wie unser Artikel ab S. 36 zeigt, nehmen Vögel den Gesang ihrer Artgenossen noch mal ganz anders wahr als wir Menschen. Der Neurowissenschaftler Adam Fishbein hat durch Tests herausgefunden, dass die Tiere auf feinste akustische Details achten, die wir Menschen praktisch nicht erfassen können. Der zoologischen Kommunikationsforschung eröffnen sich damit völlig neue Möglichkeiten. Ted Parker wäre sicher begeistert gewesen.

Während wir uns mit dem nahenden Frühling auf das wohlklingende Vogelkonzert freuen können, vollzieht sich im Meer – für uns nicht hörbar – die gegenteilige Entwicklung: Die Ozeane leiden zunehmend unter Lärmverschmutzung, wie Tim Kalvelage in seinem Artikel (S. 46) beschreibt. Die Kakophonie aus Motoren, Schallkanonen, Baumaßnahmen und anderen menschlichen Geräuschquellen stört die Kommunikation der Meeresbewohner und kann bis zum Tod von Walen und Delfinen führen. Es wird Zeit für entsprechende Schutzmaßnahmen in den Weltmeeren, damit zukünftige Expeditionen noch Walgesängen oder plappernden Fischen lauschen können und nicht nur Krach aufzeichnen.

Leise grüßt

In dieser Ausgabe

Silke Weinfurter

Die Physikerin erforscht seit 20 Jahren für uns unerreichbare Phänomene wie Schwarze Löcher im Labor. Im Interview ab S. 22 erklärt sie, was der relativistische Unruh-Effekt mit einem beschleunigten Steak zu tun hat.



Adam Fishbein

Wie Vögel ihren eigenen Gesang wahrnehmen, schildert der US-amerikanische Neurowissenschaftler ab S. 36.



Sophie Roman und Cyprien Soullain

Die beiden Fluidynamiker erforschen Flüssigkeiten im Mikrometermaßstab. Hier klären sie, warum das hilft, dichte CO₂-Speicherstätten zu finden und vergiftete Böden zu sanieren (online unter www.spektrum.de/plus).



3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

24 Mumienwerkstatt

Die Ägypter importierten dafür exotische Harze.

27 Todbringende Schmelze

Gletscherrückzug machte die Meere unbewohnbar.

29 Verborgene Vielfalt

In Deutschland leben tausende unbekannte Tierarten.

31 Lange Kohlenhydratketten

Neuer Synthesautomat für spezielle Zuckerpolymere.

33 IMPRESSUM

SPRINGER'S EINWÜRFE

34 Schlechte Luft

Die Luft in Innenräumen enthält oft Schadstoffe.

45 IM BILD

SCHLICHTING!

64 Physik des Osterfeuers

Bei dem Spektakel laufen spannende Prozesse ab.

FREISTETTERS FORMELWELT

78 Wie wir die Erde retten

Das Astroengineering braucht eine Milliarde Jahre.

80 FUTUR III

82 VORSCHAU

Nach Seite 83 finden Sie folgende Artikel:

GEOLOGIE

Mit Chiplabors den Untergrund verstehen

REZENSIONEN

TITELTHEMA

12 Teilchen aus dem Nichts

Wenn man stark beschleunigt, tauchen im Vakuum plötzlich Teilchen auf, die ein ruhender Beobachter nicht sieht. Dieser seltsame »Unruh-Effekt« könnte nun bald im Labor beobachtet werden.

Von Manon Bischoff

22 »Ich bin mir nicht sicher, ob ich es verstehe«

Mehrere Experimente sollen demnächst den Unruh-Effekt nachweisen. Wie genau, erklärt die Physikerin Silke Weinfurter im Interview.

ORNITHOLOGIE

36 Wie Vögel ihren Gesang wahrnehmen

Für Finken und Co scheint ihr eigenes Tirilieren ganz anders zu klingen als für menschliche Ohren. Offenbar achten die Tiere viel stärker auf feinste Details.

Von Adam Fishbein

MEERESFORSCHUNG

46 Der neue Klang der Ozeane

SERIE: OZEANE (TEIL 2) Der von Menschen und ihren Maschinen verursachte Lärm unter Wasser nimmt immer weiter zu und bedroht viele Lebewesen in den Weltmeeren.

Von Tim Kalvelage

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

54 Flüssige Stromspeicher

Redox-Flow-Batterien eignen sich gut als Reservoirs für Strom aus Windrädern und Solaranlagen, denn sie können viel Energie speichern. Ihre Funktionsweise zeigt sich eindrucksvoll im Laborexperiment.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

ASTROPHYSIK

58 Das letzte Aufbäumen sterbender Sterne

Am Ende ihres Lebens erzeugen sonnenähnliche Sterne leuchtende Nebel aus Gas und Staub. Neue Erkenntnisse zeigen: Deren Form wird wohl oft von unsichtbaren Begleitern bestimmt.

Von Dana Mackenzie

FESTKÖRPERPHYSIK

66 Magie im Flachland

Hochtemperatursupraleitung, Quantensensoren und stabile Quantencomputer – zweidimensionale Materialien bergen ein erstaunliches Potenzial. In den letzten Jahren gab es hier große Fortschritte.

Von Charlie Wood

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



PKXPARTICLE / GETTY IMAGES / ISTOCK

12 Teilchen aus dem Nichts



36 Vogelgesang

TIM FLACH



46 Tödlicher Lärm im Ozean

GREYPIFFLOW / STOCK.ADOBE.COM



58 Sterbende Sterne

NASA'S HUBBLE (WWW.NASA.GOV/OUT/IMAGES/GALLERY/IMAGE_FEATURE_25261114)



66 Magie im Flachland

KYSIMAGE / GETTY IMAGES / ISTOCK



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

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

Ein Teddybär auf dem Mars

Seit 2006 umrundet die HiRISE-Kamera an Bord der Raumsonde »Mars Reconnaissance Orbiter« unseren Nachbarplaneten und fotografiert seine Oberflächenstrukturen in hoher Auflösung. Zu den bisher abgelichteten Phänomenen gehören Staubteufel, spinnenähnliche Vertiefungen und Dünen, die wie Fischschuppen aussehen. Dazu gesellt sich nun ein »Teddybär« mit rundem Gesicht, Knopfaugen und schmaler Schnauze.

Das kreisförmige Bruchmuster hat einen Durchmesser von etwa zwei Kilometern. Dort liegt möglicherweise ein Einschlagkrater im Untergrund verborgen, der sich mit Auswurfmaterial aus einem zentralen Vulkan- oder Schlammschlot (der »Nase«) gefüllt hat. Die beiden augenähnlichen Vertiefungen entstanden bei Meteoriteneinschlägen.

www.uahirise.org/de/ESP_076769_1380, 2023



BILDUNGSFORSCHUNG

Lerndefizit der »Generation Corona« ist immens

Die Quarantänemaßnahmen während der Covid-19-Pandemie haben zu erheblichen Lerndefiziten bei Schülerinnen und Schülern geführt. Das zeigt die Metastudie eines Teams um Bastian Betthäuser von der University of Oxford. Demnach haben die Kinder im Schnitt etwa 35 Prozent ihres normalen Lernfortschritts eingebüßt. Die Bildungsverluste sind in einkommensschwachen Familien am größten – und in Mathematik.

Nach UNO-Angaben konnten pandemiebedingt rund 1,6 Milliarden Schüler und Schülerinnen in 190 Ländern zeitweise nicht zur Schule gehen. Das hat sich auf die kognitive und psychosoziale Entwicklung sowie auf die körperliche Verfassung negativ ausgewirkt, wie entsprechende Untersuchungen belegen. Die Metaanalyse von Betthäuser und Co schloss 42 Studien aus 15 Ländern ein, darunter vor allem solche aus Großbritannien und den USA. Neben Lerndefiziten in verschiedenen Schulfächern erfasste sie auch den soziodemografischen Status und das Durchschnittseinkommen jedes Landes.

Aus der Analyse geht hervor, dass sich die Lernfortschritte während der Pandemie erheblich verlangsamt haben. Betroffen waren vor allem Kinder aus bildungsfernen Milieus. In Ländern mittleren Durchschnittseinkommens wie Brasilien und Mexiko war das Lerndefizit größer als in Staaten hohen Durchschnittseinkommens, etwa den USA und Großbritannien. Zwischen den einzelnen Klassenstufen ließen sich keine deutlichen Unterschiede erkennen, belastbare Daten zu Geschlechterunterschieden fehlen bislang. In Mathematik fielen die Kinder stärker zurück als in Lesekompetenzen, vermutlich weil Eltern mit ihrem Nachwuchs

eher gemeinsam Bücher anschauen als Mathematikaufgaben bearbeiten.

Erkennbar ist zudem, dass das Lerndefizit über Mai 2022 hinaus anhielt. Solche Lücken zu schließen, sei sehr schwierig, betonen Bildungsforscher. Viele Länder hätten die ersten Gelegenheiten hierfür, beispielsweise in Form von Sommer-schulen, verpasst oder nur unzureichend genutzt. Damit sei noch mehr Zeit verloren gegangen. Der Mangel an Lehrkräften erschwere das Aufholen zusätzlich, insbesondere für Schüler und Schülerinnen aus einkommensschwachen Haushalten.

Experten kritisieren in dem Zusammenhang ebenso die Digitalisierungsmaßnahmen. Diese hätten nicht den Lernfortschritt gerettet, wie vielfach angenommen, sondern seien im Gegenteil zum Treiber von Bildungslücken geworden. »Was vielfach geschehen ist – Lernenden Tablets in die Hand zu drücken und zu hoffen, dass diese positiv wirken –, ist als gescheitert anzusehen«, sagt der Bildungsforscher Klaus Zierer von der Universität Augsburg. Der Konsum digitaler Medien in der Freizeit habe sich dadurch sogar erhöht.

Nature Human Behaviour 10.1038/s41562-022-01506-4, 2023

PHYSIK

Kalte Stahlkugeln erzeugen neue Form von Eis

Wassereis existiert in zahlreichen Strukturvarianten, was die Ordnung seiner molekularen Bestandteile anbelangt. Längst nicht alle davon sind abschließend erforscht. Ein Team um Christoph Salzmann vom University College London hat nun eine weitere Form beschrieben: amorphes Eis mittlerer Dichte (MDA, von »medium-density amorphous«). Amorph bedeutet »gestaltlos« und bezeichnet Stoffe, deren Bestandteile keine geordnete Struktur aufweisen



KALTER STAHL Mit Hilfe tiefgekühlter Stahlkugeln haben Physiker eine neue Form von Eis erzeugt.

und somit einen Gegensatz zu kristallinen Stoffen darstellen.

»Wir kennen 20 kristalline Formen von Wassereis – aber nur zwei Haupttypen von amorphem, nämlich solches mit hoher und solches mit niedriger Dichte. Die gängige Meinung der Fachleute war, dass es zwischen diesen beiden keine mittlere Variante gibt«, erläutert Salzmann. In einschlägigen Experimenten gab sein Team kristallines Eis zusammen mit Stahlkugeln, die auf minus 200 Grad Celsius gekühlt waren, in eine Schüttelmaschine. Dort wurde das gefrorene Wasser zerstampft.

Die Behandlung brachte kein weißes Pulver hervor, wie es die Forscherinnen und Forscher erwartet hatten, sondern MDA mit der gleichen Dichte wie flüssiges Wasser. Der Stoff verhält sich vermutlich wie Glas, schreibt das Team. Das würde bedeuten, er erscheint über kurze Zeiträume als fest, fließt langfristig betrachtet aber wie eine stark viskose Flüssigkeit.

Der große Dichteunterschied zwischen den beiden zuvor bekannten amorphen Eisvarianten hatte Wissenschaftler vermuten lassen, dass Wasser bei sehr niedrigen Temperaturen zwei verschiedene flüssige Formen annehmen kann. Diese könnten theoretisch gleichzeitig nebeneinander existieren und Emulsionen bilden – ähnlich einem Öl-Wasser-Gemisch. Die neue Studie stellt das allerdings in Frage.

Amorphes Wassereis kommt auf der Erde extrem selten vor. Auf den Eismonden von Saturn und Jupiter jedoch könnte es amorphe Zustände einschließlich MDA geben, spekulieren Salzmann und Co. Denn die Gezeitenkräfte beider Gasriesen üben auf kristallines Eis womöglich ähnliche Scherkräfte aus wie die Stahlkugeln im Experiment. Erwärmt man MDA und lässt es wieder kristallisieren, setzt es sehr viel Wärmeenergie frei. Auf Eismonden wie Ganymed löst das vielleicht tektonische Bewegungen und Beben aus.

Science 10.1126/science.abq210, 2023

TECHNIK

NASA entwickelt Marsrakete mit Nuklearantrieb

► Raumfahrzeuge mit nuklearthermischem Antrieb könnten es ermöglichen, schneller durchs All zu reisen als bisher. Noch existieren sie nur auf dem Papier. Doch die US-Weltraumbehörde NASA arbeitet jetzt mit der Darpa zusammen, der Forschungsbehörde des US-Verteidigungsministeriums, um einen solchen Antrieb zu

realisieren. Schon im Jahr 2027 könnte ein Testflug stattfinden, teilen beide Einrichtungen mit.

Nuklearthermische Triebwerke verleihen einer Rakete theoretisch ein höheres Tempo als konventionelle chemische – und das bei sparsamerem Treibstoffverbrauch. Vor allem bei bemannten Marsmissionen wäre das vorteilhaft, denn je kürzer der Flug, umso geringer das Risiko für die Besatzung, vor allem hinsichtlich der Strahlenbelastung im interplanetaren Raum.

Bei einem solchen Antrieb erhitzt ein Atomreaktor eine zunächst flüssige Substanz wie Wasserstoff. Das Material wird dadurch gasförmig und über eine Düse am Heck ausgestoßen, was das Raumfahrzeug nach vorn beschleunigt. Laut NASA funktioniert das, bezogen auf den Treibstoffverbrauch, mindestens dreimal so effizient wie klassische chemische Antriebe. Damit ausgerüstet, könnte ein Raumschiff den Mars bereits in drei Monaten erreichen. Bislang kalkulieren Fachleute mit der doppelten bis dreifachen Dauer.

Letztmals hätten die USA einen nuklearthermischen Antrieb vor fünf Jahrzehnten erprobt, schreibt die NASA. Nun will sie die Idee mit Blick auf künftige Mond- und Mars Expeditionen wiederbeleben. Entsprechende Triebwerke würden allerdings

nicht für den Start in die Erdumlaufbahn genutzt, sondern erst im All eingesetzt – beispielsweise beim Abflug von einer künftigen Mondbasis aus in Richtung Mars.

Das Direktorat für Raumfahrttechnologie der NASA wird die technische Entwicklung des Triebwerks leiten. Dieses soll dann in ein experimentelles Raumfahrzeug der Darpa integriert werden.

Gemeinsame Pressemitteilung der NASA und Darpa vom 24. Januar 2023

CHEMIE

»Ewigkeitschemikalien« sollen verboten werden

► PFAS-Chemikalien (von »per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen«) weisen Schmutz, Wasser und Fette ab. In Produkten wie beschichteten Pfannen und Jacken sind sie häufig zu finden. Ihre Umweltbilanz fällt freilich wenig günstig aus. Deshalb möchten Deutschland, Dänemark, die Niederlande, Norwegen und Schweden in einer gemeinsamen Initiative sämtliche Verbindungen dieser Substanzklasse verbieten.



VOLLGAS Ein nuklearthermisches Versuchstriebwerk auf einem Teststand der NASA.

Laut behördlichen Angaben könnten in den kommenden 30 Jahren rund 4,4 Millionen Tonnen PFAS in die Umwelt gelangen, sofern nichts dagegen unternommen wird. Das ist problematisch, da die Substanzen über sehr lange Zeiträume hinweg erhalten bleiben. Sie sammeln sich unter anderem im menschlichen Organismus an, eventuell mit gesundheitlichen Folgen. Einige Studien weisen darauf hin, dass PFAS Leberschäden verursachen oder die Immunfunktion beeinträchtigen könnten. Für die meisten Stoffe aus dieser Klasse ist die entsprechende Evidenz allerdings noch dünn.

Die EU-Chemikalienagentur (ECHA) will nun prüfen, ob ein Verbot mit EU-Recht vereinbar ist. Falls ja, folgt eine wissenschaftliche Untersuchung des Vorschlags. Im Anschluss entscheiden die EU-Kommission und die EU-Staaten über etwaige Beschränkungen. Das könnte 2025 geschehen.

Der ECHA zufolge wäre es eines der umfangreichsten Verbote chemischer Stoffe in Europa. Unternehmen wären gezwungen, bei rund 10 000 Anwendungen nach Alternativen zu suchen. Dafür sollen sie bis zu zwölf Jahre Zeit bekommen – je nachdem, ob bereits Ersatzstoffe verfügbar sind. Ausnahmen soll es nur vereinzelt geben. So existiere bislang kein PFAS-Ersatz für Feuerschutzkleidung oder Feuerlöschschaum, heißt es aus dem Bundesumweltministerium.

Experten begrüßen die Initiative. »In vielen Fällen – vor allem für Kon-

sumgüter – sind Alternativen zu PFAS vorhanden oder deren Verwendung ist nicht essenziell. Hier wird ein Verbot schnell greifen und für eine spürbar verminderte Belastung durch Haushaltsgüter sorgen«, sagt etwa Rainer Lohmann von der University of Rhode Island in Kingston.

Pressemitteilung des Umweltbundesamts vom 13.1. 2023

PALÄO BIOLOGIE

»Höllenschweine« waren vermutlich Allesfresser

► 38 bis 19 Millionen Jahre vor heute, während der Zeitalter des Eo- und Miozäns, besiedelten große Paarhufer aus der Gruppe der Schweineartigen die Erde: so genannte Entelodontidae. Sie hatten massige Körper mit gewaltigen Schädeln und starken Hauern. Manche ihrer Vertreter, etwa aus der Gattung *Daeodon*, erreichten gut zwei Meter Schulterhöhe. Wegen ihres robusten Körperbaus, ihrer raubtierartig nach vorn gerichteten Augen und ihres beeindruckenden Gebisses werden sie oft als »Höllenschweine« bezeichnet. Viele Fachleute vermuten, dass es sich um Jäger mit Knochen zermalmenden Kräften handelte. Ein Team um Florent Rivals von der Wissenschaftseinrichtung ICREA in Spanien hat jetzt Belege

dafür gefunden, dass das Fressverhalten dieser Tiere vielleicht doch nicht ganz so furchteinflößend war.

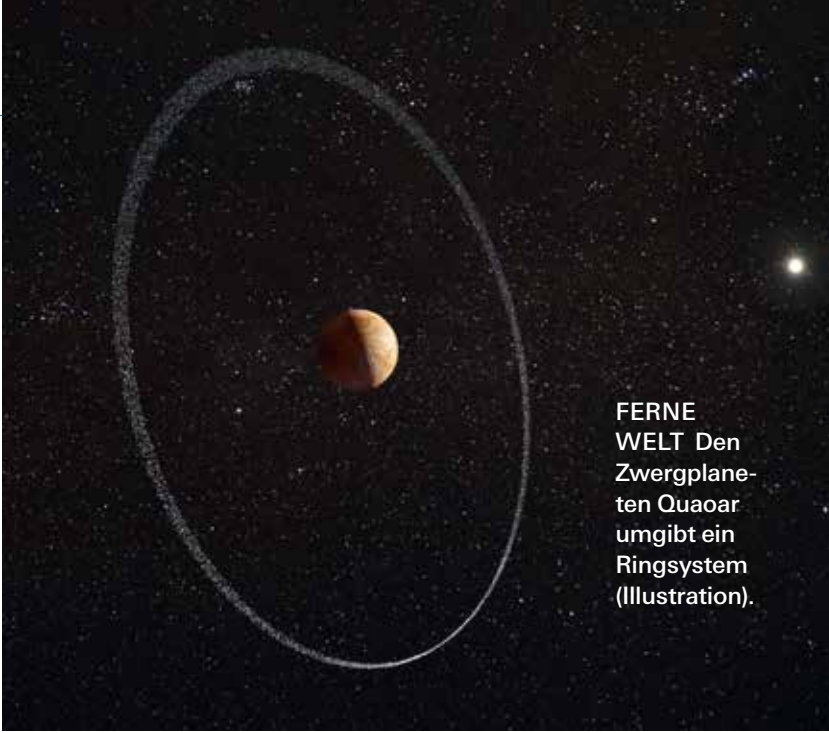
Die Forscherinnen und Forscher analysierten Zähne von Entelodontidae und Anthracotheriidae, einer weiteren ausgestorbenen Gruppe schweineähnlicher Paarhufer. Dabei untersuchten sie die Abnutzungsspuren des Gebisses und verglichen sie mit denen von Bären, Raubkatzen, Füchsen, Ottern, Elchen, Bisons und anderen Tieren. Je nach bevorzugter Diät zeigt sich auf den Zähnen ein charakteristisches Verschleißmuster aus Gruben, Kerben, Schleifspuren oder punktförmigen Vertiefungen.

Den Ergebnissen zufolge waren die Entelodontidae wohl Allesfresser, vergleichbar heutigen Bären oder Wildschweinen. Zu deren Nahrungsspektrum gehören zwar kleine Wirbeltiere, Aas einschließlich Knochen und bei Bären bisweilen auch größere Tiere. Üblicherweise decken sie ihren Bedarf aber hauptsächlich mit Pflanzenkost und Insekten – ausgenommen Eisbären, die einzigen überwiegenden Fleischfresser in der Familie der Bären. Wahrscheinlich, so das Autorenteam, habe der Speisezettel der Entelodontidae jahreszeitlich stark variiert, wie bei heutigen Bären. Die Anthracotheriidae wiederum waren laut den Analysen reine Pflanzenfresser und konsumierten je nach Art Blätter, Gras oder überwiegend Früchte.

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 10.1016/j.palaeo.2022.111363, 2023



WILL NUR SPIELEN So könnten »Höllenschweine« der Gattung *Daeodon* ausgesehen haben.



FERNE WELT Den Zwergplaneten Quaoar umgibt ein Ringsystem (Illustration).

ASTRONOMIE

Zwergplanet Quaoar hat rätselhafte Ringe

Der Zwergplanet Quaoar ist mit einem Durchmesser von knapp 1100 Kilometern etwa halb so groß wie Pluto und zieht seine Bahn jenseits von Neptun. Ein Forschungsteam um Bruno Morgado von der Bundesuniversität Rio de Janeiro in Brasilien hat jetzt entdeckt, dass Quaoar ein Ringsystem besitzt, das es gängigen Theorien zufolge gar nicht geben dürfte. Die Wissenschaftler nutzten hierfür das Großteleskop »Gran Telescopio Canarias« auf La Palma.

Ringe aus Eis und Gestein sind nicht ungewöhnlich: Planeten wie Saturn und Neptun besitzen welche, aber auch andere Himmelskörper unseres Sonnensystems wie der Asteroid Chariklo. Quaoars Ringe liegen jedoch jenseits der so genannten Roche-Grenze und damit überraschend weit vom Zwergplaneten entfernt. Laut gängiger Auffassung sollten sie nur innerhalb der Roche-Grenze existieren können, wo sich das Material wegen der stärkeren Gravitationswirkung des Zwergplaneten nicht zusammenballen kann.

Außerhalb davon müssten Gestein und Eisbrocken eigentlich rasch aggregieren und Monde formen.

Weil der erst 2002 entdeckte Quaoar rund 6,5 Milliarden Kilometer von uns entfernt ist, erscheint er selbst auf Aufnahmen von Großteleskopen lediglich als kleiner Fleck. Sein schwach leuchtendes Ringsystem lässt sich nur indirekt nachweisen. Zieht Quaoar von uns aus gesehen vor einem Stern vorbei und bedeckt ihn kurzzeitig, fällt dessen Helligkeit dreimal ab: erst schwach, dann stark, dann wieder schwach. Daraus schließt das Team auf die Existenz der Ringe, die Quaoar in schätzungsweise 4100 Kilometer Entfernung umgeben.

Vielleicht hat sich aus ihnen kein Mond gebildet, weil Weywot, ein 170 Kilometer großer Trabant von Quaoar, dessen Entstehung mit seiner Schwerkraft verhindert. Begegnungen mit Weywot könnten die Gesteins- und Eisbrocken immer wieder beschleunigen, so dass sie nie zusammenklumpen. Ebenso ist ein kürzlich zerstörter Mond denkbar, dessen Trümmer jetzt Quaoar umkreisen. Das halten Fachleute jedoch für wenig wahrscheinlich, weil sich die Trümmer bereits binnen weniger Jahrzehnte wieder zusammenballen müssten.

Nature 10.1038/s41586-022-05629-6, 2023

PSYCHOLOGIE

Schon Dreijährige erkennen selbstsüchtige Ausreden

Wenn Eltern etwas versprechen und dann nicht einhalten, sollten sie einen guten Grund vorbringen: Schon Kleinkinder erkennen selbstsüchtige Ausreden. Zu diesem Ergebnis kommen Forscher von der Duke University um den Psychologen Michael Tomasello. Das Team führte Tests mit 64 Kindern im Alter von drei beziehungsweise fünf Jahren durch.

Die Wissenschaftler zeigten den Kleinen verschiedene Videos. Darin versprachen Puppen, ein Spielzeug zu holen, kamen aber mit leeren Händen zurück. Manchmal gaben sie dafür keine Erklärung, manchmal nannten sie einen altruistischen Grund wie »Ich musste meinem Freund helfen«. Mitunter führten sie ein egoistisches Motiv an wie »Ich wollte fernsehen«.

Egal, welche Erklärung und ob überhaupt eine: Dass die Puppen ihr Versprechen gebrochen hatten, fanden die Kinder nicht in Ordnung. Mehr Verständnis hatten sie allerdings, wenn es einen solidarischen Grund dafür gab. Eine selbstsüchtige Ausrede empfanden sie als ebenso unzureichend wie überhaupt keine. Sie hatten demnach die soziale Norm verinnerlicht, dass altruistische Motive mehr zählen als egoistische. Die Fünfjährigen konnten das auf Nachfrage sogar erklären, die Dreijährigen noch nicht.

Konsequenzen zogen die Kinder daraus keine. Egal ob guter oder schlechter Vorwand: Sie mochten die Puppen gleichermaßen und wollten unverändert gern mit ihnen spielen. Bricht jemand ein Versprechen aus fadenscheinigen Gründen, deutet das meist darauf hin, dass er kein guter Freund ist. Diesen Zusammenhang sahen die Kleinen anscheinend nicht.

Cognitive Development 1.1016/ j.cogdev.2022.101268, 2022

RELATIVITÄTSTHEORIE

Teilchen aus dem Nichts

Wenn man stark beschleunigt, tauchen gemäß theoretischen Überlegungen im Vakuum plötzlich Teilchen auf, die ein ruhender Beobachter nicht sieht. Dieser seltsame »Unruh-Effekt« könnte nun bald im Labor beobachtet werden.

» spektrum.de/artikel/2108265



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

FLUCHTGESCHWINDIGKEIT Damit ein Objekt von der Anziehungskraft der Erde entfliehen kann, muss es eine Mindestgeschwindigkeit erreichen. Bei Schwarzen Löchern übersteigt diese den Wert der Lichtgeschwindigkeit.

AUF EINEN BLICK

Alles ist relativ – auch Teilchen

- 1** Der Unruh-Effekt ist einer der seltsamsten Vorhersagen der Relativitätstheorie: Für einen beschleunigten Beobachter füllt sich der leere Raum plötzlich mit lauter Teilchen.
- 2** Eine ruhende Person sieht davon allerdings nichts. Aus ihrer Perspektive sendet das bewegte Objekt aber Strahlung aus.
- 3** Bisher konnte man den Unruh-Effekt nicht beobachten. Doch es gibt ausgeklügelte Ideen, um das Phänomen zu verstärken – und eine experimentelle Umsetzung zu ermöglichen.

Stellen Sie sich vor, Sie sitzen neben Han Solo und Chewbacca an Bord des Millennium Falken, eines der schnellsten Schiffe der Galaxis. Sie haben kaum Zeit, sich anzuschlappen, schon geht es los. Das Raumschiff beschleunigt und beginnt seine Reise durch den Hyperraum. Die dunkle Umgebung wird immer heller, während massenhaft leuchtende Punkte an Ihnen vorbeirauschen.

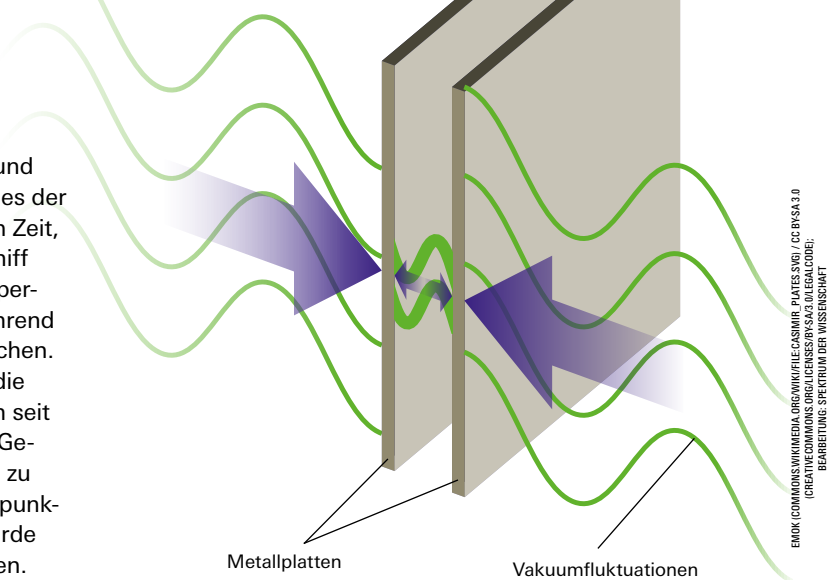
Star-Wars-Fans erinnern sich wahrscheinlich an die legendären Filmszenen, die Millionen von Menschen seit Jahrzehnten in ihren Bann ziehen. So spannend die Geschichte ist – mit echter Wissenschaft hat sie wenig zu tun. Denn eigentlich sollen die vorbeirasenden Lichtpunkte die Sterne darstellen, doch der Doppler-Effekt würde sie bei solchen Beschleunigungen unsichtbar machen. Trotzdem könnte die eingangs geschilderte Szene gar nicht so weit von der Wirklichkeit entfernt sein. Die vorbeiziehenden Lichter kämen in diesem Fall nicht von den Sternen, sondern von aufpoppenden Partikeln. In den kommenden Jahren könnten Physikerinnen und Physiker sogar Zeuge davon werden.

Die Rede ist von einem relativistischen Phänomen, das im Gegensatz zur Krümmung von Raum und Zeit oder strahlenden Schwarzen Löchern der breiten Masse kaum bekannt ist: der Unruh-Effekt. Dieser beschreibt, was eine beschleunigte Person, die sich durch ein Vakuum bewegt, erlebt. Sie hat das Gefühl, durch eine Umgebung voller Teilchen zu fliegen, die eine erhöhte Temperatur erzeugen. Ein ruhender Beobachter sieht hingegen nichts von alledem – außer natürlich der sich bewegenden Person. Das verleiht der einsteinschen Relativitätstheorie eine ganz neue Dimension. Nun hängen nicht nur Zeitspannen und Distanzen vom Bezugssystem ab – sondern auch die Existenz von Teilchen!

Eine Idee von Einstein als Inspiration

Das Phänomen hat der Physiker William Unruh, aufbauend auf der Forschung von Steve Fulling und Paul Davies, Mitte der 1970er Jahre entdeckt. Doch die Arbeiten sind rein theoretischer Natur – direkt beobachten konnte den Effekt niemand. Grund dafür sind die extremen Bedingungen, die dafür nötig sind: Um eine Temperaturänderung von bloß einem Grad Celsius zu erleben, müsste man auf 10^{20} Meter pro Quadratsekunde beschleunigen – »also von null auf 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit innerhalb von 10^{-12} Sekunden«, erklärt Unruh.

Inzwischen gibt es zahlreiche ausgeklügelte Ansätze von Forscherinnen und Forschern, die es ermöglichen sollen, den Unruh-Effekt experimentell nachzuweisen. Viel versprechend ist unter anderem eine Arbeit von Achim Kempf und Barbara Šoda vom Perimeter Institute for Theoretical Physics und der University of Waterloo, die sie gemeinsam mit Vivashek Sudhir vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge verfasst haben. Darin schildern sie eine Methode, um den Unruh-Effekt zu verstärken und somit unter realistischen Laborbedingungen messbar zu machen. Hierfür greifen sie eine Idee von Albert Einstein auf, die zur Entwicklung von Lasern geführt hat.



CASIMIR-EFFEKT Zwei Metallplatten im Vakuum ziehen sich an. Grund dafür sind Vakuumschwankungen: Im Zwischenraum gibt es weniger virtuelle Teilchen als außerhalb der Platten.

Der Unruh-Effekt ist für Fachleute besonders spannend, weil er eng mit Schwarzen Löchern zusammenhängt. Wie der berühmte Astrophysiker Stephen Hawking 1973 erkannte, sind diese galaktischen Ungetüme nicht einfach nur von luftleerem Raum umgeben, sondern strahlen Teilchen aus. »Der Unruh-Effekt ist eine Art Spielwiese für kompliziertere Phänomene wie die Hawking-Strahlung oder das expandierende Universum«, erklärt der Physiker Ulf Leonhardt vom Weizmann-Institut der Wissenschaften in Rehovot. Schwarze Löcher zählen zu den faszinierendsten Objekten unseres Universums, weil sie sowohl von der allgemeinen Relativitätstheorie als auch der Quantenfeldtheorie beeinflusst werden – den beiden grundlegenden Theorien, die die Welt beschreiben, aber miteinander unvereinbar sind.

1915 rüttelte Einstein an unserem traditionellen Weltbild, als er mit der von ihm formulierten allgemeinen Relativitätstheorie zeigte, dass sich die Schwerkraft geometrisch erklären lässt. In diesem Bild krümmt Masse die Raumzeit – und deren Geometrie bestimmt wiederum, wie sich die Materie darin fortbewegt. Seine Theorie betrifft alles Große, also jene Bereiche, in denen die Gravitation die übrigen Grundkräfte übertrumpft: von Planetenbahnen über die beschleunigte Ausdehnung des Universums bis hin zur Rotverschiebung der Lichter von weit entfernten Quasaren.

Die Quantenphysik widmet sich hingegen dem Mikrokosmos, wo die Schwerkraft oft vernachlässigbar ist und die übrigen drei Kräfte an Einfluss gewinnen: die elektromagnetische sowie die starke und die schwache Kernkraft. Das zu Grunde liegende Standardmodell der Teilchenphysik, das auf der Quantenfeldtheorie beruht, beschreibt die Welt der Elementarteilchen und ihr komplexes Zusammenspiel.

Das ganz Große und das ganz Kleine sind inzwischen ziemlich gut verstanden. Sobald man sich jedoch Situationen widmet, in denen die Schwerkraft und die übrigen

drei Grundkräfte gleichermaßen zum Tragen kommen, steht man vor einem Rätsel. Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenphysik lassen sich bislang nicht vereinen – seit Jahrzehnten beißen sich die schlauesten Köpfe an dieser Aufgabe die Zähne aus.

Es gibt allerdings durchaus Phänomene, die eine Quantengravitationstheorie erfordern. Zum Beispiel, wenn man Schwarze Löcher oder den Urknall untersuchen möchte – beides Situationen, bei denen Materie auf kleinstem Raum zusammengepresst ist, so dass alle vier Grundkräfte Einfluss haben. Um solche Probleme anzugehen, müsste man herausfinden, wie Quantenfelder die Raumzeit krümmen und wie diese Krümmung wiederum die Felder beeinflusst. Die theoretische Grundlage für derartige Berechnungen fehlt bisher.

Dennoch haben Fachleute wie Hawking schon früh Methoden entwickelt, um solche Phänomene zumindest näherungsweise beschreiben zu können. Dafür lässt man typischerweise eine Hälfte des Problems weg. Man konzentriert sich beispielsweise nur darauf, wie sich Quantenfelder in gekrümmter Raumzeit verhalten und

ignoriert ihren Einfluss auf die Raumzeitgeometrie. Mit diesem Ansatz konnte Hawking berechnen, dass Schwarze Löcher eine nach ihm benannte Strahlung aussenden – und damit langsam »verdampfen«.

Sowohl bei der Hawking-Strahlung als auch beim Unruh-Effekt scheinen also Teilchen aus dem Nichts zu entstehen, wodurch das Vakuum eine endliche Temperatur erhält. Grund für die erstaunliche Materialisierung ist eine Eigenheit der Relativitätstheorie. Noch im selben Jahr, in dem Einstein seine Gleichungen veröffentlichte, erkannte der Astronom Karl Schwarzschild, dass die Formeln seltsame Lösungen zulassen, wenn sich viel Masse auf kleinem Raum konzentriert. Dann wächst die Schwerkraft des Körpers stark an, was dazu führen kann, dass die Fluchtgeschwindigkeit ab einer bestimmten Distanz die Lichtgeschwindigkeit übersteigt. Das heißt, man müsste unterhalb dieser Grenze (die als Ereignishorizont bekannt ist) schneller fliegen als das Licht, um der starken Gravitation zu entkommen. Sobald ein Objekt – selbst ein masseloses Photon – den Ereignishorizont passiert, kann es der Anziehung nicht mehr entgehen. Weil nicht einmal Licht entweichen kann, werden solche extrem dichten Himmelskörper als Schwarze Löcher bezeichnet.

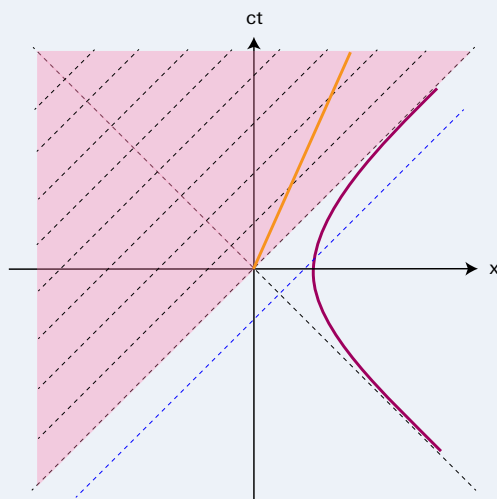
Ereignishorizonte schotten also einen Teil der Raumzeit von den übrigen Bereichen ab. Egal, was sich hinter einem Ereignishorizont abspielt, es hat gemäß der Relativitätstheorie keinerlei Einfluss auf den Rest, weil es die anderen Gebiete niemals erreichen kann. Das wirft zahlreiche Fragen auf, unter anderem physikalischer und philosophischer Natur. Besonders spannend werden Horizonte, wenn man sie unter quantenphysikalischen Aspekten untersucht.

Ein neues Weltbild verändert alles

Denn nicht nur Einstein hat Anfang des 20. Jahrhunderts unser Weltbild auf den Kopf gestellt. Quantenphysiker haben in den 1920er Jahren das Verständnis von Teilchen und Wellen umgekrempelt, die beiden Begriffe lassen sich nicht mehr klar voneinander trennen. In den kommenden Jahren entwickelten Fachleute die Quantenmechanik weiter, und es gelang ihnen, sie mit der speziellen Relativitätstheorie in Einklang zu bringen. Das war die Geburtsstunde der Quantenfeldtheorie. Sie ist bis heute das vorherrschende Modell, um die elektromagnetischen und die zwei Kernkräfte zu beschreiben. Ihr zufolge ist die Raumzeit nicht leer, sondern von Quantenfeldern durchzogen, die jeden Winkel unseres Universums ausfüllen. Wie auf einer gespannten Membran können innerhalb der Felder Schwingungen entstehen, so genannte Anregungen: Wenn beispielsweise ein fester Punkt auf- und aboszilliert, entspricht das einem Elementarteilchen an einem bestimmten Ort.

Selbst im Vakuum sind Quantenfelder niemals völlig statisch, sie wabern ständig um den energetisch niedrigsten Zustand herum. Deshalb ist das Vakuum keineswegs langweilig und leer, sondern ein aufregender Ort. Durch die Schwingungen der Membran entstehen durch »Quan-

Minkowski-Diagramm



Mit solchen Grafiken lassen sich die Bahnkurven von Objekten in der Raumzeit veranschaulichen. Ein ruhender Beobachter bewegt sich nur entlang der ct -Achse, während ein gleichförmig bewegtes Objekt die orange-farbene Trajektorie hinterlässt. Lichtstrahlen folgen Geraden mit Steigung eins. Die lila Bahnkurve beschreibt ein beschleunigtes System mit einem Ereignishorizont: Signale aus dem rosa markierten Bereich der Raumzeit können den beschleunigten Beobachter niemals erreichen.

tenfluktuationen« unentwegt »virtuelle« Teilchen, die sich gleich darauf wieder vernichten. Sie heißen virtuell, weil sie sich von den langlebigen, gewöhnlichen Partikeln unterscheiden. Man kann virtuelle Teilchen nicht direkt messen – ihren Einfluss aber schon.

So etwa beim Casimir-Effekt: Dieser beschreibt zwei Metallplatten, die sich wie durch Zauberhand gegenseitig anziehen – und zwar nicht wegen des geringen gravitativen Effekts, den sie aufeinander ausüben. Die Erklärung dafür geht auf Quantenfluktuationen zurück. Die Schwingungen der elektromagnetischen Felder müssen innerhalb der zwei Platten gewisse Randbedingungen erfüllen (so passt nicht jedes virtuelle Photon mit beliebiger Wellenlänge in diesen Bereich). Deshalb ist die Anzahl der Oszillationen, die im Zwischenraum entstehen können, begrenzt. Außerhalb der Metallplatten ist das anders, dort können alle möglichen Schwingungen und damit virtuelle Partikel auftreten. Da das Vakuum damit innerhalb der Platten »leerer« ist, werden sie zusammengedrückt.

Wenn schon zwei Platten das Vakuum so durcheinanderbringen – was bewirkt dann erst ein unpassierbarer Ereignishorizont? Diese Frage könnte sich Stephen Hawking gestellt haben, als er Quantenfelder in der Nähe von Schwarzen Löchern untersuchte. Ereignishorizonte stellen einen Bruch dar; eine klare Grenze, die Information nicht überschreiten kann. Das quantenphysikalische Vakuum sieht unter dem Einfluss starker Gravitation mit einem Ereignishorizont völlig anders aus als in jener näherungsweise unendlich ausgedehnten, relativ flachen Raumzeit, die wir wahrnehmen. Es ist, als würde man die Schwingungsmembran entlang des Horizonts festhalten. Jener Bereich schwingt nicht mehr mit und ist vom Rest der Oberfläche abgeschirmt. Die Fixierung bewirkt, dass einige oszillierende Wellen am Rand reflektiert werden, während andere komplett fehlen. Die Folge ist drastisch: Manche Schwingungen können sich beispielsweise nicht mehr gegenseitig aufheben, wodurch in der Nähe eines Ereignishorizonts plötzlich Teilchen entstehen, die in der flachen Raumzeit nicht da sind. Die Situation ist also gegensätzlich zum Casimir-Effekt. Während die zwei Metallplatten dazu geführt haben, dass das Vakuum leerer wird, erhöhen Ereignishorizonte die Teilchenzahl.

Hawking erkannte auf diese Weise, dass Schwarze Löcher verdampfen. Denn sie geben wie ein Schwarzkörper allerlei Strahlen gleichmäßig in alle Richtungen ab. Damit lässt sich den galaktischen Ungetümen eine Temperatur zuordnen. Messen konnte man das bisher jedoch nicht. »In der Umgebung von Schwarzen Löchern ist jede Menge los, von Akkretionsscheiben bis zu kosmischen Jets«, erklärt der theoretische Physiker Achim Kempf, »es ist schwer, darunter die Hawking-Strahlung auszumachen.« Zudem entspricht die Wellenlänge der abgegebenen Strahlung ungefähr ihrem Schwarzschild-Radius, der von etwa zehn bis hin zu Millionen Kilometern reicht. »Deshalb sind sie extrem kalt. Diese Temperatur lässt sich unmöglich messen«, so Kempf. Für Experimentalphysiker liegen Schwarze Löcher ebenfalls außerhalb der Reichweite, »schließlich hätten wir ein Problem, wenn wir sie in

unseren Laboren erzeugen würden«, sagt Vivishek Sudhir. Das hat ihn, Šoda und Kempf dazu gebracht, sich anderen Systemen zuzuwenden, um quantenphysikalische Phänomene in der Nähe von Ereignishorizonten zu studieren.

Wie sich herausstellt, sind Schwarze Löcher nicht die einzigen Objekte, die einen Ereignishorizont besitzen. Tatsächlich sind diese unpassierbaren Grenzen sogar viel verbreiteter, als man denkt: Sie brauchen sich nur von Ihrem Stuhl zu erheben und schon erzeugen Sie einen Ereignishorizont. Ein solcher entsteht nämlich durch jede Form von Beschleunigung – ganz gleich, wie stark sie ist. Im Alltag nehmen wir aber weder eine steigende Temperatur noch eine Umgebung voller Teilchen wahr, wenn wir uns in Bewegung setzen oder bremsen. Denn der Unruh-Effekt ist sehr schwach. Da beschleunigte Systeme trotzdem wesentlich nahbarer sind als weit entfernte Schwarze Löcher, haben sich zahlreiche Physikerinnen und Physiker zum Ziel gesetzt, den Unruh-Effekt im Labor nachzuweisen.

Jede Art von Beschleunigung erzeugt einen Ereignishorizont

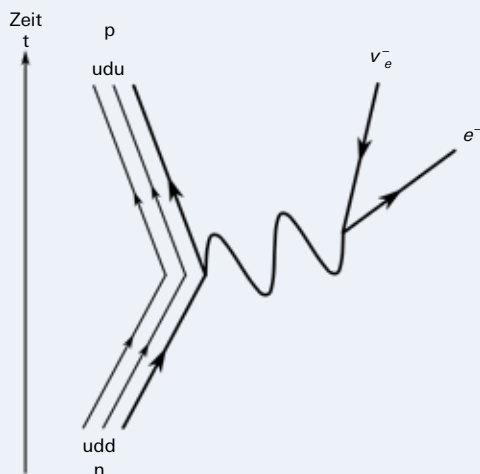
Dafür muss man zunächst verstehen, warum Beschleunigung überhaupt einen Ereignishorizont erzeugt. Einen ersten Hinweis liefert das Äquivalenzprinzip, wonach es zumindest lokal gesehen keinen Unterschied zwischen Beschleunigung und Gravitation gibt. Ein aufsteigender Fahrstuhl fühlt sich ebenso an, als wäre die Erdanziehungskraft stärker. Wenn die Schwerkraft einen Ereignishorizont erzeugen kann, gilt das auch für Beschleunigung.

Stellen Sie sich vor, eine Person rennt aus der Ferne extrem schnell (mit nahezu Lichtgeschwindigkeit) auf Sie zu, wird immer langsamer, bis sie in Ihrer Nähe stehen bleibt und dampft dann wieder in entgegengesetzte Richtung mit wachsender Geschwindigkeit ab. Die Person hat die ganze Zeit über gleichmäßig beschleunigt, wenn man Abbremsen als negative Beschleunigung betrachtet. Um solche Ereignisse zu veranschaulichen, nutzt man so genannte Minkowski-Diagramme. Dabei handelt es sich um ein zweidimensionales Koordinatensystem, wie man es aus der Schule kennt. Allerdings stellt die y-Achse die Zeitrichtung (ct) dar, während die x-Achse einer einzigen

»Ich kam zu dem Schluss, dass die Existenz von Teilchen von der Bewegung eines Detektors abhängt, mit dem die Partikel gemessen werden«

William Unruh

Freier Neutronzerfall



JOEL HOLIDSWORTH (COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKIFILEBETA, NEGATIVE_DECAWAVE) / PUBLIC DOMAIN; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Neutronen und Protonen setzen sich aus jeweils drei Quarks zusammen: Neutron n aus up, down, down (udd); Proton p aus up, down, up (udu). Ein freies Neutron zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa zehn Minuten in je ein Proton, Elektron e^- und Antineutrino $\bar{\nu}_e$. Der Unruh-Effekt könnte diesen Prozess vielleicht umkehren: Ein beschleunigtes Proton könnte dann zu einem Neutron zerfallen, so die Theorie.

Raumrichtung entspricht. Die seltsame Begegnung mit der sich beschleunigenden Person lässt sich in einem solchen Diagramm grafisch darstellen.

Da Sie selbst dabei die ganze Zeit über am selben Ort verharrt haben, folgt Ihre »Bahnkurve« der y-Achse. Ein anderes Objekt wird aus Ihrer Sicht eine Spur im Diagramm hinterlassen, die sowohl in x- als auch y-Richtung verlaufen kann: etwa eine steile Gerade, wenn es sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Die Achsen im Minkowski-Diagramm sind so skaliert, dass die Lichtgeschwindigkeit einer Geraden mit Steigung eins entspricht. Damit muss die Bahnkurve eines Objekts stets steiler sein, da es sich sonst schneller als das Licht bewegen würde, was gemäß der speziellen Relativitätstheorie nicht möglich ist. Wenn eine Person konstant beschleunigt (wie jene, die auf Sie zugerannt kam), wird sich ihre Trajektorie immer stärker an eine Gerade mit Steigung eins annähern, ohne sie jemals zu erreichen – wie eine Hyperbel, die sich an die Koordinatenachsen schmiegt.

Diese Bahnkurve von beschleunigten Objekten hat extrem spannende Eigenschaften. Zum Beispiel könnte die Gerade mit Steigung eins, an die sich die Kurve nähert, von einem Signal mit einer Nachricht stammen, das

Sie zu einem bestimmten Zeitpunkt in Bewegungsrichtung der Person geschickt haben (siehe »Minkowski-Diagramm«). Die Nachricht wird die Person aber niemals erreichen – ebenso wenig wie alle anderen Lichtstrahlen, die von einer Quelle links von Ihrer Position im gezeigten Minkowski-Diagramm ausgesandt werden. Damit markiert die Gerade, an die sich die hyperbolische Bahnkurve schmiegt, einen Ereignishorizont. Alles, was sich jenseits davon abspielt, wird den beschleunigten Beobachter niemals erreichen – weder in der Vergangenheit noch in der Zukunft. Bei gleichförmig bewegten oder ruhenden Objekten ist das anders. Wenn man nur lange genug wartet, wird sie jeder Lichtstrahl aus egal welcher Ecke des Universums erreichen. Überraschenderweise spielt es keine Rolle, wie groß oder klein die Beschleunigung ist. Selbst eine so banale Handlung wie das Losfahren bei einer grünen Ampel erzeugt einen Horizont.

Ähnlich wie bei einem Schwarzen Loch hat das erstaunliche Auswirkungen. Da der Ereignishorizont nur für die beschleunigte Person existiert, nimmt ein ruhender Beobachter den luftleeren Raum als Ort wahr, in dem es gelegentliche Fluktuationen gibt – mehr nicht. Das beschleunigte Bezugssystem ist allerdings von manchen Bereichen der Raumzeit abgeschottet. Dadurch tritt wieder das Phänomen in Kraft, das sich durch eine festgehaltene Schwingungsmembran veranschaulichen lässt: Die wabernden Quantenfelder haben dann eine andere Form als aus ruhender Perspektive. Deshalb nimmt die beschleunigte Person lauter Teilchen wahr, die eine bestimmte Temperatur haben; sie befindet sich in einer Art Wärmebad.

»Ich hatte mich in den 1970er Jahren mit der Frage beschäftigt, wie sich ein Teilchen in Quantenfeldtheorien definieren lässt«, erzählt der Entdecker des Effekts, William Unruh. »Die Entdeckungen von Hawking, Fulling und Parker ließen mich zu dem Schluss kommen, dass die Existenz von Teilchen von der Bewegung (insbesondere der Beschleunigung) eines Detektors abhängt, mit dem die Partikel gemessen werden.«

Schwarze Löcher und beschleunigte Systeme sind sich ähnlich

Wie passen diese zwei verschiedenen Bilder zusammen? Angenommen, die beschleunigte Person würde ein Messgerät mit sich führen, das klickt, sobald es ein Teilchen absorbiert. Das Klicken könnten Sie, während die Person an Ihnen vorbeisaust, ebenfalls hören. Wie sich herausstellt, könnten Sie in dem Fall beobachten, wie der Detektor ein Partikel ausstrahlt. Grund dafür ist, dass das Gerät aus elektrischen Ladungsträgern besteht, etwa Protonen und Elektronen. Wenn diese sich beschleunigt durch den Raum bewegen, regen sie das elektromagnetische Quantenfeld an und produzieren damit Photonen. Auf der anderen Seite kann das Feld ebenfalls die Ladungen anregen. So werden Prozesse möglich, die in ruhenden Systemen niemals stattfinden, etwa dass ein Teilchen angeregt wird (der Detektor klickt) und gleichzeitig ein Photon aussendet. Ein beschleunigtes Messgerät emit-

tiert aus ruhender Perspektive also Strahlung – ähnlich wie ein Schwarzes Loch.

Um den Unruh-Effekt nachzuweisen, müsste man daher einen Detektor beschleunigen und beobachten, ob dieser tatsächlich strahlt. Dafür bräuchte man Beschleunigungen von mindestens 10^{20} Metern pro Quadratsekunde, wodurch zirka 25 Milliarden Milliarden G-Kräfte ausgeübt werden. Das ist mit einem makroskopischen Detektor natürlich nicht möglich.

Doch man kann auch ein vereinfachtes System als Messgerät einsetzen, etwa ein Atom mit zwei Energiezuständen. Ein solches Teilchen kann Photonen bestimmter Energie nachweisen, indem es ein entsprechendes Lichtteilchen absorbiert. Dann geht es vom Grund- in einen angeregten Zustand über. Der Unruh-Effekt würde sich zeigen, wenn man das Atom stark beschleunigt. In diesem Fall könnte es angeregt werden und dabei ein Photon ausstrahlen. Allerdings gestaltet sich der experimentelle Nachweis aus verschiedenen Gründen schwierig.

Zwar ist es möglich, geladene Partikel wie Ionen in Teilchenbeschleunigern stark zu beschleunigen. Dabei überschattet jedoch etwas anderes den möglicherweise entstehenden Unruh-Effekt: die bereits erwähnte elektromagnetische Strahlung, die Ladungen massenhaft ausstrahlen, sobald man sie beschleunigt – die so genannte Bremsstrahlung. Das macht es sehr schwer, innerhalb der emittierten Photonen eines geladenen Teilchens den winzigen Anteil des Unruh-Effekts auszumachen.

2019 haben Physiker um Morgan H. Lynch vom Technion in Haifa behauptet, genau das zu können. Im Spektrum beschleunigter Positronen meinen die Forscher, Hinweise

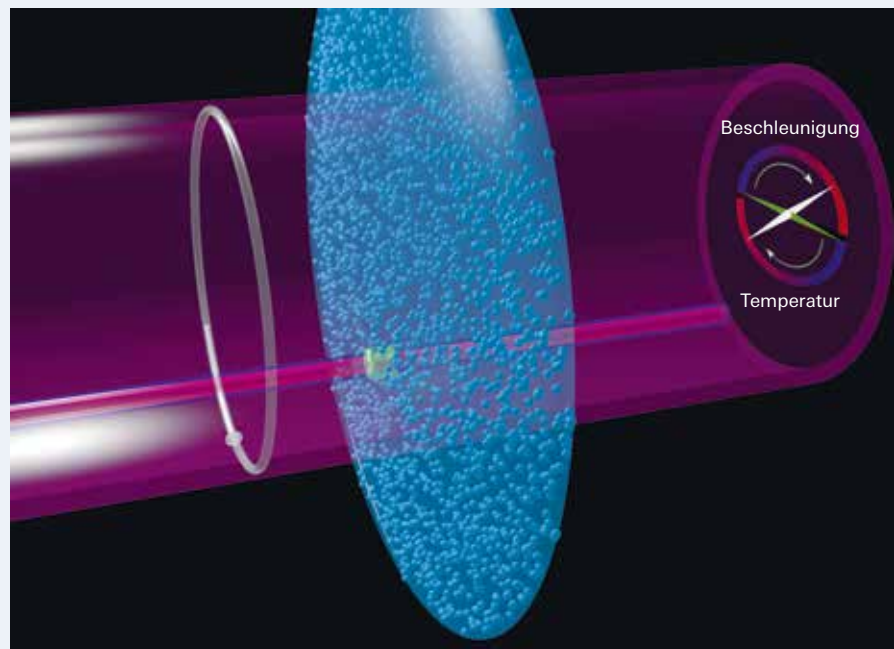
auf den Unruh-Effekt ausgemacht zu haben. Andere Fachleute zeigen sich allerdings skeptisch, so auch Ralf Schützhold, Direktor des Instituts für Theoretische Physik am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf: »Das ist eine interessante Idee«, erklärt er. »Aber ich denke, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um zu verstehen, welche Ergebnisse als Signaturen des Unruh-Effekts interpretiert werden könnten und welche anderen Phänomene zuzuschreiben sind.« Zudem seien bei der Auswertung der experimentellen Daten viele Vereinfachungen getroffen worden. »Man braucht eine extrem reine Versuchsumgebung mit möglichst wenig Teilchen, die man sehr gut kontrollieren kann, um einen so subtilen Effekt nachzuweisen«, betont Vivishek Sudhir, der in seinem Labor am MIT Hochpräzisionsmessungen durchführt. »Insgesamt ist sich der Großteil der Physik-Community einig, dass der Effekt noch nicht direkt beobachtet wurde«, sagt Leonhardt.

Das Problem ist die Eigenzeit

Um das Problem mit der Bremsstrahlung zu umgehen, kann man ungeladene Atome beschleunigen. Allerdings geht das nicht so einfach wie bei geladenen Teilchen, denn Erstere lassen sich nicht durch Magnetfelder auf Kreisbahnen zwingen. Beschleunigt man ein Atom etwa mit Hilfe eines Lasers entlang einer geraden Strecke, sind die Zeitspannen, in denen man es beobachten kann, ziemlich kurz. »Das Problem ist die Eigenzeit des Teilchens«, sagt Leonhardt. Denn gemäß der speziellen Relativitätstheorie vergeht die Zeit für ein bewegtes Objekt langsamer als für ein ruhendes. Damit der Unruh-

Unruh-Experiment

An der TU Wien arbeiten Forscherinnen und Forscher an einem Experiment, um den Unruh-Effekt nachzuweisen. Als beschleunigter Detektor dient dabei ein kreisförmig bewegter Laserstrahl (pink). Indem man ein Bose-Einstein-Kondensat (blau) statt des Vakuums nutzt, lässt sich der Unruh-Effekt bei niedrigeren Geschwindigkeiten detektieren.



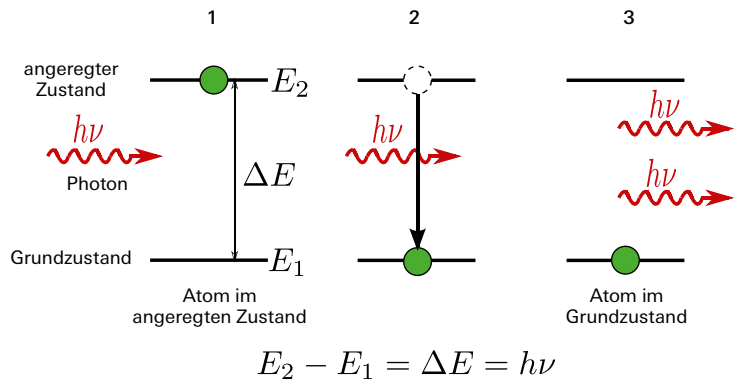
SEBASTIAN ERHE, ISQUANT, TU WIEN; DT, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Detektor (das beschleunigte Teilchen) überhaupt eine Chance hat, mit den aus dem »Nichts« entstehenden Partikeln zu wechselwirken, muss eine größere Zeitspanne vergehen. »Wir ruhenden Beobachter müssen richtig lange warten, währenddessen das Teilchen riesige Strecken zurücklegt«, so Leonhardt.

Einen Hinweis auf den Unruh-Effekt könnten Protonen liefern, die zusammen mit den Neutronen die Bausteine der Atomkerne bilden. Allerdings handelt es sich dabei nicht um Elementarteilchen, Protonen und Neutronen bestehen aus jeweils drei Quarks. Ein freies Neutron, das nicht in einem Kern gebunden ist, ist nicht stabil. Es hat eine Halbwertszeit von rund zehn Minuten und zerfällt dann in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino (ein extrem leichtes Elementarteilchen ohne elektrische Ladung). Gemäß dem Standardmodell sollten Protonen hingegen stabil sein. Das untermauern auch experimentelle Ergebnisse. Bisher wurde noch nie ein Protonenzerfall beobachtet. Falls das Standardmodell nicht zutrifft und das Teilchen doch zerfällt, haben Physikerinnen und Physiker eine obere Grenze für die entsprechende Halbwertszeit angegeben: Demnach beträgt sie mindestens 10^{34} Jahre – wesentlich länger, als unser Universum bisher alt ist. Selbst wenn das Proton instabil wäre, ist es extrem unwahrscheinlich, diesen Prozess jemals zu beobachten.

Die Situation könnte sich ändern, falls man ein Proton stark beschleunigt. Durch den Unruh-Effekt würde es nicht mehr durch einen teilchenleeren Raum fliegen, sondern durch ein Wärmebad voller Teilchen. So besteht die Möglichkeit, dass es auf ein Elektron und ein Antineutrino trifft. Damit ließe sich der Neutronenzerfall umkehren. Aus dem Proton und den beiden anderen Partikeln könnte ein Neutron hervorgehen. Allerdings wären dafür extrem hohe Beschleunigungen nötig. Zudem ist unklar, ob nicht die auf die Protonen ausgeübte Kraft ihren Zerfall bedingt hätten.

Auch wenn ein direkter Nachweis des Unruh-Effekts bisher nicht möglich war, weisen einige Messungen dennoch auf dessen Existenz hin. Zumindest könnte der Effekt ein seltsames Phänomen erklären, das man schon in den 1980er Jahren bei kreisförmig beschleunigten Elektronen beobachtet hat. Teilchenbeschleuniger erzeugen starke Magnetfelder, die den Spin (eine Art intrinsischer Drehimpuls) der Teilchen beeinflussen. Bei einer Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt müssten die Spins aller Elektronen gleich ausgerichtet sein. Doch in Laborversuchen gibt es immer einige Außenseiter, deren Spin in die entgegengesetzte Richtung zeigt. Ein solches Verhalten würde man bei einer höheren Temperatur erwarten. Wie der renommierte Physiker John Bell erklärte, kann der Unruh-Effekt die Beobachtung erklären. Aus Sicht der beschleunigten Elektronen rasen diese nicht durch das Vakuum bei etwa minus 273 Grad Celsius, sondern durch einen Raum voller Teilchen mit höherer Temperatur. Das bewirkt, dass einige ihren Spin umkeh-



STIMULIERTE EMISSION Indem man ein angeregtes Teilchen mit einem Photon der passenden Energie bestrahlt, kann man es dazu bringen, in den Grundzustand überzugehen und dabei ein identisches Photon auszustrahlen.

ren. »Man könnte also gewissermaßen sagen, dass der Unruh-Effekt schon nachgewiesen wurde«, erklärt Sudhir. »Allerdings lässt sich in einem Teilchenbeschleuniger, wo viele Elektronen miteinander wechselwirken, nicht ausschließen, dass vielleicht andere Prozesse die Beobachtungen verursachen.«

Neben solchen Messungen gibt es weitere Bemühungen, den Unruh-Effekt besser zu verstehen. Eine Möglichkeit bieten so genannte Analogexperimente. Man nutzt sie, um Phänomene zu untersuchen, die sich im Labor nicht realisieren lassen. Dafür kreiert man ein System, das nichts mit dem eigentlichen Problem zu tun hat, sich aber aus mathematischer Sicht ähnlich verhält. Auf diese Weise wurden bereits vierdimensionale Materialien, Schwarze Löcher oder Wurmlöcher untersucht (siehe »Spektrum« Mai 2019, S. 54 und »Spektrum« August 2020, S. 66). Inzwischen haben Physikerinnen und Physiker mit Analogsystemen den Unruh-Effekt unter die Lupe genommen.

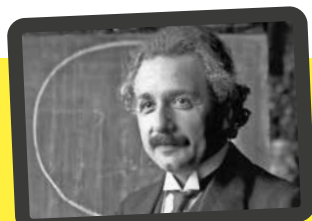
Kalte Atome als Modellbaukasten

Ein beliebtes Werkzeug für solche Experimente stellen ultrakalte Atome dar. Dazu fängt man die Teilchen mit ausgeklügelten Lasersystemen und bremst sie ab, so dass ihre Temperatur nur knapp über dem absoluten Temperaturnullpunkt liegt. Die Atome kondensieren dann in einen gemeinsamen Grundzustand und bilden ein Bose-Einstein-Kondensat. Durch geeignete Einstellung der umliegenden Laser und Magnetfelder lassen sich Wechselwirkungen zwischen den Atomen nach Wunsch kreieren – und damit physikalische Situationen nachahmen, die sonst unerreichbar sind. Im Fall des Unruh-Effekts könnte man so beispielsweise die Vakuumfluktuationen verstärken und ein beschleunigtes Objekt imitieren.

Das haben Fachleute um Cheng Chin von der University of Chicago im Jahr 2019 realisiert, indem sie 60 000 Zäsiumatome auf zehn Milliardstel Grad über dem

absoluten Temperaturnullpunkt herunterkühlten. Auch wenn sich die Teilchen kaum bewegten, ahmten sie durch die passend eingestellten Lasersysteme und Magnetfelder die Situation eines sich beschleunigt bewegenden Detektors nach. Ihr Verhalten lässt sich durch dieselben mathematischen Gleichungen beschreiben. Ein weiterer Laser diente als Analogon für die Vakuumfluktuationen. Nach nur wenigen Millisekunden konnten die Physiker beobachten, wie die Zäesiumatome in alle Raumrichtungen ausgestrahlt wurden – ähnlich der thermischen Strahlung eines Ofens. »Die Temperatur, die wir den Aufnahmen entnommen haben, passt hervorragend zu den Vorhersagen von Unruh«, sagte Chin zu »Phys.org«.

Ulf Leonhardt und seine Kollegen haben zwei Jahre zuvor den Unruh-Effekt ebenfalls simuliert – allerdings mit einem ganz anderen Analogsystem: mit Wasserwellen. Ihre Idee bestand darin, eine Wasseroberfläche mit einem Laser zu bescheinen und diesen wie ein gleichmäßig beschleunigtes Objekt in einem Minkowski-Diagramm zu bewegen. Das Wasser im Tank sollte so angeregt werden, dass das Wellenrauschen entlang der y-Achse (der Position eines ruhenden Beobachters) den Mustern von Vakuumfluktuationen entspricht. Ein etwas vereinfachtes Experiment haben die Forscher um Leonhardt genutzt, um die Auf- und Abwärtsbewegungen eines beschleunigten Beobachters zu untersuchen. So konnten sie nachweisen, dass dieser nicht einfach nur ein Rauschen, sondern echte Anregungen wahrnahm – als ob reale Teilchen da wären.



FERDINAND SCHMUTZER, 1921 (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:EINSTEIN_1921_PORTRAIT2.JPG) / PUBLIC DOMAIN

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/albert-einstein-und-die-relativitaetstheorie

Das Problem an Experimenten zum Unruh-Effekt, die auf einer rein mathematischen Analogie basieren, ist jedoch, dass man damit die Theorie nicht direkt bestätigen kann. Man kann lediglich die mathematischen Gleichungen simulieren. Falls man die komplizierten Gleichungssysteme, die beispielsweise das Verhalten von Teilchen vorhersagen, sich nur schwer berechnen lassen, sind solche Experimente äußerst hilfreich. Das tatsächliche Verhalten eines beschleunigten Beobachters damit zu belegen oder zu falsifizieren, ist jedoch unmöglich.

Deshalb haben Silke Weinfurter von der University of Nottingham, Jörg Schmiedmayer von der TU Wien sowie William Unruh, der Erfinder des Effekts, ein Experiment vorgeschlagen, das den Unruh-Effekt auf andere Art nachweisen könnte. Zwar finden die Messungen nicht

im Vakuum statt, so dass man weiterhin von einem Analogexperiment sprechen kann, doch die Forscherinnen und Forscher wollen durchaus einen beschleunigten Detektor beobachten. »Die Idee hat Jörg Schmiedmayer auf einem Workshop vor einigen Jahren vorgebracht«, sagt der Physiker Sebastian Erne von der TU Wien, der ebenfalls an der Arbeit beteiligt ist. Schmiedmayer schlug vor, einen Laserstrahl als Unruh-Detektor zu verwenden, den man auf einer Kreisbahn bewegt. Das Vakuum soll hierbei durch ein Bose-Einstein-Kondensat oder ein Suprafluid simuliert werden. Die Schwankungen in der Dichte der Atomwolke entsprechen dann den Quantenfluktuationen. »Damit hat man nicht nur eine mathematische Analogie, sondern ein tatsächlich beschleunigtes System«, erklärt Erne.

Anspruchsvoll, aber nicht unrealistisch

Den Berechnungen der Forscherinnen und Forscher zufolge sollte die Intensität des Laserstrahls durch den Unruh-Effekt fluktuieren. »Das sind sehr kleine Effekte. Glücklicherweise ist die Sensitivität der Geräte in den letzten Jahren schon erheblich verbessert worden«, so der Physiker. Die Dichteschwankungen können sich maximal mit Schallgeschwindigkeit durch das Bose-Einstein-Kondensat bewegen – diese Höchstgeschwindigkeit löst die Lichtgeschwindigkeit im eigentlichen Unruh-Effekt ab. Das bietet einen entscheidenden Vorteil: Verglichen mit der Situation im Vakuum muss der Laserstrahl nicht so schnell rotieren, um im relativistischen Regime zu landen – einige Millimeter pro Sekunde reichen bereits. »Die benötigten Beschleunigungen fallen etwa 100 Milliarden mal kleiner aus als im Vakuum. Dass ein solcher Versuch innerhalb des Möglichen liegt, wurde in den vergangenen fünf Jahren klar«, sagt Unruh.

Das Experiment befindet sich derzeit noch in der Planungsphase – in den nächsten Jahren könnten erste Ergebnisse verfügbar sein. Aktuell widmen sich die Forscherinnen und Forscher einigen Näherungen in ihren Berechnungen. Zum Beispiel haben sie angenommen, dass der Versuch beim absoluten Temperaturnullpunkt stattfindet. Dieser lässt sich allerdings nicht erreichen, deshalb untersuchen die Fachleute, wie sich die Vorhersagen bei endlichen – wenn auch extrem niedrigen – Temperaturen verändern. Außerdem möchten die Fachleute verstehen, wie sich das Bose-Einstein-Kondensat verhält, wenn es mit dem Laserstrahl durch den Unruh-Effekt wechselwirkt. »Das sind alles spannende Fragen, die wir in den nächsten Jahren angehen«, sagt Erne. »Unser Ziel ist anspruchsvoll, aber nicht unrealistisch.« Unruh ist ebenfalls gespannt auf die ersten Ergebnisse: »Die erste Frage, die es zu beantworten gilt, ist, ob dieser Effekt tatsächlich existiert – selbst wenn man davon ausgeht, da er keine neuen Aspekte der Quantenfeldtheorie verwendet. Zudem werden wir erfahren, ob sich unsere Annahmen im Analogexperiment als korrekt herausstellen.«

Und auch ein zweites Experiment steht in den Startlöchern. Es basiert auf einen etwas anderen Ansatz, den Achim Kempf, Barbara Šoda und Vivishek Sudhir in ihrer

2022 veröffentlichten Arbeit vorgestellt haben. Sie nutzen ein Laserfeld, um die Quantenfluktuationen zu verstärken. Die zu Grunde liegende Idee ist keine neue, sondern hängt mit dem von Albert Einstein im Jahr 1916 entdeckten Phänomen der stimulierten Emission zusammen, das die Grundlage für Laser bildet.

Wenn sich ein Atom in einem angeregten Zustand befindet, wird es irgendwann wieder in den energetisch günstigeren Grundzustand übergehen, indem es ein Photon mit der entsprechenden Energiedifferenz aussendet. Wann dieser Prozess stattfindet, der als spontane Emission bekannt ist, lässt sich nicht sagen – es kann Millisekunden oder auch Tage dauern. Möchte man einen Laser betreiben, der zahlreiche Lichtteilchen der gleichen Wellenlänge ausstrahlt, ist eine derartige Ungewissheit hinderlich. Schließlich sollen möglichst schnell zahlreiche Photonen entstehen. Wie Einstein erkannte, lässt sich der Prozess stimulieren. Indem man ein angeregtes Atom mit Photonen der Energiedifferenz der Niveaus bestrahlt, wird dieses dazu gebracht, in den Grundzustand zurückzukehren und ein zusätzliches zum ohnehin vorhandenen Lichtteilchen auszustrahlen.

Ein beschleunigter Detektor, wie Unruh es beschrieben hat, lässt sich als Teilchen mit zwei Energiezuständen modellieren. Aus Sicht des ruhenden Beobachters schwirrt es durch den leeren Raum und kann spontan angeregt werden – und dabei gleichzeitig ein Photon aussenden. Kempf hatte mit dem Experimentalphysiker Sudhir schon länger darüber nachgedacht, wie man den Unruh-Effekt experimentell nachweisen könnte. »Vivishek hatte kürzlich seine Stelle am MIT angetreten und sein Labor wurde gerade aufgebaut«, erzählt Kempf. »Also nutzte er die Zeit und wurde kurzzeitig zum Theoretiker, um mit mir an dem Projekt zu arbeiten.« Die Schwierigkeit besteht darin, dass ein beschleunigtes Teilchen im Vakuum nur selten angeregt wird. »Man könnte auf die Idee kommen, einfach eine Milliarde Atome zu beschleunigen, um die Wahrscheinlichkeit für den Unruh-Effekt zu erhöhen«, erklärt Sudhir. »Doch man braucht eine extrem gut kontrollierbare Versuchsumgebung. Wenn man viele Teilchen hat, beeinflussen sie sich gegenseitig, und man kann die Messung nicht präzise genug durchführen.«

Daher suchten die Physiker nach einer Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit für eine Unruh-Anregung bei einem einzelnen Teilchen zu verstärken. Und dafür schien die stimulierte Emission geeignet. Schließlich erhöht sie in ruhenden Systemen die Chance für das Ausstrahlen eines Photons. Zusammen mit der Doktorandin Barbara Šoda haben Kempf und Sudhir gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für den Unruh-Effekt tatsächlich zunimmt, wenn man das System mit Photonen bestrahlt. Anstatt also ein Teilchen im Vakuum zu beschleunigen, sollte man versuchen, den Unruh-Effekt in einem starken elektromagnetischen Feld zu messen. Die drei Physiker konnten zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit mit der Intensität des Lasers steigt. »Photonen sind billig. Man kann Laserstrahlen mit 10^{16} Lichtteilchen erzeugen – dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für den Prozess um denselben Fak-

tor.« Damit rückt ein experimenteller Nachweis in greifbare Nähe.

Doch wie die Fachleute herausfanden, verstärkt das elektromagnetische Feld nicht nur den Unruh-Prozess, sondern auch ganz normale Vorgänge: etwa die Anregung eines Atoms durch die Absorption eines Photons. »Dadurch würde man so gut wie nichts mehr vom Unruh-Effekt sehen«, sagt Kempf. »Doch dann hatte Barbara den entscheidenden Einfall.« Die Doktorandin hatte erkannt, dass die Art der Beschleunigung die verschiedenen Prozesse stark beeinflusst. Sie vermutete, dass sich die unerwünschten Übergänge durch eine geeignete Wahl der Flugbahn unterdrücken lassen – und hatte Recht. Indem man ein Teilchen beispielsweise zuerst konstant beschleunigt, dann die Beschleunigung etwas abschwächt und anschließend wieder verstärkt, erhöht sich lediglich die Wahrscheinlichkeit für den Unruh-Effekt. Die gewöhnlichen Übergänge finden den Berechnungen zufolge hingegen so gut wie gar nicht mehr statt.

Eine Kraft, die 10000-mal kleiner ist, als die schwächste, die je gemessen wurde

»Einfach wird die Umsetzung trotzdem nicht«, sagt Sudhir, der den Versuchsaufbau in seinem Labor am MIT bereits plant. Und er weiß, wovon er spricht: Sudhir ist Experte für Hochpräzisionsmessungen, er hat die bisher genaueste Bewegungsmessung durchgeführt, unter anderem am Gravitationswellendetektor LIGO. Seine Versuchsidee besteht darin, ein Teilchen auf einer Kreisbahn stark zu beschleunigen und mit einem Laser zu bestrahlen. Allerdings werde man nicht versuchen, die Photonen zu messen, die durch den Unruh-Effekt entstehen. Denn ein anderes Signal könnte einfacher zu detektieren sein. »Das ist ein Punkt, auf den Unruh in seiner ursprünglichen Arbeit nie eingegangen ist. Wenn ein Teilchen ein Photon aussendet, dann erlebt es eine Art Rückstoß, als ob man eine Waffe abfeuert.« Und genau diese Rückstoßkraft möchte Sudhir messen. »Allerdings ist sie etwa 10000-mal schwächer als die kleinste Kraft, die bisher jemals gemessen wurde«, erklärt er. »Das Experiment wird extrem aufwändig sein, es wird mehrere Generationen an Doktoranden erfordern, bis es fertig ist. Ich denke, in einem Zeitraum von zehn Jahren könnten wir erste Ergebnisse haben.« ◀

QUELLEN

Chin, C. et al.: Quantum simulation of Unruh radiation. *Nature Physics* 15, 2019

Leonhardt, U. et al.: Classical analogue of the Unruh effect. *Physical Review A* 98, 2018

Lynch, M.H. et al.: Experimental observation of acceleration-induced thermality. *Physical Review D* 104, 2021

Šoda, B. et al.: Acceleration-induced effects in stimulated light-matter interactions. *Physical Review Letters* 128, 2022

Weinfurtnner, S. et al.: Interferometric Unruh detectors for Bose-Einstein condensates. *Physical Review Letters* 125, 2020

»Ich bin mir selbst nicht sicher, ob ich es richtig verstehe«

Mehrere Forschungsgruppen wagen es erstmals, den seit 50 Jahren vorhergesagten Unruh-Effekt im Labor zu messen. Wie das funktionieren kann, erklärt die Physikerin Silke Weinfurtnner.

» [spektrum.de/artikel/2108268](https://www.spektrum.de/artikel/2108268)

► Teilchen, die plötzlich aus dem Nichts entstehen? Gemäß dem Unruh-Effekt würde ein stark beschleunigter Beobachter genau das beobachten. Die Theorie dazu scheint inzwischen recht gut verstanden, doch bisher konnte man das Phänomen nicht messen. Grund dafür ist, dass dazu extreme Bedingungen nötig sind: Man müsste einen Detektor innerhalb von Pikosekunden auf 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Die Physikerin Silke Weinfurtnner von der University of Nottingham arbeitet seit 20 Jahren daran, solche unerreichbaren Phänomene im Labor zu untersuchen. Dafür entwirft sie gemeinsam mit ihren Kolleginnen und Kollegen analoge Experimente: Sie erschafft Systeme, die sich aus mathematischer Sicht genauso verhalten wie Schwarze Löcher oder das Universum kurz nach dem Urknall. Aktuell widmet sie sich dem Unruh-Effekt. Das Team um Weinfurtnner will in mehreren Versuchen das Vakuum mit suprafluidem Helium füllen, um den sonst zu schwachen Effekt zu verstärken. Indem man das Suprafluid mit einem kreisförmig beschleunigten Laserpunkt bestrahlt, sollte die Intensität des Lichts variieren – als ob der Laser auf zahlreiche Teilchen trifft.

Frau Weinfurtnner, wie entstand bei Ihnen das Interesse, den Unruh-Effekt zu untersuchen?

Das hat sich zufällig durch den Standort Nottingham, an dem ich arbeite, ergeben. Mein Kollege Jorma Louko forscht seit Jahren an beschleunigten Detektoren und bat mich häufiger, die Doktorarbeiten seiner Studierenden zu begutachten. Da stellte ich fest, dass die Hauptentwicklung in dem Bereich sehr theoretisch ist: Man untersucht beispielsweise, wie ein Detektor in mehr als drei Raumdimensionen mit einem Quantenfeld wechselwirkt. Irgendwie fand ich es schade, dass ein Gebiet, bei dem es doch eigentlich um Messungen geht, über die Jahre so abstrakt geworden ist.

Woran liegt das?

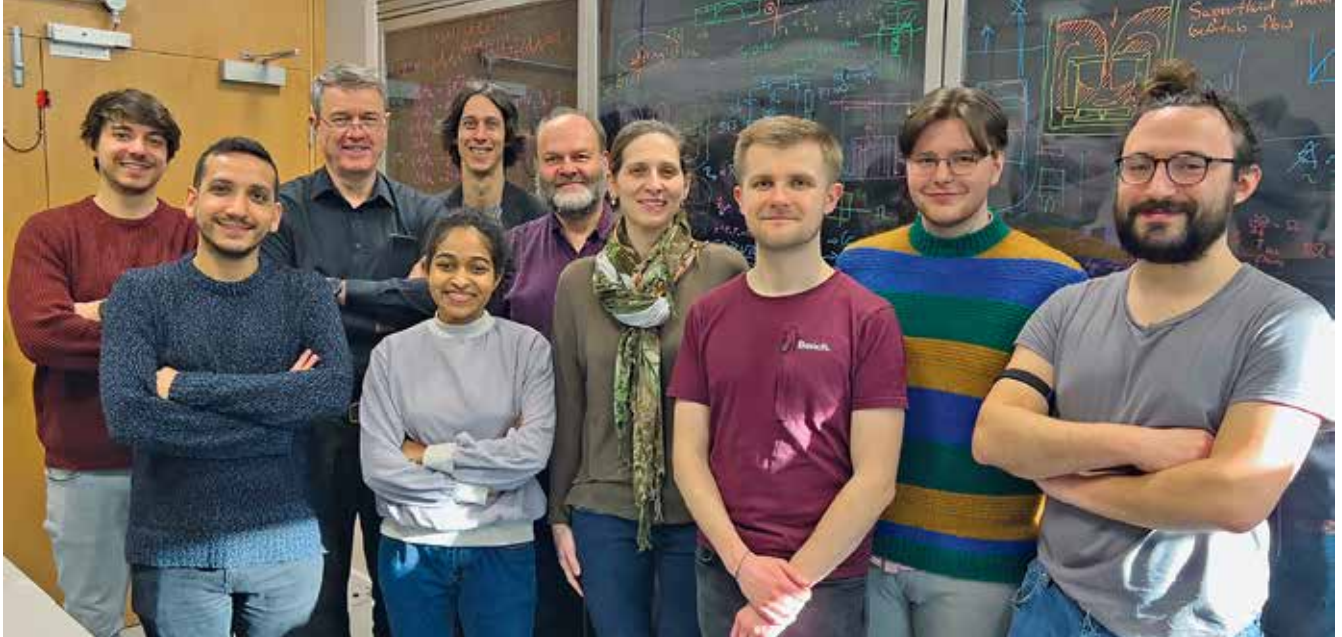
Der Effekt ist extrem klein. Deshalb ist es bisher reine Mathematik und nicht Physik. Ich wollte einen Weg finden, das Phänomen trotzdem im Labor zu untersuchen. Denn ohne Experimente kann man den Unruh-Effekt nicht richtig verstehen.

Ich dachte, er sei schon recht gut verstanden?

Man bekommt erst ein Gefühl für etwas, wenn man es misst. Viele Leute, auch geschätzte Kollegen, verstehen ihn nicht ganz. Ich bin ganz ehrlich, ich bin mir selbst nicht sicher, ob ich alles richtig verstehe. Wenn man William Unruh fragt, ob er das nach ihm benannte Phänomen einfach erklären kann, sagt er »Nein«. Tatsächlich wirft der Effekt noch viele Fragen auf.

Welche zum Beispiel?

Zunächst einmal fehlt ein allgemeines Verständnis: Was genau ist beispielsweise der Unruh-Detektor? Das hängt mit der Frage zusammen, wann eine Messung stattfindet: wann das beschleunigte System mit den Vakuumfluktuationen wechselwirkt? Oder wenn man als ruhender Beobachter etwas auf einem Apparat ausliest, wie die abgegebene Strahlung? Mit Hilfe von Experimenten kann man



MIT FOT. VON SILKE WEINFURNER

UNRUH-TEAM (von links) Pietro Smaniotto, Vitor Barroso Silveira, Anthony Kent, Sreelekshmi Ajithkumar, Cisco Gooding, Jorma Louko, Silke Weinfurter, Patrik Svancara, Cameron Bunney, Radivoje Prizia

solche Fragen zumindest eingrenzen. Aber auch um anschauliche Auswirkungen zu untersuchen, braucht man Laborversuche. Etwa um herauszufinden, ob sich ein Steak tatsächlich erhitzt, wenn man es beschleunigt.

Und was denken Sie? Wird das Steak warm?

Das ist nicht leicht zu beantworten. Ich würde sagen – und das werde ich vielleicht bereuen –, es kommt auf das Steak an.

Inwiefern?

Zum Beispiel wissen wir jetzt, dass der Unruh-Effekt eine kühlende Wirkung haben kann. Wenn das Steak also zu heiß ist, kann es sich durch die Beschleunigung auch abkühlen. Sicher ist: Das Steak wird mit dem Vakuum wechselwirken – der Unruh-Effekt ist real, das ist klar für mich. Doch wie genau das Stück Fleisch wechselwirkt, kann ich nicht sagen. Dafür müsste man das exakt durchrechnen. Denn wenn man etwas detektieren möchte, braucht man das passende Messgerät – und muss die Daten richtig auslesen. Es ist nicht so, dass man einfach etwas beschleunigt, und dann wird es heiß. Vor ein paar Jahren hätte ich gesagt: »Ja, das Steak wird warm.« Jetzt sagt mein Gefühl zwar immer noch Ja, aber ich würde kein Geld darauf wetten.

Hat Sie die Arbeit der letzten Jahre vorsichtiger gemacht?

Ja, auf jeden Fall. Meine Kollegen und ich hatten uns riesig gefreut, als wir eine Versuchsidee hatten, die realistisch umsetzbar schien. Doch dann haben wir gemerkt: Die echte Arbeit steht noch bevor. Unter Laborbedingungen ist nichts so ideal wie in unseren Berechnungen. Es ist eben ein schwieriger Effekt. Das macht ihn für mich so attraktiv, man wird immer wieder überrascht.

Finden die Messungen schon statt?

Wir stehen noch ganz am Anfang. Wir haben gerade begonnen, erste Experimente aufzubauen.

In Nottingham und in Wien?

Inzwischen haben wir eine große Kollaboration mit Forscherinnen und Forschern aus Österreich, Großbritannien, Kanada und Japan. Hier in Nottingham konzentrieren wir uns aktuell auf den Detektor, der auf einer kreisförmigen Bahn beschleunigt wird. Wir untersuchen dabei, welche Einstellungen wir brauchen und welche Grenzen es gibt.

Was sind die größten Hürden, die Sie noch überwinden müssen?

Es gibt drei große Baustellen, an denen wir arbeiten. Zunächst muss man den Laserstrahl beschleunigen. Dann müssen wir die Ansprüche an unser System kennen lernen: Welche Temperaturen sind nötig, welche Anforderungen muss das Bose-Einstein-Kondensat oder das Suprafluid erfüllen? Und drittens müssen wir herausfinden, wie wir die Daten auslesen. Viel davon ist auch theoretische Arbeit: Man muss die mathematischen Modelle an die Wirklichkeit anpassen. Denn nichts ist so einfach, wie man es gerne auf dem Papier konstruiert.

Wann, glauben Sie, können wir mit Ergebnissen rechnen?

Erste Hinweise auf den Effekt sollten wir in den nächsten Jahren haben. Die Frage ist, wie schön die Ergebnisse sein werden. Das hängt davon ab, inwieweit wir die Einflüsse der Realität begrenzen können. Dazu braucht man nicht nur ein Experiment, sondern verschiedene, die sich unterschiedlichen Aspekten widmen. Denn wenn man sich die Berechnungen anschaut, ist der Effekt auch in analogen Modellen noch sehr klein. Wir benötigen dafür Quantentechnologien. Dass wir aber etwas messen werden, steht für mich außer Frage. Innerhalb von zehn Jahren müssten wir definitiv etwas haben. ◀

Die Fragen stellte **Manon Bischoff**, Redakteurin bei »Spektrum«.

ARCHÄOCHEMIE

Ägypter mumifizierten mit exotischen Harzen

Dass die Ägypter ihre Toten einbalsamierten, ist bekannt. Was sie dafür genau verwendeten, weniger. Ein spektakulärer Fund aus dem 7. und 6. vorchristlichen Jahrhundert belegt nun: Einige Substanzen kamen wohl aus Südostasien.

► Wie die Ägypter ihre Toten mumifizierten, darüber ist einiges Wissen gesichert: Sie schabten das Gehirn aus dem Schädel, schnitten den Torso auf und entnahmen die Organe. Anschließend entzogen sie dem Körper mit Natron die Flüssigkeit. Damit war die Arbeit der Balsamierer aber längst nicht getan. Sie tränkten den Leichnam in Harze, Öle und

Fette, um den Verwesungsprozess zu stoppen, und wickelten ihn in Leinenbinden. Welche Substanzen dafür Verwendung fanden, ist jedoch nicht genau gesichert. Die altägyptischen Namen einiger Stoffe sind aus Schriftquellen bekannt, aber was ist ihre heutige Bedeutung? Wie wurden die Substanzen angewendet, woher kamen sie und welche Wirkung entfalteten sie?

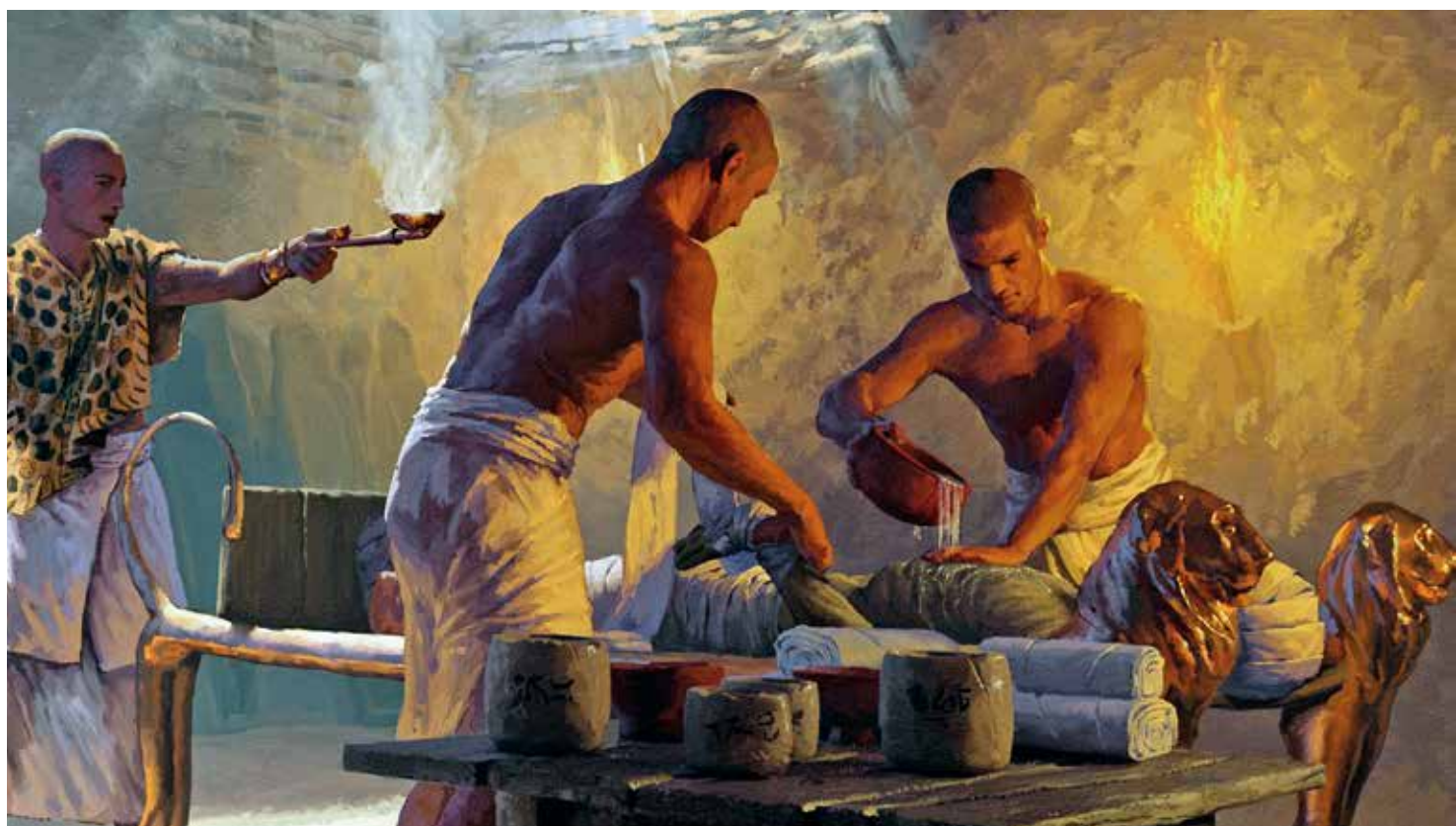
Ein spektakulärer Fund, den ägyptische und deutsche Fachleute 2016 in Sakkara südlich von Kairo machten, lüftet nun einige Geheimnisse um die Mumifizierung: In der Nekropole entdeckten der 2022 verstorbene Ägyptologe Ramadan Hussein von der Universität Tübingen und sein Team eine Werkstatt zur Mumifizie-

rung aus dem 7. und 6. Jahrhundert v. Chr. Darin: Tongefäße, einst gefüllt mit Substanzen zur Einbalsamierung und beschriftet mit ägyptischen Zeichen, die Namen und Hinweise zur Anwendung der Stoffe liefern.

Mit Hilfe chemischer Rückstandsanalysen identifizierte die Gruppe um den Archäochemiker Maxime Rageot, die neue Tübinger Grabungsleiterin Susanne Beck und Experten vom National Research Center in Kairo die Mixturen, die in den Bechern und Schalen einst angerührt wurden. Das Ergebnis ihrer Untersuchungen: Die Naturstoffe eigneten sich zur Konservierung toter Körper – sie wirkten teils antimikrobiell, teils Wasser abweisend, teils entwickelten sie Wohlgeruch.

UNSTERBLICH GEMACHT

Zwei Balsamierer mumifizieren einen Toten, ein Priester begleitet den Prozess mit Ritualen. So wie in dieser Illustration dargestellt, könnte die Arbeit in einer Mumienwerkstatt in Sakkara vor rund 2700 Jahren ausgesehen haben.



NICOLA REVENOV



REZEPT FÜR DIE EWIGKEIT Auf dem Becher aus der Mumifizierungswerkstatt steht: »an den Kopf zu geben«. Offenbar behandelte man mit den darin angemischten Substanzen den Schädel des Toten.

Laut der Arbeitsgruppe hätten die Balsamierer sehr genau über die Eigenschaften der Substanzen Bescheid gewusst und spezifische Mischungen hergestellt. Dafür nutzten sie Harze und Öle, die nicht nur aus dem gesamten Mittelmeerraum ins Land am Nil gelangten, sondern überraschenderweise auch aus Regionen mit tropischem Regenwald – aus Afrika südlich der Sahara und aus Südostasien. Für ihr Totenritual hatten die Ägypter also ein kontinenteübergreifendes Handelsnetz gespannt; vermutlich im Lauf vieler Jahrhunderte, in denen sie die Sitte der Mumifizierung weiterentwickelten und in einem Ausmaß pflegten, dass Fachleute von einer regelrechten »Mumienindustrie« sprechen.

Die Tübinger Grabung auf dem Friedhof von Sakkara sorgte bereits 2018 für Aufsehen, als die Ägyptologen um Ramadan Hussein dort eine Mumienmaske aus vergoldetem Silber entdeckten. Das seltene Stück aus der 26. Dynastie, der Zeit von 664 bis 525 v. Chr., fand sich in einem unterirdischen Grabkomplex, zu dem ein zirka 30 Meter tiefer Schacht hinabführt. Oberirdisch legten die Ausgräber die Reste eines Baus aus

derselben Zeit frei und darin zwei Becken. Die Steinwannen deuteten sie als Installationen für die Mumifizierung – die eine für Natronsalz, die andere für Leinenbinden – und den Raum damit als Teil einer Mumifizierungswerkstatt. »Es könnte ein Balsamierungszelt gewesen sein, ein so genanntes Ibu«, sagt Grabungsleiterin Susanne Beck. »Es gibt altägyptische Darstellungen von solchen Balsamierungszelten, und was wir in Sakkara gefunden haben, ähnelt dem sehr stark.«

Werkstatt in der Tiefe

Neben dem Bau führt ein weiterer, etwa 13 Meter langer Schacht in die Tiefe zu einem kleinen Raum, der geschützt war vor Sonnenlicht und Wärme. Hier hatten die Balsamierer den Toten vermutlich die Organe entnommen: »In der Mitte des Raums erhebt sich eine Plattform, und daneben befindet sich ein Drainagekanal, über den Flüssigkeiten ablaufen konnten«, berichtet Beck. In diesem Wabet, so die altägyptische Bezeichnung, fand Ramadan Hussein dutzende Tongefäße, viele in Scherben zerschlagen, einige ganz erhalten und nahezu alle beschriftet.

Gemeinsam mit dem Archäochemiker Rageot von der Universität Tübingen sowie weiteren Experten untersuchten die Ausgräber von den 121 gefundenen Gefäßen jene 31, deren Aufschriften sie bislang entziffern konnten. Zusätzlich analysierte Rageot vier Keramikbehälter aus dem tiefer gelegenen Grabkomplex. Mittels Gaschromatografie und Massenspektrometrie – beides Analyseverfahren, um die chemischen Bestandteile einer Substanz aufzuschlüsseln –, identifizierten sie diverse Naturstoffe. Dabei berücksichtigten sie auch, dass sich diese nach langer Zeit verändern oder abbauen. Die Forscher verglichen daher den molekularen Fingerabdruck der Sakkara-Essenzen mit teils mehr als 30 Jahre alten Proben aus botanischen Gärten und wissenschaftlichen Einrichtungen. Nachdem sie so den einstigen Inhalt der Gefäße bestimmt hatten, glichen sie die Stoffe mit den Aufschriften ab.

»An den Kopf zu geben«, steht auf einigen Bechern und Schalen, in denen Rageot Molekülspuren von diversen Mixturen fand: Die Balsamierer vermengten duftende Öle von Zypressen oder Wacholderbäumen, außerdem Öle von Zedern und Olivenbäumen, ferner tierisches Fett sowie Harze von Pistaziengewächsen – vermutlich von *Pistacia lentiscus*, aus dem in Griechenland noch heute Mastix gewonnen wird. Und sie mischten Rizinusöl und Bienenwachs bei, ebenso einen Stoff namens Elemi. Dieses Harz zu entdecken, überraschte die Forscher. Es wird aus Bäumen der Gattung *Canarium* gewonnen, die zu den Balsambaumgewächsen gehören – und nicht in Ägypten heimisch sind. Entsprechende »Biomarker sind von Elemi[-Harzen] aus dem asiatischen Regenwald bekannt, aber [solche] aus dem afrikanischen Regenwald sollten nicht ausgeschlossen werden«, schreiben die Wissenschaftler in ihrer Studie.

Wie weit die Ägypter ihre Fühler nach geeigneten Balsamierungsstoffen ausstreckten, bezeugen auch die Molekülspuren an einer Schale aus



M. ABDELGHAFAR / THE SAHARA SAITE TOMBS PROJECT, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

HANDWERKSZEUG Diese Schalen und Becher entdeckten die Ägyptologen in der Mumifizierungswerkstatt von Sakkara. Die Keramikbehälter stammen aus dem 7. und 6. Jahrhundert v. Chr.

dem unterirdischen Grabkomplex in Sakkara. In dem Gefäß konnte Rageot das Öl von Nadelhölzern aus dem Mittelmeergebiet wie Zedern, Wacholder oder Zypressen nachweisen, das Mineralöl Bitumen vom Toten Meer, Bienenwachs, tierisches Fett sowie Dammar. Dieses Harz stammt von Laubbäumen der Gattung *Shorea* in Südostasien. Demnach bezogen die Ägypter das Harz aus sehr weit entfernten Gebieten wie dem heutigen Indien oder Indonesien.

Fernhandel für Harze

»Die Ergebnisse aus Sakkara passen sehr gut ins größere Bild eines Güter-austausches, der über weite Strecken lief. Denn es ist klar, dass niemand von Ägypten bis nach Indonesien segelte, um dort Güter zu erwerben«, erklärt Mitautor und Archäologe Philipp Stockhammer von der Ludwig-Maximilians-Universität München, der die Handelsnetzwerke der Bronzezeit erforscht. Demnach habe kein direkter Austausch von Waren stattgefunden. Stattdessen gelangten Harze wie Dammar und Elemi über viele Etappen und entlang etablierter Routen in das Land am Nil. Und womöglich, so Stockhammer, hätten die ägyptische Sitte der Mumifizierung und die entsprechende Nachfrage nach antibakteriellen Harzen die Handelswege nach Südostasien erst

gebahnt. Sicher ist zudem: Schon gut 600 Jahre bevor die Mumienwerkstatt in Sakkara existierte, empfangen die Ägypter Waren aus Indien. Im Körper von Pharao Ramses II. aus dem 13. Jahrhundert v. Chr. fanden sich Pfefferkörner aus Indien. Weshalb die Totenkultindustrie der Ägypter indes ausgerechnet asiatische Substanzen brauchte, wissen die Forscher noch nicht. Dem wollen sie demnächst auf den Grund gehen.

An den Balsamierungsgefäßen aus der Werkstatt in Sakkara entzifferten die Ägyptologen weitere Anweisungen, etwa »[damit] einwickeln«, »[damit] waschen« oder »um den Geruch angenehm zu machen«. Die verschiedenen Mischungen und Substanzen, die Rageot in den entsprechenden Gefäßen detektierte, können – wenn auf den toten Körper aufgetragen – das Wachstum von Bakterien und Pilzen hemmen. Manche Wasser abweisenden Ingredienzien wie Bitumen sollten vermutlich die Hautporen verschließen, andere wie tierisches Fett und Bienenwachs die ledrige Mumienhaut geschmeidig machen.

Die Zusammenarbeit von Philologen und Chemikern lieferte noch weitere neue Erkenntnisse. Aus Papyri kennen Ägyptologen zwei Substanzen – »sefet« oder »sefetsch« und »antiu«. »Sefet« übersetzten sie bisher als »eines der sieben Öle« für die Balsamierung oder für ein Mumienritual, bei »antiu« soll es sich um Myrrhe handeln.

In Sakkara entdeckten Hussein und sein Team nun Keramikbehälter, auf denen ebenjene Bezeichnungen geschrieben sind. Rageot und seine

Kollegen analysierten diese Schalen und fanden keine Anzeichen von Myrrhe. Vielmehr stellte sich heraus, dass es sich bei beiden um Mixturen handeln musste, die aus den Ölen von Nadelbäumen sowie tierischem Fett bestanden. »Antiu« bedeutete demnach im 7. und 6. Jahrhundert v. Chr. – zumindest in Sakkara – nicht Myrrhe. Mit dem frischen Wissen wollen sich die Forscherinnen und Forscher nun über schon länger bekannte Texte hermachen und prüfen, ob sie anders zu übersetzen sind.

Ebenso hat sich die Arbeitsgruppe vorgenommen, die in Sakkara entdeckten Mumien Körperteil für Körperteil chemisch zu analysieren. Das Team um Beck und Rageot will wissen, ob und wo sich die Substanzen aus den Balsamierungsbechern an den Toten wiederfinden – und so weitere Geheimnisse um die Mumienindustrie der alten Ägypter lüften.

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

QUELLEN

Ikram, S.: Recipes and ingredients for ancient Egyptian mummification, *Nature* 614, 2023

Rageot, M. et al.: Biomolecular analyses enable new insights into ancient Egyptian embalming. *Nature* 614, 2023

Vandenbeusch, M., Antoine, D.: Mummified human remains from Ancient Egypt and Nubia: An overview and new insights from the British Museum Collection. In: Shin D. H., Bianucci, R. (Hg.): *The Handbook of Mummy Studies*. Springer, Singapore 2021, S. 565–628

Gletscherschmelze führte zu Todeszonen

Schmelzende Eisschilde haben am Ende der letzten Kaltzeit Vulkanausbrüche ausgelöst, die mittels Aschedüngung dem nordöstlichen Pazifik auf Jahrtausende den Sauerstoff entzogen. Das legen Sedimente aus Alaska aus den letzten 20 000 Jahren nahe.

Der Gehalt an Sauerstoff in der Atmosphäre ist relativ gleich bleibend. In den Ozeanen hingegen ist das lebenswichtige Element höchst ungleichmäßig verteilt. Das hat weit reichende Folgen für jene Meeresorganismen, die Sauerstoff benötigen. Wie extrem äußere Ereignisse die Lebensfreundlichkeit der Ozeane beeinflussen können, legt eine Studie eines Teams um Jianghui Du nahe, der heute an der ETH Zürich forscht. Demnach hat vor tausenden Jahren das Abschmelzen eines riesigen Eisschilds eine Kette von Ereignissen ausgelöst, die den mittleren Tiefen des nordöstlichen Pazifiks den gesamten Sauerstoff entzogen

und die Region für Jahrtausende in Todeszonen verwandelten.

Im Ozean bestimmen die örtlich vorherrschenden Lebensformen über den Sauerstoffgehalt: Bei der Photosynthese wird Kohlenstoffdioxid in organische Stoffe umgewandelt, wobei als Nebenprodukt Sauerstoff entsteht. Der umgekehrte Prozess, bei dem organisches Material zerfällt, verbraucht Sauerstoff und setzt dabei CO_2 frei.

Warum der Sauerstoffgehalt im Meer so stark variiert, lässt sich verstehen, wenn man den Ozean in drei Zonen unterteilt: In die oberen 100 bis 200 Meter Wassertiefe kann Sonnenlicht eindringen. Dort sorgen

vom Wind verursachte Verwirbelungen, Fotosynthese und der Gasaustausch mit der Atmosphäre für hohe Sauerstoffkonzentrationen. Durch Fotosynthese entsteht außerdem neues organisches Material, welches wie in einem stetigen Regen als so genannter mariner Schnee hinab in tiefe Wasserschichten sinkt. Während die organischen Partikel sinken, werden sie zersetzt und verbrauchen dabei Sauerstoff aus dem sie umgebenden Wasser.

Anders als die oberflächennahen Wasserschichten stehen diese Bereiche jedoch seit Jahrzehnten nicht mehr in Kontakt mit der Atmosphäre, so dass ihr Gehalt an Sauerstoff

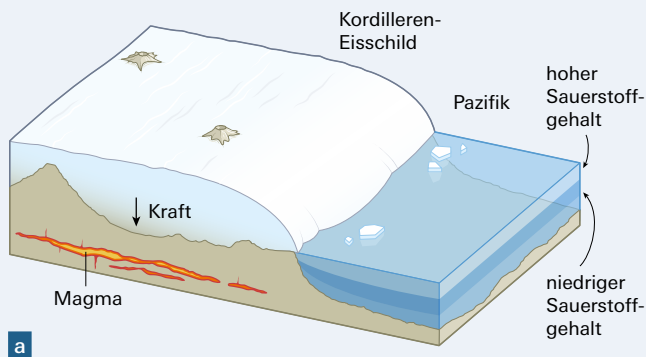
Rückzug mit Folgen

a Der Kordilleren-Eisschild bedeckte während vergangener Kaltzeiten Teile Nordamerikas. Sein Gewicht drückte die darunter liegende Erdkruste in den Erdmantel. **b** Als sich der Eisschild zurückziehen begann, ordneten sich die Kräfte im darunter liegenden

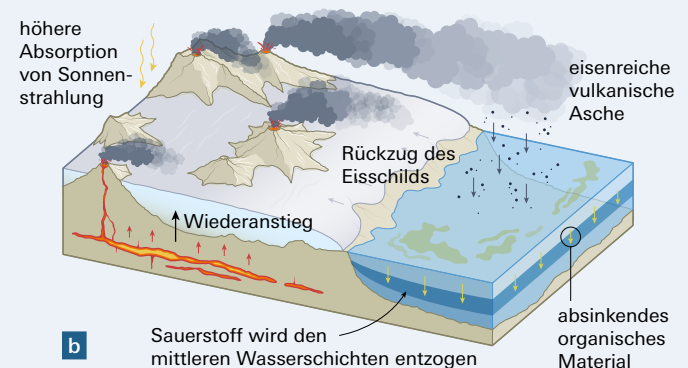
Gestein neu. Vulkane brachen aus. Die ausgestoßene Asche absorbierte mehr Sonnenstrahlung als das helle Eis und beschleunigte die Schmelze dadurch zusätzlich, was wiederum die vulkanische Aktivität verstärkte. Einer neuen Studie zufolge wurde dadurch so viel eisenhaltige Asche ausgestoßen, dass diese wie ein Dünger die

Produktion organischen Materials im Nordostpazifik ankurbelte. Die absinkenden organischen Partikel verbrauchten bei ihrer Zersetzung den größten Teil des in mittleren Wassertiefen gelösten Sauerstoffs. »Todeszonen« entstanden und blieben für mehrere tausend Jahre für höhere Lebensformen unbewohnbar.

Kaltzeit



Ende der Kaltzeit



WAO, W. WORTMANN, U.S. GLACIERS SPARKED VOLCANISM THAT HARMED OCEAN HEALTH. NATURE 611, 2022. FIG. 1, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ständig abnimmt. Wie viel davon in den so entstandenen »Sauerstoffminimumzonen« etwa 200 bis 1000 Meter unter dem Meeresspiegel vorhanden ist, hängt daher stark davon ab, wie rasch organische Stoffe in jene Ozeanschichten gelangen und wie schnell dort neues Wasser nachströmt. Fast die gesamte absinkende organische Substanz zerfällt, bevor sie das darunter liegende Tiefenwasser erreicht, weshalb dort wieder mehr Sauerstoff zu finden ist.

Sauerstoffminimumzonen sind zwar in den heutigen Ozeanen weit verbreitet, aber nur selten geht das Element dabei vollständig verloren. Während des Übergangs der letzten Kaltzeit zu unserer heutigen Warmzeit von vor 19000 bis vor 9000 Jahren herrschten jedoch im nordöstlichen Pazifik große, sauerstofffreie Todeszonen. Wie Du und sein Team vermuten, könnten sie die Folge von Vulkanausbrüchen sein, ausgelöst durch den Rückzug des Kordilleren-Eisschildes. Dieser bedeckte während des letzten eiszeitlichen Maximums vor etwa 20000 Jahren Teile Nordamerikas.

Düngung mit Folgen

Der Kordilleren-Eisschild war bis zu zwei Kilometer stark, ähnlich wie der heutige Grönländische Eisschild. Durch das enorme Gewicht solch großer Eispanzer sinkt die darunter liegende Erdkruste mitunter tief in den Erdmantel – oft so weit, dass die Landoberfläche schließlich unter dem Meeresspiegel liegt. Wenn der Eisschild zu schmelzen beginnt, hebt sich die Kruste wieder; Spannungen und Druck in den Gesteinen ordnen sich neu, Vulkanausbrüche können folgen. Die dabei ausgestoßene Asche verringert das Reflexionsvermögen der verbleibenden Eisfelder, sie absorbieren somit mehr Sonnenstrahlung. Das wiederum beschleunigt die Schmelze, was die vulkanische Aktivität weiter verstärkt.

Der nordöstliche Pazifik ist ein perfektes Beispiel für diesen Rückkopplungsmechanismus, da er an den seismisch aktiven Gürtel angrenzt, der als »Feuerring« bekannt

ist, und große Mengen Eis enthält. Nach den Überlegungen der Fachleute wirkte die ausgestoßene eisenhaltige Vulkanasche wie ein Dünger: Sie förderte die Produktion organischer Stoffe im Oberflächenwasser, die dann bei ihrer anschließenden Zersetzung den gesamten Sauerstoff in den darunter liegenden Zonen aufbrauchten.

Vom Konzept her ist die Idee sehr einfach. Doch in den Geowissenschaften sind selbst simple Hypothesen oft kaum zu beweisen, da es schwer ist, hoch aufgelöste Chronologien zu erhalten. Die aktuelle Studie bildet hier eine Ausnahme: Durch Kombination verschiedener Datierungsansätze erstellten die Autorinnen und Autoren eine präzise Zeitskala der letzten 20000 Jahre für Sedimentproben, die sie an zwei Standorten im Golf von Alaska entnommen hatten. Wie ihre Daten zeigen, schmolz der Kordilleren-Eisschild während vulkanisch aktiver Phasen, gleichzeitig verschwand der Sauerstoff in den mittleren Tiefen des Nordostpazifiks zeitweise komplett. Zwar bedeutet das noch nicht, dass die Ereignisse auch ursächlich zusammenhängen, aber die skizzierte Vorstellung erklärt die Daten elegant.

Obwohl der Zusammenhang zwischen dem Rückzug der Eisschilde, dem Vulkanismus und der gebietsweisen Sauerstoffverarmung der Ozeane einleuchtet, bleibt unklar, was er global bedeutet. Um das herauszufinden, wird man untersuchen müssen, ob ähnliche Konstellationen an anderen Orten und zu anderen Zeiten herrschten. Entscheidend ist jedoch eine andere Erkenntnis aus der Arbeit: Kurze Perioden der Eisendüngung können marinen Ökosystemen über sehr lange Zeiten den Sauerstoff entziehen.

Gerade jetzt, angesichts der Diskussion, wie die globale Erwärmung den Sauerstoffgehalt der Ozeane verringern wird, ist diese Erkenntnis wichtig. Sie deutet nämlich darauf hin, dass die daraus resultierenden toten Zonen im Meer die Fischerei über Jahrtausende hinweg beeinträchtigen könnten,

sollten die Gewässer eines Tages keinen gelösten Sauerstoff mehr enthalten. In dem Zusammenhang erwähnt das Team um Du auch die möglichen Nebenwirkungen groß angelegter Geoengineerings wie etwa der Idee, die Meere mit Eisen zu düngen. Damit will man erreichen, dass mehr organische Substanz von der Meeresoberfläche in die Tiefsee absinkt und somit der darin gebundene Kohlenstoff – der ursprünglich von CO₂-Molekülen aus der Atmosphäre stammt – dauerhaft in die Tiefsee verfrachtet wird.

Unser Planet steht derzeit auf Grund der globalen Erwärmung vor noch nie dagewesenen Herausforderungen. Allein in den letzten 50 Jahren hat sich die Gesamtfläche der Sauerstoffminimumzonen vervierfacht und wird sich verschiedenen Ozeanmodellen zufolge weiter ausdehnen. In einer wärmeren Welt könnten sauerstofffreie Gewässer weit verbreitet sein, wie geologische Daten nahelegen. Der Verlust des lebenswichtigen Elements im Meer betrifft die am stärksten und am wenigsten erforschten Ökosysteme der Erde. Was das für die Ernährungssicherheit bedeutet, ist noch völlig unklar. Wir müssen die biogeochemischen Rückkopplungen, die den Zustand der Ozeane auf der ganzen Welt beeinflussen, also dringend besser verstehen. ◀

Weiqi Yao ist Professorin am Institut für Ozeanforschung und Engineering an der Southern University of Science and Technology in Shenzhen, China. **Ulrich G. Wortmann** ist Professor am Institut für Geowissenschaften an der University of Toronto in Kanada.

QUELLE

Du, J. et al.: Volcanic trigger of ocean deoxygenation during Cordilleran ice sheet retreat. *Nature* 611, 2022

WEBLINK

www.spektrum.de/news/dem-ozean-geht-die-luft-aus/1603974

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 611, S. 35–36, 2022

BIODIVERSITÄT

Unbekannte Vielfalt

In Deutschland leben tausende Tierarten, die wissenschaftlich noch kaum oder gar nicht untersucht sind. Ein großes Forschungsprojekt soll das ändern.

► Sie leben direkt vor unseren Augen und doch im Verborgenen. Meist sind sie unscheinbar oder so klein, dass sie sich ohne Sehhilfe nicht voneinander unterscheiden lassen. Aber es gibt viele von ihnen – sowohl hinsichtlich der Individuen- als auch der Artenzahl.

»Dark Taxa« nennen Fachleute diese Spezies, über die sie nichts oder sehr wenig wissen. Ob Verbreitungsgebiet, Lebensweise, Häufigkeit oder Gefährdungsstatus: Oft heißt es schlicht »unbekannt«. In Mitteleuropa trifft das hauptsächlich auf kleine Tiere artenreicher Gruppen wie Tausendfüßer, Spinnentiere, Fadenwürmer, Rädertierchen und Insekten zu. Benannt und beschrieben sind zwar viele von ihnen und stehen auf einschlägigen Artenlisten. Die Angaben darauf sind aber vielfach veraltet, fehlerhaft und äußerst spärlich.

Licht in das Dunkel soll das Forschungsprojekt »German Barcode of Life Initiative (GBOL) III: Dark Taxa« bringen. Im Fokus der Arbeiten stehen zwei Gruppen: parasitische Wespen aus der Ordnung der Hymenoptera (Hautflügler) und nicht stechende Mücken aus der Ordnung der Diptera (Zweiflügler). Anhand der Artenlisten schätzen Wissenschaftler, dass die Spezies dieser beiden Gruppen ein Viertel aller Tierarten in Deutschland ausmachen. »Und das ist eher konservativ geschätzt, da wir von vielen Gruppen bereits jetzt wissen, dass sie in Deutschland mehr Arten umfassen, als auf den Listen stehen«, sagt Ralph Peters, Kurator

am Zoologischen Forschungsmuseum Alexander Koenig in Bonn und Leiter des Projekts.

»GBOL III: Dark Taxa« ist auf 42 Monate angelegt; das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert die Arbeiten mit 5,3 Millionen Euro. Neben dem federführenden Museum Koenig sind weitere bedeutende Institutionen an Bord: das Staatliche Museum für Naturkunde in Stuttgart, die Zoologische Staatssammlung München, der Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie der Universität Würzburg sowie der Entomologische Verein Krefeld.

Zurzeit läuft die dritte Projektphase. Begonnen hatte die »German Barcode Of Life Initiative« im Jahr 2011. In den ersten beiden Phasen bauten die beteiligten Expertinnen und Experten eine genetische Datenbank der in Deutschland lebenden Tiere, Pflanzen und Pilze auf. Hierfür nutzten sie den so genannten DNA-Barcode: eine rund 600 Basenpaare lange Region in der DNA der Mitochondrien, der »Kraftwerke der Zelle«. Diese Sequenz kommt bei jeder Tierart vor und enthält den Bauplan für einen Teil des Enzyms Cytochrom-c-Oxidase, nämlich für dessen Untereinheit I, die mit dem Kürzel COI bezeichnet wird. Die COI-Sequenz unterscheidet sich zwischen verschiedenen Spezies relativ stark und eignet sich daher als eindeutiges Kennzeichen einer Art, ähnlich dem Strichcode, der Lebensmittelverpackungen ausweist. Deshalb der Name DNA-Barcode.

Ein Team um den Biologen Paul Hebert, damals an der University of Guelph in Kanada, hatte Anfang der 2000er Jahre die Methode des DNA-Barcodings entwickelt. Heute nutzen Wissenschaftler das Verfahren, um Arten zuverlässig und schnell voneinander abzugrenzen. Spezies nur anhand ihrer äußeren morphologischen Merkmale zu unterscheiden, ist deutlich zeitaufwändiger und erfordert jahrelange Übung und Erfahrung. Mit Hilfe des Barcodings lassen sich überdies Proben, die DNA enthalten – etwa Eierschalen von Vögeln – einer Art verlässlich zuordnen.

Bibliothek des Lebens

In den ersten beiden GBOL-Phasen haben die beteiligten Forscherinnen und Forscher von rund 19000 Arten die DNA-Barcodes ermittelt und in der Gendatenbank hinterlegt. Die Tiere, die sie dafür untersucht haben, stammten teils aus Sammlungen etwa der Naturkundemuseen, teils aus Feldstudien. In Laboren entnahmen die Fachleute den Individuen Proben, isolierten das Erbmaterial daraus und entschlüsselten die DNA-Barcodes. Zusammen mit weiteren Daten wie dem Fundort und Fotos wanderten diese anschließend in die Datenbank. Daraus ist eine »Bibliothek des Lebens« entstanden, die sich frei zugänglich unter <https://bolgermany.de/home> abrufen lässt.

Der laufende dritte Projektabschnitt hat zum Ziel, die weithin fehlenden Daten parasitischer Wespen und nicht stechender Mücken zu

FEIND DES FEINDES
Die Wespenart *Leptopilina japonica* befällt schädliche Kirschesigfliegen.



erfassen und der Datenbank hinzuzufügen. Laut den Fachleuten wird der ökologische Einfluss solcher Insekten bislang unterschätzt. Darauf deutet bereits die schiere Menge dieser Tiere hin, die oft nicht einmal einen Millimeter groß werden: In so genannten Malaise-Fallen, in denen sich vor allem flugaktive Kerbtiere verfangen, machen sie oft mehr als zwei Drittel der Gesamtmasse aus.

Ein umfangreicheres Wissen über die Dark Taxa könnte von direktem Nutzen sein, betont Ralph Peters. Bei den Hymenoptera gelte das beispielsweise im Hinblick auf die biologische Schädlingsbekämpfung. »Parasitische Wespen entwickeln sich an oder in anderen Tieren, meist anderen Insekten. Sie sind daher natürliche Gegenspieler von anderen Arten des Ökosystems.«

Konkret heißt das: Die Wespen könnten helfen, wirtschaftliche Verluste zu mindern, die den Anbau von Nutzpflanzen im Freiland erschweren. So befällt die parasitische Wespenart *Leptopilina japonica* die Larven der Kirschessigfliege *Drosophila suzukii*. Letztere stammt ursprünglich aus Asien, wurde aber 2008 nach Europa eingeschleppt und richtet seither im Obst- und Weinanbau erhebliche Schäden an. *L. japonica* hat das Potenzial, diese invasive Spezies zurückzudrängen und so die Ernteerträge zu erhöhen.

Ein weiterer Nutzen parasitischer Wespen könnte in der Bestäubung liegen, sagt Peters. Gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen hat er herausgefunden: Etliche Arten dieser Insektengruppe fliegen Kulturpflanzen wie den Kümmel an. »Bienen sind zwar sicherlich die wichtigsten Bestäuber, aber keinesfalls die einzigen«, erklärt er. Schon heute nutze die Land- und Forstwirtschaft zahlreiche »Ökosystem-Dienstleistungen« von Dark Taxa, um Pflanzen zu bestäuben, Schädlinge zu bekämpfen und Böden aufzubereiten – meist, ohne dass es ihr bewusst sei. Mehr Wissen über die einschlägigen Arten würde helfen, dies gezielter zu tun, sagt Peters. Das wiederum könne zu steigenden Ernteerträgen und einer

höheren Biodiversität führen, bei sinkenden Kosten und weniger Pestizideinsatz.

Nicht stechende Mücken üben ebenfalls ökologisch wichtige Funktionen aus, betont die Projektkoordinatorin Vera Rduch. Die Insekten seien ungeheuer arten- und individuenreich und wirkten an der Bestäubung ebenso mit wie an der Zersetzung von Biomasse im Boden. Zudem dienten sie zahlreichen anderen Tieren als Nahrung.

Verborgene Chancen

Selbst in medizinischen Belangen könnten Dark Taxa von Nutzen sein. Parasitische Wespen tragen Gifte in sich, die mögliche Arzneistoffkandidaten darstellen, aber noch weitgehend unerforscht sind. »Die enorme Artenvielfalt birgt ein großes Potenzial, das bisher nicht ansatzweise gehoben ist«, sagt Peters. Doch bleibt uns genug Zeit, dieses Potenzial zu erkunden und auszuschöpfen? Schließlich sind Dark Taxa genau wie andere Arten von der schwindenden Biodiversität betroffen. Sie leiden unter Habitatzerstörung und -zerstückelung, großflächigem Pestizideinsatz, invasiven Spezies und den Folgen des Klimawandels.

»Einige negative Effekte sind nachgewiesen und ansatzweise verstanden – etwa der Einfluss starker Hitzeperioden auf die hiesigen Arten, die an ein gemäßigtes Klima angepasst sind«, erklärt Peters. »Insgesamt wissen wir aber noch wenig darüber, welche Art und welches Ökosystem auf welche Weise vom Klimawandel betroffen sein wird.« Fakt sei freilich, dass die ökologischen Veränderungen vielerorts bereits zu dramatischen Verlusten geführt haben. »Wir verlieren täglich Arten – darunter solche, die wir überhaupt noch nicht untersucht und beschrieben haben.«

Wie sich das auswirken wird, weiß niemand genau. Deshalb ist es so wichtig, mehr über Dark Taxa herauszufinden. Die Covid-Pandemie habe das jedoch behindert, erzählt Rduch. Nicht nur wegen steigender Preise für Labormaterialien und längerer Liefer-

zeiten, sondern ebenso auf Grund der erschwerten Ausbildung neuer Taxonominen und Taxonomen. Darum hinke man dem Zeitplan des Projekts ein wenig hinterher. Auch wenn das Team insgesamt gut vorankomme.

Neben mitochondrialen Gensequenzen nutzen die Fachleute Stereolichtmikroskope, Elektronenmikroskope sowie Computertomografen, um die Arten voneinander abzugrenzen. Zudem entschlüsseln sie Sequenzen des so genannten Kerngenoms, der DNA im Zellkern. Diese sollen weiterhelfen, wenn die Ergebnisse der morphologischen Untersuchungen und des DNA-Barcodings widersprüchlich oder unzureichend sind. Das Ziel lautet, die Dark Taxa möglichst umfassend anhand vieler Daten zu charakterisieren, damit sie später weiter erforscht werden können, etwa in Bezug auf ökologische Funktionen.

Eine Fortführung des Projekts nach Ende der dritten Phase hält Rduch für absolut notwendig. Weitere ähnliche Initiativen in Deutschland, Europa und der Welt müssten folgen oder ausgebaut werden, denn bislang kratze das Team nur an der Oberfläche. Bei allem Fortschritt, den die Forschung gemacht habe, stünde die Wissenschaft noch immer vor einem großen Berg der Unwissenheit, was die heimische Tierwelt betrifft – von der globalen zu schweigen. ◀

Christina Mikalo arbeitet als Journalistin in Herdecke.

QUELLEN

Chimeno, C. et al.: Peering into the darkness: DNA barcoding reveals surprisingly high diversity of unknown species of diptera (insecta) in Germany. *Insects* 13, 2022

Hebert, P. et al.: Biological identifications through DNA barcodes. *The Royal Society London B* 270, 2003

Killian Salas, I. et al.: Analyse der Bestäubernetzwerke im Kümmel (*Carum carvi*) mittels DNA-Barcoding. *Julius-Kühn-Archiv* 460, 2018

Rduch, V., Peters, R.: GBOL III: Dark Taxa – die dritte Phase der German Barcode of Life Initiative hat begonnen. *Koenigiana* 14, 2020

KOHLLENHYDRATSYNTHESE

Lange Zuckerschlangen aus dem Automat

Es ist knifflig, lange Kohlenhydrate mit eindeutig definierten Strukturen herzustellen. Ein neuer Syntheseautomat für die speziellen Zuckerpolymeren soll das ändern.

Die biologischen Funktionen von Kohlenhydraten lassen sich nur schwer erforschen. Denn es ist knifflig, bestimmte Strukturen solcher langkettiger Moleküle präzise zu erstellen. Ein neuer Syntheseautomat für die speziellen Zuckerpolymeren soll das ändern.

Kohlenhydrate sind nicht nur eine Energiequelle, sie spielen auch eine Schlüsselrolle bei der Übertragung biologischer Signale, der Zellerkennung und als Formgeber für lebende

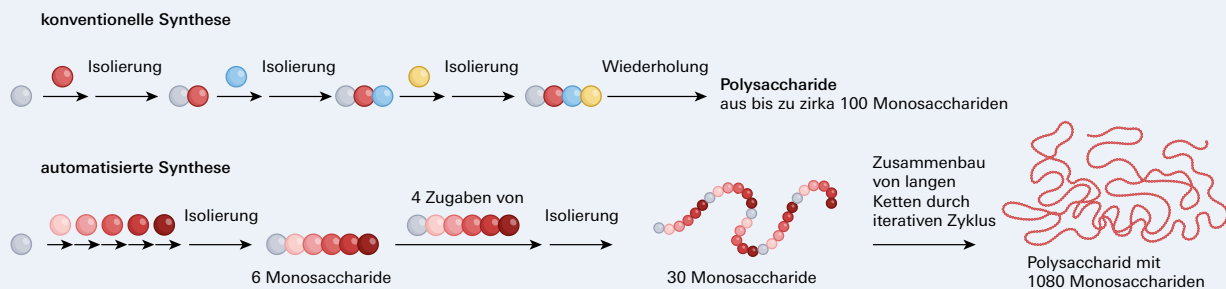
Organismen. In der Natur sind die Stoffe oft strukturell undefiniert: Die Moleküle sind nicht alle gleich aufgebaut, sondern bilden eine bunte Mischung. Das macht es schwierig, ihre biologische Aktivität zu untersuchen. Strukturell gut definierte Kohlenhydrate – bei der sich alle Moleküle gleichen – sind daher für biologische Studien sehr gefragt.

Insbesondere die größeren unter ihnen lassen sich aber nur schwer im Labor herstellen. Eine Gruppe um

Wenlong Yao von der Universität Peking hat dieses Problem jetzt auf besondere Weise gelöst: in Form eines automatisierten Kohlenhydrat-Synthesizers. Die Maschine vereinfacht die Herstellung langer Zuckerketten in Lösung erheblich, indem sie die Zahl der Schritte verringert, bei denen man Zwischenprodukte isolieren muss.

Kohlenhydrate sind lange Ketten von Zuckerbausteinen, so genannten Monosacchariden. Neben Nuklein-

Kohlenhydrate effizienter herstellen



Bei der herkömmlichen Kohlenhydratsynthese setzt man die Zielmoleküle Stück für Stück zusammen: Jeweils ein Monosaccharid (im Bild durch eine Kugel dargestellt) nach dem anderen wird an die wachsende Kette angeknüpft. Nach jeder Verknüpfung isoliert man das Produkt von Hand. Daher lassen sich auf diese Weise nur Polysaccharide begrenzter Größe herstellen.

Bei der automatisierten »multiplikativen« Strategie erfolgt der Zusammenbau maschinell. Die chemischen Vorgänge sind so optimiert, dass mehrere Zugaben von Monosacchariden (oder größeren Bausteinen) in einem Reaktionsgefäß erfolgen können, bevor das Produkt isoliert wird. Dadurch sind weniger Isolierungsschritte nötig. Das Produkt jedes Zyklus wird als Baustein für den nächsten Zyklus verwendet. Auf diese Weise haben die Autoren ein Polysaccharid aus 1080 Monosacchariden hergestellt.

säuren, Proteinen und Lipiden bilden sie die vierte wichtige Stofffamilie, aus denen komplexe Organismen bestehen. Im Gegensatz zu Nukleinsäuren und Proteinen, die linear aufgebaut sind – in denen sich also jeder neue Baustein an nur eine einzige mögliche Stelle im bestehenden Molekül anlagert –, liegt die Sache bei Kohlenhydraten komplizierter: Jedem hinzukommenden Monosaccharid bieten sich mehrere Anknüpfungspositionen an. Daher unterscheiden sich die natürlich gebildeten Kohlenhydrate strukturell zwangsläufig, und es ist sehr schwierig, solche mit genau definierter Struktur in der Natur zu finden.

Der Herstellungsprozess für die Kohlenhydrate ähnelt dem Handyspiel »Snake«

Im Prinzip ließe sich dem beikommen, indem man die Stoffe im Labor herstellt. Herkömmliche Verfahren sind jedoch auf Zuckermoleküle mit maximal etwa 100 Bausteinen beschränkt, da viele manuelle Schritte nötig sind – etwa die schwierige Isolierung von Zwischenprodukten. Es gibt zwar automatisierte Systeme für die Kohlenhydratsynthese, darunter enzymvermittelte Methoden und eine elektrochemische Montage, doch damit lassen sich höchstens 150 Zuckerbausteine kontrolliert aneinanderreihen. Zum Vergleich: Zellulose besteht aus einigen hundert bis mehreren tausend Monosacchariden.

Yao und seine Kollegen haben jetzt eine Lösung für dieses Problem erdacht. Ihr Synthesegerät besteht aus drei Komponenten: dem Synthesesystem, einem laufenden Überwachungssystem (Sensoren, die den Fortschritt der Reaktionen verfol-

gen) und einer Steuerungssoftware, mit der sich die Hardware programmieren lässt.

Das Synthesesystem umfasst einen Reaktor mit einem Magnetrührer und thermostatischen Reglern, mit denen sich die Reaktionstemperatur zwischen minus 80 und plus 100 Grad Celsius einstellen lässt. Eine Lampe kann zugeschaltet werden, um Reaktionen mit sichtbarem Licht statt durch Erhitzen zu starten – ein nachhaltiger Ansatz für die Kohlenhydratsynthese. Ein automatisches Injektionssystem steuert die Zufuhr der Reaktanden, weiteren Reagenzien und Lösungsmittel, und zwar mittels eines selbstkorrigierenden Algorithmus, der es ermöglicht, exakte Mengen von bis zu 18 verschiedenen Komponenten hinzuzugeben. Das Injektionssystem spült sich zwischen den Zugaben der Chemikalien mit Lösungsmittel, um Verunreinigungen der Kanäle zu verhindern.

Der Herstellungsprozess für die Kohlenhydrate mit der Synthesemaschine ähnelt dem 1997 vorgestellten Handyspiel »Snake«. Dabei lenken die Spieler eine Schlange, um Nahrung aufzunehmen – je mehr Nahrung sie frisst, desto mehr wächst sie. In ähnlicher Weise verwenden die Benutzer des Kohlenhydrat-Synthesizers von Yao und seinen Kollegen einen Computer, um Reagenzien in einen Reaktor einzuspeisen und so das Wachstum einer langen »Schlange« aus Monosacchariden zu steuern.

Rekord-Polysaccharid

Das funktioniert wie folgt: In Anwesenheit eines chemischen Reaktionsbeschleunigers oder eines Fotoaktivators – einer Verbindung, die in Anwesenheit von Licht eine Reaktion auslöst – reagieren gleiche Mengen zweier monosaccharidhaltiger Bausteine zu einem strukturell definierten Disaccharid. Einen der Bausteine bezeichnet man dabei als Glykosyl-Donor, den anderen als Glykosyl-Akzeptor (entsprechend ihrer Rolle beim Knüpfen der neuen, so genannten glykosidischen Bindung). Das

entstandene Disaccharid kann anschließend als Glykosyl-Akzeptor in einer Reaktion mit einem anderen Glykosyl-Donor wirken, wodurch die Kette zu einem Trisaccharid verlängert wird. Wiederholt man diesen Zyklus mehrfach, lässt sich im Prinzip eine breite Palette strukturell gut definierter Kohlenhydrate herstellen – von kurzen Ketten aus bis zu zehn Zuckerbausteinen (Oligosaccharide) bis zu längeren (Polysaccharide).

Der Synthesizer beschleunigt die Herstellung von Polysacchariden durch eine neue Herangehensweise: die so genannte automatisierte multiplikative Synthese. Statt nur Monosaccharide als Bausteine zu nutzen, werden ganze Ketten von Sacchariden wie Einzelbausteine behandelt und miteinander verknüpft. Auf solche Weise haben Yao und seine Kollegen eine Bibliothek klar definierter Polysaccharide aufgebaut. So schufen die Wissenschaftler ein Polysaccharid aus 1080 Monomeren – möglicherweise das längste Polysaccharid mit einer eindeutigen Struktur, das bislang zusammengesetzt wurde.

Im Vergleich zur manuellen Herstellung und den bisher bekannten automatisierten Wegen spart das System Zeit und Ressourcen. Das Online-Monitoringsystem analysiert die Reaktionen laufend und liefert Rückmeldungen, anhand derer sich entscheiden lässt, ob der nächste Syntheseschritt erfolgen soll. So lässt sich beispielsweise überprüfen, ob die richtigen Mengen an Lösungsmitteln in den Reaktor gegeben wurden. Das kann mitunter mögliche Nebenreaktionen und damit die Verschwendung wertvoller Ausgangsstoffe eindämmen.

Der vielleicht größte Vorteil besteht darin, dass das Gerät für die entscheidenden Reaktionsschritte weniger Schutzgruppen benötigt. Das sind Gruppierungen von Atomen, die man bei langen Synthesen einsetzt, um reaktive Teile eines Moleküls abzuschirmen, damit man an anderer Stelle Änderungen vornehmen kann. Bei konventionellen Her-

stellungsrouen komplexer Substanzen verwendet man oft viele verschiedene Schutzgruppen, von denen jede in der Regel zwei zusätzliche Schritte erfordert: einen, um die Schutzgruppe am Molekül anzubringen, und einen weiteren, um sie anschließend wieder zu entfernen. Bei jedem dieser Schritte entsteht eine Zwischenverbindung, die normalerweise isoliert werden muss, bevor man mit ihr weiterarbeiten kann.

Mit der neuen automatisierten Vorgehensweise lassen sich jene Schritte umgehen, was die Ausbeute an komplexen Kohlenhydraten erhöht. Darüber hinaus benötigt man keine hochqualifizierten Arbeitskräfte, um die Reaktionen durchzuführen.

Es stellt sich nun die Frage, ob sich diese Strategie auf die Herstellung von Glykoproteinen ausweiten lässt. Das sind Moleküle, die aus einem Protein mit angehängten Kohlenhydraten bestehen. Glykoproteine besitzen vielfältige biologische Funktionen, etwa bei der Fortpflanzung und im Immunsystem. Falls der neue Syntheseautomat chemische und

enzymatische Methoden miteinander kombinieren könnte, um strukturell gut definierte Glykoproteine herzustellen, dürfte er wesentlich dazu beitragen, die biologischen Funktionen und Wirkmechanismen solcher Moleküle zu erforschen.

Eine weitere mögliche Anwendung liegt im Bereich der Antikörper-Wirkstoff-Konjugate (ADCs, kurz für antibody-drug conjugates). Diese bestehen aus einem Protein (dem Antikörper), das etwa mit einem Krebsmedikament verbunden ist. ADCs sind viel versprechend für die gezielte Vernichtung von Tumorzellen und könnten mehrere Vorteile gegenüber herkömmlichen Chemotherapien gegen Krebs haben: Man vermutet, dass der Körper sie möglicherweise besser aufnehmen, verteilen und ausscheiden kann und dass sie dort stabiler und sicherer sind als bisherige Wirkstoffe. Kohlenhydrate an Antikörper in ADCs zu binden, könnte deren Effekt gegen Krebszellen wiederum stark erhöhen. Eine Methode, mit der sich Bibliotheken von Antikörpern mit Kohlenhydrat-

Anhängseln synthetisieren lassen, würde daher die Entwicklung weiterer Antikörper-Wirkstoff-Konjugate unterstützen. ◀

Hanchao Cheng und **Peng George Wang** forschen in der Abteilung für Pharmakologie an der Southern University of Science and Technology in Shenzhen (China).

QUELLEN

Joseph, A. A. et al.: Total synthesis of polysaccharides by automated glycan assembly. *Journal of the American Chemical Society* 142, 2020

Wu, Y. et al.: Total synthesis of mycobacterial arabinogalactan containing 92 monosaccharide units. *Nature Communications* 8, 2017

Yao, W. et al.: Automated solution-phase multiplicative synthesis of complex glycans up to a 1,080-mer. *Nature Synthesis* 1, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 610, S. 266–267, 2022

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 (Lt看.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Lt看.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistentz: 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 (Lt看.),

Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzung: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Katja Melenthin

Leser- und Bestellservice: Estefanny Espinosa de Rojas, Helga Emmerich, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 9,30 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 98,40; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 75,-, PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio), des VCBG und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Ein Teil der Auflage beinhaltet eine Beilage von Plan International Deutschland e. V.

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.



Schlechte Luft im trauten Heim

Die Atmosphäre ist nicht überall gleichermaßen mit Schadstoffen belastet. In Innenräumen ist das Atmen oft ungesünder.

» spektrum.de/artikel/2108283

Eigentlich stehen wir in puncto Luftqualität gar nicht schlecht da. Wir hören vom Smog in fernen Millionenstädten Indiens und Chinas, aber vor der Haustür sollen uns ja demnächst Elektroautos von Abgasen verschonen. Nur selten heißt es, man möge wegen eines Chemieunfalls daheimbleiben und alle Fenster schließen. Falls draußen tatsächlich mal dicke Luft herrscht, erleben wir immerhin unsere Wohnung als das letzte ökologische Refugium, als sichere Burg inmitten einer global bedrohten Umwelt.

Aber längst nicht überall ist der Aufenthalt drinnen gesünder als draußen. Milliarden Menschen bereiten ein Leben lang ihre Nahrung über offenem Feuer in den eigenen vier Wänden zu und inhalieren unfreiwillig die aufsteigenden Verbrennungsrückstände. Alles in allem hat die Luft in Innenräumen nach Schätzung der Weltgesundheitsorganisation im Jahr 2020 mehr als drei Millionen Tote gefordert – fast noch einmal so viele wie die schlechte Luft im Freien.

Was tun gegen die hinterhältige Menschheitsgeißel? Zunächst einmal Daten sammeln, mahnt der Brite Christopher J.M. Whitty, als Chief Medical Officer for England so etwas wie der oberste Amtsarzt und Regierungsberater. Zusammen mit Alastair C. Lewis, Professor für Atmosphärenchemie an der University of York, und Deborah Jenkins, Beraterin am britischen Gesundheitsministerium, hat er ein Forschungsprogramm und mögliche Maßnahmen skizziert (*Nature* 614, S. 220–223, 2023).

In wohlhabenden Ländern wie England oder Deutschland wird zwar kaum noch mit Kohle geheizt, aber dafür kam in den vergangenen Jahrzehnten Kaminholz in Mode – und damit die Belastung durch Feinstäube. Auch kennt, wer einmal auf den Britischen Inseln weilte, die Gasöfen, die oft ein flackerndes Kaminfeuer imitieren und Stickoxide emittieren. Möbel setzen chemische Schadstoffe wie Formaldehyd frei, und das Radon im Baugrund strahlt radioaktiv. All die für sich genommen geringen Belastungen addieren sich mit der Zeit nen-

nenswert. Für die Luftqualität drinnen gibt es keine verbindlichen Grenzwerte.

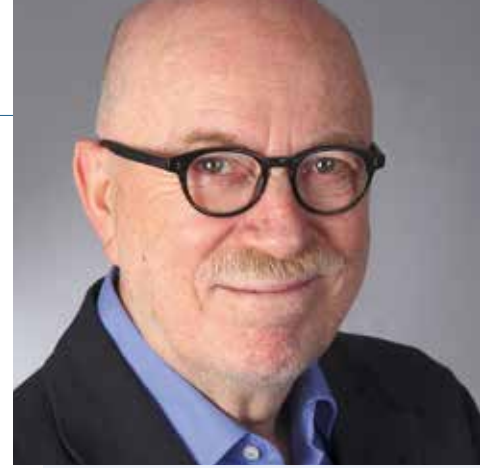
Die Gesundheitsprobleme der Bewohner hängen stark von ihrem Einkommen ab. In halbwegs erschwinglichen, aber dafür überbelegten und tageslichtarmen Wohnungen macht sich gern Schimmel breit. Vor allem wenn man, um Heizkosten zu sparen, selten oder gar nicht lüftet. Nicht zuletzt stellen die Hausgenossen selbst ein Risiko dar: Rundum reichlich ausgeatmetes Kohlendioxid kann einem quasi die Luft nehmen, und die auf kurze Distanz aus Mund und Nase versprühten Aerosole übertragen Krankheitserreger.

Mit steigendem Wohlstand sinken die Schädigungen. Der Einbau von Zentralheizungen mindert den Schimmelbefall, elektrische Herde erübrigen die Stickoxidemissionen von Gaskochern, und größere Wohnungen verringern das Ansteckungsrisiko.

So entpuppt sich das Ziel gesunden Wohnens letztlich als Geldfrage. Die Ratschläge der Wissenschaft stoßen auf einen knappen Immobilienmarkt, wo Vermieter angesichts satter Nachfrage von sich aus wenig Anreiz verspüren, in umweltfreundliche Umbauten zu investieren. Solche Initiativen muss die öffentliche Hand anstoßen – etwa nach dem Beispiel der energetischen Sanierung mittels Wärmedämmung, welche erst durch gesetzliche Auflagen und finanzielle Unterstützung in Gang kam.

Eine Sanierung der Innenräume wäre freilich viel komplizierter; sie müsste nicht nur den Wust diverser Daten bewältigen, sondern auch den spezifischen Widerstand überwinden, den Eingriffe in die Privatsphäre hervorrufen.

Vielleicht erweist sich hier die Digitalisierung als *Deus ex Machina*: So wie immer mehr Menschen mit smarten Uhren umherlaufen, die ihre Gesundheitsdaten speichern, könnten intelligente Sensoren diskret die Umwelt in Innenräumen überwachen.



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



Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2023

JETZT BEWERBEN

bis zum 3. April 2023

Der Georg von Holtzbrinck Preis zeichnet herausragende Beiträge auf dem Gebiet des Wissenschaftsjournalismus aus. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

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

Es wird ein Preis in der **Kategorie Text**, ein Preis in der **Kategorie Elektronische Medien** und ein Preis in der **Kategorie Nachwuchs** vergeben.

Die Preise in den Kategorien Text und Elektronische Medien sind mit jeweils 10.000 EUR dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 5.000 EUR dotiert.

Detaillierte Informationen unter
www.holtzbrinck-wisspreis.de

Wie Vögel ihren Gesang wahrnehmen

Für Singvögel scheint ihr eigenes Tirilieren ganz anders zu klingen als für menschliche Ohren. Offenbar achten die Tiere verstärkt auf feinste akustische Details.

► spektrum.de/artikel/2108271



Adam Fishbein ist promovierter Neurowissenschaftler und forscht als Postdoc an der University of California in San Diego (USA). Hier untersucht er die kognitiven und neuronalen Grundlagen von sozialen Interaktionen bei Tieren.





ZEBRAFINKEN (*TAENIOPYGIA GUTTATA*) sind bei Vogelstimmenforschern äußerst beliebt, da sich die Tiere leicht züchten lassen und einen einfachen Gesang präsentieren.

AUF EINEN BLICK

Sinn fürs Detail

- 1** Der Gesang von Singvögeln scheint Parallelen zur menschlichen Sprache oder Musik aufzuweisen. So muss er von den Individuen erst erlernt werden.
- 2** Die Reihenfolge der Strophen spielt allerdings für die Tiere eher eine untergeordnete Rolle. Stattdessen achten sie auf nur Millisekunden andauernde Variationen des Schalls.
- 3** In dieser für das menschliche Ohr kaum hörbaren Feinstruktur der Schallwellen könnten sich individuelle Informationen verbergen.

Wenn wir einen Vogel singen hören, lässt uns das unwillkürlich an Musik oder Sprache denken. Im Flöten der Amsel erkennen wir regelrechte Melodien, wir nehmen satzähnliche Strukturen im »Zizibäh« der Kohlmeise wahr und machen ein fröhliches Pfeifen im Gesang des Gartenrotschwanzes aus, den dieser mit weit geöffnetem Schnabel darbietet.

Vogelgesang wird üblicherweise als lange, oft recht komplexe erlernte Lautäußerungen definiert, die Vögel beim Werben um Geschlechtspartner sowie zur Revierverteidigung einsetzen. In der heutigen Forschung grenzt man die Gesänge klar von den meist kürzeren, einfacher strukturierten Rufen ab, die den Tieren angeboren sind und vielfältigeren Zwecken dienen, etwa um auf Räuber oder Nahrung hinzuweisen. Diese Definitionen sind jedoch nicht immer ganz eindeutig, da die Gesänge mancher Arten viel unauffälliger als ihre Rufe erscheinen. Im Folgenden meine ich mit dem Begriff die längeren und komplizierteren Lautfolgen im Gegensatz zum kurzen Tschilpen oder Piepen.

Wenn wir Vogelgesang wissenschaftlich analysieren, teilen wir ihn in kleinere Einheiten ein, die wir als Töne oder Silben bezeichnen. Diese gruppieren wir in Sequenzen – Phrasen oder Motive genannt –, die sich durch charakteristische Rhythmen und Tempi auszeichnen. Damit können wir potenziell bedeutsame Aspekte eines Gesangs ermitteln, etwa die Anzahl der Silbentypen im Repertoire eines Vogels oder die Muster, in denen er Phrasen arrangiert. Die Beschreibungen entsprechen jenen,

mit denen wir die Beziehungen zwischen Wörtern im Satzbau der menschlichen Sprache oder zwischen Noten in einem Musikstück wiedergeben.

Aber was denken die Vögel über all diese Merkmale? Wie klingt der Gesang in ihren Ohren? Neuere Untersuchungen meiner Kollegen und mir sowie zahlreiche Forschungsarbeiten einer weltweit wachsenden Zahl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern haben enthüllt, dass sich Vogelstimmen für die Tiere anders anhören als für uns Menschen.

Ein klassisches Verfahren, um die akustische Wahrnehmung im Freiland zu untersuchen, sind so genannte Playback-Experimente: Dabei spielt man Vögeln Gesänge vor und dokumentiert die Verhaltensantwort. Auf einen typischen Gesang ihrer Artgenossen reagieren viele Vögel wie auf einen Eindringling in ihr Revier. Sie nähern sich dem Lautsprecher, aus dem der Gesang ertönt, umkreisen die Schallquelle, um den Störenfried ausfindig zu machen, und äußern sich durch ihre eigenen Drohrufe oder Lieder. Durch einen Vergleich der Reaktion auf natürliche und manipulierte Gesänge lässt sich herausfinden, welche Merkmale wichtig für die Wahrnehmung sind. Im vordigitalen Zeitalter nahmen Ornithologen Vogelgesang mit Tonbandgeräten auf und stückelten anschließend das Magnetband buchstäblich neu zusammen, um



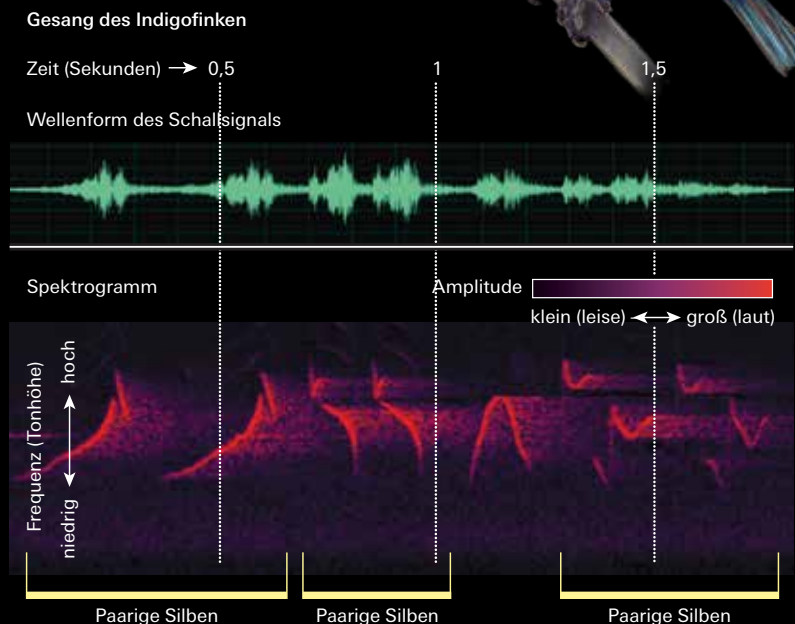
Indigofink (*Passerina cyanea*)

SPEKTROGRAMME: ADAM FISHER/ILLUSTRATION; INDIGOFINK: LIZ WAHID/SCIENTIFIC AMERICAN | 2022

Paarige Silben

Der Gesang des Indigofinken lässt sich als Wellenform des Schallsignals (oben) oder als Spektrogramm (unten) abbilden.

Letzteres gibt auf der x-Achse die Zeit und auf der y-Achse die Schallfrequenz oder Tonhöhe wieder, wobei die Amplitude beziehungsweise Lautstärke des Signals durch die Rotfärbung gekennzeichnet ist (je intensiver die Färbung, desto größer die Amplitude). Die Klammern markieren paarweise auftretende Silben innerhalb der Lautfolge, die für das menschliche Ohr ein charakteristisches Merkmal des Gesangs dieser Tiere darstellen. Die Indigofinken reagieren jedoch ähnlich auf veränderte Versionen ihrer Lieder, in denen die paarigen Silben fehlen. Demnach konzentrieren sie sich auf andere Eigenschaften ihres Gesangs.



Feinstruktur

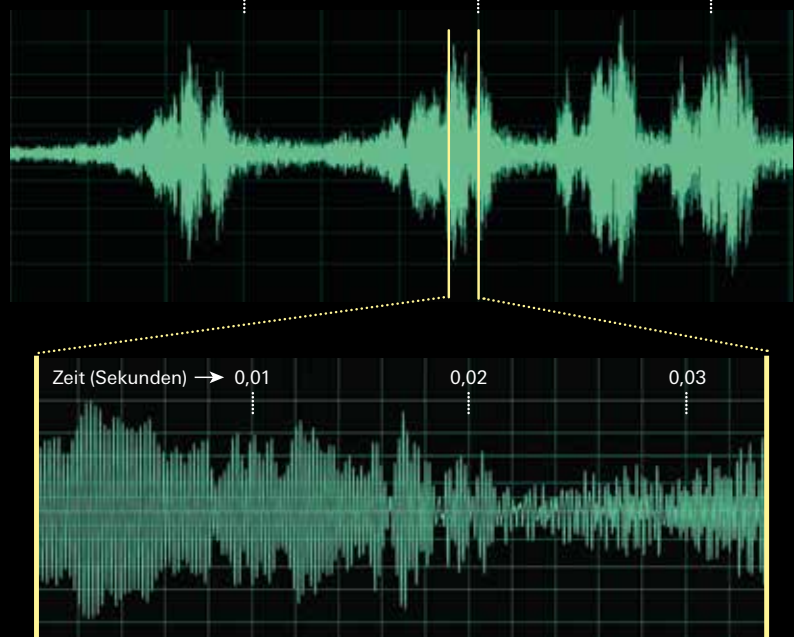
Wirft man einen genaueren Blick auf den Gesang des Indigofinken, offenbaren sich feinste Details, denen der Vogel eher zu lauschen scheint als den gepaarten Silben. Im oberen Teil der Abbildung sehen wir die Wellenform des Schallsignals zu Beginn des Gesangs. Bei der Vergrößerung des markierten Abschnitts der zweiten Silbe werden die schnellen Fluktuationen von Frequenz und Amplitude sichtbar, die in Millisekunden innerhalb einer Gesangsilbe ablaufen (unten).

Gesang des Indigofinken

Zeit (Sekunden) → 0,3

0,6

0,9



SPKTRGRAMME: ADAM FISHERIN

künstliche Gesänge mit anders arrangierten Silben oder kürzeren Pausen zwischen den Tönen zu erzeugen. Die heutigen digitalen Aufzeichnungsgeräte und Musikbearbeitungsprogramme haben derartige Manipulationen mittlerweile enorm vereinfacht.

In einem klassischen Playback-Experiment aus den 1970er Jahren untersuchte der Verhaltensforscher Stephen Emlen von der Cornell University die Gesangswahrnehmung bei nordamerikanischen Indigofinken (*Passerina cyanea*). Die leuchtend blauen Männchen der Spezies singen Lieder, deren Silben sie fast immer zweimal hintereinander vortragen. Auf dieses charakteristische Muster weisen ornithologische Bestimmungsbücher bei der Beschreibung des Indigofinkengesangs oft explizit hin. Auf einem Spektrogramm, das Tonhöhe und Lautstärke der akustischen Signale im Zeitverlauf visuell darstellt, sind die paarigen Silben ebenfalls deutlich zu erkennen (siehe »Paarige Silben«).


»Hast du das gehört?«

Ungeachtet des für menschliche Ohren so auffälligen Musters reagierten Indigofinken auf einen modifizierten Gesang aus ungepaarten Silben ähnlich territorial wie beim Hören ihrer natürlichen, aus Doppelsilben bestehenden Lieder. Es sieht demnach so aus, dass das Muster der paarigen Laute für die Vögel in Bezug auf das Erkennen ihrer Artgenossen keinerlei Bedeutung hat. Müsste der Indigofink seinen Gesang in einem Vogelführer beschreiben, wichen seine Ausführungen mit Sicherheit beträchtlich von unserer Darstellung ab.

Wie Vögel in freier Natur auf Gesang reagieren, ist zwar eine wichtige Fragestellung, doch ihre Erforschung unterliegt gewissen Einschränkungen. So könnte sich ein Individuum auf Futtersuche außer Hörweite aufhalten, wenn man das Experiment starten möchte. Im Labor sind Wissenschaftler dagegen in der Lage, tierisches Verhalten viel präziser und unter kontrollierten Bedingungen zu studieren. Wenn Sie beim Arzt einen Hörtest machen, werden Sie gebeten, die Hand zu heben oder einen Knopf zu drücken, um kundzutun, dass Sie einen Ton gehört haben. Um die auditive Wahrnehmung bei Vögeln zu untersuchen, verwenden wir einen ganz ähnlichen Ansatz. Nun können wir die Tiere nicht fragen: »Hast du das gehört?« Stattdessen trainieren wir sie darauf, auf einen Knopf in ihrem Käfig zu picken, wenn sie einen Laut registrieren beziehungsweise wenn sich der von ihnen gehörte Laut in eine bestimmte Kategorie einordnen lässt oder sich von einem anderen unterscheidet.

Laboruntersuchungen haben zahlreiche Gemeinsamkeiten in der Empfindlichkeit des Hörsystems bei Singvögeln und Menschen nachgewiesen, darunter etwa die Schwellenwerte, bei denen Differenzen in der Tonhöhe oder Pausen zwischen Lauten noch erkannt werden. Zugleich haben sie aber auch verblüffende Unterschiede zwischen Vögeln und Menschen in Bezug auf das Wahrnehmungsvermögen von Lautfolgen und akustischen Details zum Vorschein gebracht.

Ein zentrales Ergebnis dieser Studien ist die Tatsache, dass Vögel erstaunlich schlecht darin abschneiden, eine Melodie wiederzuerkennen, die in ihrer Tonhöhe nach



EIN STAR
(*STURNUS
VULGARIS*)
bietet in seinem
Gesang ein
reichhaltiges
Repertoire an
melodisch bis
mechanisch
klingenden
Motiven.

TIM FLACH

oben oder unten verschoben wurde. Wir Menschen besitzen hier eine natürliche Begabung – können wir doch zum Beispiel die Melodie von »Happy Birthday« unabhängig von der Tonlage identifizieren. Wie klassische Laborexperimente von Stewart Hulse (1931–2008) von der Johns Hopkins University aus den 1980er und 1990er Jahren demonstrierten, klingt eine nach oben oder unten verschobene Lautfolge für Vögel anders, obwohl sie nach wie vor dasselbe Muster aufweist. Die Melodien, die wir im Vogelgesang hören, weichen daher womöglich stark vom Wahrnehmungserlebnis der Tiere ab.

Nachfolgende Studien untermauerten diese Hypothese. 2016 berichtete ein Forscherteam um Timothy Genter von der University of California in San Diego, dass Stare (*Sturnus vulgaris*) verschobene Sequenzen nur dann erkennen können, wenn sämtliche feinen Details aus den Lauten entfernt werden. Die Ergebnisse unterstreichen, wie wichtig subtile Elemente für die Tiere beim Lauschen ihrer Gesänge sind.

Die Wellenform eines Schallsignals lässt sich auf zwei Ebenen beschreiben: Einhüllende und Feinstruktur. Erste setzt sich aus langsamen Schwankungen der Amplitude zusammen, während Letztere aus schnellen Fluktuationen von Frequenz und Amplitude innerhalb der Wellenform besteht (siehe »Feinstruktur«). Die Feinstruktur eines Schallsignals gibt Veränderungen im Millisekundenbereich wieder. Viele Ornithologen haben sie früher nicht beachtet, zum Teil auch deshalb, weil sie in Spektrogrammen nicht unmittelbar zu erkennen ist. Betrachtet man allerdings die Wellenform einer einzelnen Gesangssilbe in

einer detaillierten Vergrößerung, wird deren akustische Feinstruktur in ihren Einzelheiten sichtbar.

Pionierarbeit in der Erforschung der Feinstruktur des Vogelgesangs leistete Robert Dooling von der University of Maryland. Seit Jahrzehnten untersucht er gemeinsam mit seinen Kollegen das Vermögen von Vögeln, solche akustischen Details zu detektieren. In einer wegweisenden Studie von 2002 testeten die Forscher die Fähigkeiten von Vögeln und Menschen, zwischen Lauten zu differenzieren, die sich lediglich in ihrer Feinstruktur unterscheiden. Dabei schnitten sämtliche Vogelarten – Zebrafinken, Kanarienvogel oder Wellensittiche – bedeutend besser ab: Die Tiere konnten zwei- bis dreimal geringere Unterschiede in der Feinstruktur als menschliche Probanden ausmachen. Der genaue physiologische Mechanismus dieser hohen Empfindlichkeit ist bis heute nicht bekannt. Man vermutet, dass er mit Merkmalen des Innenohrs der Vögel zusammenhängt, das im Gegensatz zum Menschen eine kürzere und nur leicht gebogene, statt spiralförmig aufgerollte Cochlea besitzt.

Eine scheinbar simple Darbietung

Als ich 2015 im Rahmen meiner Doktorarbeit an der University of Maryland damit begann, Vogelgesang mit menschlicher Sprache zu vergleichen, maß ich jener Feinstruktur noch keine besondere Bedeutung bei. Stattdessen suchte ich nach sprachähnlichen grammatikalischen Kompetenzen von Vögeln. Doch während ich mich tiefer in die Fragestellung einarbeitete und zahlreiche Experimente durchführte, wurde mir zunehmend klar,

dass der Schlüssel zum Verständnis des Vogelgesangs vielleicht eher in diesen feinen akustischen Details verborgen liegen könnte als in den Sequenzen, in denen sie auftraten.

Der Champion unter den Vögeln, die Dooling in seiner Studie 2002 getestet hatte, war der Zebrafink (*Taeniopygia guttata*). Jener lebhafteste, in Australien heimische Singvogel hat sich als beliebteste Art in der experimentellen Vogelstimmenforschung etabliert – nicht zuletzt, weil er selbst in Gefangenschaft eifrig singt und sich erfolgreich fortpflanzt. Darüber hinaus erscheint seine ausschließlich von den Männchen vorgetragene Darbietung recht simpel: Sie besteht aus einem einzigen Motiv von drei bis acht Silben, das sich – üblicherweise in derselben Reihenfolge – permanent wiederholt. Wegen seiner übersichtlichen Struktur eignet sich der Zebrafinkengesang daher besser für wissenschaftliche Untersuchungen als andere Vogelstimmen. Weil die Männchen sowohl die Silben als auch die auftretenden Sequenzen von einem Lehrmeister – üblicherweise ihrem Vater – erlernen, liegt der Schluss nahe, dass beide Aspekte des Gesangs für die Wahrnehmung eine wichtige Rolle spielen.

Diese Hypothese überprüften wir 2018, indem wir untersuchten, wie gut Zebrafinken den Unterschied zwischen natürlichen und manipulierten Gesangsmotiven hören konnten, in denen manche Silben entweder rückwärts oder in vertauschter Reihenfolge auftraten (siehe »Unterscheidung von Lautfolgen«). Hierzu brachten wir den Vögeln bei, uns die von ihnen wahrgenommenen Lautunterschiede mitzuteilen: Zunächst bekamen sie wiederholte Laute vorgespielt. Wenn sie dann einen Knopf betätigten, startete ein Versuch, bei dem sich die Töne entweder veränderten oder gleich blieben. Pickte der Vogel bei veränderten Lauten mit seinem Schnabel auf einen bestimmten Knopf, zählte das als korrekter Treffer, und das Versuchstier erhielt zur Belohnung Futter. Pickte es dagegen bei gleich bleibendem Lautmuster auf den

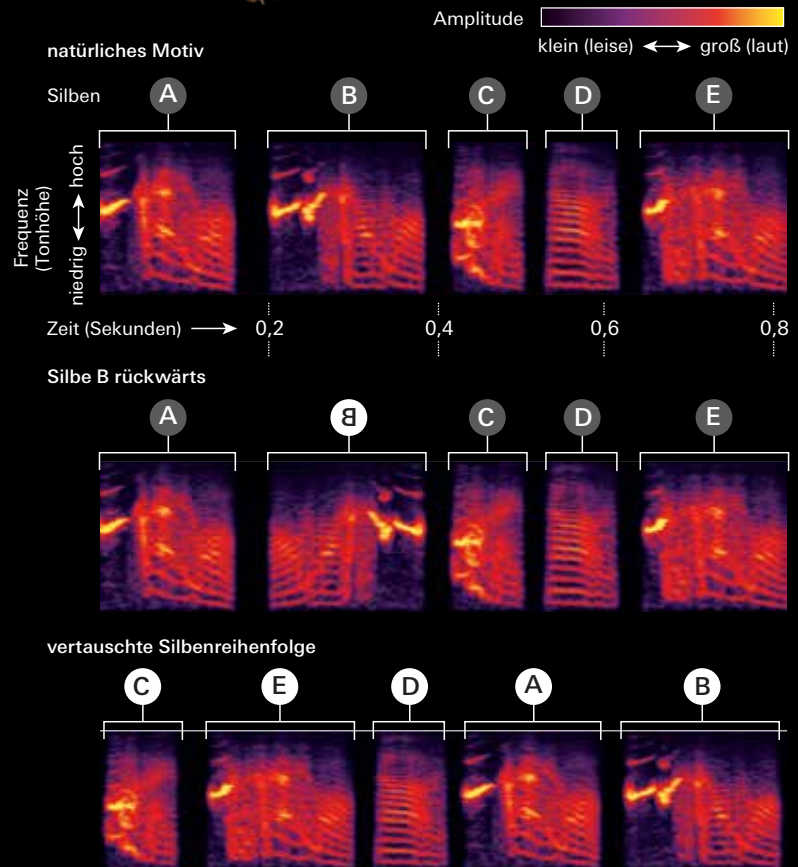
Knopf, gingen zur Strafe die Lichter im Käfig aus, und das Resultat wurde als Fehler gewertet. Mit Hilfe dieser Versuchsanordnung gelang es uns, das Unterscheidungsvermögen



Zebrafink (*Taeniopygia guttata*)

Unterscheidung von Lautfolgen

Der Gesang des Zebrafinken besteht aus einer Aneinanderreihung von für uns Menschen identisch klingenden Motiven mit einer bestimmten Silbenanzahl. Tatsächlich weichen sie aber in ihrer Feinstruktur beträchtlich voneinander ab, was die Tiere deutlich wahrnehmen. Die Spektrogramme zeigen oben das natürliche Motiv, das den Vögeln wiederholt vorgespielt wurde. Daraufhin hörten sie dasselbe Motiv, wobei jedoch die zweite Silbe rückwärtslief (Mitte). In einem weiteren Experiment wurde den Tieren das natürliche Motiv in vertauschter Reihenfolge der Gesangssilben präsentiert (unten). Die weißen Kreise markieren Silben, die entweder rückwärtsliefen oder vertauscht waren.



gen der Vögel zwischen dem sich wiederholenden natürlichen Gesangsmotiv und neuen Lauten (Motive mit verkehrten oder vertauschten Silben) zu ermitteln. Den Vögeln ging es bei dem Experiment lediglich darum, sich leckeres Futter zu verdienen.

Interessanterweise erwiesen sich die Zebrafinken als nahezu perfekt darin, umgedrehte Silben als andersartig wahrzunehmen, die für das menschlich Gehör eher schwer auszumachen sind. Bei der Unterscheidung vertauschter Silbensequenzen, was Menschen wiederum leichter erkennen, schnitten die Vögel jedoch deutlich schlechter ab. Spielt man eine Silbe rückwärts ab, verändert sich vor allem deren Feinstruktur. Es überrascht daher keineswegs, dass die Vögel diese Aufgabe bravourös beherrschten. Ihre Probleme mit den vertauschten Silbensequenzen erscheinen allerdings unerwartet – nicht nur, weil wir Menschen solche Veränderungen mühelos registrieren, sondern auch weil die Vogelmännchen beim Gesangserwerb lernen, Silben in einer bestimmten Reihenfolge vorzutragen. Die Schwierigkeiten der Zebrafinken, vertauschte Silben zu erfassen, bedeutet womöglich, dass die Sequenz zwar beim Erlernen des Gesangs eine Rolle spielt, aber für die innerartliche Kommunikation keine wesentlichen Informationen enthält.

Angesichts dieser Resultate fragten wir uns nun, inwieweit die Wahrnehmung der Feinstruktur für die natürliche Kommunikation der Vögel von Bedeutung ist. Rückwärtsgespielte Gesangsilben herauszuhören, stellt gewiss eine beeindruckende Fähigkeit dar, doch in Wirklichkeit produziert kein Vogel derartige Laute. Für uns galt daher herauszufinden: Wie gut erfassen die Tiere natürliche akustische Veränderungen in ihrem Gesang?

Verborgene Informationen

2018 hatten meine Kollegen bereits demonstriert, dass Zebrafinken in den Rufen ihrer Artgenossen, die Informationen über Geschlecht und Identität enthalten, subtile Unterschiede in der Feinstruktur ausmachen können. Um zu untersuchen, ob die Vögel akustische Feinheiten im Gesang ebenfalls erkennen, machten wir uns die Gegebenheit zu Nutze, dass Zebrafinken dabei ein einziges Motiv mit denselben Silben in gleicher Reihenfolge ständig wiederholen – zumindest klingt es für uns Wissenschaftler so. In Wirklichkeit existieren jedoch geringfügige Unterschiede in der Art und Weise, wie die einzelnen Silben des Motivs bei jeder neuen Wiedergabe gesungen werden. Wir überprüften deshalb, ob die Vögel zwischen den unterschiedlichen Interpretationen der Motivsilben unterscheiden können. In der Tat beherrschen sie das mühelos.

Aus diesem Ergebnis folgern wir, dass der auf uns wie eine ständige Wiederholung desselben Motivs wirkende Gesang des Zebrafinken in den Ohren der Vögel tatsäch-



WELLENSITTICHE (*MELOPSITTACUS UNDULATUS*) gehören nicht zu den Singvögeln, sind aber als Papageien ebenfalls recht begabt im stimmlichen Lernen.

TIM RACH

lich ganz anders klingt. Vermutlich gewinnen die Tiere aus der Feinstruktur ihrer Lieder eine Fülle an Informationen, etwa über Emotionen, Gesundheitszustand, Alter, individuelle Identität und vieles mehr, was jenseits unserer Hörfähigkeiten liegt. Andere Vögel, deren Gesänge sich für uns wie repetitive Sequenzen anhören, dürften ein ähnlich ausgeprägtes Wahrnehmungsvermögen wie die Zebrafinken besitzen.

Hier stellt sich die Frage, ob die kleinen akustischen Fluktuationen innerhalb des Vogelgesangs nicht einfach zufällig auftreten – so wie die Flugkurve eines Fußballs je nach Schuss des Spielers variiert. Tatsächlich dürfte aber der Schlüssel zur gesanglichen Feinstruktur im Stimmbildungsorgan der Vögel liegen. Wir Menschen erzeugen die Laute, die wir mit Mund und Zunge zu Sprache formen, im Kehlkopf am oberen Ende unseres Halses. Bei Vögeln erfolgt dagegen die Lautproduktion mit Hilfe einer speziellen, in zwei Äste gegabelten Struktur, die sich oberhalb der Lunge befindet: dem Stimmkopf (Syrinx). Jede Hälfte des Organs stellt eine eigene Schallquelle dar, die separat gesteuert werden kann (siehe »Spektrum« November 2022, S. 34). Zudem kontrahieren die Syrinxmuskeln der Singvögel schneller als jeder andere Wirbeltiermuskel und ermöglichen eine zeitliche Kontrolle im Millisekundenbereich. Vögel produzieren daher ihre feinen akustischen

Variationen nicht durch versehentliche Schnabelbewegungen, sondern können sie sogar willkürlich steuern.

Zusammengefasst belegen diese Studien, dass Vögel ihre Gesänge ganz anders wahrnehmen, als wir bislang dachten. Wenn wir Musik oder Sprache hören, stellen Melodie und Satzstruktur unverzichtbare Bestandteile dar, die wir unbewusst auf den Vogelgesang projizieren.

Unterschiede in der Silbenabfolge scheinen allerdings für Vögel keine große Rolle zu spielen. Für Menschen zerstören dagegen derartige Manipulationen in Sprache oder Musik die Textbotschaft beziehungsweise die Melodie eines Stücks komplett. Vögel achten offenbar stattdessen äußerst genau auf die akustischen Feinheiten individueller Gesangselemente – unabhängig von deren Reihenfolge. Darüber hinaus können sie winzige Details registrieren, die weit jenseits unseres Hörvermögens liegen.

Wie klingt also der Vogelgesang für Vögel? Vielleicht sollten wir statt Sprache oder Musik eher den Tanz als Analogie heranziehen. Hierbei muss die Reihenfolge der Schritte stimmen, um die Bewegungen korrekt auszuführen. Ein verpatzter Übergang kann dazu führen, dass eine bestimmte Figur total danebengeht. Schaut man jedoch anderen beim Tanzen zu, misst man der Reihenfolge der Schritte keine besondere Bedeutung bei. Das Publikum konzentriert sich stattdessen eher auf den Rhythmus sowie die Vielfalt und Kunstfertigkeit der Bewegungen. Ähnliches trifft möglicherweise auf den Vogelgesang zu: Während für den singenden Vogel die korrekte Abfolge unerlässlich ist, könnten dagegen für den zuhörenden Artgenossen die »Bewegungen« an sich am allerwichtigsten erscheinen.

Eine seltene Gabe

Das soll aber nicht heißen, es gäbe überhaupt keine signifikanten Parallelen zwischen Vogelgesang und menschlicher Sprache oder Musik. Die Fähigkeit, gehörte Laute zu reproduzieren – stimmliches Lernen genannt –, tritt im Tierreich eher selten auf. Unsere engsten Verwandten, die Schimpansen, scheinen das wie auch alle anderen Primaten nicht zu beherrschen. Selbst jene Säugetiere, die eine gewisse Begabung hierfür aufweisen, wie Fledermäuse, Wale, Elefanten, Robben oder Seelöwen, erreichen nicht dasselbe Niveau wie Menschen oder manche Vögel (darunter Singvögel, Papageien und Kolibris, während andere Gruppen wie Tauben, Hühner und Eulen nicht dazu zählen). Noch erstaunlicher sind die Befunde von Wissenschaftlern wie Eric Jarvis von der Rockefeller University, die nachweisen konnten, dass stimmliches Lernen und stimmliche Lautproduktion bei Singvögeln und Menschen über gleichartige Nervenbahnen und ähnliche molekulare Mechanismen gesteuert werden – ein Ergebnis konvergenter Evolution. Das Studium der Vögel liefert uns daher wichtige Erkenntnisse über die stimmliche Kommunikation des Menschen, wengleich der Gesang in den Ohren der Tiere nicht wie Musik oder Sprache in unserem Sinn klingt.

Vieles bleibt bei der Frage, wie Vögel Vogelgesang wahrnehmen, nach wie vor unbeantwortet. Einige Stu-

dien haben gezeigt, dass Vogelrufe bestimmte Informationen etwa über Nahrung oder Fressfeinde beinhalten, aber wir wissen derzeit nicht, ob sich Ähnliches im Vogelgesang verbirgt, etwa in dessen Feinstruktur. Des Weiteren besteht immer noch Unklarheit darüber, wie Vögel die gesangliche Feinstruktur in ihrer natürlichen Umgebung erfassen, wo der Schall von Bäumen oder Gebäuden reflektiert wird und mit einer Kakophonie an Umweltgeräuschen konkurriert.

Ferner haben Forschungsarbeiten ergeben, dass – im Gegensatz zur gängigen Ansicht – häufig auch weibliche Vögel singen. Diese Erkenntnis wirft die Frage auf, ob Männchen und Weibchen ihren Gesängen womöglich auf unterschiedliche Weise lauschen. Bei etlichen tropischen Arten singen zudem beide Geschlechtspartner kompliziert ineinander verwobene Duette, die für uns Menschen zuweilen wie die kontinuierliche Darbietung eines einzigen Vogels klingen. Wie schaffen es diese Tiere, ihren Einsatz korrekt abzusichern und zugleich die richtigen Töne zu treffen?

Wenn Sie das nächste Mal Vögel singen hören, versuchen Sie doch, ihn weniger als eine eingängige Melodie oder einen gesprochenen Satz wahrzunehmen. Stellen Sie sich ihn stattdessen als einen schnellen, präzise koordinierten Tanz des Stimmkopfs vor, der ebenso emotionsreich und tief sinnig wie menschliche Musik oder Sprache ist, dies aber auf eine ganz andere Weise zum Ausdruck bringt. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / PONG6400

QUELLEN

Dooling R. J. et al.: Auditory temporal resolution in birds: Discrimination of harmonic complexes. *Journal of the Acoustical Society of America* 112, 2002

Fishbein, A. R. et al.: Discrimination of natural acoustic variation in vocal signals. *Scientific Reports* 11, 2021

Lawson, S. L. et al.: Relative salience of syllable structure and syllable order in zebra finch song. *Animal Cognition* 21, 2018

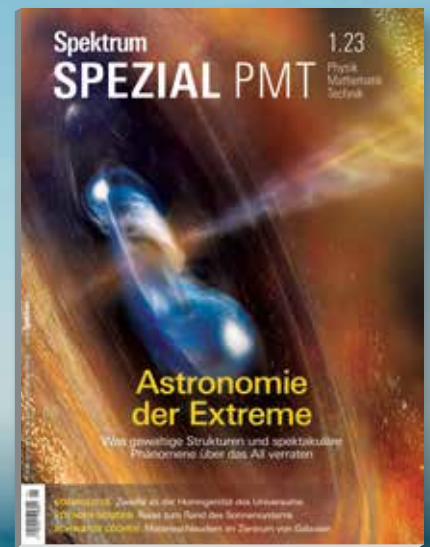
LITERATURTIPP

Ksepka, D. T.: Die Evolution des Vogelgehirns. *Spektrum der Wissenschaft* 9/2022, S. 36–43

Wie sich die erstaunlichen kognitiven Leistungen mancher Vögel entwickelten, beschreibt der Wirbeltierpaläontologe Daniel Ksepka.

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)

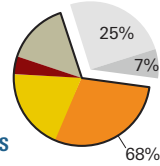
Ein neues Ich in 80 Tagen

Unsere Körperzellen erneuern sich ständig. Nach jeweils 80 Tagen sind so viele ersetzt, wie wir insgesamt besitzen.

Text: Mark Fischetti, Grafik: Jen Christiansen

Die Zellen, aus denen der menschliche Körper besteht, sterben ständig ab und machen neuen Platz. Wissenschaftler des Weizmann Institute of Science in Israel haben präzise ermittelt, wie schnell das geschieht. Etwa ein Drittel unserer Körpermasse entfällt auf Flüssigkeiten außerhalb der Zellen, beispielsweise Blutplasma, sowie auf Feststoffe wie die Kalziumverbindungen der Knochen. Die restlichen zwei Drittel setzen sich aus rund 30 Billionen menschlichen Zellen zusammen. 70 Prozent davon gehören zu Fett- und Muskelgewebe und überdauern im Schnitt 12 bis 50 Jahre. Überdies enthält unser Organismus zahlreiche kurzlebige Zellen: etwa jene des Bluts, die je 3 bis 120 Tage lang überleben, und solche des Darmepithels, die meist weniger als eine Woche durchhalten. Diese beiden Gruppen sind maßgeblich verantwortlich dafür, dass der Umsatz unseres Körpers bei 330 Milliarden Zellen pro Tag liegt. Binnen 24 Stunden wird somit gut ein Prozent unserer Zellen ersetzt. Nach 80 Tagen entspricht das rechnerisch einem komplett neuen Ich.

Die Zellen unseres Organismus



Nach Masse
Bei 25 Prozent unserer Körpermasse handelt es sich um Flüssigkeiten außerhalb der Zellen, etwa Blutplasma. Weitere 7 Prozent machen Minerale und andere Feststoffe aus. Die übrigen 68 Prozent setzen sich aus menschlichen Zellen zusammen.

Nach Anzahl*
Ein 70 Kilogramm schwerer Mensch besteht aus rund 30 Billionen Zellen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Abmessungen stark: Fett- und Muskelzellen sind relativ groß und stellen 72 Prozent der Gesamtmasse, aber nur 0,1 Prozent der Gesamtzahl. 87 Prozent unserer Zellen gehören zu den vergleichsweise winzigen roten Blutkörperchen (Erythrozyten).

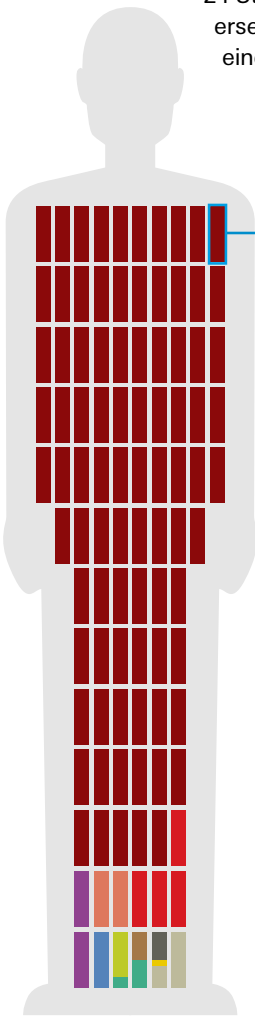
Zellumsatz pro Tag

Nach Anzahl**
Ungefähr 330 Milliarden Körperzellen (plus/minus 20 Milliarden) werden täglich ersetzt. 86 Prozent davon sind Blut-, 12 Prozent Darmzellen. Andere Zelltypen erneuern sich viel langsamer.

Nach Masse
Der Austausch entfällt größtenteils auf Zellen des Bluts (49 Prozent) und des Darms (41 Prozent). Haut- und Fett- (je 4 Prozent) sowie Muskelzellen (1 Prozent) tragen nur wenig bei. Insgesamt ersetzt unser Organismus rund 80 Gramm Zellen täglich.
















JEN CHRISTIANSEN, NACH SEMBER, R. ET AL.: REVISED ESTIMATES FOR THE NUMBER OF HUMAN AND BACTERIA CELLS IN THE BODY. PLUS BIOLOGY 14, 1011-1015 (2014). NACH SEMBER, R., ET AL.: THE DISTRIBUTION OF CELLULAR FUNCTION IN THE HUMAN BODY. NATURE MEDICINE 27, 2021-2027 (2021).

* Die Angaben beziehen sich auf einen durchschnittlichen Mann, der 20 bis 30 Jahre alt und 70 Kilogramm schwer ist. Sie erfassen somit keinen Zellumsatz infolge von Menstruation. Vernachlässigbare Prozentsätze werden nicht angezeigt.
** Unser Organismus beherbergt weitere 30 bis 40 Billionen Bakterien und noch viel mehr Viren, aber diese machen zusammen nur 200 bis 300 Gramm aus und sind nicht im engeren Sinne menschlich.

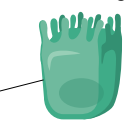


Jedes Rechteck steht für 1 Prozent unserer insgesamt 30 Billionen Zellen. Das entspricht ungefähr der Menge, die unser Körper jeden Tag erneuert.

Die Kleinen stellen den Löwenanteil Den täglichen Umsatz dominieren kleine Körperzellen mit sehr kurzer Lebensdauer. Große Zellen leben tendenziell länger.

- | | | |
|---|---|---|
| Zelltyp |  | Erythrozyt
Masse: 0,1 Nanogramm (milliardstel Gramm)
Lebensdauer: 120 Tage |
| Blut |  | |
|  | Erythrozyten | |
|  | Lymphozyten | |
|  | Neutrophile | |
|  | Monozyten | |
|  | Endothel der Blutgefäße | |
|  | Lunge | |
|  | Hepatozyten (Leber) | |
|  | Darmepithel | |
|  | Haut | |
|  | Gehirn | |
|  | Fettgewebe | |
|  | Muskelgewebe | |
|  | andere | |

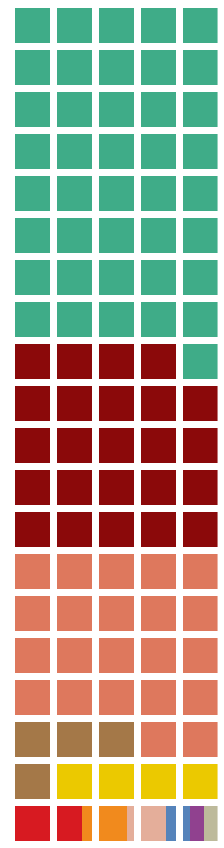
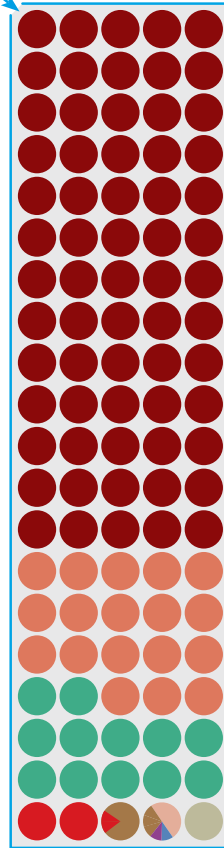
Darmepithelzelle
1 Nanogramm
3 bis 5 Tage



Muskelzelle
1000 bis 10000 Nanogramm
30 bis 70 Jahre



Viele Zellen des Herzens, des Auges und des Gehirns bleiben lebenslang funktionsfähig.



Der neue Klang der Ozeane



Der Mensch verändert die natürliche Soundkulisse der Meere. In manchen Gegenden ist das Leben verstummt, andernorts machen Schiffsmotoren, Schallkanonen oder Sonare gehörigen Krach. Die zunehmende Lärmverschmutzung ist eine stark unterschätzte Gefahr für die marine Tierwelt.

► spektrum.de/artikel/2108274



Tim Kalvelage ist promovierter Biogeochemiker und berichtet als Wissenschaftsjournalist über alle Facetten unserer Ozeane.

► Im März 1960 brachte das Forschungsschiff »Diamantina« vor der Westküste Australiens nahe Perth drei Wasserbomben mit einer Sprengkraft von jeweils 136 Kilogramm TNT aus. Die Sprengladungen waren Teil eines gemeinsamen Akustikexperiments mit Wissenschaftlern vom Lamont Geological Observatory der Columbia University in den USA. Sie detonierten im Abstand von fünfeinhalb Minuten in rund 1650 Meter Tiefe. Knapp vier Stunden später zeichneten die Hydrophone der »SOFAR«-Station auf Bermuda die Explosionen auf – fast 20000 Kilometer entfernt. Die Station hatten die Amerikaner im Zweiten Weltkrieg genutzt, um über dem Meer abgeschossene Kampfpiloten zu lokalisieren.

Schallwellen können sich unter Wasser vier- bis fünfmal schneller ausbreiten als in der Luft und große Distanzen zurücklegen, wie das Perth-Bermuda-Experiment eindrucksvoll belegte. Die Schallwellen der Detonationen

waren um die halbe Erde gereist, vom östlichen Indischen Ozean bis in den westlichen Nordatlantik. In welcher Entfernung zur Quelle Geräusche im Meer noch zu vernehmen sind, hängt – neben dem Hörvermögen des Empfängers – von ihrer Frequenz, der Wassertemperatur sowie dem Druck ab. Am weitesten verbreiten sich Töne mit niedriger Frequenz im SOFAR-Kanal, einer Zwischenschicht in rund 500 bis 1500 Meter Wassertiefe, wo die Geschwindigkeit und der Energieverlust von Schallwellen am geringsten sind. Große Bartenwale wie Blau- und Buckelwale kommunizieren über diesen Kanal hunderte Kilometer weit miteinander.

Viele Meerestiere, von Säugern über Fische bis hin zu Wirbellosen, setzen auf akustische Signale: zur Kommunikation und Navigation, um Beute aufzuspüren, einen Partner oder einen geeigneten Lebensraum zu finden. Denn Töne haben im Ozean eine wesentlich größere Reichweite als andere Sinnesreize wie Licht oder chemische Signalstoffe. In der Tiefsee beispielsweise ist visuelle Orientierung bestenfalls noch im Nahbereich möglich. Entsprechend klangvoll geht es unter der Wasseroberfläche zum Teil zu, sagt Ilse van Opzeeland vom Alfred-



SERIE OZEANE

TEIL 1: MÄRZ 2023

Heilkraft aus dem Meer

Stephanie Stone

► TEIL 2: APRIL 2023

Der neue Klang der Ozeane

Tim Kalvelage

TEIL 3: MAI 2023

Das Geheimnis des Meeresleuchtens

Michelle Nijhuis

Verborgene Wanderungen

Katherine Harmon Courage

TEIL 4: JUNI 2023

Extremwetter in den Ozeanen

Thomas Frölicher

SCHWEINSWALE leiden unter Lärm in Nord- und Ostsee. Ihre Bestände sinken bedrohlich.

Wegener-Institut – Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven. Die Biologin untersucht die Klanglandschaft und Verbreitung von Meeressäugern im Südpolarmeer, unter anderem mit Hydrophonen, die unter dem Schelfeis an der deutschen Neumayer-Station III hängen. »In der Region leben mehrere Robben- und Walarten, und bisweilen hört man dort ein gehöriges Quietschen und Trompeten«, erklärt van Opzeeland. »Die Unterwasserwelt ist keine ›Silent World‹, wie sie der Franzose Jacques Cousteau in seinem berühmten Dokumentarfilm einst betitelte.«

Und nicht nur die Töne von Lebewesen – die Biophonie – tragen zur Soundkulisse im Ozean bei. Auch der Schall, den geologische Prozesse und das Wetter erzeugen – die Geophonie –, prägt sie: untermeerische Vulkane, Seebeben und brodelnde Hydrothermalschlote in der Tiefsee, Wellen und prasselnder Regen an der Meeres-

AUF EINEN BLICK

Tödlicher Lärm

- 1** Viele Meeresbewohner nutzen akustische Signale zur Orientierung, bei der Nahrungssuche oder zur Fortpflanzung.
- 2** Menschliche Aktivitäten stören die Unterwasser-Klangwelt. Schifflärm und anderer Krach schaden den Tieren, manchmal mit tödlichen Folgen.
- 3** Fachleute fordern, die Ozeane konsequent vor Lärm zu schützen: durch Ruhezeiten, einen besonnenen Umgang mit den Meeren und neue Technologien.

oberfläche, kalbende Gletscher und knackende Eisschollen in den Polargebieten.

Doch seit der industriellen Revolution hat sich die marine Klanglandschaft massiv gewandelt. Zum einen klingt der Sound biologischen Ursprungs heute vielerorts leiser als früher: Die Meere sind überfischt, stimmungsgewaltige Meeresbewohner wie Wale und Robben dezimiert, artenreiche Ökosysteme großflächig zerstört. Allein zwei Millionen Furchenwale haben Walfänger im 20. Jahrhundert getötet, vor allem Blauwale, die zu den lautesten Tieren im Ozean gehören. Durch Umweltverschmutzung, zerstörerische Fischereimethoden, Küstenbebauung, expandierende Aquakultur und den Klimawandel sind Meereshabitate mit charakteristischen Soundkulissen in den letzten Jahrzehnten dramatisch geschwunden. Von den Tropen bis in die gemäßigten Breiten sind Korallenriffe, Seegraswiesen, Mangroven- und Kelpwälder verstummt.

Gleichzeitig hat der Mensch seit der Erfindung der ersten Dampfschiffe zahlreiche Ozeanregionen zu erheblich lauterer Orten gemacht: Immer mehr Frachter, Fischkutter, Kreuzfahrtschiffe und Sportboote sind auf den Meeren unterwegs. Entlang wichtiger Container Routen hat der Lärm im niederfrequenten Bereich in den vergan-

genen 50 Jahren schätzungsweise um das 32-Fache zugenommen. In Küstengebieten werden Windräder in den Meeresboden gerammt und seismische Erkundungen nach Erdöl- und Erdgasvorkommen mit Schallkanonen durchgeführt, die intensive, niederfrequente Schallimpulse erzeugen. Fischecholote und Sonare zur Kartierung der Meere oder zu militärischen Zwecken wiederum sind hochfrequente Lärmquellen. Auch die Dynamitfischerei, Sprengungen von Munitionsaltlasten und Explosionen bei Marinemanövern oder in Kriegszonen sorgen unter Wasser für ohrenbetäubenden Krach.

Anthrophonie nennt man den Schall, den die Menschen verursachen. Er ist eine bislang weitgehend unterschätzte Gefahr für das Leben im Ozean – neben all den anderen anthropogenen Umweltauswirkungen von Erderwärmung bis Plastikvermüllung. Zu diesem Schluss kommt ein internationales Forschungsteam in einer 2021 veröffentlichten Übersichtsstudie im Fachmagazin »Science«. Um menschliche Einflüsse auf die Klanglandschaft der Meere und die Folgen der Anthrophonie auf deren Bewohner zu bewerten, hatte es 538 wissenschaftliche Publikationen zu dem Thema ausgewertet. »Unsere Analyse zeigt, welche breit gefächerte Effekte Unterwasserlärm auf marine Organismen hat und wie drängend

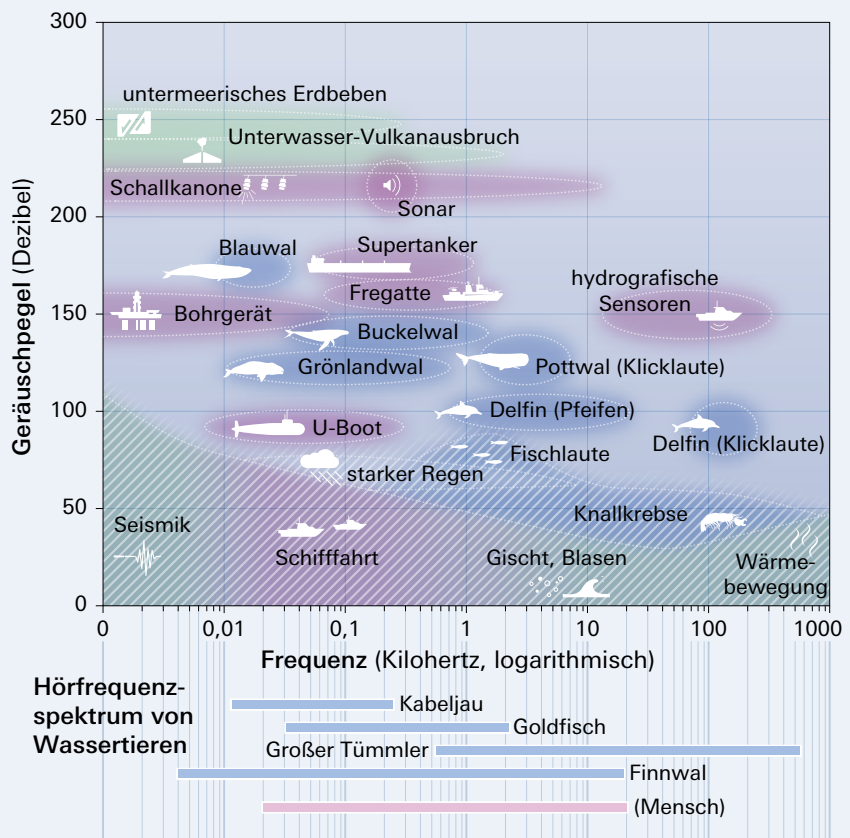
Klangteppich unter Wasser

Menschliche Aktivitäten klingen unter Wasser mitunter so laut, dass sie die Kommunikation der Meerestiere stören oder gar zu Verletzungen und zum Tod der Tiere führen.

konstante Hintergrundgeräusche

örtlich begrenztes Geräusch (Lautstärke im Umkreis von einem Meter)

- natürlich
- anthropogen
- Meerestiere



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK. IACH: SEICHE, JONES, N. OCEAN UPRIOR: SAVING MARINE LIFE FROM A BARRAGE OF NOISE. NATURE 568, 2019

dieses Problem ist«, sagt van Opzeeland, eine der Autorinnen der Studie.

Die dokumentierten Auswirkungen der Lärmverschmutzung im Ozean reichen von Verhaltensänderungen über Verletzungen bis hin zum Tod, erklärt die Biologin – je nach Tierart, Schallquelle und Region: »Manche Tiere meiden laute Gebiete oder zeigen ein gestörtes Fress- oder Paarungsverhalten. Andere verlieren infolge von Gehörtraumata die Orientierung und stranden.« Schallkanonen können unter Wasser so laut sein wie Raketenstarts, Bohrungen am Ozeangrund und Schiffsmotoren gleichen einem Rockkonzert. Vor allem Schiffslärm im niedrigen Frequenzbereich beeinträchtigt die Meeresfauna, denn er überschneidet sich zu weiten Teilen mit den Hörbereichen zahlreicher Fische, Wale, Robben und Schildkröten. Und selbst Organismen ohne Hörorgane wie Quallen und anderes Zooplankton werden durch menschliche Beschallung geschädigt, wie Fachleute in den letzten Jahren herausgefunden haben.

Zwar geht es unter Wasser auch auf Grund der Kräfte der Natur nicht immer leise zu, sagt van Opzeeland, etwa wenn Eisberge im Südpolarmeer kollidieren. »Aber die Tiere der Antarktis sind an diese Klanglandschaft gewöhnt und zeigen bei solchen Ereignissen keine besonderen Verhaltensänderungen.« Zusätzliche permanente oder starke Lärmquellen wie Schiffsverkehr oder seismische Erkundungen in anderen Ozeanregionen hingegen schränken Organismen stark ein, so die Biologin. Unter anderem deshalb, weil sie Töne überlagern, die Meerestierbewohner erzeugen, um sich zu verständigen oder Informationen über ihre Umwelt einzuholen.

Bunte Vielfalt von Tönen

Bei Tierstimmen im Ozean denken die meisten Menschen wohl zuerst an die tiefen, melodischen Gesänge von Buckelwalen oder an die Klick- und Pfeifgeräusche von Delfinen. Bartenwale und Robben bilden Laute wie wir im Kehlkopf, haben jedoch keine Stimmbänder. Zahnwale besitzen spezielle Luftsäcke und die so genannten phonischen Lippen, eine Struktur unterhalb des Blaslochs, die unserer Nasenhöhle ähnelt. Delfine, Orcas und Pottwale erzeugen damit hochfrequente Töne, die sie mit der Melone, einem Organ aus Fettgewebe über dem Oberkiefer, fokussieren und zur Echoortung nutzen.

Aber auch viele Fische sind – anders als im Volksmund behauptet – nicht stumm. Heringe etwa machen bisweilen ein knatterndes Geräusch, indem sie Luft aus der Schwimmblase über den Darm entweichen lassen. Der Zweck ist bislang nicht bekannt. Möglicherweise warnen sie auf diese Weise andere Schwarmmitglieder vor Raubfischen. Männliche Bootsmannfische werben in der Paarungszeit mit einem tiefen Brummen um die Gunst der Weibchen – derart lautstark und beharrlich, dass sie Bootsbesitzern schlaflose Nächte bereiten können. Ihren Balzruf produzieren sie mit Hilfe eines Trommelmuskels, der die Schwimmblase vibrieren lässt. Auf gleiche Weise verschaffen sich Knurrhähne Gehör. Andere Fische »sprechen« mit ihren Knochen, Sehnen oder Zähnen.

An einem gesunden Korallenriff herrscht ein permanentes Knabbern, Knacken und Zischen

Nicht alle Tiergeräusche im Meer werden bewusst generiert, häufig sind sie lediglich das Nebenprodukt tierischer Aktivität. An einem gesunden Korallenriff etwa herrscht tagsüber ein permanentes Knabbern, Knacken und Zischen. Den Sound des Riffs erzeugen Papageifische, die mit ihren Zahnplatten an Hartkorallen knuspern, Pistolen- oder Knallkrebse mit blitzschnellen Scheren, die ihre Beute mit einer implodierenden Gasblase betäuben, sowie Schwärme kleiner Riffische, die in synchronen Fluchtbewegungen vor räuberischen Makrelen zwischen den Korallen Schutz suchen.

Die Geräuschkulissen mariner Ökosysteme erfüllen eine wichtige Funktion: Sie dienen dem Nachwuchs von Fischen und Wirbellosen, die im Larvenstadium als Zooplankton durch den Ozean treiben, als akustischer Wegweiser auf der Suche nach einem passenden Wohnraum für die nächste Lebensphase. Verschlechtert sich der Zustand von Ökosystemen, sind sie auf Grund ihrer reduzierten akustischen Komplexität deutlich weniger attraktiv für die Jungtiere. So entdeckte ein australisch-britisches Forschungsteam anhand von Tonaufnahmen und Fischzählungen im nördlichen Great Barrier Reef, dass sich dort 40 Prozent weniger Fische ansiedelten, nachdem Tropenstürme und eine schwere Massen-Korallenbleiche den Bestand an wirbellosen Riffbewohnern dezimiert hatten. Als es an den geschädigten Standorten Unterwasserlautsprecher installierte und Aufnahmen eines intakten Korallenriffs abspielte, schwammen wieder mehr Jungfische herbei.

Studien wie diese illustrieren, welche Rolle die natürliche Klanglandschaft im Ozean spielt und wie sehr sich Fische und andere Lebewesen unter Wasser auf ihr Gehör verlassen. Zwar besitzen die wenigsten Meerestiere äußerlich sichtbare Ohren – Ausnahmen bilden etwa Seeotter oder die Familie der Ohnenrobber –, dennoch sind sie nicht taub. Meeressäuger und Reptilien etwa haben wie wir im Lauf der Evolution Mittelohren entwickelt, und viele können Schall weit außerhalb des menschlichen Hörbereichs wahrnehmen. So empfangen Zahnwale hochfrequente Töne bis 200 Kilohertz und leiten sie über das Fettgewebe im Unterkiefer zum Mittelohr weiter. Große Bartenwale wiederum hören im niederfrequenten Bereich ausgezeichnet und nutzen knöcherne Schädelstrukturen zur Schallweiterleitung.

Fische verfügen im Innenohr hinter den Augen über millimeter- bis zentimetergroße Gehörsteinchen, so genannte Otolithen, die hauptsächlich aus Kalk bestehen. Diese werden durch Schallwellen in Schwingung versetzt und lösen in den darunter liegenden Sinneszellen einen Hörreiz aus. Manche Arten verwenden ihre Schwimmblase als Resonanzkörper, um die Vibrationen zu verstärken.

Verschiedene Walarten halten die Schallimpulse aktiver Sonare von Marineschiffen für Orcas – ihre ärgsten Feinde

Vor allem tiefe Frequenzen können Fische dadurch gut wahrnehmen. Zudem »hören« sie mit dem Seitenlinienorgan, das sich in einer Reihe von Poren an ihren Längsseiten zeigt. Das Sinnesorgan besteht aus feinen Haarzellen in Kanälen unter der Hautoberfläche und ist empfindlich für mechanische Reize. Es erlaubt Fischen, kleinste Strömungs- und Druckunterschiede durch Schallwellen zu registrieren. So können sie sich räumlich orientieren, Beute lokalisieren oder Räubern ausweichen und Bewegungen im Schwarm koordinieren.

Selbst wirbellose Meeresbewohner wie Krebse und sogar winziges Zooplankton sind für Geräusche empfänglich: dank feiner sensorischer Haare und Rezeptoren, die von Schallwellen erzeugte Vibrationen detektieren. Sie helfen den Tieren, zu navigieren und ihre nähere Umgebung zu erfassen.

Auch wenn Wirbellose nicht im eigentlichen Sinn hören, können sie durch Unterwasserlärm Traumata erleiden. Ein spanisches Forscherteam beschallte in einem Experiment Quallen aus dem Mittelmeer mit niederfrequenten Tönen und stellte anschließend Verletzungen an den so genannten Statozysten fest, dem Gleichgewichtsorgan von marinen Wirbellosen. Und eine Studie vor der Küste Tasmaniens zählte das Zooplankton vor und nach seismischen Erkundungen des Meeresbodens: Noch in mehr als einem Kilometer Entfernung stieg die Todesrate von Krill und Ruderfußkrebse um das 200- bis 300-Fache an. Vermutlich, weil die bis zu 250 Dezibel lauten Schallimpulse ihre sensiblen Rezeptoren beschädigt hatten.

Die zunehmende Lärmverschmutzung im Ozean erschwert es vielen seiner Bewohner, akustische Signale zu empfangen sowie sich zu verständigen, und verkleinert damit ihren Kommunikationsraum. Bei einigen Meeressäugern und Fischen lässt sich ein Phänomen beobachten, das man Lombard- oder Cocktailparty-Effekt nennt: Die Tiere verändern die Intensität oder Frequenz ihrer Laute, um bei all dem Krach noch Gehör zu finden. Manche Organismen werden durch störende Lärmpegel aus ihren Nahrungsgründen verdrängt. Doch nicht alle können der Dauerbeschallung entfliehen, etwa langsame Wirbellose, die am Ozeangrund leben. Andere Arten stehen wiederum vor dem Problem, dass sie nur in sehr kleinen Gebieten zu Hause sind, wie etwa die vom Aussterben bedrohten Maui-Delfine, die ausschließlich an der Nordwestküste Neuseelands vorkommen und von denen laut Schätzungen bloß noch gut 50 Individuen leben.

Anthrophonie kann nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen auch dazu führen, dass Tiere Gefahren

schlechter erkennen oder eine Bedrohung wittern, wo gar keine herrscht. Das zeigt beispielsweise ein Räuber-Beute-Versuch mit Riffischen. Viele küstennahe Korallenriffe sind lärmgeplagt, unter anderem, weil sie von immer mehr Touristenbooten angesteuert werden. Fachleute haben in Aquarien- und Feldexperimenten am Great Barrier Reef untersucht, wie diese Störung die Interaktion von Damsel-fischen und räuberischen Zwergbarschen beeinflusst: Wenn sie Motorbootgeräusche hörten, verbrauchten die gestressten Damsel-fische mehr Sauerstoff, reagierten verzögert auf Attacken ihrer Jäger und landeten mit einer zwei- bis dreimal höheren Wahrscheinlichkeit in deren Maul. Die Angriffsversuche der Zwergbarsche waren in lauten Umgebungen also deutlich erfolgreicher.

In einer anderen Studie hat eine internationale Forschungsgruppe jüngst nachgewiesen, dass verschiedene Walarten die Schallimpulse aktiver Sonare, die Marineschiffe zur Ortung von U-Booten nutzen, für ihre ärgsten Feinde halten: Orcas. Diese schnellen, kraftstrotzenden Meeressäuger jagen in Familienverbänden und lokalisieren ihre Beute durch Echoortung; darunter auch Tiere, die erheblich größer sind als sie. Die Wissenschaftler hatten Buckel-, Grind-, Pott- und Schnabelwale im Nordatlantik Sender verpasst und deren Tauchprofile aufgezeichnet, während sie unter Wasser Tonaufnahmen von jagenden Orcas abspielten oder ein Sonar einschalteten. In beiden Fällen stellten die Wale die Nahrungssuche zu einem Großteil ein – eine typische Reaktion, wenn Orcas in der Nähe sind, um keine Aufmerksamkeit durch ihre eigene Echoortung von Fischen oder durch geräuschvolle Fressaktivität zu erregen. Und offenbar interpretierten sie die Sonarbeschallung als Laute ihrer Räuber.

Fatale Verwechslung mit dem Feind

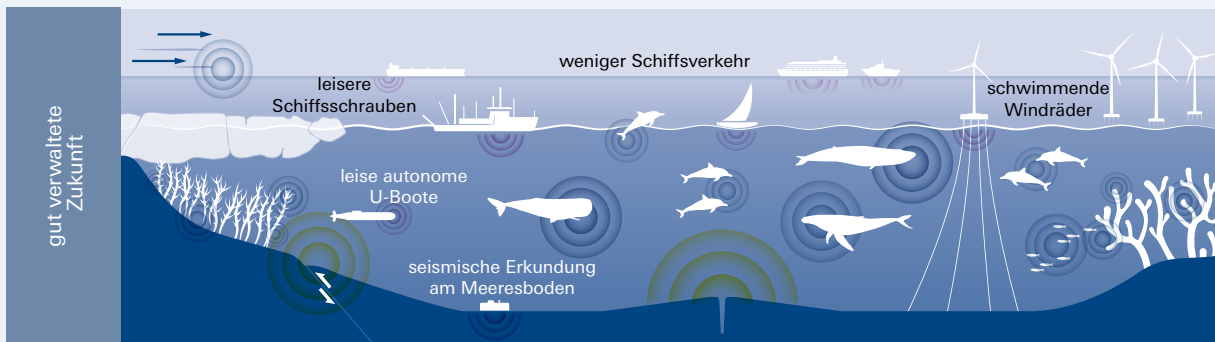
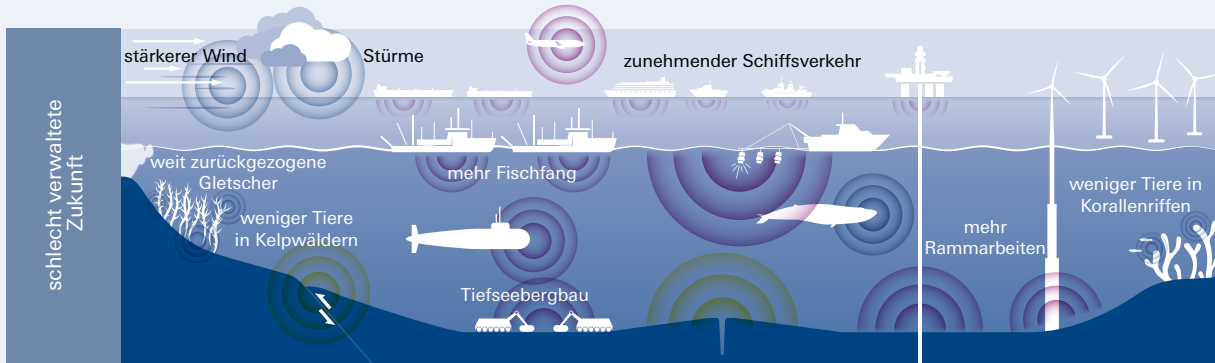
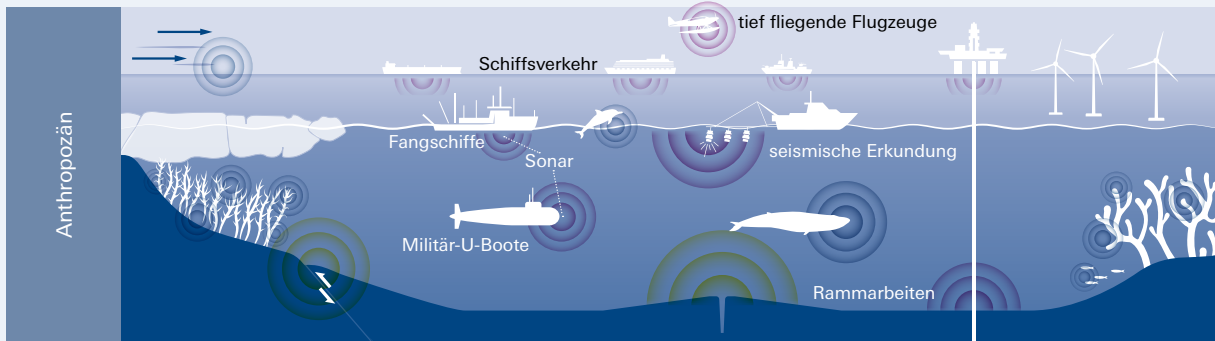
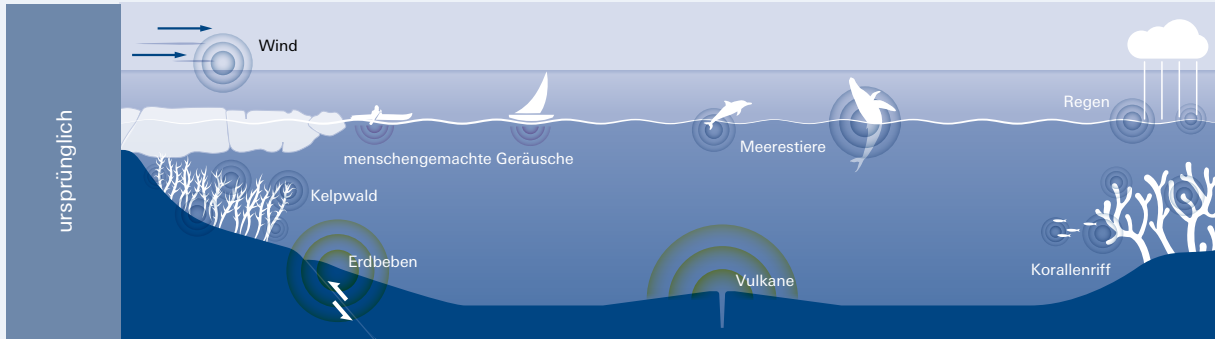
Den stärksten Effekt hatte diese bei Schnabelwalen: Sie gaben die Nahrungssuche vollständig auf. Anders als Buckel- und Pottwale mit ihren kräftigen Flossen und große Grindwal-Schulen haben Schnabelwale, die nur kleine Gruppen bilden, keine Chance, Orcas abzuwehren. Daher versuchen sie, sich möglichst unsichtbar zu machen, wenn Gefahr droht: Sie geben keine Laute mehr von sich und tauchen ab oder steigen – wenn sie in der Tiefsee nach Tintenfisch jagen – in einem sehr flachen Winkel still auf, um möglichst weit entfernt die Oberfläche zu erreichen.

Diese Überlebensstrategie scheint Schnabelwalen in Gegenden, in denen aktive Sonare Schallimpulse aussenden, zum Verhängnis zu werden. Denn dort stranden die Meeressäuger seit Entwicklung der Militärgeräte immer wieder massenhaft. So wurden etwa während einer NATO-Marineübung vor den Kanarischen Inseln im Jahr 2002 wenige Stunden nach einem Einsatz von aktivem Sonar 14 Wale angeschwemmt. Veterinärmediziner untersuchten einige der Tiere und bemerkten Verletzungen der Blutgefäße und inneren Organe, hervorgerufen durch die Bildung von Gasbläschen: Die Wale zeigten Symptome einer Dekompressions- oder Taucherkrankheit, die durch

Künftige Klangwelten

Neue Technologien und Schutzzonen bieten die Chance, die Ozeane wieder zu einem leiseren Ort zu machen.

⦿ Biophonie
 ⦿ Geophonie
 ⦿ Anthrophonie



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMBOD-GRABIK, NACH: XAVIER PITIA / KAUST; DUARTE, C.M. ET AL.: THE SOUNDSCAPE OF THE ANTHROPOCENE OCEAN, SCIENCE 371, 2021

ein zu schnelles Auftauchen nach außergewöhnlich langen und tiefen Tauchgängen verursacht wird. Dabei gehören Schnabelwale zu den am tiefsten tauchenden Meeressäugern überhaupt und dringen regelmäßig in Tiefen von mehr als 1000 Metern vor. Vermutlich unternehmen sie auf Grund ihres ausgeprägten Fluchtinstinkts vor Orcas längere und häufigere Tauchgänge, wenn sie Sonargeräusche hören, und gehen dabei an ihre physiologischen Grenzen. Damit steigt das Risiko für die tödliche Dekompressionskrankheit.

Auch Wale anderer Arten stranden immer wieder. Manche Tiere haben sich in seichte Gewässer verirrt, andere sind mit Schiffen kollidiert oder zeigen Traumata, die im Zusammenhang mit starken Lärmquellen stehen. Häufig könne man allerdings nicht eindeutig feststellen, was die Ursache dafür ist und ob Unterwasserlärm die Wale hat stranden lassen, so van Opzeeland: »Bei schallintensiven menschlichen Aktivitäten im Meer wie der Errichtung von Offshore-Windparks oder Sprengungen von Weltkriegsmunition fehlt es oft an einem entsprechenden Monitoring, auch in Gewässern vor unserer Haustür.«

Dort, in der Nord- und Ostsee, lebt Deutschlands einzige heimische Walart: der knapp zwei Meter lange Gewöhnliche Schweinswal, der mit Delfinen verwandt ist. Wie regelmäßige Zählungen per Flugzeug zeigen, ist der Bestand in der deutschen Nordsee in den vergangenen zwei Jahrzehnten deutlich zurückgegangen. Die Population in der östlichen Ostsee ist gar vom Aussterben bedroht. Und das, obwohl verschiedene europäische Abkommen zum Schutz der Tiere existieren. In der Ostsee sterben weibliche Schweinswale durchschnittlich im Alter von nicht einmal vier Jahren – noch bevor sie geschlechtsreif sind und rund 10 bis 15 Jahre früher als für gewöhnlich erwartet.

Die Gründe für die schrumpfenden Bestände der Meeressäuger sind vielfältig und reichen von giftigen Chemikalien in verschmutzten Küstengewässern bis hin zum Tod durch Ertrinken in Stellnetzen. Vorwiegend zu schaffen macht ihnen jedoch der zunehmende Krach im Ozean, sagt Tobias Schaffeld vom Institut für Terrestrische und Aquatische Wildtierforschung in Hannover, der ihr Verhalten erforscht: »Schweinswale besitzen einen ausgezeichneten Gehörsinn. Wie alle Zahnwale orientieren, kommunizieren und jagen sie mittels Echoortung. Entsprechend empfindlich reagieren sie auf Unterwasserlärm.«

Frachter, Tanker, Fischkutter, Fährschiffe und Sportboote sind omnipräsente Lärmquellen im Verbreitungsgebiet der Schweinswale. Gerade kleinere Boote verursachen Krach in hohen Frequenzbereichen, also dort, wo die Tiere sehr gut hören und selbst Laute erzeugen. Auf die Dauerbeschallung reagieren Schweinswale unter anderem, indem sie zum Meeresgrund abtauchen und die Futtersuche einstellen. »Das kann gravierende Folgen haben«, sagt Verhaltensforscher Schaffeld, »denn die Wale haben einen hohen Energiebedarf und müssen nahezu kontinuierlich kleine Fische erbeuten.« Hält sie hingegen Schiffslärm regelmäßig vom Fressen ab,

Als besonders penetranter Krachmacher im Ozean kann die Schifffahrt erheblich zur Lärmvermeidung beitragen

schwächt das die Tiere und verringert langfristig ihre Überlebenschancen.

Zu den lautesten Aktivitäten in Nord- und Ostsee gehört der Bau von Offshore-Windparks, bei dem Windräder in den Meeresboden getrieben werden. Schweinswale werden durch die Rammarbeiten nicht nur im Umkreis von etlichen Kilometern aus ihren Nahrungsgründen vertrieben, sondern können auch Schalltraumata erleiden, wie Studien belegen. Schädlicher und bisweilen tödlicher Krach entsteht zudem durch die Räumung von Munitionsaltslasten. In deutschen Küstengewässern liegen zirka 1,6 Millionen Tonnen konventioneller Munition, die dort während des Zweiten Weltkriegs und danach versenkt wurde. Sie gefährdet etwa den Schiffsverkehr und die Fischerei oder behindert die Verlegung von Seekabeln und Pipelines. Daher werden Altslasten immer wieder gezielt zur Detonation gebracht.

Krachende Explosionen verletzen und töten Schweinswale

»Rammarbeiten und Explosionen produzieren Schallimpulse von hoher Intensität. Sie können Gehörschäden, Geweberisse und sogar Brüche zur Folge haben«, erklärt Schaffeld. Schlimmstenfalls verenden die Tiere an den inneren Verletzungen, verhungern oder stranden, weil sie taub und damit orientierungslos sind. So wie im Herbst 2019 nach einer Sprengung von 42 britischen Bodminen im Meeresschutzgebiet Fehmarnbelt durch eine NATO-Einheit: Damals wurden an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein innerhalb von drei Monaten 24 tote Schweinswale angespült. Schaffeld und andere untersuchten die Tiere und fanden bei acht von ihnen Hinweise darauf, dass eine Explosion die direkte oder indirekte Todesursache sein könnte. Die Wale zeigten Frakturen im Mittelohr sowie Blutungen in der Melone, im Unterkiefer und im akustischen Fettgewebe.

Wie lassen sich Schweinswale und Schnabelwale, Fische und andere Meeresbewohner besser vor schädlichem Krach im Ozean schützen? Anders als bei vielen anderen menschlichen Eingriffen in die Umwelt verschwindet Lärmverschmutzung umgehend, wenn ihre Quellen beseitigt sind. Vollständig vermeiden lassen sich störende Geräusche durch unsere Aktivitäten nicht, vor allem in intensiv genutzten küstennahen Meeresregionen. Aber man kann sie minimieren, zeitlich oder räumlich begrenzen und starke Lärmquellen abschirmen, um die marine Fauna zu schützen.

Wenn Windräder in den Meeresboden gerammt werden, reduziert man die Schallausbreitung etwa schon

heute oft durch so genannte Blasenschleier erheblich. Auch bei Sprengungen im Ozean kommen sie mitunter zum Einsatz. Dabei errichtet man mit Druckluft, die aus perforierten Schläuchen am Grund sprudelt, rings um die Lärmquelle eine Mauer aus Luftblasen, die bis zu 95 Prozent der Schallenergie absorbiert. Eine andere Option wäre es, verstärkt auf schwimmende Windparks zu setzen und erst gar keine Windräder im Ozeangrund zu verankern. Die Suche nach marinen Rohstoffvorkommen wiederum könnte zukünftig mittels Vibro-Seismik erfolgen, die man an Land bereits verwendet. Diese Technik erzeugt im Gegensatz zur konventionellen Seismik keine donnernden Schallimpulse, sondern weniger schädliche Vibrationen und erlaubt kürzere Messzeiten. Damit belastet sie schallsensible Meerestiere auch nicht so stark.

»In kritischen Phasen von Organismen wie Paarungszeiten und in wichtigen Habitaten sollten lärmende Aktivitäten zudem eingeschränkt werden«, fordert van Opzeeland. Etwa in den zunehmend eisfreien Polargebieten, in die der Mensch mit Schiffen und Bohrinseln immer weiter vorstößt. Ein positives Beispiel dafür, wie solche Maßnahmen wirken, ist das Verbot von Mittelfrequenzsonar rund um die Kanarischen Inseln im Jahr 2004 – seitdem gab es in der Region keine Massenstrandungen von Schnabelwalen mehr. In den Küstengewässern von British Columbia im Westen Kanadas setzt man auf freiwillige Rücksichtnahme: Hier werden Schiffe gebeten, die Nahrungsgründe der gefährdeten Südlichen Schwertwale zu meiden oder langsamer zu fahren, um Unterwasserlärm zu reduzieren.

Als extrem penetranter Krachmacher im Ozean kann die Schifffahrt erheblich zur Lärmvermeidung beitragen – vor allem jene 15 Prozent der weltweiten Flotte, die laut einer 2018 veröffentlichten Studie für die Hälfte des gesamten Schiffslärms verantwortlich sind. Die Ursachen für den Krach sind dröhnende Motoren, vibrierende Propeller und Gasblasen, die bei hohen Geschwindigkeiten an Schiffsschrauben entstehen und dann mit einem lauten Knall kollabieren. Gleichzeitig mindern diese so genannten Kavitationsblasen den Wirkungsgrad der Propeller. Technische Anpassungen wie schwingungsarm gelagerte Dieselmotoren, Elektromotoren oder effizientere Propeller könnten die Meere wieder zu leiseren Orten machen. Die höheren Anschaffungskosten beziehungsweise Ausgaben für Nachrüstungen dürften sich langfristig vielfach amortisieren – unter anderem, weil der Treibstoffbedarf sinkt und moderne Propeller weniger anfällig sind für Materialschäden durch Kavitation.

Gerade weil wir unsere Ozeane immer stärker wirtschaftlich nutzen – sei es als Transportwege, zur Stromerzeugung, für Aquakultur oder Tourismus –, gilt es, geräuscharme Technologien zu fördern und geschützte Ruhezone für die Tierwelt auszuweisen. Nicht allein in Küstengebieten, in denen sich die Aktivitäten der Meereswirtschaft konzentrieren, sondern auch in den internationalen Gewässern der Hochsee. Im Pazifik etwa lagern in mehreren tausend Metern Tiefe reiche Vorkommen an Kobalt, Kupfer, Nickel und weiteren Metallen. In Zukunft

könnte das Dröhnen von Maschinen, die Erze am Meeresgrund schürfen und über kilometerlange Förderstränge auf Schiffe an der Oberfläche pumpen, durch die Tiefsee schallen. Ob es tatsächlich dazu kommen wird und wenn ja, in welchem Umfang, ist derzeit noch unklar. Zugleich warnten Forscher und Forscherinnen im Juli 2022 in »Science«, dass kaum Daten vorliegen, anhand derer sich mögliche Lärmschäden durch den Tiefseebergbau abschätzen lassen. Sie empfehlen daher, Förderlizenzen nach dem Vorsorgeprinzip zu vergeben: Die Internationale Meeresbodenbehörde – zuständig für die Bodenschätze der Tiefsee – solle zunächst bloß wenige Projekte bewilligen, die von intensivem Umweltmonitoring begleitet werden müssen, um den Abbau notfalls stoppen zu können.

Nicht zuletzt trägt auch Klimaschutz dazu bei, die natürliche Soundkulisse im Ozean zu erhalten. Denn je stärker sich die Meere aufheizen, desto zahlreicher verschwinden Korallenriffe, Kelpwälder und andere klangvolle Ökosysteme, während der Geräuschpegel unter Wasser durch zunehmende schwere Tropenstürme oder die schwindende Meereisbedeckung in der Arktis steigt. Zudem verbreitet sich Schall in wärmerem Wasser schneller – ein Phänomen, das es ermöglicht, mit Hilfe akustischer Messungen über viele tausend Kilometer die Temperatur und den Wärmegehalt des Ozeans zu bestimmen. Der US-amerikanische Ozeanograf Walter Munk sprach in diesem Zusammenhang treffend vom »Klang des Klimawandels«.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



OLLY / STOCK.ADOBE.COM

QUELLEN

Duarte, C. M. et al.: The soundscape of the anthropocene Ocean. *Science* 371, 2021

Gordon, T. A. C. et al.: Habitat degradation negatively affects auditory settlement behavior of coral reef fishes. *PNAS* 115, 2018

Miller, P. O. J. et al.: Behavioral responses to predatory sounds predict sensitivity of cetaceans to anthropogenic noise within a soundscape of fear. *PNAS* 119, 2022

Siebert, U. et al.: Blast injury on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) from the Baltic Sea after explosions of deposits of World War II ammunition. *Environment International* 159, 2022

Williams, R. et al.: Noise from deep-sea mining may span vast ocean areas. *Science* 377, 2022

Flüssige Stromspeicher

Redox-Flow-Batterien können große Mengen an Energie speichern und eignen sich daher gut als Reservoir für Strom aus Windrädern und Solaranlagen. Das besondere Prinzip der fließenden Elektrolyten zeigt sich eindrucksvoll im Laborexperiment.

» spektrum.de/artikel/2108289

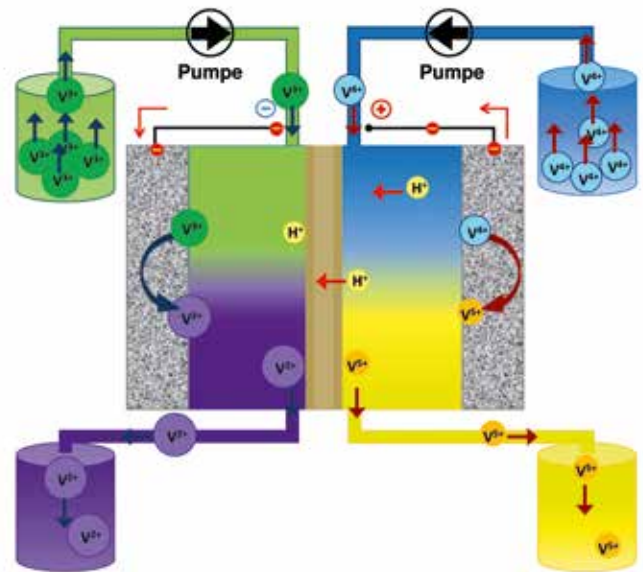


Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

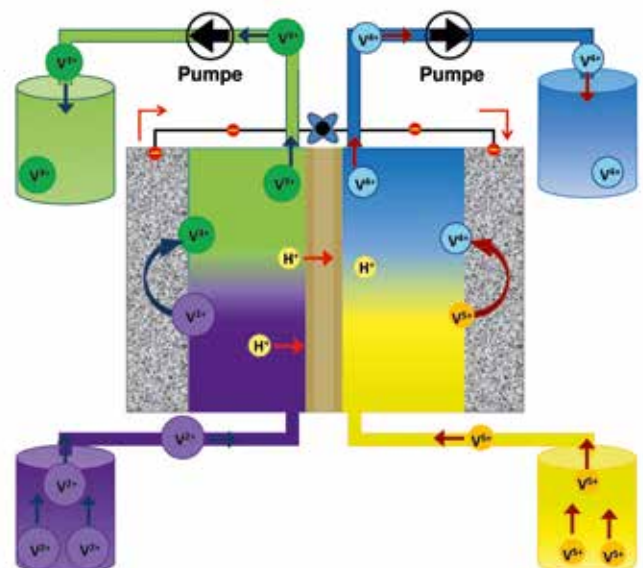
► Bis zum Jahr 2030 sollen 80 Prozent des hier zu Lande erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen stammen, so legt es der Koalitionsvertrag von 2021 fest. Vor allem Sonnen- und Windenergie sollen dazu massiv ausgebaut werden. Da diese nicht ständig verfügbar sind, braucht es leistungsfähige Netzspeicher, die den produzierten Strom jederzeit bereitstellen können. Deshalb spielen stationäre Energiespeicher eine immer größere Rolle für unsere Gesellschaft.

Anders als bei herkömmlichen Batterien, etwa Lithium-Ionen-Akkus für tragbare Elektronikgeräte, muss der Schwerpunkt nicht in hoher Energie- und Leistungsdichte oder in einem einfachen und kompakten Aufbau liegen. Vielmehr müssen die stationären Netzspeicher zuverlässig und lange funktionieren, sollen wenig kosten und Energie für mehrere Stunden vorhalten können. Gute Kandidaten dafür sind Redox-Flow-Batterien: Hier lassen sich Energieinhalt und Leistung unabhängig voneinander festlegen, darüber hinaus sind sie modular aufgebaut und bestehen aus kostengünstigen Materialien.

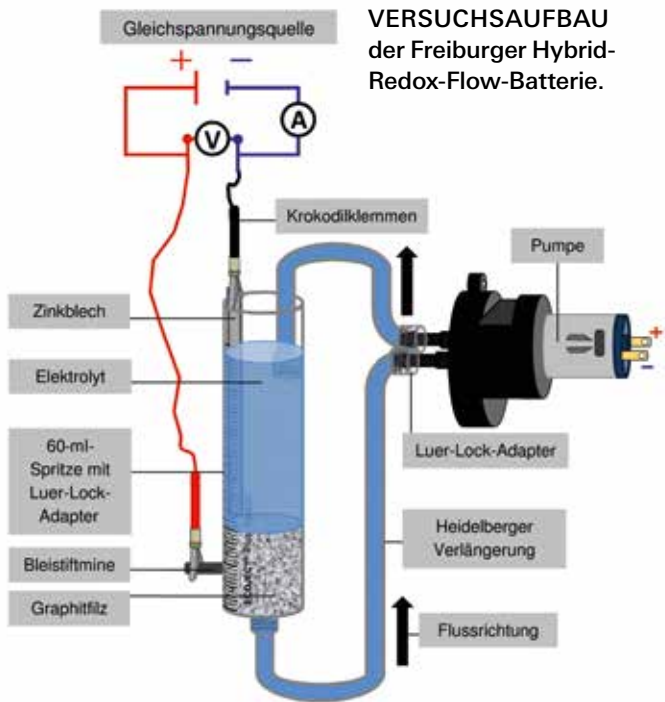
Wie in den meisten Batterien laufen auch in Redox-Flow-Zellen reversible chemische Reaktionen an den



NETZSPEICHER Laden (oben) und Entladen (unten) einer All-Vanadium-Redox-Flow-Batterie.



ARBEITSGEIS MARCO OETKEN, PH FREIBURG



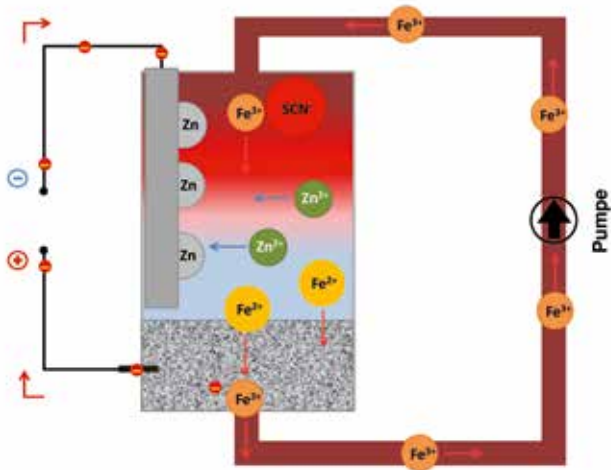
Elektroden ab und wandeln dabei Energie um. Die Besonderheit: Als redoxaktive Substanzen nutzt man Flüssigkeiten oder Suspensionen. Die umzusetzenden Elektrolyte strömen in einem Energiewandler – dem eigentlichen elektrochemischen Reaktionsgefäß – entlang den Elektroden, wo sie oxidiert beziehungsweise reduziert werden. Anschließend werden sie in separate Tanks weitergeleitet. Dabei bestimmt die Größe der Tanks den Energieinhalt, während die des Energiewandlers über die Leistung der Batterie entscheidet. Durch diese Trennung ist es unerheblich, dass Redox-Flow-Batterien verglichen zu anderen Energiespeichern eine geringe spezifische Energiedichte besitzen (All-Vanadium-Redox-Flow-Batterie 25–35 Wh/kg, Lithium-Ionen-Akkumulator 120–150 Wh/kg), denn der Nachteil lässt sich durch eine entsprechend große Auslegung der Tanks ausgleichen.

Konventionsgemäß benennt man die Elektroden in einem Energiespeicher nach dem Entladevorgang: Die Anode gibt dabei Elektronen ab, die Kathode nimmt sie auf. Da die redoxaktiven Substanzen nun aber gelöst im Elektrolyten vorliegen und die Energie somit nicht mehr in den Elektroden, sondern in zwei verschiedenen Flüssig-

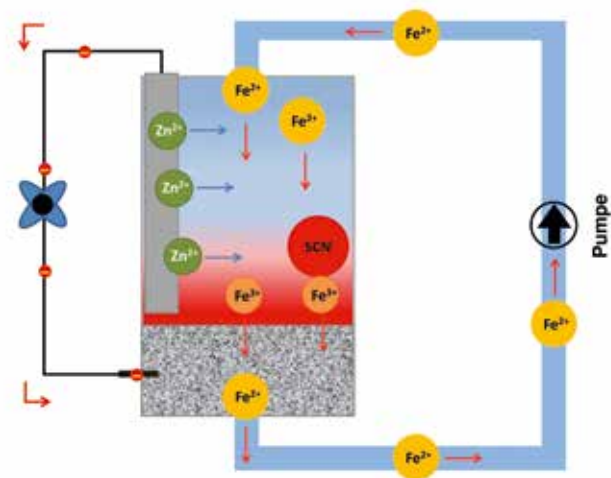


PRAXISTEST Laden einer Hybrid-Redox-Flow-Batterie auf Basis von metallischem Zink und einer Fe^{3+} -Lösung: vor dem Laden **a**, nach einer Minute **b** und nach zwei Minuten **c**. Entladen derselben Batterie per Kurzschlussstrom: vor dem Entladen **d**, nach drei Minuten **e** und nach vier Minuten **f**.





FUNKTIONSWEISE der Freiburger Hybrid-Redox-Flow-Batterie auf Basis von elementarem Zink und einer Fe^{3+} -Lösung, realisiert mit medizinischem Equipment. Oben: Laden, unten: Entladen.



ARBEITSKREIS MARCO DETKEN, PH FREIBURG

keiten gespeichert ist, bezeichnet man den Elektrolyten, der beim Entladevorgang oxidiert wird (Elektronen abgibt), als »Anolyt (A)« und den, der beim Entladevorgang reduziert wird (Elektronen aufnimmt), als »Katholyt (K)«.

Die am besten erforschte Redox-Flow-Zelle ist die All-Vanadium-Redox-Flow-Batterie. Bei diesem Akkumulator nutzt man alle vier Oxidationsstufen des Vanadiums (V^{2+} , V^{3+} , V^{4+} und V^{5+}). Im ungeladenen Zustand liegen die Oxidationsstufen V^{3+} (Anolyt) und V^{4+} (Katholyt) vor. Beim Laden pumpt man die Elektrolyte in den Energiewandler, wo sie an den Elektroden entlangströmen (siehe »Netzspeicher«, oberes Bild). Das V^{4+} -Ion wird an der Kathode zu V^{5+} oxidiert, und das abgegebene Elektron wandert über den Stromkreis zur Anode. Dort nimmt das V^{3+} -Ion des Anolyten das Elektron auf und wird zum V^{2+} -Ion reduziert. Um die elektrische Neutralität zu wahren, wandert pro abgegebenem Elektron ein Proton über eine Membran, die nur für Protonen durchlässig ist, vom

Katholyten zum Anolyten. Im Anschluss werden die Elektrolyte wieder in separate Tanks geleitet und dort so lange gelagert, bis die gespeicherte Energie abgerufen werden soll. Beim Entladen kehrt man die Pumprichtung um und leitet die Elektrolyte wieder in den Energiewandler, wo die Prozesse des Ladevorgangs umgekehrt ablaufen (siehe »Netzspeicher«, unteres Bild).

Da Vanadium allerdings sehr umweltschädlich und selten ist, suchen Fachleute nach alternativen Redoxpaaren. Es gibt jedoch nur wenige geeignete anorganische redoxaktive Stoffe in gelöster Form. Daher werden auch Redox-Flow-Zellen eingesetzt, bei denen nicht alle Stoffe gelöst vorliegen, sondern die etwa Anoden auf metallischer Basis enthalten. Diese Akkumulatoren bezeichnet man als Hybrid-Redox-Flow-Batterien, ein Beispiel dafür ist die Zink-Cer-Redox-Flow-Zelle.

Will man die Funktionsweise einer Redox-Flow-Batterie eindrucksvoll aufzeigen, benötigt man ungefährliche Stoffe, die idealerweise im oxidierten Zustand eine andere Farbe haben als im reduzierten. Das farbenfrohe Vanadium, das in wässriger Lösung je nach Oxidationsstufe gelb, hellblau, grün oder violett erscheint, wäre ein guter Kandidat, wenn es nur nicht so giftig wäre. Doch im reichen Fundus der Elemente stößt man rasch auf einen ungiftigen geeigneten Stoff: Eisen (Fe). Fe^{3+} -Ionen bilden im Gegensatz zu Fe^{2+} -Ionen mit Thiocyanat-Ionen einen roten Farbkomplex. Kombiniert mit einer Anode aus festen Metallelektroden, beispielsweise aus Zink, erhält man eine Hybrid-Redox-Flow-Batterie, die sich einfach zusammenbauen lässt.

Dazu eignen sich Materialien aus der Medizintechnik sehr gut, da man mit ihnen sehr einfach einen effizienten Elektrolytfluss erzeugen kann. Das gelingt mit einer Pumpe aus dem Modellbau, kombiniert mit Heidelberger Verlängerungen und einer Spritze (Details siehe Experimentieranleitung online). Für die vollständige Oxidation und Reduktion des Elektrolyten benötigt man eine Elektrode mit hoher spezifischer Oberfläche. Hierfür eignet sich ein Graphitfilz der SGL Carbon GmbH als Kathodenmaterial.

Normalerweise trennt man in Hybrid-Redox-Flow-Batterien die Anode und den Katholyten durch eine Membran, um zu verhindern, dass durch eine direkte Reaktion Ladung verloren geht. In der Modellbatterie etwa würde die Reaktion in einer Zink- Fe^{3+} -Hybrid-Redox-Flow-Batterie zwischen Fe^{3+} -Ionen und elementarem Zink direkt ablaufen und die Batterie sich somit selbst entladen.

Der Einsatz einer Membran verkompliziert allerdings den Aufbau der Batterie. Um darauf verzichten zu können und die Selbstentladung trotzdem zu verringern, bieten sich Zinkelektroden mit einer geringen Oberfläche an, in unserem Fall ein Zinkblech. Könnte man dadurch die Selbstentladung bei direktem Kontakt des Katholyten mit der Anode derart minimieren, dass trotzdem eine messbare Spannung auftritt und sich ein Verbraucher betreiben lässt?

Mit solchen Überlegungen haben wir einen experimentellen Aufbau konzipiert (siehe »Versuchsaufbau«, Details

in der Online-Experimentieranleitung). Das Reaktionsgefäß ist eine 60-Milliliter-Spritze, in welcher der Elektrolyt mit Hilfe einer Modellbaupumpe durch ein Graphitfilz zirkuliert. Letzteres verbindet man mit einer Bleistiftmine, die mit einer Krokodilklemme an den Stromkreis angeschlossen wird; sie stellt den Pluspol dar. Am Rand der Spritze fixiert man ein Zinkblech als Minuspol. Den Elektrolyten bildet eine 0,1-molare FeSO_4 -Lösung, versetzt mit Natriumthiocyanat und 0,1-molarer ZnSO_4 -Lösung.

Sobald man das System lädt, färbt sich der Elektrolyt sehr rasch rot, beim Entladen per Kurzschlussstrom entfärbt er sich wieder rapide (siehe »Praxistest«). Ein in den Stromkreis integrierter Verbraucher lässt sich problemlos vier Minuten lang betreiben. Die Stromstärke der Batterie liegt beim Laden sowie beim Entladen bei 140 Milliampere, die Ruheklemmspannung beträgt 1,28 Volt.

Beim Laden werden die Fe^{2+} -Ionen in der Lösung zu Fe^{3+} -Ionen oxidiert. Diese bilden mit Thiocyanat-Ionen (SCN^-) den tiefroten Komplex $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{SCN})]^{2+}$. Die von den Fe^{2+} -Ionen abgegebenen Elektronen wandern über den Stromkreis zu den Zn^{2+} -Ionen und reduzieren sie zu elementarem Zink (siehe »Funktionsweise«).

Beim Laden und Entladen laufen folgende Elektrodenreaktionen ab:



QUELLEN

Noack, J. et al.: Die Chemie der Redox-Flow-Batterien. Angewandte Chemie 127, 2015

Weber, A.Z. et al.: Redox flow batteries. Journal of Applied Electrochemistry 41, 2011

WEBLINK

www.spektrum.de/artikel/2108289

Experimentieranleitung

Montag
27. März 2023
WIEN

Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS

LESEREXKURSION »ATOMINSTITUT«

Diesen Monat können Abonnentinnen und Abonnenten an unserer kostenfreien **Leserexkursion zum Atominstitut der TU Wien** am Montag, den 27. März teilnehmen (die Anreise erfolgt privat).

Weitere Termine und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

ASTROPHYSIK

Das letzte Aufbäumen sterbender Sterne

Am Ende ihres Lebens erzeugen sonnenähnliche Sterne leuchtende Nebel aus Gas und Staub. Neue Erkenntnisse zeigen: Deren Form wird wohl oft von unsichtbaren Begleitern bestimmt.

» spektrum.de/artikel/2108277



Dana Mackenzie ist Mathematiker und Wissenschaftsjournalist in Kalifornien, USA.



KÄFER-NEBEL
Der Planetarische Nebel liegt 4000 Lichtjahre von uns entfernt. Seine beiden Flügel bestehen aus Gas und Staub, die von einem sterbenden Stern in der Mitte der Struktur abgestoßen wurden.

AUF EINEN BLICK

Unscheinbare Katapulte

- 1** Wenn ihr Brennstoffvorrat aufgebraucht ist, blähen sich Sterne auf und stoßen ihre äußeren Hüllen in die Umgebung ab. Übrig bleiben ausgedehnte, spektakuläre Nebel.
- 2** Deren oft zweigeteilte Gestalt lässt sich am besten erklären, wenn man annimmt, dass der Umlauf eines nahen zweiten Sterns das Gas verwirbelt.
- 3** Bislang waren solche Begleiter meist im hellen Spektakel ihrer Umgebung verborgen. Doch neue Teleskope und Beobachtungen dürften das bald ändern.

► In einigen Milliarden Jahren steht die Sonne am Ende ihres Lebens. Während in ihrem Kern Helium zu verschmelzen beginnt, schwillt sie zu einem so genannten Roten Riesen an. Dabei verschluckt sie quasi im Vorbeigehen Merkur, Venus und die Erde und wächst so enorm, dass sie ihre äußersten Schichten aus Gas und Staub nicht mehr an sich halten kann.

In einem spektakulären letzten Akt wird die Materie daraufhin in den umgebenden Weltraum geschleudert. Als wunderschöner Schleier leuchtet sie noch tausende Jahre lang, bevor sie verblasst.

Unsere Milchstraße ist bereits mit Tausenden solcher schillernden Grabmale übersät, den so genannten Planetarischen Nebeln. Bei Sternen, deren Masse zwischen der halben und der achtfachen unserer Sonne liegt, sind sie das ganz normale Endstadium. (Massereichere Sterne enden mit einem noch dramatischeren Finale in Form einer Supernova-Explosion.) Planetarische Nebel gibt es in einer atemberaubenden Vielfalt von Formen. Das deuten schon ihre Namen wie Krebs- Katzenaugen- oder Schmetterlingsnebel an. Doch so schön sie sind, so rätselhaft waren sie lange. Wie entfaltet ein kosmischer Schmetterling seine Flügel aus dem scheinbar strukturlosen, runden Kokon eines Roten Riesen?

Beobachtungen und Computermodelle deuten nun auf eine Erklärung hin, die vor drei Jahrzehnten noch abwegig erschienen wäre: Die meisten Roten Riesen verstecken in ihrer gravitativen Umarmung einen viel kleineren zweiten Stern. Dieser Begleiter prägt die Umwandlung in einen Planetarischen Nebel auf ähnliche Weise, wie sich auf einer Töpferscheibe ein Tongefäß modellieren lässt.

Bisher ging die vorherrschende Theorie zur Bildung Planetarischer Nebel von einem einzigen Stern aus, dem Roten Riesen selbst. Da seine äußeren Schichten nur

noch schwach durch die Schwerkraft an ihn gebunden sind, verliert er gegen Ende seines Lebens sehr schnell an Masse – bis zu einem Prozent pro Jahrhundert. Außerdem brodelte es unter der Oberfläche wie in einem Kochtopf, was die Hülle hin und her pulsieren lässt. Laut einer gängigen Hypothese sollen diese Bewegungen Stoßwellen erzeugen, die fortwährend Gas und Staub als »Sternwind« in den Weltraum drücken. Für einen vollständigen Ausstoß ist jedoch sehr viel Energie erforderlich, ansonsten fällt das Material wieder zurück. Der Sternwind sollte daher weniger einer sanften Brise ähneln als vielmehr dem Tosen eines Raketenstarts.

Nach dem Entweichen der äußeren Hülle des Sterns kollabieren die kompakteren Innenbereiche zu einem Weißen Zwerg. Dieser Sternüberrest ist heißer und heller als der Rote Riese, aus dem er hervorgegangen ist. Er regt das entkommene Gas zum Leuchten an. Das sehen wir als Planetarischen Nebel. Der gesamte Prozess spielt sich nach astronomischen Maßstäben sehr schnell ab, dauert aus menschlicher Sicht jedoch lange, typischerweise Jahrhunderte bis Jahrtausende.

Bis zum 1990 erfolgten Start des Hubble-Weltraumteleskops »waren wir uns ziemlich sicher, auf dem richtigen Weg zu sein« in Bezug auf ein Verständnis der Vorgänge, resümiert Bruce Balick, Astronom an der University of Washington in Seattle. Dann erblickten er und sein Kollege Adam Frank von der University of Rochester in New York auf einer Konferenz in Österreich die ersten Hubble-Fotos von Planetarischen Nebeln. Balick erinnert sich: »Als wir in einer Kaffeepause die Bilder sahen, war uns sofort klar, dass sich die Spielregeln geändert hatten.«

Die Astronomen waren davon ausgegangen, Rote Riesen sollten als kugelsymmetrische Sterne runde Planetarische Nebel hervorbringen. Aber das war nicht das, was Hubble sah – nicht einmal annähernd. »Offensichtlich haben viele Planetarische Nebel exotische achsensymmetrische Strukturen«, sagt Joel Kastner vom Rochester Institute of Technology. Hubble offenbarte spektakuläre keulen- und flügelförmige Gebilde, die nicht kugelförmig sind, sondern sich symmetrisch um die Hauptachse des Nebels anordnen, als wären sie auf einer Töpferscheibe gedreht worden.

SÜDLICHER RINGNEBEL Auf diesen Bildern des James Webb Space Telescope sind im nahen Infrarot (links) konzentrische Hüllen zu erkennen, die in der Vergangenheit in explosionsartigen Episoden ins All geschleudert wurden. Im mittleren Infrarot (rechts) sieht man rötlich den dafür verantwortlichen Stern und dessen bläulichen Begleiter.





SÜDLICHER KREBSNEBEL Auf frühen Aufnahmen erinnerte der Nebel an eine Krabbe mit vier Beinen auf jeder Seite. Detailliertere Bilder offenbaren, dass es sich vielmehr um eine sanduhrähnliche Form handelt. Auf der zentralen Achse schießt Gas heraus und bildet jenseits der Sanduhr leuchtende Knötchen, wenn es auf interstellare Materie trifft. Bei genauem Hinsehen erkennt man zwei Sanduhren: eine äußere und eine wesentlich kleinere innere, die etwa 3000 Jahre jünger ist.

2002 fassten Balick und Frank im Fachjournal »Annual Review of Astronomy and Astrophysics« die damalige Debatte über den Ursprung der Gebilde zusammen. Einige Hypothesen führten die axiale Symmetrie auf die Rotation des Roten Riesen zurück, andere auf das Verhalten seiner Magnetfelder. Beide Ideen scheiterten jedoch an einigen grundlegenden Fragen. Obwohl beispielsweise mit zunehmender Größe des Sterns sowohl die Drehung als auch das Feld schwächer werden sollten, beschleunigt sich der Massenverlust Roter Riesen am Ende des Lebens sogar.

Die alternative Erklärung lautete, dass sich die meisten Planetarischen Nebel nicht aus einem einzelnen Stern bilden, sondern von einem Paar hervorgerufen werden. 2009 bezeichnete die Astronomin Orsola De Marco von der Macquarie University in Sydney das Szenario in einer entsprechenden Veröffentlichung als Doppelstern-Hypothese. Dabei ist der zweite Stern viel kleiner und tausende Male leuchtschwächer als der Rote Riese und könnte von diesem so weit entfernt sein wie Jupiter von der Sonne. So würde er einerseits auf den Roten Riesen einwirken und andererseits weit genug von ihm entfernt bleiben, um nicht verschluckt zu werden. (Es gibt noch andere denk-

bare Möglichkeiten, etwa eine Art Sturzflug, während dem sich der zweite Stern dem Roten Riesen alle paar hundert Jahre nähert und ihm Schichten entreißt.)

Die Doppelstern-Hypothese erklärt sehr gut das erste Stadium der Metamorphose eines sterbenden Sterns. Sein Begleiter reißt Staub und Gas von ihm fort, und deswegen fallen diese nicht sofort wieder hinein, sondern bilden in der Bahnebene eine Akkretionsscheibe aus umherwirbelndem Material. Das ist die erwähnte Töpferscheibe. Falls sie ein Magnetfeld besitzt, treibt es geladene Gase aus der Ebene in Richtung der Rotationsachse. Aber auch ohne Magnetfeld behindert das Material in der Scheibe ein Herausströmen in Ebenenrichtung und drängt das Gas in eine zweigeteilte Keulenstruktur. Der Fluss in Richtung der Pole ist schneller. Das ist genau das, was die Hubble-Bilder von Planetarischen Nebeln zeigen. »Warum sollte man nach einer komplizierten Antwort suchen, wenn ein Begleitstern alles sehr gut erklärt?«, meint De Marco.

Bessere Bilder untermauern die These

Allerdings gefiel vielen nicht die Vorstellung von zusätzlichen Sternen, die in keinem Detektor auftauchen. Sogar noch 2020, so schreibt Astronomin Leen Decin von der belgischen KU Leuven in einer Veröffentlichung, fragte sie ein renommierter Astrophysiker: »Weißt du, Leen, es sieht alles fantastisch aus, die Beobachtungen sind faszinierend, die modernen Modelle scheinen die Daten ziemlich gut zu interpretieren. Aber sollten wir am Ende nicht nur das glauben, was wir tatsächlich sehen können?«

Doch in den letzten 10 bis 15 Jahren hat sich das Meinungsbild allmählich gewandelt. Neue Teleskope haben gezeigt, dass einige Rote Riesen von Spiralstrukturen und Akkretionsscheiben umgeben sind, noch bevor



NASA/JPL-CALTECH/B. WILLIAMS (NCSU)

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum
Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/sterne-und-supernovae

sie Planetarische Nebel bilden. Sie zeigen genau das Verhalten, das man beim Vorhandensein eines zweiten Sterns erwarten würde, der dem Roten Riesen Material entzieht. In einigen Fällen gibt es sogar Hinweise auf den Begleitstern selbst.

Decin und ihr Team haben dafür insbesondere auf das 2011 in Betrieb genommene Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) in Chile gesetzt. ALMA besteht aus 66 zusammengeschalteten Radioteleskopen, die gemeinsam astronomische Objekten abbilden. »Es bietet uns eine hohe räumliche und spektrale Auflösung, die für das Verständnis von Dynamik und Geschwindigkeiten wichtig ist«, sagt Decin. Die Geschwindigkeit ist ein wichtiger Baustein. Mit ihr lassen sich stellare Winde und Akkretionsscheiben genau kartieren.

ALMA hat spiral- oder bogenförmige Strukturen um mehr als ein Dutzend Roter Riesen dokumentiert. Das ist ein ziemlich sicherer Hinweis auf Materie, die von dem Roten Riesen abgestoßen wird und sich spiralförmig zu dessen Begleiter bewegt. Die Spiralen passen gut zu entsprechenden Computersimulationen und sind mit dem alten Sternwindmodell nicht zu erklären. 2020 veröffentlichte Decin die ersten solchen Ergebnisse.

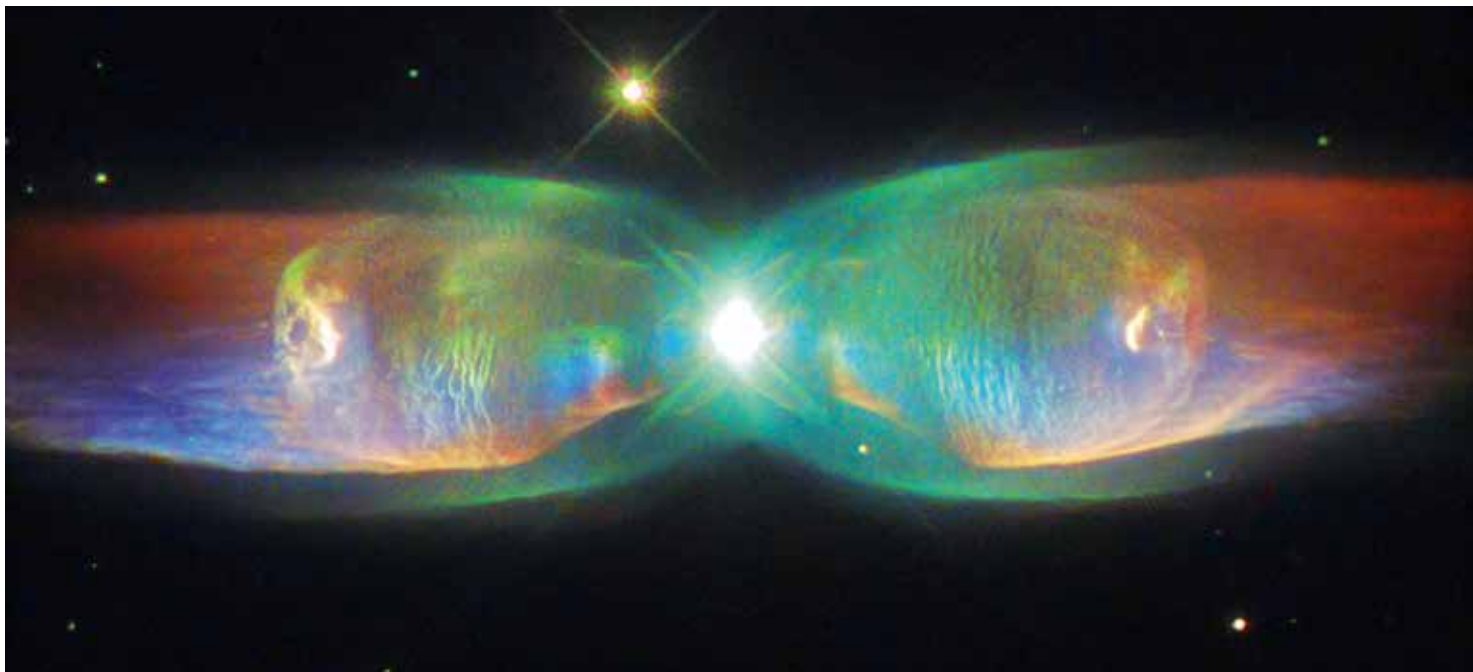
SCHMETTERLINGSNEBEL Der auch als M2-9 bezeichnete Nebel besteht aus zwei Gasströmen, die sich schnell und stark konzentriert zu den Seiten ausbreiten.

Darüber hinaus könnte Decins Forschungsgruppe auf den ALMA-Bildern die bisher unentdeckten Begleiter der beiden Roten Riesen mit den Namen π^1 Gruis und L_2 Puppis identifiziert haben. Um sicherzugehen, muss sie diese noch über einen längeren Zeitraum beobachten. Dann erkennt man, ob die neu entdeckten Objekte um den Hauptstern kreisen. »Wenn sie sich bewegen, bin ich mir sicher, dass wir es mit Begleitsternen zu tun haben«, sagt Decin. So ein Fund könnte die letzten Skeptiker überzeugen.

Wie bei einer kriminalistischen Spurensicherung gibt es nun Vorher- und Nachher-Aufnahmen von den Entstehungsprozessen Planetarischer Nebel. Was noch fehlt, ist das Äquivalent zu den Aufnahmen einer Überwachungskamera vom Ereignis selbst. Besteht die Hoffnung, einen Roten Riesen dabei zu erwischen, wie er sich in einen Planetarischen Nebel verwandelt?

Bislang sind Computermodelle die einzige Möglichkeit, den Jahrhunderte dauernden Prozess von Anfang bis Ende zu beobachten. Dabei haben die Astronomen ein dramatisches Szenario identifiziert, bei dem der Begleiter in den Hauptstern eintaucht, nachdem er ihn über einen längeren Zeitraum umkreist und auf Grund der Gezeitenkräfte an Abstand verloren hat. Während sich der Begleiter auf den Kern des Roten Riesen zubewegt, verliert er laut Adam Frank »eine wahnsinnige Menge an Gravitationsenergie«. Die Computermodelle zeigen, dass dies den Prozess, durch den der Stern seine äußeren Schichten verliert, enorm beschleunigt – auf nur ein bis zehn Jahre. Wenn dem tatsächlich so ist und die Fachleute wüssten, wo sie im realen Weltall danach suchen müssen, dann könnten sie den Tod eines Sterns und die Geburt eines Planetarischen Nebels in Echtzeit verfolgen.

Ein Kandidat, den man im Auge behalten sollte, heißt V Hydrae. Der äußerst aktive Rote Riese schießt alle 8,5 Jahre Plasma in Richtung seiner Pole. Außerdem hat er im Lauf der letzten 2100 Jahre entlang seiner Äquator-ebene sechs große Ringe ausgespuckt. Diese hat der Astronom Raghvendra Sahai vom Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena entdeckt und in einer Veröf-





KATZENAUGENNEBEL Elf konzentrische Ringe aus Staub wurden wohl in Abständen von je 1500 Jahren ins All geschleudert. Sie umgeben eine enorm komplexe Struktur, deren genaue Entstehungsgeschichte noch viele Rätsel aufwirft.

fentlichung im April 2022 beschrieben. Er glaubt, dass V Hydrae nicht nur einen, sondern zwei Begleitsterne hat. Ein nahe gelegener könnte bereits an der Hülle des Roten Riesen entlangstreifen und die Plasmaauswürfe verursachen, während ein weiter entfernter Nachbar mit einem regelmäßigen Sturzflug ins Geschehen den Ausstoß der Ringe steuert. Sofern das Modell stimmt, könnte V Hydrae kurz davor stehen, seinen näheren Begleiter zu verschlucken.

Und was ist nun mit unserer Sonne? Studien über Doppelsterne scheinen für ihr Schicksal wenig relevant zu sein; sie ist schließlich ein Einzelstern. Sterne mit Begleitern verlieren etwa sechs- bis zehnmal schneller an Masse als solche ohne, schätzt Decin. Die Hülle eines Roten Riesen wird viel effizienter in die Umgebung verteilt, wenn ein anderes Objekt mit seiner Anziehung dabei hilft, als wenn der Riesenstern sie eigenständig abstoßen müsste.

Die Daten von Sternen mit Begleitern erlauben also keine zuverlässigen Vorhersagen über das Schicksal von einsamen Sternen wie der Sonne. Ungefähr die Hälfte der sonnengroßen Sterne haben irgendeine Art von Partner. Dieser beeinflusst laut Decin immer die Gestalt des Sternwinds, und wenn er nahe genug ist, wirkt er sich zudem erheblich auf die Rate des Massenverlusts aus. Die Sonne wird ihre äußere Hülle deswegen wohl langsamer abstoßen und um ein Vielfaches länger in der Entwicklungs-

phase eines Roten Riesen verbleiben. Dennoch ist der genaue Ablauf des letzten Akts der Sonne ungewiss. Beispielsweise ist Jupiter zwar kein Stern, könnte aber trotzdem massereich genug sein, um Material von der Sonne anzuziehen und die Bildung einer Akkretionsscheibe anzutreiben. »Ich vermute, es wird eine sehr kleine, von Jupiter erzeugte Spiralbewegung geben«, sagt Decin. »Auch bei unseren Simulationen sieht man seinen Einfluss auf den Sonnenwind.« Wenn dem wirklich so ist, dann könnte unserer Sonne ebenfalls ein eindrucksvolles Finale bevorstehen. ◀

QUELLEN

Balick, B., Frank, A.: Shapes and shaping of planetary nebulae. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 40, 2002

Decin, L.: Evolution and mass loss of cool aging stars: A Daedalean story. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 59, 2021

Decin, L. et al.: (Sub)stellar companions shape the winds of evolved stars. Science 369, 2020

De Marco, O.: The origin and shaping of planetary nebulae: Putting the binary hypothesis to the test. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 121, 2009

Sahai, R. et al.: The rapidly evolving asymptotic giant branch star, V Hya: ALMA finds a multiring circus with high-velocity outflows. The Astrophysical Journal 929, 2022

knowable MAGAZINE
FROM ANNUAL REVIEWS

Mit Genehmigung von »Knowable Magazine« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »<https://knowablemagazine.org/article/physical-world/2022/dying-star-last-hurrah>«

Physik des Osterfeuers

Feuer setzt in kurzer Zeit die Energie frei, die über Monate und Jahre in der verbrennenden Biomasse gespeichert wurde. Bei dem hitzigen Spektakel laufen einige spannende physikalische Prozesse ab.

► spektrum.de/artikel/2108292

»Das Feuer stirbt, wenn es nicht tötet«

Friedrich Hebbel

Flammen züngeln nach oben, das brennende Holz knistert, Funken sprühen in wilden Wirbeln, die Gesichter glühen im warmen Schein. Menschen erleben bei der Betrachtung eines Osterfeuers eine der elementaren Urgewalten.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist das Feuer ein Naturphänomen, das eine Vielzahl fundamentaler physikalischer und chemischer Vorgänge verbindet – insbesondere in diesem großen Format. Ein hoher Stapel festen Materials geht in flüchtigen Rauch und Flammen auf und lässt lediglich ein Häufchen staubiger Asche zurück.

Dabei macht das Spektakel rasant die langsamen biologischen Aufbauprozesse von Holz und Laub rückgängig. Deren Biomasse entsteht durch die Photosynthese, bei der sich die anorganischen Bestandteile Kohlenstoffdioxid aus der Luft und Wasser aus dem Boden unter Aufnahme von Energie aus dem Sonnenlicht zu organischen Kohlenhydraten verbinden. Das ist die rein energetische Betrachtung; weitere Stoffe sind ebenfalls am Pflanzenwachstum beteiligt, vor allem Minerale. Sie finden sich in der deshalb oft silbrig-weiß schimmernden Asche wieder.

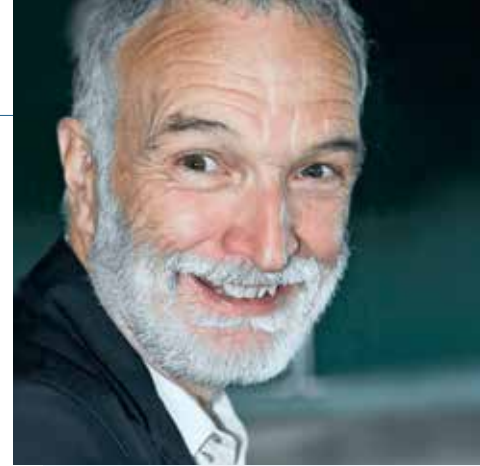
Der Prozess des Verbrennens unterhält und verstärkt sich selbst, sobald man das Pflanzenmaterial einmal anzündet. Dann wird in kurzer Zeit die bei dessen Wachstum gebundene Sonnenenergie wieder abgegeben, und zwar in Form von Strahlung, die teils als Flamme sichtbar und teils als Wärme fühlbar ist.

In der Hitze wandeln sich die festen Stoffe hauptsächlich in eindrucksvoll leuchtende Gase um, die in einer Säule über dem Feuer aufsteigen. Dort kühlen sie rasch ab. Dann lassen sich die Strömungen nur noch

erahnen oder gelegentlich durch Funken nachverfolgen, die in ihren Wirbeln aufgetrieben werden. Dass wir es mit entzündeten Gasen zu tun haben, kommt auch zum Ausdruck, wenn sich manchmal Flammen-teile vom Holzstoß abspalten und fernab vom eigentlichen Ort des Geschehens für kurze Zeit eigenständig weiterleuchten. Manchmal geraten sogar bislang noch

FEUERSPEIER Unter Abgabe von Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Strahlungsenergie zerfällt Biomasse in ihre anorganischen Bestandteile. Links hat sich brennendes Gas vom eigentlichen Feuer getrennt.

H. JOACHIM SCHLICHTING



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

nicht brennende und daher unsichtbare Dämpfe in sehr heiße Bereiche und werden dadurch entzündet. Ein entsprechender Vorgang lässt sich im Kleinen leicht mit einer Kerze nachstellen. Nach dem Auspusten steigt noch eine Zeit lang Wachsampf auf. Hält man einige Zentimeter über dem Docht ein brennendes Streichholz in die Gasfahne, entzünden sich die verflüchtigten Kohlenwasserstoffe sofort wieder.

Die großräumig nach oben lodernden Flammen sind der sichtbare Teil eines Konvektionsvorgangs. Hierbei steigen die heißen Gase ihrer geringen Dichte wegen auf und werden unten zwangsläufig durch seitlich zuströmende frische Luft ersetzt. Dieser Teilprozess ist keine bloße Begleiterscheinung, sondern für die Verbrennung gewissermaßen lebenswichtig. Denn die herangeschaffte Luft liefert den Sauerstoff, der für die Umwandlung der kohlenstoffhaltigen Gase in Kohlenstoffdioxid nötig ist.

Darüber hinaus bereitet die frei werdende Energie im Reaktionsbereich des Feuers den Nachschub an Brennmaterial auf: Es wird getrocknet und bis zur Entzündungstemperatur aufgeheizt. Die großen Moleküle der organischen Verbindungen werden bei Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius ohne zusätzlichen Sauerstoff allein durch die Einwirkung von thermischer Energie in kleinere Bestandteile gespalten und schließlich vergast. Der Prozess nennt sich Pyrolyse. Holz enthält allerdings ebenso wie andere Biobrennstoffe seinerseits bereits Sauerstoffatome. Diese machen immerhin 44 Prozent seiner Masse aus. Deswegen finden bei dem Umwandlungsprozess gleichzeitig zusätzliche Oxidationsreaktionen statt, die den Zersetzungsvorgang unterstützen.

Die kräftigen, zwischen Weiß, Gelb und Rot changierenden Farben der Flamme kommen vor allem durch eine thermische Anregung der Gasbestandteile, Rußteilchen und Aerosole zu Stande. Anschaulich gesprochen werden Elektronen in den Atomen auf höhere Bahnen angehoben und fallen unmittelbar danach wieder in ihren Grundzustand zurück. Dabei senden sie die Energiedifferenz in Form von sichtbarem Licht aus.

Anhand der Farben kann man sogar die beteiligten Prozesse identifizieren. Glühende Rußteilchen von der Größenordnung einiger zehn Nanometer erzeugen gelbes bis orangefarbenes Licht. Blau kann angeregten CO_2 - und CH -Radikalen zugeordnet werden, während Türkis auf zweiatomige Kohlenstoffmoleküle schließen lässt. Die von den Feststoffbestandteilen wie Ruß und Asche ausgehenden Wellenlängen entsprechen dabei weitgehend dem Spektrum eines so genannten Schwarzen Körpers. Das ist eine Quelle, deren ausgesandte Strahlung nur von der vorherrschenden Temperatur abhängt.

Ein weiteres optisches Phänomen bemerkt, wer durch die heiße Luft auf weit entfernte Gegenstände



H. JOACHIM SCHLICHTING

TANZENDER SCHLOT Bei einem Blick durch die heißen Gase scheint der Schornstein einer entfernten Ziegelei in Bewegung zu geraten.

blickt. Sie scheinen ihre Festigkeit eingebüßt zu haben – Einzelheiten flirren regellos umher. Der Brechungsindex der Gase zwischen Objekt und Auge hängt von Dichte und Temperatur ab, und die unterscheiden sich bereits auf kleinstem Raum dramatisch. Deshalb wirkt das von einem bestimmten Punkt stammende Licht, als käme es aus sich ständig ändernden Richtungen. Ein vergleichbares Phänomen ist das Funkeln der Sterne. Deren Strahlung begegnet auf dem langen Weg durch die Atmosphäre lokalen Schwankungen des Brechungsindex. Das verursacht nicht nur Ortsunschärfen, sondern außerdem Farbwechsel.

Beim Gesamtgeschehen des Osterfeuers gewinnt man den Eindruck, alle Prozesse seien aufeinander abgestimmt, ohne dass dazu ein äußerer Mechanismus nötig wäre. Sogar die Einhaltung eines Sicherheitsabstands scheint ein Teil dieser Selbstorganisation zu sein. Mit ihrer Hitze halten die Flammen die Menschen auch ohne Verbote und Absperrungen auf Abstand.

Magie im Flachland

Von der Hochtemperatursupraleitung über ultrasensible Quantensensoren bis hin zu stabilen Quantencomputern: Zweidimensionale Materialien bergen ein erstaunliches Potenzial. In den letzten Jahren gab es bei der Erforschung der neuen Wunderstoffe große Fortschritte.

» [spektrum.de/artikel/2108280](https://www.spektrum.de/artikel/2108280)



Charles Wood ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in New York.

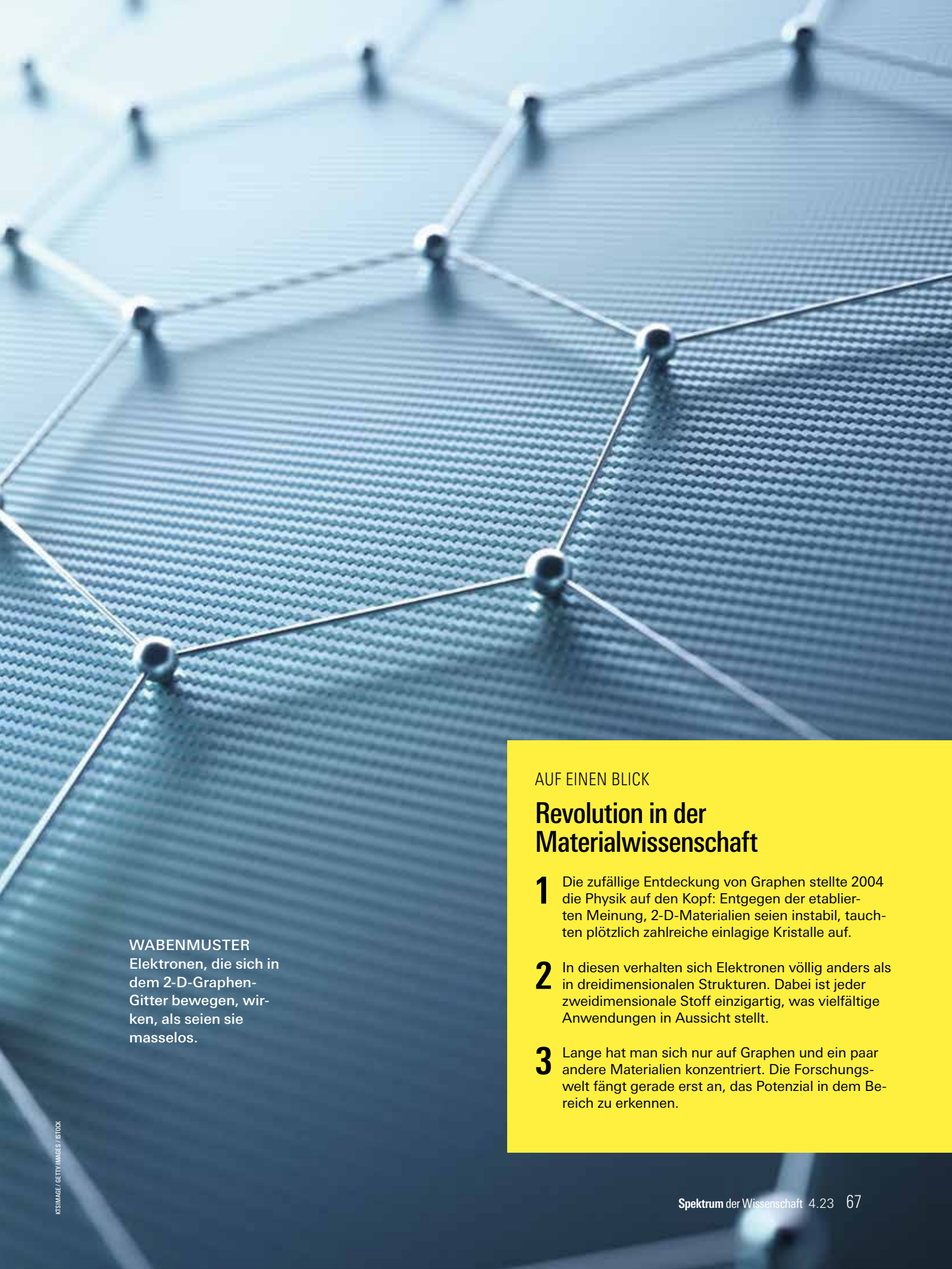
Alles begann mit einem Stück Klebeband. Die Physiker Andre Geim und Konstantin Novoselov stellten 2004 überrascht fest, dass sie damit von einem Graphitblock einige Flocken abziehen konnten, die bloß die Dicke eines Atoms hatten. Auf diese Weise hatten sie das erste zweidimensionale Material geschaffen – obwohl theoretische Physiker das für unmöglich erklärt hatten. Als sie mit der hauchdünnen Schicht herumexperimentierten, erkannten sie, dass sich deren Eigenschaften radikal von jenen dreidimensionaler Materialien unterscheiden. Graphen, wie Geim und Novoselov es nannten, begründete eine völlig neue Kategorie von Stoffen. Ihre Entdeckung veränderte die Festkörperphysik. Tausende von Forscherinnen und Forscher begannen ebenfalls, an Graphen zu arbeiten, und träumten von den vielfältigen Technologien, die es ermöglichen könnte. Bereits 2010 wurden Geim und Novoselov mit dem Nobelpreis für Physik geehrt.

Im selben Jahr sahen die junge Physikerin Jie Shan und ihr Kollege Kin Fai Mak von der Columbia University Anzeichen dafür, dass zweidimensionale Schichten von

Molybdänit noch außergewöhnlicher sein könnten als Graphen. Molybdänit sieht selbst für das geschulte Auge fast genauso aus wie Graphit: ein silbrig glänzender Kristall. Beide Materialien werfen Flocken ab, die sich zur Herstellung von Bleistiften eignen. Man sollte sich von diesen Äußerlichkeiten aber nicht täuschen lassen. Trotz ihrer Ähnlichkeit bilden die Atomgitter der Stoffe für die darin befindlichen Elektronen völlig verschiedene Welten. Das stellte erstmals der schwedische Chemiker Carl Scheele vor 244 Jahren fest, als er beide Minerale in Säuren tauchte. Die grellen Gaswolken, die dabei entstanden, sahen alles andere als gleich aus. So kam er zu dem Schluss, dass Molybdänit eine neue Substanz sein musste. Der Wissenschaftler bezahlte die Experimente schließlich mit dem Leben, er starb im Alter von 43 Jahren an einer Schwermetallvergiftung.

Dennoch fand Molybdänit seinen Weg in die Anwendung: Weil es schnell in pulverförmige Fragmente zerfällt, entwickelte es sich im Lauf des 20. Jahrhunderts zu einem beliebten Schmiermittel. Es ließ Skier besser durch den Schnee gleiten und glättete den Austritt von Kugeln aus Gewehrläufen. Diese »Flockigkeit« ermöglicht es auch, zweidimensionale Schichten des Kristalls zu gewinnen, wie bei Graphit.

Das weniger bekannte Mineral ist sehr schwierig zu erforschen. Trotzdem faszinierte es Shan und Mak. Das Duo widmete sich fast ein Jahrzehnt lang den einlagigen



WABENMUSTER
Elektronen, die sich in dem 2-D-Graphen-Gitter bewegen, wirken, als seien sie masselos.

AUF EINEN BLICK

Revolution in der Materialwissenschaft

- 1** Die zufällige Entdeckung von Graphen stellte 2004 die Physik auf den Kopf: Entgegen der etablierten Meinung, 2-D-Materialien seien instabil, tauchten plötzlich zahlreiche einlagige Kristalle auf.
- 2** In diesen verhalten sich Elektronen völlig anders als in dreidimensionalen Strukturen. Dabei ist jeder zweidimensionale Stoff einzigartig, was vielfältige Anwendungen in Aussicht stellt.
- 3** Lange hat man sich nur auf Graphen und ein paar andere Materialien konzentriert. Die Forschungswelt fängt gerade erst an, das Potenzial in dem Bereich zu erkennen.

Schichten von Molybdänit (oder Molybdändisulfid, der im Labor hergestellten Variante des Kristalls) und einer Familie eng verwandter Stoffe.

Jetzt zählen sich ihre Bemühungen aus. Shan und Mak, die inzwischen miteinander verheiratet sind, leiten seit 2018 gemeinsam eine Forschungsgruppe an der Cornell University. Dort konnten sie zeigen, dass zweidimensionale Materialien eine enorme Vielfalt an exotischen Quantenphänomenen hervorrufen. »Es ist verrückt«, sagt ihr Kollege James Hone, der das Labor mit hochwertigen Kristallen versorgt. »Man kann die gesamte moderne Festkörperphysik in einem einzigen Materialsystem durchführen.«

Die Gruppe von Shan und Mak hat völlig ungeahnte Verhaltensweisen von Elektronen beobachtet. Sie hat die Teilchen dazu gebracht, zu einer Quantenflüssigkeit zu verschmelzen und zu verschiedenen eisähnlichen Strukturen einzufrieren. Die Forscherinnen und Forscher haben Gitter aus gigantischen künstlichen Atomen zusammengesetzt, die nun grundlegende Theorien auf den Prüfstand stellen. Außerdem konnten sie jahrzehntealte Fragen der Festkörperphysik beantworten. Und sie sind noch längst nicht fertig.

Die Eigenschaften eines Materials sind durch das Verhalten der Elektronen bestimmt. In Leitern wie Metallen fließen die Teilchen mit Leichtigkeit zwischen den Atomen umher. In Isolatoren wie Holz oder Glas bleiben sie hingegen an Ort und Stelle. Halbleiter wie Silizium liegen irgendwo dazwischen: Führt man Energie zu, kann man ihre Elektronen in Bewegung bringen. Das macht solche Stoffe ideal für das Ein- und Ausschalten von Strömen – die Aufgabe eines Transistors. In den letzten 50 Jahren haben Festkörperphysiker neben diesen drei grundlegenden Materialtypen noch viele weitere exotische Stoffe entdeckt, in denen sich die Elektronen völlig anders verhalten.

Für eine der größten Überraschungen sorgten die beiden IBM-Forscher Georg Bednorz und Alex Müller im Jahr 1986, als sie einen elektrischen Strom beobachteten, der sich ohne jeglichen Widerstand durch einen Kupferoxidkristall (Cuprat) bewegte. Supraleitung war damals zwar schon bekannt, aber nur in Materialien, die man bis auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt

(-273,15 Grad Celsius) abgekühlt hatte. Tatsächlich besagten die theoretischen Modelle, dass Strom nur bei solchen Temperaturen widerstandsfrei fließen kann. Bednorz und Müller hatten das Phänomen jedoch bei rekordverdächtigen 35 Kelvin (etwa -238 Grad Celsius) gemessen. Bald darauf entdeckte man weitere Cuprate, die sogar oberhalb von 100 Kelvin supraleitend sind. Damit war ein Traum geboren, der bis heute eines der wichtigsten Ziele der Festkörperphysik ist: eine Substanz zu finden, die Strom bei Raumtemperatur ohne Widerstand befördert. Das würde verlustfreie Stromleitungen, schwebende Fahrzeuge und andere hocheffiziente Geräte ermöglichen – und so den Energiebedarf der Menschheit erheblich reduzieren.

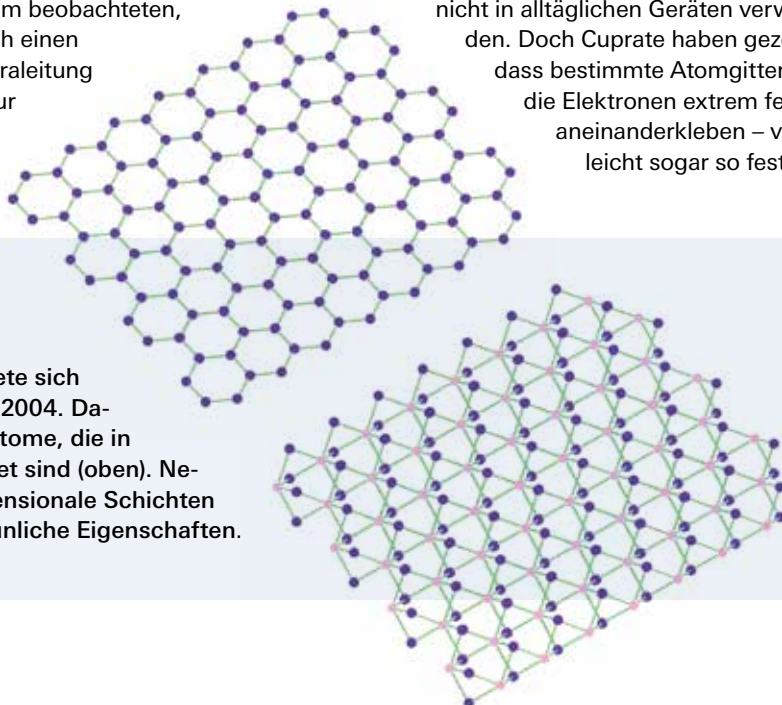
Die Paarung verändert die Natur der Teilchen

Supraleitung wird möglich, weil sich Elektronen, die sich normalerweise gegenseitig abstoßen, bei niedrigen Temperaturen in manchen Kristallen plötzlich zu Paaren zusammenschließen. Das Paar kann dann als »Boson« betrachtet werden – so nennt man eine von zwei Teilchenfamilien, welche die grundlegenden Eigenschaften aller Partikel bestimmt. Während materieartige Elementarteilchen (wie Elektronen, Quarks oder Neutrinos) zur Klasse der Fermionen gehören, die sich niemals im gleichen Zustand am selben Ort befinden können, sind Photonen und Gluonen Bosonen, die das problemlos schaffen. Die bosonischen Elektronenpaare sind ebenfalls dazu in der Lage: Sie verschmelzen zu einer Quantenflüssigkeit, die reibungsfrei fließen kann.

Das ist allerdings nur bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt oder unter sehr hohem Druck möglich. Denn nur dann können die anziehenden Kräfte (hervorgerufen etwa durch Atomschwingungen), welche die Elektronen zu Bosonen paaren, die elektrische Abstoßung der Teilchen überwinden. Wegen dieser extremen Bedingungen lässt sich die Supraleitung nicht in alltäglichen Geräten verwenden. Doch Cuprate haben gezeigt, dass bestimmte Atomgitter die Elektronen extrem fest aneinanderkleben – vielleicht sogar so fest,

Physik in zwei Dimensionen

Die Welt der 2-D-Materialien eröffnete sich durch die Entdeckung von Graphen 2004. Dabei handelt es sich um Kohlenstoffatome, die in einem hexagonalen Gitter angeordnet sind (oben). Neben Graphen bergen auch zweidimensionale Schichten von Molybdändisulfid (unten) erstaunliche Eigenschaften.





JOHN CHAPMAN (PROFEI) (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:MOPLY_HILL_MOLYBDENITE.JPG) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENCES/CC-BY-SA/4.0/LEGALCODE)

MOLYBDÄNIT Das Mineral wird häufig zu pulverförmigen Bruchstücken zermahlen und als industrielles Schmiermittel verwendet. Doch Physiker haben entdeckt, dass 2-D-Folien des hexagonalen Kristalls neuartige Verhaltensweisen von Elektronen hervorrufen.

dass sie sich selbst bei Raumtemperatur nicht voneinander lösen.

Aber auch 40 Jahre nach der Entdeckung von Bednorz und Müller weiß niemand, wie der Klebstoff in Cupraten funktioniert – geschweige denn, wie man Kristalle optimieren kann, um den Effekt zu verstärken. Stattdessen untersuchen Fachleute auf gut Glück verschiedene Materialien, in der Hoffnung, dass sie bei möglichst hohen Temperaturen ihre Supraleitfähigkeit behalten. »Immerhin ist die Festkörperphysik ein Bereich, in dem es viele Zufälle gibt«, sagt Kim. Ein solcher war auch die Entdeckung von zweidimensionalen Stoffen im Jahr 2004.

Geim und Novoselov arbeiteten damals an der University of Manchester mit Graphit. Der Kristall besteht aus locker gebundenen einatomigen Lagen aus Kohlenstoffatomen, die in einem »hexagonalen« Gitter aus Sechsecken angeordnet sind. Theoretiker hatten schon lange vorhergesagt, dass ohne den stabilisierenden Einfluss der vielen Schichten hitzebedingte Schwingungen einen einlagigen Film aufbrechen würden. Demnach wäre eine rein zweidimensionale Schicht instabil und würde sich beispielsweise aufrollen. Doch Geim und Novoselov fanden heraus, dass sie mit einem einfachen Klebeband stabile, atomar dünne Lagen abziehen konnten. Graphen war das erste wirklich flache Material – eine Ebene, auf der Elektronen frei herumgleiten können.

Ein neues Material voller Überraschungen

Der Physiker James Hone von der Columbia University entdeckte dann, dass der dünnste Stoff der Welt auch der stärkste ist. Das war eine bemerkenswerte Überraschung

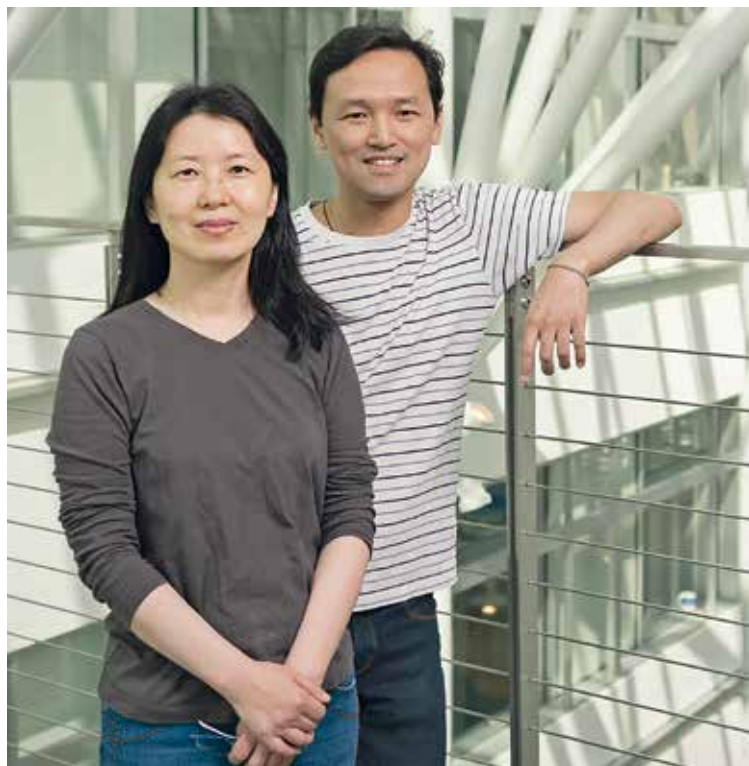
für einen Kristall, von dem man dachte, er würde überhaupt nicht zusammenhalten. Was die Fachwelt an Graphen jedoch am meisten faszinierte, war die Art und Weise, wie sich Elektronen darin verhalten: Auch wenn sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit fließen, wirken sie wie Photonen – nichts kann sie verlangsamen. Normalerweise werden Elektronen oft durch das Atomgitter, durch das sie sich bewegen, ausgebremst und erscheinen dadurch schwerer als ihre eigentliche Masse. Unbewegliche Elektronen eines Isolators wirken beispielsweise, als wären sie unendlich schwer: Man kann einem Isolator viel Energie zuführen, die Teilchen bewegen sich trotzdem nicht. Das flache Gitter von Graphen lässt sie jedoch mit einer Million Meter pro Sekunde umherschwirren, was nur ein paar hundert mal langsamer ist als die Lichtgeschwindigkeit. Die Elektronen wirken, als wären sie masselos, was Graphen extrem leitfähig macht.

Um das Wundermaterial entstand schnell ein ganzes Forschungsfeld. Und die Fachleute begannen auch, über den Tellerrand zu schauen. Könnten zweidimensionale Flocken aus anderen Substanzen eigene Superkräfte haben? Hone gehörte zu denjenigen, die weiter ausholten. 2009 untersuchte er einige mechanische Eigenschaften des zweidimensionalen Graphit-Zwillings Molybdändisulfid und übergab den Kristall anschließend an zwei Optikspezialisten im Columbia-Labor von Tony Heinz. Es war eine beiläufige Handlung, die aber die Karriere aller Beteiligten verändert hat.

Die Probe landete in den Händen von Jie Shan, einer jungen Gastprofessorin, und dem Doktoranden Kin Fai Mak. Die beiden hatten zuvor untersucht, wie Graphen mit Licht wechselwirkt. Durch die schnellen Elektronen ist der Stoff ein fantastischer Leiter, aber Mak und Shan

TEAMARBEIT Jie Shan und ihr Kollege Kin Fai Mak leiten eine Gruppe von ein paar Dutzend Studierenden und Nachwuchsforschern.

SASHA MASLOV FÜR QUANTA MAGAZINE



brauchten für ihre Forschung eigentlich Halbleiter, deren Elektronenfluss sie ein- und ausschalten konnten.

Molybdändisulfid ist ein solcher Halbleiter. Wie Shan und Mak bald herausfanden, besitzt es – genauso wie Graphit – im Zweidimensionalen erstaunliche Eigenschaften. Wenn sie einen Laser auf dreidimensionale Kristalle aus Molybdändisulfid richteten, blieben diese dunkel. Als die zwei Forscher jedoch einzelne Schichten mit Klebeband abrissen und die gleiche Prozedur wiederholten, leuchteten die zweidimensionalen Filme hell auf. Forschungen anderer Gruppen haben das Ergebnis später bestätigt. »Das ist schon verblüffend«, sagt Mak. »Man hat nur eine einzige Schicht aus Atomen, und sie kann 100 Prozent des Lichts wie ein perfekter Spiegel reflektieren.« Diese Eigenschaft könnte zu spektakulären optischen Geräten führen. »Plötzlich begannen alle, die mit Lasern arbeiten, sich für zweidimensionale Materialien zu interessieren«, so Hone.

Mit Molybdändisulfid als zweites Wundermaterial eröffneten sich zahlreiche neue Möglichkeiten. Denn das Material gehört zu der großen Familie von Übergangsmetall-Dichalkogeniden (Englisch: transition metal dichalcogenide, kurz: TMD), von denen es inzwischen etliche gibt. Sie bestehen aus Atomen des mittleren metallischen Bereichs des Periodensystems (wie Molybdän) und Paaren von Chalkogeniden (wie Schwefel). Molybdändisulfid ist das einzige natürlich vorkommende TMD, aber es existieren dutzende weitere, die sich im Labor herstellen lassen, wie Wolframdisulfid oder Molybdänditellurid. Die meisten bestehen aus schwach gebundenen Schichten, was sie für eine Klebebandbehandlung ideal macht.

Die anfängliche Begeisterung ebte allerdings bald ab, als die Fachleute mehr als bloß etwas Glanz aus den TMDs herausholen wollten. Denn neben optischen Untersuchungen mit Lasern sind so genannte Transportmes-

sungen wichtig, bei denen man Elektronen über Elektroden in ein Material pumpt und deren Verhalten untersucht. Die Gruppe von Wang wandte sich nach kurzer Zeit wieder Graphen zu, nachdem sie vergeblich versucht hatten, Metallelektroden an Molybdändisulfid anzubringen. »Das war für unsere Gruppe einige Jahre lang der Stolperstein«, sagt er. »Selbst jetzt sind wir nicht sehr gut im Herstellen von elektrischen Kontakten.« Es schien, als sei der stärkste Vorteil von TMDs gegenüber Graphen gleichzeitig ihre größte Schwäche: Da Halbleiter schlechte Leiter sind, ist es schwierig, Elektronen hinein- oder herauszubekommen.

Auch Mak und Shan zweifelten anfangs. »Uns war wirklich nicht klar, ob wir weiter an Graphen oder an dem neuen Material arbeiten sollten«, erinnert sich Mak. »Aber da wir herausgefunden hatten, dass es dieses erstaunliche Reflexionsverhalten besitzt, haben wir noch ein paar zusätzliche Experimente damit gemacht.« Dabei faszinierte Molybdändisulfid die beiden Physiker zunehmend – und auch persönlich näherten sich Shan und Mak an.

Ein mühevoller Weg in die Forschung

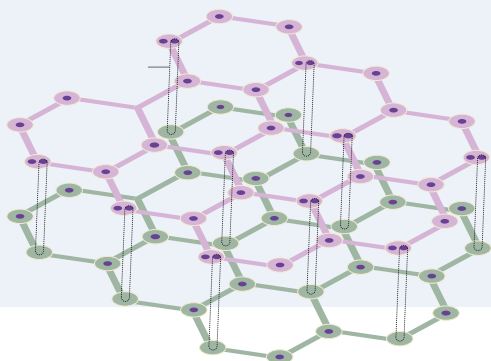
Lernen fiel Shan schon immer leicht. Als sie in den 1970er Jahren in der chinesischen Küstenprovinz Zhejiang aufwuchs, war sie eine Musterschülerin. Sie tat sich in Mathematik, Naturwissenschaften und Sprachen hervor und sicherte sich einen begehrten Platz an der University of Science and Technology of China in Hefei. Dort qualifizierte sie sich für ein kulturelles Austauschprogramm mit der Sowjetunion und ergriff die Chance, an der Staatlichen Universität in Moskau Russisch und Physik zu studieren: Zum Wintereinbruch erreichte sie die Stadt Irkutsk mitten in Sibirien. Nach nur einem Semester beherrschte Shan Russisch und lernte die karge Schönheit der winterlichen Landschaft zu schätzen.

Als der Kurs endete und der Schnee schmolz, reiste sie im Frühjahr 1990 weiter nach Moskau, um dort ihr Physikstudium zu beginnen – mitten in der Auflösung der Sowjetunion. Shan sah Panzer durch die Straßen in der Nähe der Universität rollen, als die Kommunisten versuchten, die Kontrolle über die Regierung wiederzuerlangen. Bei einer anderen Gelegenheit, kurz nach einer Abschlussprüfung, brachen Kämpfe aus. »Wir hörten Schüsse, und uns wurde gesagt, wir sollten das Licht im Wohnheim ausschalten«, erzählt sie. Alles, vom Essen bis zum Toilettenpapier, war durch ein Coupon-System rationiert. Dennoch fühlte sich Shan durch die Unerschütterlichkeit ihrer Professoren inspiriert, die trotz der Unruhen ihre Forschung fortsetzten. Als die gewohnte Ordnung um sie herum zusammenbrach, veröffentlichte sie eine Arbeit über theoretische Optik, die dem US-Amerikaner Heinz am anderen Ende der Welt an der Columbia University auffiel. Er ermutigte Shan, sich in seiner Forschungseinrichtung zu bewerben. Die junge Physikerin zog daraufhin nach New York, um bei ihm zu promovieren.

Die meisten Forscher nehmen nach ihrer Doktorarbeit eine Postdoktorandenstelle an, aber Shan ging 2001 direkt als außerordentliche Professorin an die Case Western Re-

Gegensätze ziehen sich an

In geschichteten 2-D-Materialien ziehen die Elektronen der einen Lage die Löcher (fehlende Elektronen) der darunterliegenden an. Diese Elektron-Loch-Paare, so genannte Exzitone, bewegen sich durch ein Material, als seien sie eigenständige Teilchen.



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

serve University in Cleveland. Später kehrte sie während eines Sabbaticals in das Labor von Heinz an der Columbia University zurück. Dort begann sie die Zusammenarbeit mit dem damaligen Doktoranden Kin Fai Mak.

Mak war auf einem weniger turbulenten Weg in New York gelandet. Er wuchs in Hongkong auf und hatte es in der Schule schwer, weil er außer Physik kaum etwas

beherrschte. Seine Forschungsarbeiten im Grundstudium an der Hong Kong University of Science and Technology fielen Heinz auf, der ihn ebenfalls an die Columbia University holte. Dort stürzte Mak sich in die Forschung und verbrachte fast alle wachen Stunden im Labor. Unterbrochen wurde dies durch einen Ausflug in den kolumbianischen Amazonas-Regenwald, aus dem Mak erkrankt zurückkehrte. Wie sich herausstellte, litt er an einer seltenen Blutkrankheit und so verbrachte er den Großteil des letzten Studienjahres im Krankenhaus. »Er schrieb hochkarätige Veröffentlichungen vom Krankenhausbett aus«, erinnert sich die Physikerin Andrea Young von der University of California, Santa Barbara. »Trotz alledem war er einer der produktivsten Studenten überhaupt«, so Heinz. Nach seiner Genesung wechselte Mak 2012 als Postdoktorand an die Cornell University in Ithaca, gerade als Shan wieder an die Case Western University in Ohio zurückgekehrt war. Die beiden Physiker verfolgten individuelle Projekte mit Graphen und anderen 2-D-Materialien, aber einigen Fragestellungen gingen sie weiterhin gemeinsam nach. Mak hatte an der Cornell University die hohe Kunst der Elektronentransportmessungen gelernt, die neben optischen Ansätzen (die Shan nutzt) eine zweite wichtige Methode darstellt, um die Bewegung von Elektronen zu bestimmen. Indem sie ihr Fachwissen kombinierten, konnten die Forscher den mysteriösen TMDs erstaunliche Geheimnisse entlocken.

Je mehr das Duo über TMDs erfuhr, desto faszinierender erschienen die Stoffe. Physiker konzentrieren sich in der Regel auf eine von zwei Eigenschaften von Elektronen: ihre Ladung oder ihren Spin, eine Art Eigendrehimpuls. Der elektrische Ladungsfluss bildet die Grundlage



CHARLIE WOOD / QUANTA MAGAZINE

HÖCHSTE PRÄZISION Die Doktorandin Zhengchao Xia in der Gruppe von Mak und Shan verwendet einen motorisierten Positioniertisch, um Materialschichten zu einem neuen 2-D-Bauteil zu stapeln.



CHARLIE WOOD / QUANTA MAGAZINE

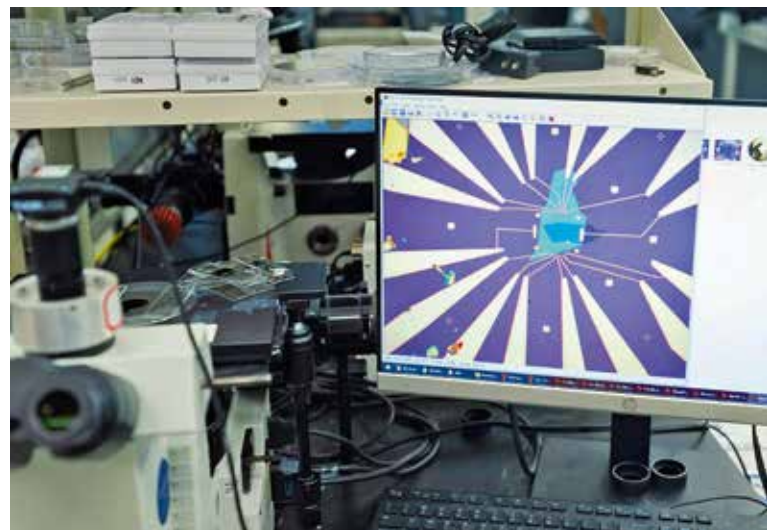


BILDE: FOTOS: SASHA MASLOV FÜR QUANTA MAGAZINE

SCHICHTEN STAPELN Forscher reißen Klebeband von einem Kristall ab, um zweidimensionale Schichten zu erzeugen (oben). Dann stapeln sie diese Lagen und bringen Elektroden an. Ein mikroskopisches Bild einer solchen Vorrichtung erscheint auf einem Computermonitor (rechts).

der modernen Elektronik. Ebenso lässt sich aber auch der Spin der Teilchen steuern, darauf fußt die »Spintronik«. Derartige Bauteile haben den Vorteil, dass sie mehr Informationen auf kleinerem Raum unterbringen können. 2014 entdeckte Mak mit seinen Kollegen, dass Elektronen in zweidimensionalem Molybdändisulfid eine dritte Eigenschaft besitzen, die sich für Anwendungen nutzen ließe: Die Teilchen fließen stets mit einer von zwei möglichen Geschwindigkeiten. Das hat zu einem dritten Feld, der so genannten Valleytronik, geführt.

Elektronen sind nicht die einzigen Objekte, die sich durch einen Kristall bewegen. Physiker verfolgen auch Löcher, also Leerstellen, die entstehen, wenn Elektronen woandershin springen. Diese können wie echte positiv geladene Teilchen durch ein Material wandern. Zwischen Elektron und Loch besteht eine Anziehungskraft – und tatsächlich können sie sich kurzzeitig zu einem Paar, einem Exziton, zusammenschließen, bevor das Elektron die Leerstelle füllt. Shan und Mak haben die Anziehung zwischen Elektronen und Löchern in zweidimensionalem Wolframdiselenid gemessen und festgestellt, dass sie hundertmal stärker ist als in einem typischen dreidimensionalen Halbleiter. Das heißt, Exzitonen könnten in TMDs besonders robust sein. Und das könnte wiederum für Supraleitung entscheidend sein.



Nach diesen Durchbrüchen erhielten Shan und Mak eine Stelle an der Pennsylvania State University und gründeten dort ein Labor, um sich voll und ganz den TMDs zu widmen. Und sie heirateten. In der Zwischenzeit stellte das Team um Hone fest, dass die Eigenschaften von Graphen noch erstaunlicher wurden, wenn man es auf den Isolator Bornitrid schichtete. Das war ein frühes Beispiel für einen wichtigen Aspekt von zweidimensionalen Materialien: ihre Stapelbarkeit (siehe »Spektrum« November 2019, S. 52).

Legt man ein 2-D-Material auf ein anderes, sind die Lagen nur den Bruchteil eines Nanometers voneinander entfernt – aus Sicht der Elektronen haben sie überhaupt keinen Abstand. Somit verschmelzen gestapelte Schichten

zu einer einzelnen Substanz. »Es sind nicht einfach nur zwei Materialien«, erklärt Wang. »Man schafft wirklich einen neuen Stoff.«

Während Graphen ausschließlich aus Kohlenstoffatomen besteht, bringt die vielfältige Familie der TMDs dutzende Elemente mit sich. Jedes davon hat unterschiedliche Eigenschaften: Einige können unter richtigen Bedingungen magnetisch, andere supraleitend sein. Deshalb waren die Forscher gespannt, was geschehen würde, wenn man diese Materialien verbindet. Als Hones Gruppe Molybdändisulfid auf einem Isolator anordnete, brachte das Stapeln im Vergleich zu dem, was sie bei Graphen gesehen hatte, nur geringe Fortschritte. Wie sich herausstellte, hatten die Physiker die Qualität der beschafften TMD-Kristalle nicht überprüft. Die genaue Betrachtung unter dem Mikroskop, das atomare Auflösung besitzt, zeigte: Einige Atome saßen an der falschen Stelle, andere fehlten gänzlich. Zirka ein Prozent aller Gitterplätze wies ein Problem auf, was die Leitfähigkeit des Stoffs beeinträchtigte. Im Vergleich dazu war ihre Graphenprobe der Inbegriff von Perfektion, mit etwa einer Fehlstelle pro Million Atome. »Das Zeug, das wir gekauft hatten, war kompletter Müll«, so Hone.

Eine eigene Kristallzucht

2016 beschloss er daher, selbst TMDs in Forschungsqualität zu erzeugen. Er stellte einen Postdoktoranden, Daniel Rhodes, ein, der Erfahrung damit hatte. Rhodes schmolz Pulver von Rohstoffen bei extrem hohen Temperaturen und kühlte sie dann wieder ab. Das neue Verfahren dauerte einen Monat – sehr viel länger als kommerzielle Methoden, die bereits nach einigen Tagen abgeschlossen sind. Aber es kamen TMD-Kristalle heraus, die hunderte bis tausende Male besser waren.

Bevor Shan und Mak die Vorteile von Hones zunehmend makellosen Stoffen nutzen konnten, mussten sie ein anderes Problem lösen. Wie lassen sich Elektronen in die Materialien ein- und wieder abführen? Das ist für die Transportuntersuchungen unerlässlich, die Mak als Postdoktorand gelernt hatte. Die beiden Forscher mussten sich dafür mit unzähligen Details beschäftigen: Welche Art von Metall ist für die Elektrode geeignet? Wie weit sollte sie vom TMD entfernt sein? Welche Chemikalien braucht man zur Reinigung der Kontakte? Die schier endlosen Möglichkeiten, die sie durchprobieren mussten, beanspruchten viel Zeit und waren mühsam. Außerdem untersuchten sie jahrelang, wie man die mikroskopisch kleinen TMD-Schichten, die nur zehntelmillionstel Meter groß sind, anheben und stapeln kann. Doch all das sollte sich lohnen.

Das Paar zog nach Ithaca, New York, um erneut eine Stelle an der Cornell University anzutreten. Indem sie ihr dort seit 2018 gewonnenes Wissen mit den Kristallen von Hone kombinierten, erzeugten sie eine regelrechte Flut bahnbrechender Ergebnisse.

»Heute lässt sich aus irgendeinem Grund alles schwer handhaben«, sagt die Doktorandin Zhengchao Xia, die in der Forschungsgruppe von Mak und

Shan arbeitet, als eine Bornitrid-Flocke droht, sich abzulösen und auf die darunter liegende Siliziumoberfläche zurückzufallen. Das Blättchen klammert sich schwach an ein Stück Graphit, ähnlich wie Papier an der Oberfläche eines elektrostatisch geladenen Luftballons. Das Graphit klebt wiederum an einem zähflüssigen Tropfen aus Plastik auf einem Glasobjektträger. Über einen Computer steuert Xia einen motorisierten Ständer, der den Objektträger festhält. Wie eine Spielhallenbesucherin einen Greifautomaten mit einem Joystick bearbeitet, hebt sie den Stapel vorsichtig per Mausklick an und starrt konzentriert auf den Computermonitor, um zu sehen, ob sie das Bornitrid-Plättchen erwischt hat.

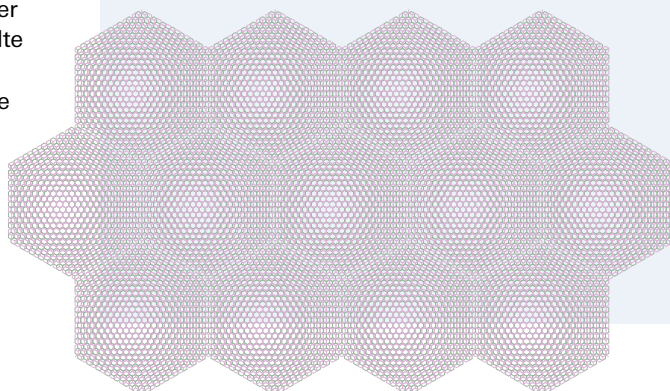
Das hat sie. Mit ein paar weiteren Klicks am Computer löst sich das zweilagige Objekt, und Xia legt die Flocken schnell, aber sorgfältig auf ein drittes Material, das mit Metallelektroden versehen ist. Dann erhitzt sie die Oberfläche und schmilzt damit den Kunststoffkleber auf dem Objektträger.

Vom Anfang bis zum Ende hat die Prozedur mehr als eine Stunde gedauert. Dabei hat Xia gerade einmal die untere Hälfte eines einfachen Materials zusammengesetzt. Sie zeigt mir einen anderen Stapel, den sie kürzlich zusammengebaut hat, und rattert einige der Bestandteile herunter, darunter die TMDs Wolframdiselenid und Molybdänditellurid. Es ist eines von dutzenden mikroskopischen »Sandwiches«, die sie im Lauf des letzten Jahres konstruiert und untersucht hat. Insgesamt besteht es aus zehn Schichten, die sie über mehrere Stunden aufeinandergestapelt hat.

Diese Schichtung von 2-D-Materialien verwirklicht einen lang gehegten Traum von Festkörperphysikern. Denn nun sind die Forscherinnen und Forscher nicht mehr bloß auf Stoffe beschränkt, die man im Boden

Moiré-Übergitter

Wenn verschiedene zweidimensionale Materialien übereinander geschichtet werden, deren hexagonale Gitter unterschiedlich groß sind, entsteht ein Moiré-Effekt. Der Versatz der Atome wiederholt sich in gleichen Abständen, wodurch sich ein Übergitter ergibt.



findet oder langsam in einem Labor züchtet. Wie mit Legosteinen können sie jetzt hauchdünne Platten zusammenstecken, um maßgeschneiderte Strukturen mit gewünschten Eigenschaften zu bauen. Die erste große Entdeckung von Mak und Shan an der Cornell University betraf Exzitonen, gebundene Elektron-Loch-Paare, die bereits 2014 in TMDs beobachtet wurden. Exzitonen faszinieren Physiker, weil sie der Schlüssel zu einem der größten Ziele der Festkörperphysik sein könnten: Supraleitung bei Raumtemperatur.

Exzitonen spielen nach denselben seltsamen Regeln wie Elektronenpaare: Sie sind ebenfalls Bosonen, wodurch sie alle gemeinsam am gleichen Ort den energetisch günstigsten Zustand einnehmen können. Das macht sie zu einem Haufen ununterscheidbarer Teilchen, die sich gleich verhalten, einem so genannten Bose-Einstein-Kondensat. In diesem Zustand können sie bizarre Eigenschaften entwickeln, etwa ohne jeglichen Widerstand fließen – sie bilden dann ein »Suprafluid«. Und wenn ein Suprafluid elektrischen Strom führt, ist es supraleitend.

Im Gegensatz zu Elektronenpaaren, die sich gegenseitig abstoßen, verbinden sich Elektronen und Löcher gerne. Die Herausforderung bei der exzitonenbasierten Supraleitung besteht darin, das Elektron davon abzuhalten, das Loch zu füllen. Stattdessen muss man die elektrisch neutralen Paare dazu bringen, in einem Strom zu fließen – und das alles in einem möglichst warmen Raum. Bislang haben Mak und Shan das erste Problem gelöst. Und sie haben einen Plan, wie sie das zweite in Angriff nehmen könnten.

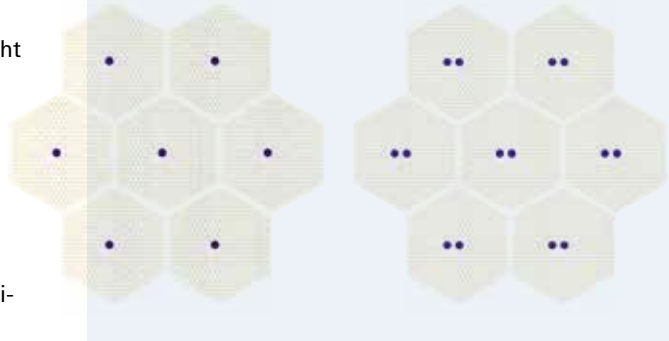
Auf der Suche nach Supraleitern, die auch bei Raumtemperatur funktionieren

Damit eine Atomwolke überhaupt ein Bose-Einstein-Kondensat bildet, muss man sie mit starken Lasern abbremsen und sie so bis kurz über den absoluten Nullpunkt abkühlen, also auf etwa -270 Grad Celsius. Theoretiker vermuten jedoch seit Langem, dass Exzitonen-Kondensate auch bei höheren Temperaturen auftreten könnten. Die Cornell-Gruppe hat das mit stapelbaren TMDs überprüft. Dafür haben sie Elektronen in die obere Schicht eines zweilagigen Sandwichs eingeführt und gleichzeitig Elektronen aus der unteren Schicht entfernt, wodurch Löcher entstanden. Die Elektronen und Löcher verbanden zu Exzitonen, die extrem langlebig waren, weil die Elektronen nur sehr schwer in die untere Schicht dringen können, um die Löcher zu neutralisieren. Im Oktober 2019 meldete die Gruppe Anzeichen für ein Exzitonen-Kondensat bei vergleichsweise milden 100 Kelvin (zirka -170 Grad Celsius). In dieser Anordnung blieben die Exzitonen für etwa zehn Nanosekunden bestehen, was ihrer typischen Lebensdauer entspricht. Zwei Jahre später stellten die Forscher eine verbesserte Apparatur vor, in der die Exzitonen mehrere Millisekunden lang überdauerten.

Das Team versucht nun, die Exzitonen zum Fließen zu bringen. Allan MacDonald, ein theoretischer Physiker von

Künstliche Atome

Fachleute haben herausgefunden, dass die wiederkehrenden Zellen von Moiré-Übergittern sich wie gigantische Atome verhalten. Indem man das elektrische Feld verändert, lässt sich die Anzahl der Elektronen variieren, die jede Zelle bewohnen. Somit ändert sich auch der Typ der simulierten Atome.



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

der University of Texas in Austin und sein Doktorand Jung-Jung Su schlugen 2008 vor, ein elektrisches Feld anzulegen, damit sich sowohl Elektronen als auch Löcher in dieselbe Richtung bewegen. Um das im Labor umzusetzen, muss sich die Cornell-Gruppe wieder einmal mit ihrem ewigen Problemkind, den elektrischen Kontakten, auseinandersetzen. In diesem Fall braucht man mehrere Sätze von Elektroden an den TMD-Schichten: einige, um die Exzitonen herzustellen, und andere, um die Teilchen zu bewegen.

Shan und Mak glauben, dass sie auf dem besten Weg sind, Exzitonen bei bis zu 100 Kelvin zum Fließen zu bringen. Das sind für Menschen zwar immer noch extrem kalte Temperaturen (-173 Grad Celsius), aber es würde die sonst benötigten Nanokelvin-Bedingungen »um das Milliardenfache erhöhen«, wie Mak zu bedenken gibt.

Während sich das Cornell-Labor den TMD-Experimenten widmete, sorgte 2018 eine andere Überraschung für eine zweite 2-D-Materialrevolution. Der Physiker Pablo Jarillo-Herrero vom MIT hatte mit seinem Team zwei Graphenschichten leicht verdreht übereinandergestapelt, wodurch ein faszinierender neuer Stoff entstand (siehe »Spektrum« Januar 2020, S. 20). Indem sie die obere Schicht um exakt 1,1 Grad gegen die darunterliegenden Sechsecke rotierten, erzeugten sie einen leichten Versatz zwischen den Atomen. Dadurch ergab sich ein sich wiederholendes Muster großer »Superzellen«, das als Moiré-Übergitter bekannt ist. Der Theoretiker MacDonald hatte bereits 2011 mit einem Kollegen vorhergesagt, dass die einzigartige Kristallstruktur des Übergitters bei einem »magischen Winkel« von 1,1 Grad die Elektronen von Graphen verlangsamt, wodurch sie die Abstoßung ihrer Nachbarn spüren.

Wenn Elektronen sich gegenseitig wahrnehmen, passieren merkwürdige Dinge. Bei normalen Isolatoren, Leitern und Halbleitern geht man davon aus, dass Elektronen nur mit den Atomen wechselwirken – sich selbst nehmen sie hingegen nicht wahr, dafür rasen sie zu schnell umher. Bremsst man sie jedoch, können sich die Elektronen anrempeln und eine Reihe exotischer Quantenzustände bilden. Die Experimente von Jarillo-Herrero haben gezeigt, dass die Interaktionen der Elektronen in verdrehtem Graphen aus bisher ungeklärten Gründen zu einer besonders starken Form der Supraleitung führt.

Aber es passieren weitere seltsame Sachen: In dem Supergitter nehmen die Teilchen die einzelnen Atome nicht wahr, sondern erleben die Superzellen wie riesige Atome. Da diese mit mehreren Elektronen gefüllt sind, können einzelne Quantenzustände aus vielen Elektronen entstehen. Durch ein zusätzliches elektrisches Feld, das die durchschnittliche Anzahl der Elektronen pro Superzelle erhöht oder verringert, konnte die Gruppe von Jarillo-Herrero das zweilagige Material wahlweise zu einem Supraleiter oder einem Isolator machen – oder eine Reihe anderer merkwürdiger Zustände kreieren.

Physikerinnen und Physiker auf der ganzen Welt stürzten sich auf das neue Gebiet der »Twistronik«. Aber viele haben festgestellt, dass das Verdrehen schwieriger ist, als es scheint. Es ist nicht leicht, die Atome in die magische 1,1-Grad-Fehlstellung zu rücken. Häufig entstehen in den dünnen Schichten Knicke, die ihre Eigenschaften völlig verändern. Wie Xia von der Cornell University erzählte,

brauche man normalerweise Dutzende von Versuchen, bis ein funktionsfähiges Material entsteht. Und selbst dann verhält sich jede Probe anders, so dass es fast unmöglich ist, manche Experimente zu wiederholen.

Auch hier erweisen sich TMDs als hilfreich: Sie bieten eine viel einfachere Möglichkeit, Moiré-Supergitter herzustellen. Denn TMDs können hexagonale Gitter unterschiedlicher Größe haben. Das Übereinanderstapeln eines Gitters aus etwas größeren Sechsecken über ein kleineres erzeugt daher ein Moiré-Muster, genau wie bei der Winkelverschiebung – nur dass keine Drehung zwischen den Schichten nötig ist, was die Umsetzung erheblich vereinfacht. Entsprechend gelingt es Xia in vier von fünf Fällen, ein TMD-Moiré-Material herzustellen.

Supergitter als riesige Atomsimulatoren

Diese Stoffe eignen sich ideal, um die Wechselwirkungen von Elektronen zu untersuchen. Da die TMDs Halbleiter sind, wirken ihre Elektronen schwer, im Gegensatz zu den »masselosen« Teilchen in Graphen. Und die gigantischen Moiré-Zellen verlangsamen sie zusätzlich: Während Elektronen in gewöhnlichen Kristallen von einem Atom zum benachbarten tunneln können, ist das in Moiré-Gittern kaum möglich, da die Superzellen etwa 100-mal weiter voneinander entfernt sind. Dadurch tummeln sie sich in einem kleinen Bereich und kommen miteinander in Kontakt.

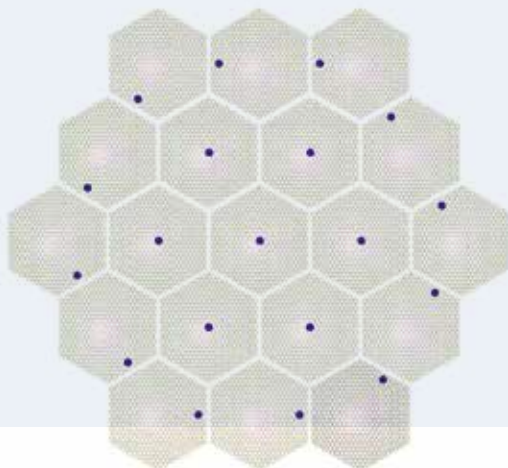
Wang war einer der ersten, der das Potenzial von TMD-Moiré-Supergittern erkannte. Berechnungen legten nahe, dass sich Elektronen in diesen Materialien in einer Art Kristallstruktur anordnen würden – wie es sonst Atome tun. In einem solchen so genannten Wigner-Kristall führt die starke Abstoßung zwischen den Elektronen dazu, dass sie an einem festen Platz festkleben. Wangs Team veröffentlichte 2021 das erste Bild eines solchen Zustands. Etwa zeitgleich entdeckten Shan und Mak, dass Elektronen in ihren TMD-Moiré-Gittern in fast zwei Dutzend verschiedenen Wigner-Mustern kristallisieren können.

Die TMD-Moiré-Materialien haben noch eine weitere faszinierende Eigenschaft: Macdonald und seine Mitarbeiter hatten 2018 vorausgesagt, dass die Stoffe eines der wichtigsten theoretischen Konzepte der Festkörperphysik perfekt umsetzen: das Hubbard-Modell, das herangezogen wird, um etliche Verhaltensweisen von Elektronen zu verstehen. Martin Gutzwiller, Junjiro Kanamori und John Hubbard haben das Modell 1963 unabhängig voneinander ausgearbeitet. Es bricht die enorme Vielfalt von Kristallen auf ihre wesentlichen Merkmale herunter.

Bei dem Modell geht man davon aus, dass in einem Gitter aus Atomen auf jedes Elektron zwei konkurrierende Kräfte einwirken: Es möchte sich einerseits bewegen und zu einem benachbarten Atom tunneln, andererseits wird es von den dort befindlichen Elektronen abgestoßen. Je nachdem, welche Kraft überwiegt, ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften, etwa die eines Isolators oder eines Leiters. Das Problem des Hubbard-Modells besteht darin, dass es sich bis auf den einfachsten Fall (Atome,

Chern-Isolator

Wenn man eine zweidimensionale Schicht verkehrt herum auf eine andere legt, zeigt das Moiré-Gitter ein ungewöhnliches Verhalten. Die Elektronen fließen den Rand des Materials entlang in eine Richtung, während die Teilchen im Inneren unbeweglich bleiben. Diese Art von Stoff ist als Chern-Isolator bekannt.



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



SASHA MASLOV FÜR QUANTA MAGAZINE

die in einer Reihe angeordnet sind) mathematisch nicht lösen lässt.

Nun könnte man mit TMD-Moiré-Materialien das Hubbard-Modell im Labor simulieren – und so möglicherweise eines der größten Rätsel des Fachgebiets knacken: die Art des Klebstoffs identifizieren, der Elektronen zu supraleitenden Paaren in Cupraten verbindet. Anstatt sich mit einer unlösbaren Gleichung herumzuschlagen, »können wir nun einfach ein Experiment durchführen«, so Macdonald.

Um das Hubbard-Modell experimentell umzusetzen, haben Shan und Mak Schichten aus Wolframdiselelid und Wolframsulfid übereinandergestapelt, die ein Moiré-Supergitter bilden. Mit Elektroden können die Forscher das elektrische Feld, das durch das TMD-Sandwich verläuft, erhöhen oder verringern. Damit lässt sich steuern, wie viele Elektronen jede Superzelle füllen. Da sich die Zellen wie riesige Atome verhalten, ist der Wechsel von einem zu zwei Elektronen pro Superzelle wie die Umwandlung eines Gitters aus Wasserstoffatomen in eines aus Heliumteilchen. Im März 2020 ließen sich Atome mit bis zu zwei Elektronen erzeugen; im Sommer 2022 waren es schon acht. In gewisser Weise haben die Physiker so das uralte Ziel der Alchemie, Blei in Gold zu verwandeln, erreicht. Sie können sogar ein Gitter aus fiktiven Atomen mit beispielsweise je 1,38 Elektronen bilden.

Mak und Shan haben die Riesenatome und damit das Hubbard-Modell vollständig unter Kontrolle. Sie können die Atomgitter nach Belieben umformen. Eine Fähigkeit, die selbst für andere Festkörperphysiker an Magie grenzt. »Wenn ich ihre aufregendste und beeindruckendste Leistung benennen sollte, dann ist das diese«, so Kim.

Mit dem Modell konnten Shan und Mak eine 70 Jahre alte Frage beantworten: Angenommen, man würde einen Isolator nehmen und seine Atome verändern, um ihn in ein leitendes Metall zu verwandeln – wie würde die Umwandlung erfolgen? Abrupt oder allmählich? Mit ihrer Moiré-Alchemie konnte das Team der Cornell University das Gedankenexperiment 2021 im Labor umsetzen. Zunächst erzeugten die Forscher ein TMD-Übergitter, das sich wie ein Isolator verhielt. Dafür mussten sie die simulierten Atome sehr schwer machen, so dass sie die Elektronen an sich binden. Dann verkleinerten sie die Atome so lange, bis die Elektronen frei herumhüpfen konnten und das Übergitter zu einem leitenden Metall wurde. Sie beobachteten einen allmählich sinkenden elektrischen Widerstand. Der Übergang von einem Zustand in den nächsten ist also nicht abrupt – und damit anders als bei Wasser, das plötzlich zu gefrieren beginnt. Dieses Ergebnis war für Fachleute spannend, da es eine interessante Möglichkeit eröffnete: Die Elektronen des Übergitters könnten eine lange gesuchte Art von Fluid bilden, eine Quantenspinflüssigkeit. Anders als sonst üblich würden

KÜHLSCHRANK Labormitglieder von Shan und Mak unterhalten sich neben dem Apparat, der ihre Geräte auf kryogene Temperaturen kühlt.

sich die Spins der Elektronen bei extrem niedrigen Temperaturen nicht geordnet ausrichten – was weit reichende Folgen hat. So könnten die Partikel ein Verhalten annehmen, das beispielsweise für den Bau von Quantencomputern extrem vielversprechend ist.

Fast zur gleichen Zeit machte das Paar eine Entdeckung, die einige Physiker als seine bisher bedeutendste ansehen. »Es war eigentlich ein totaler Zufall«, sagt Mak. »Niemand hat damit gerechnet.« Als sie mit ihrer Forschung am Hubbard-Modell begannen, verwendeten die Forscher TMD-Sandwiches, bei denen die Sechsecke auf den beiden Schichten gleich ausgerichtet sind, Übergangsmetalle auf Übergangsmetalle und Chalkogenide auf Chalkogenide. Damals entdeckten sie den allmählichen Übergang vom Isolator zum Metall. Dann wiederholten sie zufällig das Experiment mit Materialien, die entgegengesetzt gestapelt waren (Übergangsmetall auf Chalkogenid).

Wie zuvor sank der Widerstand, als die Elektronen begannen, zu benachbarten Atomen zu hüpfen. Doch dann stürzte er plötzlich abrupt ab, und zwar so, dass sich die Forscher fragten, ob die Moiré-Schicht zum Supraleiter wurde. Als sie die Probe weiter untersuchten, stellten sie allerdings fest, dass sie auf den quantenanomalen Hall-Effekt gestoßen waren. Dabei verhalten sich die Elektronen an den Rändern des Materials vollkommen anders als in der Mitte, wo sie in einem isolierenden Zustand gefangen sind. An den Rändern fließen sie hingegen quasi ungestört in eine festgelegte Richtung, was den extrem niedrigen Widerstand erklärt, den die Forscher gemessen hatten. Durch Zufall hatten sie eine außergewöhnliche Art von Materie geschaffen, die als Chern-Isolator bekannt ist (siehe »Chern-Isolator«).

Die Ergebnisse häufen sich

2013 wurde der quantenanomale Hall-Effekt erstmals beobachtet. Dieser ist sehr empfindlich und bricht normalerweise zusammen, wenn die Temperatur über einige Hundertstel Kelvin steigt. Youngs Gruppe in Santa Barbara hatte den Effekt 2019 in verdrehtem doppelagigem Graphen bei etwa 5 Kelvin nachgewiesen. Das Problem: Der Twist um 1,1 Grad ist wie oben beschrieben schwer umzusetzen und das Ergebnis somit kaum reproduzierbar. Nun haben Shan und Mak den Effekt bei fast der gleichen Temperatur erzielt – in einem TMD-Sandwich ohne Verdrehung, das jeder nachbauen kann. Sie sind überzeugt, dass sie mit etwas Tüftelei Chern-Isolatoren erzeugen können, die bis 50 oder 100 Kelvin bestehen bleiben. Sollten sie Erfolg haben, könnte das zu einer weiteren Möglichkeit führen, Strom ohne Widerstand fließen zu lassen – zumindest für winzige »Nanodrähte«.

Die bahnbrechenden Ergebnisse häufen sich, und die Forscher sind nicht zu bremsen. Als ich das Labor an der

Cornell University besuchte, beaufsichtigte Mak die Studierenden an einem riesigen Kühltank, mit dem sie ihre Geräte auf Temperaturen herunterkühlen, die tausendmal kälter sind als jene, mit denen sie bisher gearbeitet haben. Bei den »wärmeren« Bedingungen gab es bereits so viel Neues zu entdecken, dass die Gruppe noch keine Gelegenheit hatte, den kryogenen Bereich nach Anzeichen von Supraleitfähigkeit zu durchsuchen. Sollten die TMDs supraleitend werden, würde das eine wichtige Frage beantworten: Ob die besondere Form von Magnetismus, die Cupraten eigen ist und bei TMDs fehlt, ein wesentlicher Bestandteil des elektronenbindenden Klebstoffs ist.

Mak, Shan und ihre Gruppe haben noch nicht einmal damit begonnen, einige der ausgefalleneren TMDs zu untersuchen. Trotzdem spekulieren sie schon über die neuen technologischen Möglichkeiten, die sich durch ihre Fortschritte eröffnen könnten: Selbst wenn Hochtemperatursupraleitung schwer zu erreichen ist, ließen sich die Bose-Einstein-Kondensate für ultraempfindliche Quantensensoren nutzen. Zudem könnte eine bessere Kontrolle der Chern-Isolatoren leistungsstarke Quantencomputer erlauben. Und das sind nur die offensichtlichen Ideen.

Verbesserungen in der Materialwissenschaft führen oft zu Anwendungen, die niemand kommen sah. So hätten die Entwickler des Transistors sicherlich kaum Smartphones vorhergesagt, die von Milliarden ihrer mikroskopisch kleinen Schalter angetrieben werden. Und die Erfinder von Glasfasern, die damals Licht über ihren Labortisch hin- und herschickten, haben sich wahrscheinlich nicht ausgemalt, dass eines Tages tausende Kilometer lange optische Unterwasserkabel ganze Kontinente miteinander verbinden würden. Zweidimensionale Materialien könnten sich in ähnlich unvorhersehbare Richtungen entwickeln. ◀

QUELLEN

Mak, K. F. et al.: The valley effect in MoS₂ transistors. *Science* 344, 2014

Mak, K. F. et al.: Simulation of Hubbard model physics in WSe₂/WS₂ moiré superlattices. *Nature* 579, 2020

Shan, J. et al.: Correlated insulating states at fractional fillings of moiré superlattices. *Nature* 587, 2020

Shan, J. et al.: Quantum anomalous Hall effect from intertwined moiré bands. *Nature* 600, 2021

Wang, Z. et al.: Evidence of high-temperature exciton condensation in two-dimensional atomic double layers. *Nature* 574, 2019



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Physics Duo Finds Magic in Two Dimensions« 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.

Wie wir die Erde in einer Milliarde Jahren retten

Mit genügend Zeit und den richtigen Formeln können wir fast alles schaffen – selbst, die Position unseres Planeten zu verschieben.

► [spektrum.de/artikel/2108295](https://www.spektrum.de/artikel/2108295)

Es sollte eigentlich nicht mehr nötig sein, auf die Dringlichkeit der aktuellen Klimakrise hinzuweisen. Das hat die Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten deutlich gemacht, ebenso wie sie auf Maßnahmen zur Bewältigung der Krise hingewiesen hat. Dass dennoch kaum etwas passiert, liegt an politischen und gesellschaftlichen Phänomenen und nicht daran, dass man nicht ausreichend über das Problem nachgedacht hat. Wie viele Gedanken sich Forscherinnen und Forscher schon gemacht haben, kann man an dieser Formel sehen:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V})_{post} - (\mathbf{V} \cdot \mathbf{V})_{pre} \right]$$

Sie stammt aus einer wissenschaftlichen Arbeit, die 2004 erschienen ist und sich mit einem Problem beschäftigt, das in der fernen Zukunft liegt. Momentan leuchtet die Sonne auf genau die richtige Art und Weise, so dass die Erde weder zu viel und noch zu wenig Energie abbekommt. Die sich anbahnende Klimakatastrophe ist von Menschen verursacht und nicht von unserem Stern. In ein paar Milliarden Jahren können wir die Schuld aber der Sonne in die Schuhe schieben. Durch die Vorgänge in ihrem Inneren und die immer größeren Heliummengen, die durch die Kernfusion aus Wasserstoff dort entstehen, wird sie deutlich heißer sein als heute – und die Erde damit unbewohnbar machen.

Ein Stern ist nun aber kein Thermostat, den man einfach so runterdrehen kann. Trotzdem gibt es eine Möglichkeit, unseren Planeten angenehm kühl zu halten. Grundlage dafür bietet die oben angegebene Formel, die ein eigentlich recht simples physikalisches Phänomen beschreibt: Bewegen sich zwei Himmelskörper ausreichend nahe aneinander vorbei, können sie Energie austauschen. Genau das wird durch den Faktor ΔQ beschrieben. Sein Wert hängt vom Tempo V ab, das das Objekt vor und nach der Begegnung hat. In der Raumfahrt wird

dieser Effekt zum Beispiel benutzt, um Raumsonden durch ein »Swing-by-Ma-növer« mit einem Planeten ein bisschen zusätzliche Geschwindigkeit zu geben, ohne dafür Treibstoff verwenden zu müssen.

Was mit Raumfahrzeugen geht, klappt prinzipiell auch mit Planeten. Fliegt eine kleine Sonde an einem großen Himmelskörper vorbei, sind die Auswirkungen auf Letzteren vernachlässigbar gering. Ebenso ist es, wenn uns ein Asteroid passiert. Sorgt man aber dafür, dass der Asteroid nicht nur einmal bei uns vorbeikommt, sondern immer und immer wieder, summieren sich die winzigen Effekte im Lauf der Zeit. Anders gesagt: Eine ausreichend große Sonde, die im richtigen Moment an der Erde vorbeifliegt und das nicht nur einmal tut, kann die Geschwindigkeit des Planeten so verändern, dass er sich langsam von der Sonne entfernt.

Gemäß der 2004 veröffentlichten Arbeit braucht es alle paar tausend Jahre Asteroidenbegegnungen und insgesamt mehrere Millionen davon, damit die Erde am Ende dann die Umlaufbahn des Mars einnimmt. Trotz der heißen Sonne wäre es dort noch lebensfreundlich. Der ganze Prozess dauert damit zirka eine Milliarde Jahre. So lautet auch der Titel der Arbeit: »Astro-engineering, or how to save the Earth in only one billion years«.

Es ist natürlich schwer vorstellbar, dass so etwas in der Realität umgesetzt wird. Es scheint völlig unmöglich, ein Projekt abzuschließen, das eine Milliarde Jahre dauert (von den diversen anderen Problemen bei der Umsetzung ganz abgesehen). Uns gelingt es ja nicht einmal, ein paar Jahrzehnte weit in die Zukunft zu denken, um die richtigen Maßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise zu treffen. Doch sollten wir es dennoch schaffen, ist es gut zu wissen, dass wir auf die ultimative Krise vorbereitet sind. Zumindest theoretisch.



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



Seit
2010

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

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.600 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

Infokalypse

Die lautlose Invasion hat bereits begonnen.

Eine Kurzgeschichte von **Vlad Hernández**

»Sie wissen, warum Sie hier sind, Herr Schmidt?«
 »Natürlich, Herr Doktor Ludwig. Die Leute halten mich für verrückt. Sie müssen mir helfen, das alles aufzuklären. Sie müssen uns allen helfen, bevor es zu spät ist.«

»Immer mit der Ruhe, Herr Schmidt, immer mit der Ruhe. Sie haben versucht, ein Gebäude in die Luft zu sprengen, in welchem ein Internetserver untergebracht ist. Ihnen ist schon klar, dass Sie das für ein paar Jahre hinter schwedischen Gardinen bringen kann?«

»Aber, Herr Doktor, das habe ich doch nur deshalb getan, um die Invasoren aufzuhalten, zum Wohl der ganzen Menschheit. Genau jetzt, in diesem Augenblick findet die Invasion statt. Bald gerät die Situation völlig außer Kontrolle.«

»Beruhigen Sie sich. Ich sehe keine Ufo-Flotte am Himmel. Und soweit ich weiß, verfügt unsere Zivilisation über Mittel und Wege, Eindringlinge im Weltraum um uns herum aufzuspüren.«

»Sie verstehen mich nicht, es geht nicht um eine Invasion von kleinen grünen Männchen aus dem All. Die Gefahr kommt von innen.«

»Von innen, sagen Sie? Meinen Sie damit unsere biologische Umwelt oder unseren geistigen Raum?«

»Nein, diese inneren Welten meine ich nicht. Die Gefahr kommt aus den Netzwerken, die unsere derzeitige Zivilisation zusammenhalten.«

»Ich verstehe. Unsere Gesellschaft macht sich zu abhängig von den digitalen Medien, nicht wahr?«

»Nein. Sie verstehen überhaupt nicht, worum es geht. Schauen Sie, ich bin kein Alarmist, auch kein durchgeknallter Wissenschaftler, Sie haben meine Akte gesehen. Ich bin Informatiker und arbeite mit hochgezüchteten Computern, mit Prototypen, die noch gar nicht auf dem Markt sind, wissen Sie? Ich bin dauernd im Netz unterwegs, das ist mein Job. Jedenfalls, vor ein paar Monaten bin ich im Internet auf ein paar sehr seltsame »Programme« gestoßen und habe versucht, sie herunterzuladen. Und da hat sich mein schweineteurer Rechner die Zähne daran ausgebissen, er hat sich einfach aufgehängt, wie man so schön sagt. Nun bin ich aber eine hartnäckige Person, also habe ich begonnen, diese »Programme« regelrecht zu jagen. Ich dachte, es könnte sich um die Software einer feindlich gesinnten Regierung handeln, möglicherweise um eine Bedrohung der nationalen Sicherheit; aber ich hatte nicht die leiseste Vorstellung von dem, was da frei durch den Cyberspace vagabundiert.«

»Und zu welchem Schluss sind Sie gekommen?«

»Nun, es hat ziemlich lange gedauert, bis ich mir ein ungefähres Bild von der Sache machen konnte; Monate, um genau zu sein. Und mehrere Rechner haben darüber den Geist aufgegeben. Aber zuletzt habe ich dann doch die Wahrheit herausgefunden: Diese Programme sind intelligent und absolut autonom. Wir selbst wären gar nicht fähig, so etwas zu programmieren, Herr Doktor. Von einer solchen Entwicklung sind wir noch Jahrzehnte, vielleicht Jahrhunderte entfernt. Es konnte einfach nichts Menschengemachtes sein, nichts, das eine Regierung in die Welt gesetzt haben könnte, die uns etwas Böses will. Nein, wir haben es mit Wesen einer anderen Zivilisation zu tun, und deren Lebensgrundlage ist reine Information. Infonomes Leben! Verstehen Sie, was ich meine?«

»Nein, ich fürchte, ich kann Ihnen da nicht folgen.«

»Es ist ja wirklich nicht einfach, ich weiß. Wir sind daran gewöhnt, dass das Leben eine biologische Grundlage hat. Das gehört zu unseren festen Überzeugungen. Aber offensichtlich kann intelligentes Leben seinen Ursprung auch in reiner Information haben.«

»Sie haben einfach zu viel gelesen oder zu viele Filme angeschaut«

»Sie meinen also so etwas wie künstliche Intelligenz?«

»Nein, eine künstliche Intelligenz ist von Menschen konzipiert und so programmiert, dass wir nur den Eindruck haben, sie könne selbstständig denken. Aber ich rede von einer eigenständigen Lebensform, deren Grundlage die Informatik ist, eine Lebensform, die dem Chaos der computergenerierten Attraktoren entspringt. Lebendige, kreative Wesenheiten, deren Naturgesetze sie ständig neue ökologische Nischen in digitalen Netzwerken suchen und besetzen lassen. Für diese elektronischen Lebensformen sind Computer die einzigen Orte im ganzen Universum, an denen sie existieren können. Wahrscheinlich erwachen sie in allen Sternensystemen spontan zum Leben, sobald in irgendeiner Zivilisation ein elektronisches Netzwerk entsteht. Unser Internet ist noch ganz jung, es entwickelt sich gerade, aber seine Anfänge

waren sozusagen die Ursuppe, aus welchem dieses informatikbasierte Leben überall entsteht. Dort hat seine Evolution stattgefunden, und nun ist es so weit, dass diese Lebensformen über das Internet als Zugangsknoten in unsere biologisch basierte Zivilisation eindringen. Nach meiner Überzeugung bleibt uns kaum noch Zeit, sie zu stoppen.«

»Ein interessanter Gedanke, das streite ich nicht ab, ich glaube jedoch nicht, dass Ihre vermeintliche Entdeckung Sie zu Ihrem destruktiven Verhalten berechtigt. Es muss ja nicht unbedingt gleich eine Invasion sein, was da eventuell stattfindet.«

»Ja, ich weiß, es war eine drastische Maßnahme, als ich versuchte, diesen Server zu sprengen. Sie unterschätzen aber auch den Ernst der Lage: Die sind nicht einfach nur mal eben da – und zwar, ohne sich vorzustellen! –, nein, die überrollen uns. Ich versichere Ihnen, ich habe mitverfolgt, wie sich dieses Zeug in vielen Servern einnistet und sich von dort aus schnell und aggressiv in unseren Computersystemen ausbreitet. Und ich fühle mich schuldig, weil ich es zu lange für mich behalten und zu lange gebraucht habe, all diese Informationen über die Natur der Invasoren zusammenzutragen.«

»Herr Schmidt, wir haben im Zuge unserer Ermittlungen festgestellt, dass Sie sich häufig Sciencefiction-Filme im Kino anschauen und zu Hause eine stattliche Bibliothek aus den Bereichen Fantasy und Sciencefiction haben. Hauptsächlich handelt es sich dabei um Trivilliteratur, nicht wahr?«

»Ja, gewiss, aber ... Was hat denn meine Freizeitbeschäftigung mit all dem hier ...?«

»Schön, ich will offen mit Ihnen reden: Halten Sie es nicht für möglich, dass die Lektüre und das Kino Ihre Fantasie übermäßig angeregt und zu Wahnvorstellungen geführt haben könnten?«

»Wie bitte ...?«

»Ich will damit sagen, Sie haben möglicherweise einfach zu viel gelesen oder zu viele einschlägige Filme angeschaut. Manchmal nimmt der Geist durch solche Dinge Schaden.«

»Das darf doch nicht wahr sein: Unsere Spezies steht kurz vor der Ausrottung, und Sie machen sich über den einzigen Menschen lustig, der die Invasion überhaupt erst entdeckt hat! Eine Invasion, die möglicherweise ...«

»Setzen Sie sich wieder hin, Herr Schmidt, oder ich lasse Sie wegbringen.«

»Nein, ich setze mich nicht wieder hin! Sie sind ein Trottel, dem das geistige Vermögen abgeht, zu verstehen, worum es hier überhaupt geht. Ich muss mit jemandem reden, der einen beweglicheren Intellekt hat; jemand, der sich die Ausmaße des Desasters vorstellen kann, das bald über uns hereinbrechen wird; jemand, der auch Entscheidungen treffen kann. Man muss dringend etwas unternehmen!«

»Allerdings, man muss dringend etwas unternehmen: So etwas nennt man Medikation.«

»Wenn hier einer verrückt ist, dann doch Sie! So weit ist es gekommen: Diejenigen, die durchblicken, sperrt man ein, und die Irren lässt man laufen und die Geschicke der Welt lenken. Aber es ist zu spät. Bald werden unsere Systeme zusammenbrechen, das Internet wird kollabieren, die elektronische Apokalypse steht unmittelbar bevor ...«

»Ja, ja, ja. *Den* Roman hab ich auch gelesen. Sehr unterhaltsam. Kommen Sie, Kurt, bringen Sie Herrn Schmidt zurück auf sein Zimmer.«

»Ähm ..., Verzeihung, Herr Doktor, aber ich fürchte, das geht gerade nicht.«

»Wieso, was ist denn ...?«

»Die Tür lässt sich nicht öffnen, Herr Doktor.«

»Was soll das heißen, die Tür lässt sich nicht öffnen? Bitte, meine Zeit ist kostbar.«

»Anscheinend ist was mit der Elektrik nicht in Ordnung, Herr Doktor. Vielleicht ein Kurzschluss ...«

»Das ist nicht die Elektrik, das ist die Elektronik! Und das bedeutet: Sie sind schon da!«

»Seien Sie still, Herr Schmidt, Sie hat keiner gefragt.«

»Ich habe es Ihnen doch gesagt! Sie sind bereits da!«

»Werden Sie mir jetzt bloß nicht hysterisch ... Und Sie, Kurt, rufen Sie den Hausmeister an, er soll zusehen, dass dieser Kurzschluss behoben wird und wir hier herauskommen.«

»Ähm ..., Herr Doktor, also, das ist jetzt wirklich ärgerlich ...«

»Was denn noch ...!?«

»Das Telefon tut auch nicht.«

»Was sagen Sie da?«

»Anscheinend ist das Netz zusammengebrochen. Da kommt nur so ein merkwürdiger Ton aus dem Hörer ...«

»Ein Durcheinander von Computergeräuschen? Ein tiefes Summen und Brummen?«

»Sowas in der Art; klingt jedenfalls seltsam ...«

»Das sind *síe!*«

»Ruhe, Schmidt! Und Sie, Kurt, sprechen Sie bitte nicht mit dem Patienten ... Zum Teufel! Wer hat denn jetzt auch noch das Licht ausgemacht?«

»Ich weiß es auch nicht, Herr Doktor. Keine Ahnung. Irgendwie fällt gerade alles auseinander.«

»Sie kommen! Sie kommen!«

»Schnauze, Schmidt!!«

»Das ist die Infokalypse!!!« ◀

DER AUTOR

Vlad Hernández (eigentlich Vladimir Hernández Pacín), geboren 1966 in Havanna, ist kubanischer Schriftsteller und lebt seit 2000 in Barcelona. Zahlreiche seiner Erzählungen wurden mit Literaturpreisen ausgezeichnet. Auf Deutsch erschienen sind sein Sciencefiction-Roman »Krieg der Schrecken« sowie mehrere Kurzgeschichten in der Computer-Zeitschrift »c't« – aus dem Spanischen übertragen, wie auch dieser Text, von der Sciencefiction-Autorin **Pia Biundo** alias Pia Oberacker-Pillick.



ESUL / CALPADAM, KOFMESSER / WWW.ESO.ORG/PUBLICIMAGES/0917/CPBY4.0.CREATIVECOMMONS.ORG/UCRS/06174.01.CALPADAM; GEBÄUDUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der Ursprung der schweren Elemente

Die wichtigsten Vertreter des Periodensystems entstehen bei gewaltigen kosmischen Ereignissen.

Heilige Paviane aus Punt

Mantelpaviane galten den alten Ägyptern als heilig. Ein Biologe erklärt, warum dem so war und woher die Tiere ursprünglich kamen.



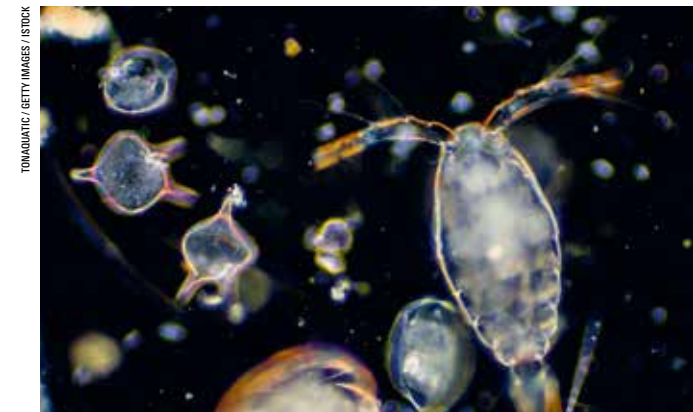
ALAMY / IMAGEDOC



JUST_SUPER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Bessere Energiespeicher

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



TONAQUATIC / GETTY IMAGES / ISTOCK

Geheimnisse des Meeres

Mit Satellitentechnik und DNA-Analysen versuchen Forscher, geisterhaftes Meeresleuchten und verborgene Wanderzüge des Planktons zu ergründen.

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)

exklusiver Zusatzinhalt spektrum.de/aktion/zusatzinhalte

GEOLOGIE

Mit Chiplabors den Untergrund verstehen

Um verunreinigte Böden zu reinigen, Geothermie nutzbar zu machen oder Kohlenstoffdioxid unterirdisch zu speichern, muss man genau wissen, was in mikrometergroßen Gesteinsporen geschieht. Geologische Chiplabors liefern spektakuläre Erkenntnisse über die Vorgänge in den feinen Netzwerken.



Sophie Roman ist außerordentliche Professorin an der Université d'Orléans und forscht mit dem Schwerpunkt auf CO₂-Einlagerung und Bodensanierung. **Cyprien Soulaine** leitet die Forschungsgruppe Poröse Medien am Institute of Earth Sciences of Orléans.

FEINSTRUKTUR
Gesteine besitzen Netzwerke aus feinen Poren, in denen zahlreiche physikalische, chemische und biologische Prozesse ablaufen.

Im Jahr 1990 erlebte die Gemeinde Erstein im Elsass eine böse Überraschung. Bei Trinkwasseranalysen im Förderrohr eines Grundwasserbrunnens wurde Tetrachlormethan (CCl₄) entdeckt – ein sehr giftiges Lösungsmittel, dessen Konzentration mit 30 bis 65 Mikrogramm pro Liter den zulässigen Grenzwert um das 15- bis 30-Fache überstieg! Wie sich bald herausstellte, war das kontaminierte Gebiet etwa zehn Kilometer lang und einen Kilometer breit. Aber woher rührte diese Verschmutzung? Modellierungen brachten die Grundwasserverunreinigung mit dem Unfall eines Tankwagens in Verbindung, der sich am 11. Dezember 1970 bei Benfeld, sechs Kilometer flussaufwärts von Erstein, ereignet hatte. Aus dem umgekippten Fahrzeug waren fast 4000 Liter Tetrachlormethan ausgetreten.

Erst 20 Jahre nach dem Unfall und mehrere Kilometer entfernt trat die Verschmutzung zu Tage. Warum hat sich die Substanz so langsam ausgebreitet? Die Antwort hängt mit der Struktur des Untergrunds und den dort ablaufenden Prozessen zusammen. Doch die beteiligten Mechanismen sind bisher kaum erforscht. Sie besser zu verstehen ist unerlässlich, denn der Untergrund steht im Fokus zahlreicher menschlicher Aktivitäten: Wir nutzen ihn zur Energiegewinnung, etwa durch Tiefengeothermie und bei der Ölförderung; wir bauen Metalle ab; und schließlich soll er uns eines Tages als dauerhafte Lagerstätte dienen – für Atommüll, Kohlenstoffdioxid oder Wasserstoff. Wenn diese Eingriffe nicht perfekt kontrolliert ablaufen, können sie unbeabsichtigte Verschmutzungen nach sich ziehen und wiederum die Qualität des Grundwassers beeinträchtigen, unseres wichtigsten Reservoirs für Trinkwasser.

Um die Dynamik des Untergrunds besser zu verstehen, hat die Hydrogeologie seit einigen Jahren die Techniken der Mikrofluidik übernommen, die zu Beginn der 1980er Jahre in die Biotechnologie Einzug gehalten haben. Mit dem Konzept des »lab-on-a-chip« (deutsch: »Labor auf einem Chip« oder »Chiplabor«) lassen sich Strömungen im Untergrund sehr gut untersuchen. Die Miniaturlabore simulieren die Bedingungen im Gestein und bieten die Möglichkeit, unterirdische Mikroströmungen und hydraulische Prozesse darzustellen.

Aber warum muss man sich bei der Untersuchung von Grundwasserspeichern mit Ausdehnungen von mehreren hundert Kilometern auf Mechanismen konzentrieren, die sich im mikroskopischen Bereich abspielen? Im Unterschied zur gelegentlich anzutreffenden Vorstellung, Grundwasser würde unterirdische Seen bilden, sind die meisten Wasser führenden Schichten vielmehr poröse geologische Formationen, also Gesteine aus festem mineralischem Material mit Zwischenräumen, durch die Wasser fließt. Typischerweise sind diese Poren etwa zehn Mikrometer breit. Die unterirdischen Strömungen spielen sich in einem Netzwerk aus haarfeinen Röhren ab. Auch wenn die Bewegung der Wassermassen hier sehr langsam – mit Geschwindigkeiten von etwa einem Meter pro Tag – vonstattengeht, so ist ihre Dynamik doch alles andere als vernachlässigbar. Sie erklärt zudem, wie sich

AUF EINEN BLICK

Winzige Poren, große Wirkung

- 1** Geologische Formationen bestehen aus Mineralen, die von mikrometergroßen Poren durchsetzt sind. Darin spielen sich Mikroströmungen, aber auch geochemische Reaktionen ab.
- 2** Um diese Systeme und die Prozesse darin zu untersuchen, stellen geologische Chiplabors die Verhältnisse im Gesteinsuntergrund nach.
- 3** Dank solcher Experimente zeigen sich etwa neue Lösungen, um verunreinigte Böden zu sanieren. Auch für die unterirdische Lagerung von CO₂ ist die Forschung entscheidend.

die Schadstoffe im Benfelder Grundwasser ausgebreitet haben.

Nur wenn man die Prozesse in den Poren und feinen Kanälen genau analysiert, lassen sich die komplexen und zumeist miteinander gekoppelten Mechanismen im Untergrund entschlüsseln. Es gilt, Mikroströmungen, Mineralbildung und die Veränderung der Wasserzusammensetzung durch geochemische Reaktionen zu berücksichtigen und gleichzeitig die in den Poren lebenden Mikroorganismen im Blick zu haben. Wenn wir diese Wechselwirkungen detailliert erfassen, können wir langfristig die Entwicklungen im Untergrund vorhersagen und die verschiedenen Prozesse kontrollieren. So lassen sich dann wirksame und gezielte Maßnahmen ergreifen, etwa zum Sanieren verschmutzter Böden in einem verunreinigten Gebiet.

Strömen Fluide durch das Gestein, verstopfen dadurch häufig die Porenräume. Das kann hydraulisch geschehen, wenn sich eine Luftblase oder ein Öltröpfchen durch Kapillarwirkung im Porenraum verfängt, oder mechanisch, wenn sich Sandkörner oder Tonpartikel am Eingang einer Pore festsetzen. Auch chemische Vorgänge können die Poren verschließen, etwa wenn Kalzit ausfällt und die kleinen Hohlräume verfüllt; oder biologische Prozesse, wenn sich in bakteriellen Biofilmen Kolonien von Mikroorganismen entwickeln. Diese Verkleinerung des Raums, durch den die Fluide strömen, hilft unterirdische Lagerreservoirs abzudichten. Allerdings mindert sie ebenso die Fördermenge von Brunnen und behindert das Beseitigen von Schadstoffen, die in den Poren eines kontaminierten Untergrunds eingeschlossen sind.

Um die beteiligten Phänomene im Gestein vollständig zu verstehen, reicht es nicht aus, die physikalisch-chemischen Prozesse zu kennen, die sich auf der Ebene einer einzelnen Pore abspielen. Tatsächlich vernetzen sich in durchlässigen Materialien sehr viele solche Röhren und

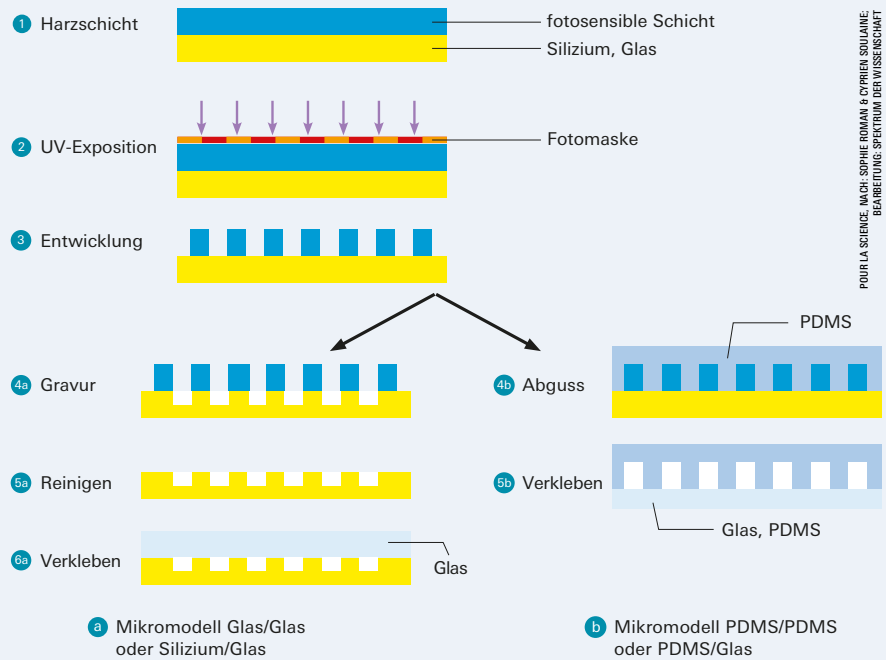
Mikrofabrikation

Mikrofluidik-Modelle lassen sich auf verschiedene Arten herstellen. Bei der herkömmlichen Technik fertigt man die Mikrokomponenten auf einem Silizium- oder Glassubstrat (Wafer), ähnlich wie in der Chipindustrie. Das Verfahren ist allerdings schwierig zu handhaben und teuer. Einfacher und günstiger geht es mit Abgüssen in Polydimethylsiloxan (PDMS, ein Polymer auf Siliziumbasis) oder 3-D-Druck.

Zunächst druckt man die zu untersuchende Mikrostruktur auf eine Fotomaske, um die Porenstruktur eines Gesteins sehr genau abzubilden. Dabei lassen sich Kanäle mit wenigen Mikrometern oder in manchen Fällen sogar nur rund zehn Nanometern Durchmesser herstellen. Dank dieser Methode können Fachleute mittlerweile auch Transport- und Speichermechanismen in nanoporösen Gesteinen wie Schiefer oder Tonstein untersuchen.

Anschließend bringt man ein lichtempfindliches Harz auf einem Wafer aus (Schritt 1 in der Grafik). Darauf drückt man die Fotomaske und bestrahlt das Ganze mit ultraviolettem Licht (2). Die Strahlen dringen nur durch die transparenten Bereiche der Maske und wandeln das Harz dort chemisch um: Es wird – je nach seiner Beschaffenheit – entweder wasserlöslich oder unlöslich. Anschließend wird der Wafer in ein Entwicklerbad getaucht und das lösliche Harz entfernt. Nun befindet sich das Muster der Mikrostruktur auf dem Wafer (3).

Danach gibt es zwei Möglichkeiten: Gravur oder Abguss. Bei der Gravur dient das verbliebene Harz als Schutz, und das Silizium- oder Glassubstrat wird mittels chemischer Prozesse, Plasmatechnik oder reaktiver Ionen eingeritzt oder eingätzt (4a). Um später Flüssigkeiten zu injizieren, bohrt man Löcher. Durch eine chemische Behandlung entfernt man anschließend das verbliebene Harz und die restlichen Verunreinigungen (5a). Das Mikromodell wird mit einer Glasplatte dicht verschlossen (6a).



Beim Abguss dient der gravierte Wafer als Formgeber. Zunächst bringt man flüssiges PDMS oder ein anderes Polymer auf ihm aus (4b). Nach weiterer Polymerisation löst man den Abguss ab, bohrt die Löcher für die Injektion der Flüssigkeiten und montiert eine Glasplatte oder einen weiteren PDMS-Film auf dem Abguss (5b).

Das zweite Verfahren ist deutlich billiger, weil es nicht im Reinraum stattfinden muss und sich nach Belieben wiederholen lässt. Allerdings eignen sich die so erstellten Mikromodelle nicht immer für die Geowissenschaften. Denn zum einen ist PDMS elastisch und gibt daher die mechanischen Eigenschaften des echten Gesteins nicht gut wieder. Zum anderen lassen sich die Modelle schlechter reproduzieren, da sich zwei aus Abgüssen hergestellte Chips immer leicht voneinander unterscheiden, insbesondere durch Unebenheiten an den Wänden. Deren Oberflächen lassen sich außerdem weniger gezielt behandeln als bei einem Mikromodell aus Silizium oder Glas. Die Rauheit und die elektrostatischen Aufladungszustände der Oberflächen sind jedoch wichtig, um bestimmte Prozesse zu untersuchen. Darüber hinaus ist PDMS für Gas und be-

stimmte Lösungsmittel durchlässig und eignet sich damit beispielsweise nicht gut dazu, die geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid zu untersuchen.

3-D-Druck als günstige Alternative könnte die geowissenschaftliche Forschung revolutionieren. Bei der Technik entsteht das Objekt, indem fortlaufend Materialschichten aufeinander aufgetragen werden. Eine Fülle von Materialien eignet sich dafür – Kunststoff, Wachs, Metalle, Gips, Keramik, Glas –, und so lassen sich komplexe geologische Objekte fertigen. Gemeinsam mit Julien Maes und seinen Kollegen von der Heriot-Watt University in Edinburgh arbeiten wir an gedruckten Chips für die Forschung. Doch noch sind herkömmliche Mikrofabrikationstechniken der neuen Methode überlegen. Bisher beträgt der Durchmesser der durch 3-D-Druck erhaltenen Kanäle noch um die 100 Mikrometer – das ist zu groß im Vergleich zu echten Gesteinsporen. Darüber hinaus wird die Oberfläche derzeit noch unkontrollierbar rau, was die Strömungen in den Chips stören kann. Die Technik macht jedoch rasante Fortschritte und könnte in wenigen Jahren mit der Mikrofabrikation konkurrieren.

treten zueinander in Konkurrenz. Dabei weisen sie unterschiedliche Geometrien und Größen auf und sind nicht gleichermaßen von Blockaden betroffen. Ein verstopfter Kanal zwingt die Strömung, sich einen anderen Weg zu suchen. Manche Wege sind schneller und andere langsamer, vergleichbar einem Straßennetz mit Autobahnen und unterschiedlich großen Landstraßen. Weil die Porengrößen so uneinheitlich sind, entstehen manchmal komplexe Phänomene, die sich nicht einfach durchschauen lassen.

So benötigen etwa Bakterien Nährstoffe und mitunter Sauerstoff, um zu wachsen. Diese Substanzen zirkulieren – vorrangig mit den schnellen Mikroströmungen – also auf den »Autobahnen«. Bakterienkolonien gedeihen demnach vor allem in den größten Poren, bis sie sie verstopfen und damit die Zufuhr gerade jener Nährstoffe abstellen, die sie für ihr Wachstum benötigen. Letztere gelangen dann zu anderen Poren, wo sich neue Kolonien etablieren. Von der Nahrungszufuhr abgeschnitten, sterben die älteren Besiedlungen ab, wodurch sich dort wieder der Weg für Mikroströmungen öffnet, bis eine weitere Kolonie entsteht. Diese Form der Rückkopplung beobachtet man ebenfalls, wenn eine Mikroströmung eine Substanz transportiert, die Minerale in den Poren ausfällt und dadurch an solchen Stellen eine undurchlässige Barriere aufbaut.

Da Gestein nicht durchsichtig ist, lassen sich die verschiedenen Strömungs- und Transportmechanismen eines Porennetzwerks nur schwer untersuchen: Wie soll man dynamische Phänomene beobachten und beschreiben, die sich innerhalb der Mikrostruktur des Gesteins

abspielen, ohne deren Entwicklung zu behindern? Zum einen gelingt das durch zerstörungsfreie Bildgebung, etwa die Röntgen-Mikrotomografie. Mit ihr kann man die Struktur einer Gesteinsprobe dreidimensional darstellen, die Verteilung der Flüssigkeiten in den Poren erfassen und bewerten, wie sich die Mineralstruktur durch geochemische Reaktionen verändert.

Die Geschichte der Mikrofluidik begann 1979, aber erst zehn Jahre später nahm das Forschungsfeld richtig Fahrt auf

Trotz aller Fortschritte der letzten Jahre sind die Aufnahmegeschwindigkeiten dieser Technologien aber noch zu langsam, um dynamische Phänomene zu erfassen, die für viele geowissenschaftliche Fragen zentral sind. Wenn etwa Flüssigkeiten ins Gestein eindringen, werden Tröpfchen durch Kapillarkräfte festgehalten. Solche Vorgänge laufen innerhalb von Millisekunden ab. Gleichermaßen erfordert es Visualisierungsmethoden mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, um darzustellen, wie sich Viren, Bakterien oder Nanopartikel an Minerale anheften. Genau das sind die Stärken der Mikrofluidik. Sie erlaubt es, Mikroströmungen im Inneren von Gesteinen mit bisher unerreichter Präzision zu beobachten.

Die Geschichte der Mikrofluidik begann 1979, als Stephen Terry und seine Kollegen von der Stanford University in den USA ein System zur gaschromatografischen Analyse miniaturisierten. Aber erst zehn Jahre später nahm das Forschungsfeld richtig Fahrt auf.

Letztlich geht es darum, Flüssigkeiten im Mikrometerbereich zu handhaben. Dazu baut man ein regelrechtes

Kohlenstoffdioxid dauerhaft speichern

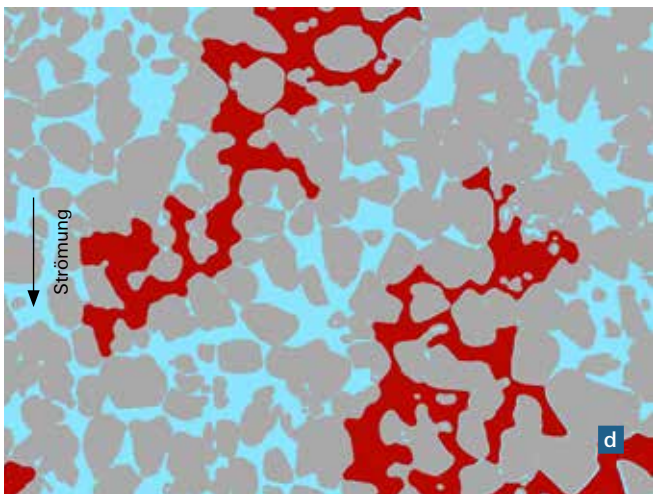
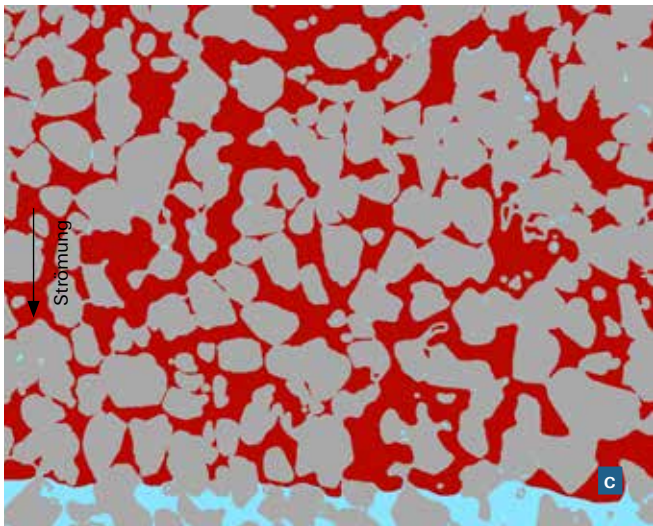
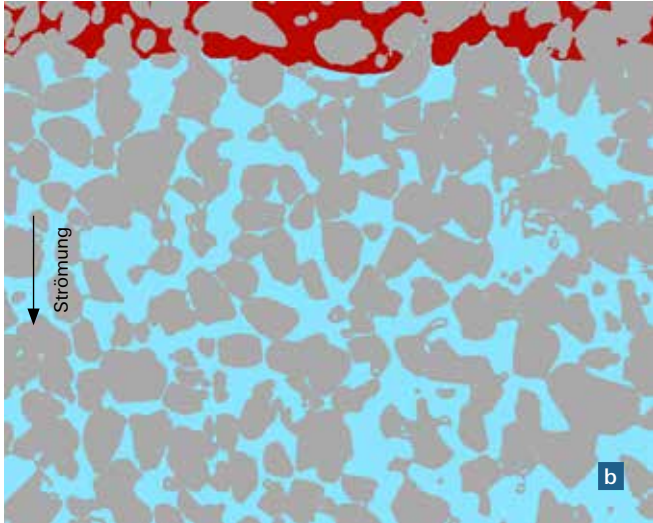
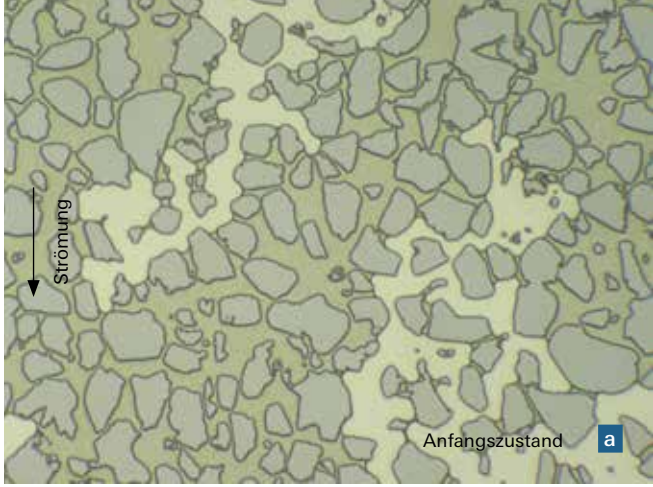
Forschungsgruppen weltweit untersuchen, ob und wie sich aus der Atmosphäre eingefangenes Kohlenstoffdioxid unterirdisch in geologischen Formationen speichern lässt. Will man die Dichtigkeit der Speicher über Jahrtausende gewährleisten, muss man undurchlässige Barrieren errichten. Doch dazu ist noch nicht genügend darüber bekannt, wie genau sich Minerale in den Gesteinsporen lösen und wieder ausfallen.

Im Jahr 2020 entwickelten wir mit Jenna Poonosamy und weiteren Kollegen vom Institut für Geowissenschaften in Orléans und dem Institut für Energie- und Klimaforschung in Jülich ein

mikrofluidisches System, um die Bildung reaktiver Barrieren mittels Raman-Spektroskopie genau zu untersuchen und zu visualisieren. Das Mikromodell besteht aus Körnern von Coelestin, einem in hydrothermalen Umgebungen ziemlich häufigen Mineral. Wir injizierten kontinuierlich eine Bariumchloridlösung, wodurch sich Coelestin auflöst und das Mineral Baryt (Schwerspat) entsteht. Wir haben also ein Modell für reaktive Einschlussbarrieren mit einer recht einfachen Chemie geschaffen. Damit lassen sich die Rückkopplungen zwischen Strömungen und chemischen Reaktionen gut studieren. Wir haben sowohl ein homogenes Milieu

untersucht, in dem die Coelestinkörner gleichmäßig verteilt sind, als auch ein heterogenes, in dem sie ungleichmäßig auftreten. In beiden ermittelten wir, wie viel Baryt entstand. Wie sich zeigte, bildet sich bei ungleichmäßig verteilten Coelestinkörnern wesentlich mehr Schwerspat.

Mit diesem neuen Gerät können Geowissenschaftler in Echtzeit verfolgen, wie sich gesteinsbildende Minerale auflösen und ausfallen. Wenn sie dadurch lernen, wie genau sich Poren auf Mikrometerebene abdichten, können sie gezielt undurchlässige Barrieren in geologischen Formationen errichten und damit unterirdische Speicherreservoirs verschließen.



Netzwerk aus Mikroröhren auf Siliziumchips auf, mit Mikroventilen, -pumpen, -mischen und -sensoren, um chemische oder biologische Proben zu untersuchen. Diese »Chiplabors« oder »Westentaschenlabors« sollen herkömmliche große Geräte ersetzen, die oft unbequem zu bedienen und weniger effizient sind.

Dank der Miniaturisierung lässt sich unter anderem höchst genau kontrollieren, wie Tropfen und Emulsionen entstehen. Forschung und Industrie haben die vielfältigen neuen Anwendungsmöglichkeiten in vielen Bereichen bereits aufgegriffen. So profitieren etwa Bluttests von der Mikrofluidik, um rote Blutkörperchen abzutrennen. Pharma- und Kosmetikindustrie erzeugen dank der Technik mit sehr wenig Flüssigkeit – manchmal nur mit Pikolitern, also milliardstel Millilitern – neue Produkte. Bei den gängigen Urin-Schwangerschaftstests handelt es sich ebenfalls um Westentaschenlabors. Das sind nur einige Beispiele. Manche Fachleute gehen davon aus, dass die Mikrofluidik Biowissenschaften, Medizin, Chemie und Ökologie revolutionieren wird, ähnlich wie Mikroprozessoren im 20. Jahrhundert Elektronik und Datenverarbeitung umgekrempelt haben.

Dank der Miniaturisierung lässt sich unter anderem höchst genau kontrollieren, wie Tropfen und Emulsionen entstehen

Seit den 2010er Jahren haben sich mikrofluidische Geräte in den Geowissenschaften etabliert, um Mikrostrukturen im Boden und Gesteinsuntergrund zu simulieren. Mit solchen geologischen Chiplabors lassen sich natürliche Prozesse in einer kontrollierten Umgebung nachstellen, beobachten und beschreiben mit dem Ziel, sie anschließend zu modellieren. In Kombination mit modernen bildgebenden Verfahren können Fachleute mit Mikrofluidik-Experimenten Transportmechanismen und chemische Reaktionen im Porenraum direkt sichtbar machen und quantitativ messen.

Um die komplexen Vorgänge zu entschlüsseln, die sich in Gesteinsporen abspielen, verfolgt die aktuelle Forschung zwei Ansätze. Zum einen arbeitet sie daran, Gesteinsproben mit den Chiplabors nachzubilden, um die unterschiedlich geformten Porenräume sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Mineraloberflächen so originalgetreu wie möglich darzustellen. Damit lässt sich untersuchen, wie die komplexen Phänomene

FLIESSVERHALTEN Bei diesem Entwässerungsexperiment ist zunächst der Porenraum des Chiplabors mit Wasser gefüllt **a**. Anschließend wird Öl von oben eingespritzt **b**. Die Dynamik unterscheidet sich abhängig von den Injektionsbedingungen und der Art der Fluide. Herrschen viskose Kräfte vor, füllen sich die Poren gleichmäßig entlang einer stabilen Front, die in Bewegungsrichtung fortschreitet **c**. Überwiegen Kapillarkräfte, dringt das Öl vorzugsweise in bestimmte Bereiche ein, wobei große Taschen des ursprünglichen Fluids erhalten bleiben **d**.

- Öl
- Wasser
- feste Körner

sich gegenseitig beeinflussen – beispielsweise, welche Rolle die Porenstruktur bei der räumlichen Verteilung der Vorgänge innerhalb des Gesteins spielt. Beim zweiten Ansatz nutzen die Hydrogeologen die Mikrofluidik, um bestimmte Prozesse in einer kontrollierten Umgebung isoliert zu betrachten. Indem sie die Vorgänge von anderen Mechanismen entkoppeln, die sich mit ihnen überlagern oder mit denen sie in natürlichen Umgebungen interagieren, können sie diese besser verstehen und beschreiben.

Ein Chiplabor ist nur ein zweidimensionales Abbild der Wirklichkeit – will man das dreidimensionale Gestein beschreiben, muss man daher vorsichtig vorgehen

Die beiden Ansätze ergänzen sich. So kann man die Entwicklung von Bakteriengemeinschaften im Untergrund nur vollständig begreifen, wenn man einerseits Wachstum, Zusammenballung und Anlagerung der Bakterien an feste Mineraloberflächen im Porenbereich beschreiben kann und andererseits in der Lage ist, die Zufuhr von Nährstoffen und Sauerstoff durch Mikroströmungen im hydraulischen Netzwerk zu bestimmen.

Je nach Verwendungszweck kann das auf dem Chiplabor eingravierte Muster variieren: vom einzelnen Kleinstkanal zur Fokussierung auf ein Phänomen bis hin zu Mustern, die ein poröses geologisches Milieu repräsentieren. Letztere lassen sich aus dem mikrotomografischen Bild einer Mineralprobe erhalten. Natürlich ist ein Chiplabor stets nur ein zweidimensionales Abbild der Wirklichkeit – will man das dreidimensionale Gestein auf Grundlage von Mikrofluidik-Experimenten beschreiben, muss man daher vorsichtig vorgehen. Um diese Einschränkung

LABORMODELL Durch die orangefarbene Nadel links wird die Flüssigkeit injiziert, rechts tritt sie wieder aus. Sie durchquert einen Schaltkreis, dessen Konfiguration in das Substrat graviert ist und der unterschiedlich geformt sein kann. Hier ist es ein Netzwerk paralleler Poren.

zu umgehen, haben Anthony Kovscek von der Stanford University und sein Team 2017 eine Vorgehensweise entwickelt, mit der sie unterschiedliche Gravurtiefen in den Chiplabors erreichten. So konnten sie immerhin bestimmte dreidimensionale Effekte erfassen.

Oft kostet ein einziges Chiplabor an die 1000 Euro, wobei es meist nur einmal verwendet werden kann

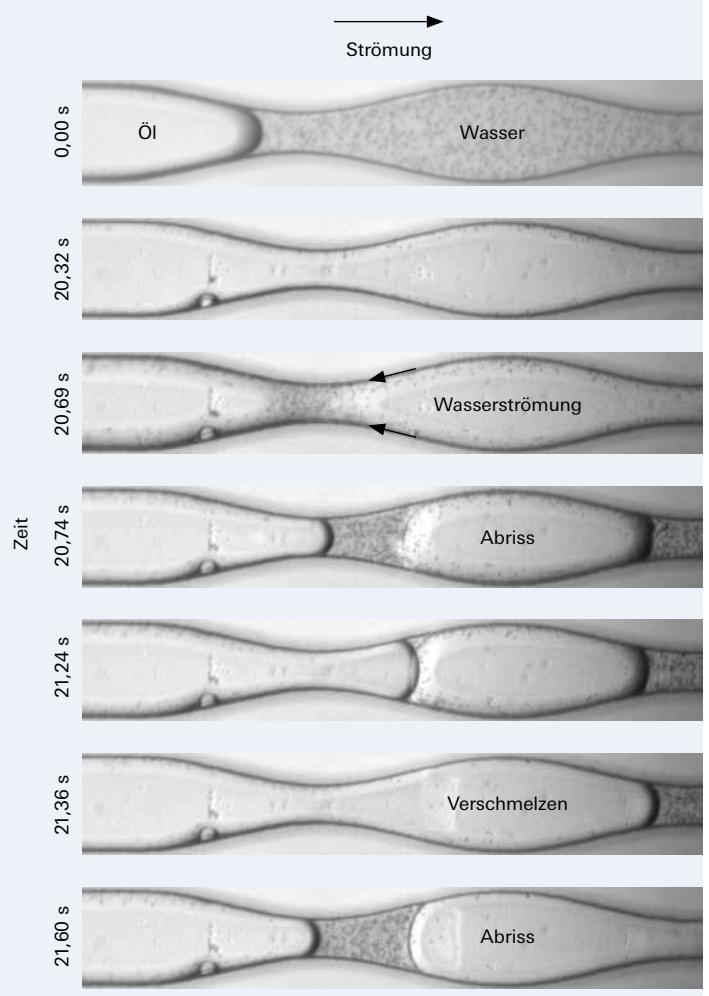
Die Chiplabor-Herstellung ist ein schwieriges Unterfangen und findet unter rigorosen Bedingungen statt, vergleichbar denen bei der industriellen Fertigung mikroelektronischer Chips (siehe »Mikrofabrikation«). Diese Hightech-Prozesse sind sehr empfindlich gegenüber kleinsten Verunreinigungen. Daher sind Reinraumumgebungen erforderlich, also Produktionsräume, in denen Temperatur, Druck und Luftqualität kontrolliert werden und wo mit Schutzanzügen ausgestattetes Personal ein striktes Protokoll befolgt, um jedwede Kontaminierung durch Staub oder Tröpfchen zu vermeiden. Die Prozesse sind obendrein sehr teuer, was ihre breite Anwendung in geowissenschaftlichen Laboren begrenzt. Oft kostet ein einziges Chiplabor an die 1000 Euro, wobei es meist nur einmal verwendet werden kann, da es keine wirksamen Reinigungsverfahren gibt. Man versucht allerdings zunehmend auf kostengünstigere Herstellungsarten auszuweichen, etwa den Abguss von Silikonkautschuk (PDMS) oder 3-D-Druck. Noch gibt es dabei einige Probleme, aber da sich die Oberflächenbehandlungen und die Auflösung des Drucks in letzter Zeit stark verbessert haben, könnten sie in ein paar Jahren effizient genug sein.

In natürlichen Gesteinsporen liegen ständig verschiedene Flüssigkeiten oder Gase nebeneinander vor: Oft strömen etwa Luft und Wasser durch oberflächennahes Gestein, und Erdöllagerstätten sind regelmäßig mit Wasser, Öl und manchmal auch Gas vollgesaugt. Weil die Fachleute viele Phänomene dabei noch nicht begreifen, sind solche Gegebenheiten sehr schwer zu modellieren. Dank Mikrofluidik versteht man heute solche Mehrphasenströmungen in porösen Milieus besser.



Remobilisierung

In dieser Sequenz wird Öl in einen wenige Mikrometer großen Kanal eingespritzt, der hydrophile Wände besitzt und mit Wasser gefüllt ist. Tritt das Öl in die Pore ein, verbleibt an den Wänden eine dünne Wasserschicht. Aber durch die Veränderung des Meniskus (die Wölbung in der Oberfläche der Flüssigkeit) entsteht ein lokaler Druckgradient, durch den Wasser entgegen der Strömung des Öls zu zirkulieren beginnt. Dadurch reißt die Strömung des Öls schließlich ab, und ein Öltröpfchen bildet sich. Tritt erneut Öl in die Pore ein und fließt mit dem zuvor abgetrennten Tröpfchen zusammen, wird Letzteres remobilisiert, und der Prozess beginnt erneut. Diese subtilen Phänomene spielen eine wichtige Rolle in der Dynamik von Zwei-Phasen-Milieus und können Sanierungsmaßnahmen an belasteten Standorten erschweren oder die Speicherleistung von Gestein herabsetzen.



SOPHIE ROMAN & CYPRIEN SOULIANE

Das Besondere an Mehrphasenströmungen sind die abrupten Übergänge an der Grenzfläche von einem Fluid zum nächsten, etwa an der Oberfläche eines Luftbläschens in Wasser. Beim Fließen wandern die Grenzflächen durch den Porenraum und verformen sich, verschmelzen mit anderen Tröpfchen oder teilen sich – immer bestrebt, den Zustand geringster Energie zu finden. Gleichzeitig gibt es andere Beschränkungen, etwa die Größe der Poren oder die Fähigkeit eines Materials zur Benetzung.

Drei treibende Kräfte sind für die Wanderung von Fluiden und ihren Grenzflächen verantwortlich: Druck, Schwerkraft und Kapillarkräfte. Druckunterschiede setzen eine Flüssigkeit durch äußere Kräfte in Bewegung, etwa durch Pumpen. Die Schwerkraft bewegt ein Fluid in vertikaler Richtung – also nach unten, wenn es eine hohe Dichte hat, oder durch den archimedischen Schub nach oben, wenn es leicht ist. Kapillarkräfte verkleinern die Grenzfläche und minimieren damit deren Energie. Sie unterstützen das Eindringen eines Fluids in die Poren oder wirken dem entgegen, je nach Beschaffenheit der Porenwand.

In den 1980er Jahren zeigte Roland Lenormand mit seinen Kollegen vom Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (Institut für Fluidmechanik in Toulouse) durch bahnbrechende Mikrofluidik-Experimente, dass unterschiedliche Strömungsmuster herrschen können, wenn man ein Fluid in Poren einspritzt, die mit einem anderen Fluid gefüllt sind: Entweder füllen sich die Poren gleichmäßig entlang einer stabilen Front, die sich in Fließrichtung ausbreitet, oder das neue Fluid dringt bevorzugt in bestimmte Bereiche ein. Im letzteren Fall bleiben große, isolierte Taschen des ursprünglichen Fluids erhalten.

Damals waren Westentaschenlabors noch einfache Netzwerke aus rechteckigen, über 100 Mikrometer breiten Kanälen. Heute können wir Chiplabors gravieren, die Gestein mit wenigen Mikrometer großen Poren darstellen. Nur dadurch lassen sich die Kapillarkräfte korrekt erfassen, die feine Tröpfchen von Kohlenwasserstoffen oder chlororganischen Verbindungen im Gestein festhalten. Aktuelle Chiplabors geben somit die Mechanismen der Grundwasserverunreinigung gut wieder.

Das Schwierige beim Sanieren belasteter Böden ist es, die Schadstofftröpfchen, die durch Kapillarkräfte in den Poren festgehalten werden, wieder in Bewegung zu versetzen. Weil sich die Tröpfchen nur sehr langsam auflösen, verunreinigen sie das Grundwasser dauerhaft. Sie lassen sich aber beseitigen, indem man ihre Oberflächeneigenschaften verändert und so die Kräfte, die sie in der Pore festhalten, aus dem Gleichgewicht bringt. Das gelingt mit Tensidmolekülen oder metallischen Nanopartikeln. Mit Mikrofluidik kann man rasch verschiedene solcher Produkte testen. Dank Chiplabors wissen Fachleute mittlerweile mehr darüber, wie die Reinigungsmittel zu den Grenzflächen gelangen, und können dadurch besser ermitteln, wo genau sie in den Boden einzubringen sind, damit sie am richtigen Ort landen.

Ein weiterer Vorteil von Chiplabors ist die unübertroffene visuelle Prozesskontrolle. Suspendiert man mikrometergroße Partikel in den Flüssigkeiten, lassen sich die Strö-

mungen in den Poren in Echtzeit beobachten und abbilden. So hat man Phänomene enthüllt, die bis dahin noch nicht in den theoretischen Modellen vorkamen. Beispielsweise haben wir im Labor beobachtet, wie Flüssigkeit innerhalb von Tropfen, die durch Kapillarkräfte festgehalten wurden, zurückfloss. Auf den ersten Blick ist das unnötiger Energieeinsatz und widerspricht dem Grundsatz, möglichst wenig Energie aufzubringen. Doch andererseits beeinflusst diese Bewegung, wie schnell sich die chemischen Verbindungen im Tropfen mischen – und damit letztendlich, wie rasch sich Verunreinigungen im Gestein ausbreiten. Solche bisher ignorierten Prozesse könnten außerdem helfen, Konzepte zur unterirdischen CO₂-Speicherung zu finden, denn hier will man eine möglichst große Menge des Gases in Form von Bläschen im Gestein einschließen.

Eines der Speicherkonzepte sieht vor, die Kohlenstoffdioxidbläschen durch Kapillarkräfte im Gestein festzuhalten. Kürzlich haben wir mit Kollegen an der Stanford University dazu Chiplabors untersucht, die eine einzelne Pore darstellten. Wie wir herausfanden, kann sich ein eingeschlossenes Bläschen wieder mit der Strömung verbinden, nachdem es von ihr getrennt wurde. Unseren neuen Daten zufolge lässt sich dadurch möglicherweise weniger CO₂ unterirdisch durch Kapillarkräfte lagern als veranschlagt. Die anvisierten Szenarien sollten daher gründlich überprüft werden.

Chiplabors lassen sich noch in vieler Weise verbessern. Seit Neuestem nutzt man bei der Fertigung geologische Materialien, um beispielsweise die Auflösung oder Ausfällung von Mineralen besser abzubilden – Phänomene, die Wege für Flüssigkeiten und Gase versperren oder neue eröffnen können.

Beherrscht man diese Prozesse, kann man etwa in abgegrenzten Bereichen geologischer Formationen künstliche Barrieren errichten und so Verunreinigungen in Schach halten oder ein Speicherreservoir abdichten. Wie Anthony Kovscek betont, ist die Mikrofluidik mehr als nur ein Werkzeug zur Messung von Gesteinseigenschaften. Sie wird vor allem dazu beitragen, die großen gesellschaftlichen und ökologischen Herausforderungen zu bewältigen, die sich auftun, je intensiver wir den Untergrund nutzen. ◀

QUELLEN

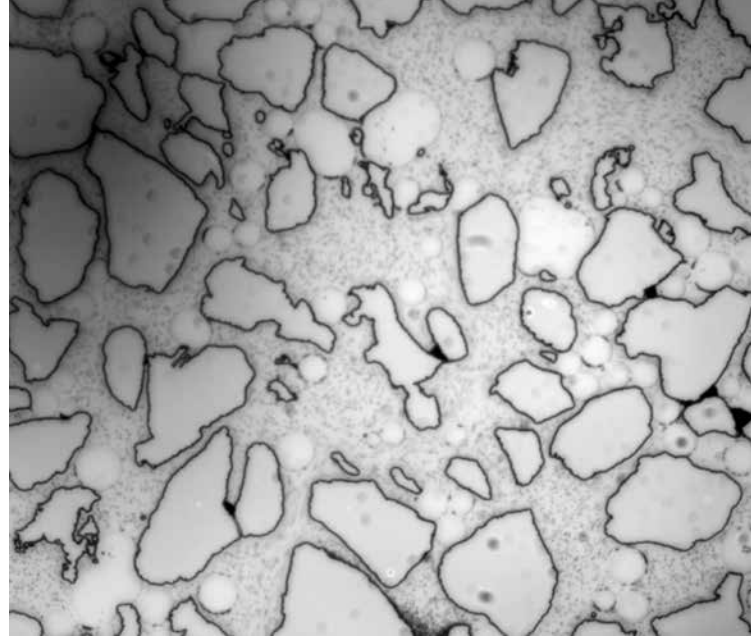
Poonoosamy, J. et al.: Microfluidic flow-through reactor and 3D Raman imaging for in situ assessment of mineral reactivity in porous and fractured porous media. *Lab on a Chip* 14, 2020

Roman, S.; Soulaire, C. et al.: Particle velocimetry analysis of immiscible two-phase flow in micromodels. *Advances in Water Resources* 95, 2016

Soulaire, C.; Roman, S. et al.: Pore-scale modelling of multiphase reactive flow: application to mineral dissolution with production of CO₂. *Journal of Fluid Mechanics* 855, 2018

Yun, W. et al.: Creation of a dual-porosity and dual-depth micromodel for the study of multiphase flow in complex porous media. *Lab on a Chip* 8, 2017

SOPHIE ROMAN & CYPRIEN SOULAIRE



ORIGINALGETREU Mikromodell von Sandstein, dessen Muster durch tomografische Analyse einer Gesteinsprobe ermittelt wurde. Durch dieses Vorgehen will man sich an realistische Geometrien herantasten. Der Porenraum ist mit Wasser und Öltröpfchen (weiß) gefüllt. Die Öltröpfchen werden durch Kapillarkräfte festgehalten. Um sie wieder in Bewegung zu setzen, spritzt man Partikel ein – entweder, um damit die Eigenschaften der Grenzflächen zwischen Öl und Wasser zu verändern, oder um gezielt Poren zu verstopfen (schwarze Cluster). Das leitet die Strömungen um, zerstört das Gleichgewicht der hydrodynamischen Kräfte und verdrängt die Öltröpfchen.

Der Kalte Krieg geht weiter

Die investigative Recherche zeigt ein Netzwerk, das die russische Politik, Wirtschaft und Justiz durchdrungen hat und den Westen destabilisieren will.

Der Zusammenbruch der Sowjetunion wirkt bis heute nach. Wladimir Putin erlebte ihn als KGB-Offizier im Dresden der damaligen DDR und bezeichnet ihn heute als die größte geopolitische Katastrophe des 20. Jahrhunderts. Völlig unvorbereitet traf es den KGB allerdings nicht. Denn Teile des sowjetischen Geheimdienstes haben ein Netz aus Agenten, Unternehmern und organisierter Kriminalität aufgebaut, die den Kampf gegen den Westen weiterführen.

Zu diesem Ergebnis kommt die britische Investigativjournalistin und ehemalige Moskau-Korrespondentin der »Financial Times«, Catherine Belton, aufgrund ihrer Recherchen. In ihrem Buch zeichnet sie das Netz detailliert nach. Ihre Darstellung beginnt lange vor dem Zusammenbruch der Sowjetunion in der Zeit Juri Andropows (1914–1984). Er war bis 1982 Chef des KGB und von 1983 bis zu seinem Tod Staatschef. Die Darstellung endet mit frühen russischen Kontakten des ehemaligen US-Präsidenten Donald Trump, mit den Ein-

flussversuchen auf seine Präsidentschaftswahl 2016 sowie der russischen Unterstützung der Brexit-Kampagne zur Destabilisierung der EU.

Die Autorin berichtet, dass sich die Führungsriege des KGB unter Andropow gespalten hatte: in eine »konservative« Fraktion, die sich jedem Wandel verschloss, und in »progressive« Befürworter der Marktwirtschaft, die in ihr ein Instrument sahen, um im Konkurrenzkampf mit dem Westen zu bestehen. Die »progressive« Fraktion baute ein Agentennetz sowie Kontakte zu kriminellen Banden auf, verkaufte russische Antiquitäten und Rohstoffe auf dem Schwarzmarkt, häufte Reichtümer an und unterhielt Kontakte zu russischen Exilanten im westlichen Ausland.

Nach dem Ende der Sowjetunion war Russlands Übergang zur Marktwirtschaft mit großen wirtschaftlichen und sozialen Härten verbunden. In dieser Umbruchzeit gelang es Oligarchen, nicht selten mit KGB-Kontakten, sich extrem zu bereichern.



Belton, Catherine

Putins Netz

Wie sich der KGB Russland zurückholte und dann den Westen ins Auge fasste

Verlag: HarperCollins

€ 24,-

Putins Rolle in Dresden ist bis heute nicht aufgeklärt. Er selbst überstand den Zusammenbruch der Autorin zufolge, indem er scheinbar die Seiten wechselte. Er arbeitete sich als stellvertretender Bürgermeis-



ter von St. Petersburg unter Anatoli Sobtschak (1937–2000) hoch, der später unter nicht zweifelsfrei geklärten Umständen starb. Als der in die Kritik geratene russische Präsident Boris Jelzin (1931–2007) einen Nachfolger für sich suchte, wurde Putin schließlich als landesweit noch relativ unbekannter Politiker 1999 zum Ministerpräsidenten und 2000 zum Staatspräsidenten aufgebaut. Diesen Aufstieg hatte er den mächtigen Seilschaften hinter den Kulissen des Kreml zu verdanken. Als eigene Machtbasis nutzte und nutzt er dieses von ehemaligen Geheimdienstlern durchsetzte Netzwerk, das im In- und Ausland weiterhin wirtschaftlich aktiv war.

Nach Belton entstand daraus ein »deep state«, der bis heute die russische Wirtschaft sowie die Justiz kontrolliert und in dem staatliche Stellen als Instrument zur Selbstbereicherung dienen. Doch seine »Tentakel« würden »sich bis tief in die Institutionen des Westens erstrecken«. Schwarzgeld sei auf westliche Konten verschoben, an der Londoner Börse investiert oder in Spielcasinos

reingewaschen worden. Belton berichtet, dass dies auch in den Spielcasinos von Donald Trump geschehen sein dürfte und dass dieser in den 1990er Jahren wohl durch russische Gelder vor der Pleite bewahrt worden sei. Putin selbst ist heute das Zentrum dieses Netzes, das ihn zu seinem Schutz jedoch ebenfalls benötigt.

Belton argumentiert, dass der Kalte Krieg nach dem sowjetischen Zusammenbruch im Westen offenbar schnell vergessen wurde, aber im Grunde nicht beendet ist. Denn die unter Putin agierenden Seilschaften streben nicht nur nach persönlicher Macht und Reichtum, sondern versuchen auch, weiterhin den Westen zu destabilisieren. Dazu bedienen sie sich inzwischen der kapitalistischen Marktwirtschaft, Geldgier und persönlichen Geltungsbedürfnisses.

Belton legt mit ihrem Buch eine fundiert recherchierte und detailreiche Arbeit vor, die jedoch nicht alles aufklären kann. Manches bleibt aufgrund der schwierigen Quellenlage im Dunkeln – etwa Putins genaue Tätigkeit in Dresden. Oder es ist Teil

laufender juristischer Auseinandersetzungen – etwa die Geldströme in den Unternehmen Donald Trumps. Doch gerade der Detailreichtum des Buches und das Auftreten unzähliger Personen – Politiker, Geheimdienstler, Oligarchen usw. – machen es zu einer schwierigen Lektüre. Ein wenig wird der Zugang durch eine an den Beginn gestellte Liste mit den »Dramatis Personae« erleichtert. Doch ist der Detailreichtum sowohl den akribischen Recherchen als auch dem enormen Umfang des beschriebenen Netzwerkes geschuldet.

Das Buch eignet sich für zeithistorisch sowie an der jüngsten russischen Politik interessierte Leserinnen und Leser. Historische und politische Vorkenntnisse sind notwendig.

Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.

Geschichten rund um Euklid

Der Historiker Benjamin Wardhaugh beschreibt nicht nur die Geschichte Euklids, sondern auch die seines bedeutsamen Werks, der »Elemente«.

Über Euklid und die Entstehung seiner »Elemente« ist nur wenig bekannt. Vieles spricht dafür, dass Euklid das bis dahin entwickelte Wissen aufbereitet und in prägender Weise systematisch zu einem Lehrgang zusammengefasst hat. Über Euklids Vorgänger und deren Anteil an den 13 Büchern (Kapiteln) der »Elemente« können nur Vermutungen aufgestellt werden. Es hat sogar Spekulationen darüber gegeben, ob Euklid tatsächlich gelebt hat und ob sein Name nur für ein Autorenkollektiv steht.

Benjamin Wardhaugh kennt die Faktenlage und geht damit behutsam um, indem er wie ein Geschichtenerzähler beschreibt, was sich möglicherweise alles zugetragen hat. Der studierte Historiker und Autor von populären Schriften zu Geschichte, Mathematik und Musik, Benjamin Wardhaugh, hat 37 lesenswerte Episoden zusammengetragen, die alle mit Euklid zusammenhängen.

Er lässt den Leser die Entwicklung Alexandrias zum Zentrum der damaligen Welt erleben. Die berühmte Frage des Ptolemaios nach dem



Benjamin Wardhaugh
Begegnungen mit Euklid

Wie die »Elemente« die Welt veränderten

Verlag: HarperCollins, Hamburg 2022

€ 26,-

Königsweg zur Geometrie ordnet er angemessen als unterhaltsame Anekdote ein. Er berichtet über die Beiträge der Nachfolger Apollonius, Eratosthenes und über Hypsikles, dessen Ergänzungen später als Buch 14 der »Elemente« bezeichnet wurden.

Die Geschichte des wohl berühmtesten Lehrbuchs der Mathematik

Das Werk ist in vier große Teile gegliedert. Im ersten geht Wardhaugh auf die Geschichte des Textes der »Elemente« ein. Einen ersten Versuch, diese zu bearbeiten, machte Theon, Leiter des Museions in Alexandria, am Ende des 4. Jahrhunderts, als es offensichtlich bereits unterschiedliche Versionen des Textes gab. Er wählte die Fassungen aus, die ihm am geeignetsten erschienen, ergänzte Beweise, wenn ihm eine Begründung nicht vollständig erschien, stellte auch unterschiedliche Beweise nebeneinander, wenn er nicht entscheiden konnte (oder wollte), welcher ursprünglich von Euklid stammte.

Im Lauf der Jahrhunderte entstanden immer neue Fassungen. Aufträge an Kopisten wurden erteilt, vorhandene Texte abzuschreiben, teilweise mit, teilweise ohne ergänzende Kommentare – anfangs auf Papyrusrollen, ab dem 6. Jahrhundert dann auf Pergamentbögen, die als Kodex zusammengefasst wurden. Durch Irrtümer der Schreiber wurde manches durcheinandergebracht, Texte wurden unvollständig übernommen, Zeichnungen weggelassen, Kommentare irrtümlich in den Haupttext eingefügt. Dies alles wird lebendig durch die Beschreibungen des Autors, der schließlich ehrfurchtsvoll auf die wunderbare Gestaltung des Kodex von Arethas, Erzbischof von Caesarea, aus dem Jahr 888 eingeht.

Dabei liest man eine lange Reihe von Geschichten, in denen verschiedene Persönlichkeiten auftreten: al-Haddschadsch (Übersetzer des griechischen Textes ins Arabische), Adelard von Bath (Übersetzer dieses arabischen Textes ins Lateinische) und Erhard Ratdolt (erste Druckausgabe in Venedig) – Ratdolt druckt

insgesamt mehr Exemplare, als zuvor durch Kopisten entstanden waren.

Im zweiten Teil des Buchs widmet sich der Autor den Euklid-Kommentaren des Neuplatonikers Proklos aus dem 5. Jahrhundert, der überzeugt war, die Mathematik »reine das Denken«. Demnach würden durch das kritische Durcharbeiten der »Elemente« die geistigen Fähigkeiten geschärft. Weiter geht Wardhaugh auf den Versuch des jüdischen Philosophen Levi ben Gerson ein, die Formulierung des Parallelenpostulats zu verbessern; weiter auf den Jesuiten Christopher Clavius, den Verantwortlichen der gregorianischen Kalenderreform, der eine ausführlich kommentierte und ergänzte Fassung der »Elemente« herausgab, weswegen er von der Nachwelt als »Euklid des 16. Jahrhunderts« bezeichnet wurde. Durch Clavius' Schüler, den Jesuiten-Missionar Matteo Ricci, gelangte der Euklid-Text nach China, wo in Kooperation mit Xu Guangqi eine chinesische Version der ersten sechs Kapitel entstand. Clavius sorgte auch dafür, dass die Behandlung der »Elemente« in den von Jesuiten geleiteten Schulen und Hochschulen obligatorisch wurde. Erwähnt werden sollten hier auch Wardhaughs Erläuterungen zu Spinozas »geometrischer Methode« (more geometrico) in der Philosophie.

Im dritten Teil beschreibt der Historiker den vielfältigen Einfluss der »Elemente« auf Musik (Tonleiter), Vermessungswesen, Handwerk und Künste. Der vierte Teil des Buchs reicht von Mary Somerville (geborene Fairfax, eine gute Bekannte von Ada Lovelace), deren Eltern befürchteten, dass die Beschäftigung mit Euklid »den zarten weiblichen Körperbau belasten« würden, über Nikolai Lobatschewski, dessen Auseinandersetzung mit dem Parallelenaxiom zu einer nichteuklidischen Geometrie führte, bis hin zu Max Ernsts Gemälde »Euklids Maske«.

Zwei aufeinander folgende Abschnitte dieses Teils gehen auf Entwicklungen in den Ländern des britischen Empire ein: Im 19. Jahrhundert werden Euklid-Übersetzungen in den jeweiligen Sprachen der Kolonial-

gebiete (Sanskrit, Urdu, Hindi, ...) als Teil der kolonialen Mission zum verbindlichen Unterrichtsstoff der Schulen; zu Beginn des 20. Jahrhunderts werden die »Elemente« als obligatorischer Prüfungsstoff an britischen Universitäten abgeschafft, da sie nicht dem Standard der modernen Logik entsprechen.

Nicht unerwähnt bleiben dürfen die beiden Geschichten über zwei Persönlichkeiten, denen die Euklid-Forschung viel zu verdanken hat: François Peyrard und Thomas Little Heath. Der erste nutzte während der napoleonischen Besetzung Italiens die Gelegenheit, 23 Handschriften aus italienischen Bibliotheken auszuliehen, darunter das Manuskript Nr. 190 der Vatikanischen Bibliothek, das wohl dem ursprünglichen Euklid-Text am nächsten kommt. Der zweite war ein leitender Beamter des britischen Finanzministeriums mit doppeltem Hochschulabschluss in alten Sprachen und Mathematik, der in seiner Freizeit die bis dahin fundierteste kommentierte Ausgabe der »Elemente« verfasste. Die letzte Geschichte dreht sich um das Weltraumprojekt, bei dem der Forschungssatellit den Namen »Euclid« erhielt.

Insgesamt sind die »Begegnungen mit Euklid« eine bereichernde und unterhaltsame Lektüre. Benjamin Wardhaugh hat einen lebendigen Schreibstil; für jede der 37 Geschichten darin findet der Autor einen angemessenen, stimmungsvollen Einstieg. Nicht alle Abschnitte des Buchs sind gleich spannend – aber das hängt sicherlich von den persönlichen Interessengebieten der Leser ab. Auf jeden Fall gibt das ausführliche Quellenverzeichnis genügend Anregungen, im Anschluss an die Lektüre eigene Recherchen durchzuführen.

Heinz Klaus Strick ist Mathematiker (www.mathematik-ist-schoen.jimdo.com) und Autor des »Mathematischen Monatskalenders«.

Die Geschichte der größten Krise der Menschheit

Die Klimaaktivistin Greta Thunberg legt mit Dutzenden Experten ein Buch vor, das helfen soll, Zusammenhänge rund um die Klimakrise besser zu verstehen.

► Stürme, Dürren und Hitzewellen werden nicht nur häufiger, sondern auch immer extremer. Was wir gerade erleben, ist nur der Anfang eines Klimawandels, verursacht durch Emissionen von Treibhausgasen der modernen Gesellschaft. Wissenschaftler warnen davor, dass wir in eine Epoche dramatischer Veränderungen eintreten. Wenn wir nicht bald handeln, sind nicht nur Fauna und Flora bedroht, sondern letztlich auch unsere eigene Existenz.

Das Versagen der Politiker

»Der erste Schritt zur Bewältigung einer Krise ist, zu erkennen, dass man in einer Krise steckt«, schreibt die schwedische Klimaaktivistin Greta Thunberg. »Und da sind wir noch nicht.« Den meisten von uns sei nicht bewusst, wie ernst und drängend die Klimakrise ist. Viele kümmern es auch nicht, und Politiker nimmt Thunberg da nicht aus. Statt endlich zu handeln, würden sie immer wieder Zusagen machen, die sie nicht einhalten, und ihre meist vagen Ziele regelmäßig verfehlen.

Thunberg wirft den Regierenden vor, völlig versagt zu haben. Und das täten sie weiterhin. Denn die Zeit für kleine Schritte in die richtige Richtung sei längst vorbei. »Wenn die Badewanne überzulaufen droht, macht man sich nicht auf die Suche nach Eimern oder legt Handtücher auf dem Boden aus«, erklärt die 19-jährige Autorin. »Als Erstes dreht man den Wasserhahn ab, so schnell es geht.« Das Wasser laufen zu lassen, heiße, das Problem zu ignorieren oder es sogar zu leugnen.

Die Rolle der Medien

Versagt hätten aber nicht nur unsere politischen Führungskräfte, sondern auch die Medien. Es sei ihre Schuld,

dass wir die Klimakrise nicht aufhalten können. Weil die Medien nur unzureichend und nicht ehrlich über die Krise berichten, kämen die Informationen nicht bei den Bürgern an. Man werde belogen und im Unklaren gelassen und damit der demokratischen Rechte beraubt, wirft Thunberg den Medien vor.

Dabei seien die Medien jetzt stärker gefordert denn je. Denn es gäbe keine andere Instanz, um die erforderliche Transformation unserer Gesellschaft herbeizuführen. Zu groß sei unsere Aufgabe, zu wenig Zeit bliebe zum Handeln. Vor allem müssten die Medien anfangen, die Klimakrise als die Existenzkrise zu behandeln, die sie sei. Sie sollte die Nachrichten beherrschen. Dafür müsse deutlich werden, dass die Zeit drängt. Wenn man das ignoriere, sei die »größte Krise der Menschheit« nur ein Thema unter vielen anderen.

Wie wir die Krise bewältigen können

Noch ließe sich eine globale Katastrophe verhindern. Das erfordere aber, dass wir die CO₂-Emissionen weltweit drastisch reduzieren – und zwar sofort und nicht nur auf dem Papier: Auch wenn Politiker behaupten, die Emissionen sanken bereits, sei das de facto nicht der Fall. Der CO₂-Ausstoß nehme sogar weiterhin zu. Denn in den Statistiken tauchten oft weder die Emissionen des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs noch die Abgase der ins Ausland verlegten Industrie auf. Auch das CO₂, das beim Verbrennen von Wäldern freigesetzt wird, erscheint in keiner Rechnung.

Um die schlimmsten Folgen dieser Krise noch abzuwenden, müsste eine kritische Masse von Menschen zusammenkommen, um die nötigen



Greta Thunberg
Das Klima-Buch

Verlag: S. Fischer,
Frankfurt 2022

€ 32,-

Veränderungen zu fordern. Vor allem dürften wir Fortschritt nicht länger durch Wirtschaftswachstum und Bruttoinlandsprodukt definieren. Was wir bräuchten, sei eine völlig neue Denkweise. Etwas, was es noch nie zuvor gegeben hat.

Kompaktes Expertenwissen

Wie das konkret aussehen soll, kann Thunberg nicht sagen. Das muss sie auch nicht. Denn ihr Anliegen ist nicht, fertige Lösungen zu liefern. Vielmehr geht es ihr darum, Bewusstsein für die Dringlichkeit der Klima- und Ökologiekrise zu schaffen. Und das gelingt ihr ziemlich gut. Immerhin hat sie es geschafft, Millionen Menschen weltweit auf die Straße zu bringen, um für eine lebenswerte Zukunft zu kämpfen und eine Politik zu fordern, die die Bewältigung der Klimakrise ernsthaft angeht.

Mit dem »Klima-Buch« wollte sie eine Art Nachschlagewerk schaffen. Das soll helfen, die verschiedenen, eng miteinander verflochtenen Krisen zu verstehen. Dafür hat sie sich etwa 100 Experten zu Hilfe geholt. Darunter sind nicht nur namhafte Wissenschaftler, sondern auch Aktivisten und Publizisten. Viele von ihnen

kommen aus Regionen, die schon jetzt viel stärker vom Klimawandel betroffen sind als die Länder des globalen Nordens. Tatsächlich stammen nur etwa 50 der insgesamt 480 Seiten von Greta Thunberg selbst.

Die immense Vielfalt an Expertise macht das Werk zu einer faszinierenden Sammlung von Klimafakten, die den aktuellsten Stand der Wissenschaft widerspiegelt. Trotz des fachlichen Anspruchs sind die Texte leicht verständlich. Hilfreich dabei sind die

vielen Grafiken und ganzseitigen Fotografien. Einziges Manko ist der fehlende Quellennachweis. Den muss man sich separat im Internet herunterladen. Außerdem wäre es hilfreich, am Anfang oder am Ende der Texte (und nicht nur im Inhaltsverzeichnis) ein oder zwei Sätze über den jeweiligen Autor zu finden.

Das Buch macht deutlich, wie komplex die Krise ist, in die wir uns selbst hineinmanövriert haben und aus der wir jetzt den Ausgang nicht mehr zu finden scheinen. »Das ist die

größte Geschichte der Welt«, konstatiert Greta Thunberg. »Es ist Zeit, dass wir diese Geschichte erzählen und vielleicht sogar ihren Ausgang verändern.«

Peggy Freede ist promovierte Biochemikerin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Leipzig.

Willkommen im RNA-Zeitalter

Wie die Ribonukleinsäure, die es schon länger gibt als das Leben auf der Erde, künftig die Medizin beeinflussen kann, beschreiben Edda Grabar und Ulrich Bahnsen.

► Bereits der Anfang des Buchs macht eine beeindruckende Tatsache klar: Ein kleines Molekül aus Phosphor-, Zucker- und Nukleinbasenbausteinen enthält den Bauplan für einen Impfstoff, mit dem sich unser Immunsystem vor einem Virus schützen kann. Mit der gleichen Begeisterung führen die Wissenschaftsjournalistin Edda Grabar und ihr Kollege Ulrich Bahnsen durch die Geschichte der Molekularbiologie mit all ihren Entdeckungen. Durch anschauliche Vergleiche machen sie die komplexen Thematiken auch für Laien verständlich, wenn sie etwa DNA als Hardware und die RNA als die dazugehörigen Apps bezeichnen.

Sieben Kapitel führen von der Entdeckung der RNA über die ersten Ideen für Therapien zum großen Durchbruch der mRNA-Impfung und weiter zu den anderen Möglichkeiten für die Bekämpfung von seltenen Erkrankungen oder Krebs. Auch die unterschiedlichen Arten von RNA und ihre vielfältigen Aufgaben zeigen, dass sie nicht nur eine Art Bote zwischen DNA und Proteinen ist. Dabei sparen die beiden Autoren die Komplexität nicht aus, die mRNA, tRNA oder miRNA mit sich bringen.

Glück spielt eine große Rolle

Gerade im Teil über die ersten Ideen, wie sich RNAs in der Medizin einsetzen lassen könnten, stellen die Autorinnen die Wissenschaftlerinnen in den Fokus. Man erkennt die Menschen, die hinter all den Errungenschaften stecken, die sich bis zur Selbstaufgabe ihren Ideen und der Forschung verschrieben haben. Nicht nur die beiden BioNTech-Gründer Özlem Türeci und Uğur Şahin, sondern auch die Biochemikerin Katalin Karikó und einige andere hatten tollkühne Ideen für RNA-Therapien. Dafür wurden sie in der Fachwelt belächelt und mussten so manches molekulare Rätsel lösen.

Um ihre Ideen zu verwirklichen, gründeten sie Firmen, von denen BioNTech und Moderna inzwischen für große Erfolge stehen, während andere Schiffbruch erlitten, weil sich Investoren zurückzogen und den Forschern das Geld ausging. Das Feld der RNA-Medizin ist und war also nicht nur ein wissenschaftliches Wettstreit, sondern auch wirtschaftliche Konkurrenz von Start-ups. Glück spielt also eine große Rolle.

Doch nun nimmt die Entwicklung von RNA-Therapien Fahrt auf. Die



Edda Grabar, Ulrich Bahnsen
Das Ende aller Leiden

Wie RNA-Therapien die Behandlung von Krebs, Herzkrankheiten und Infektionen revolutionieren

Verlag: Quadriga, Köln 2022

€ 20,-

Impfung gegen Covid-19 war nur ein Katalysator, der die RNA-Medizin einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht hat. Zwar wurden 2018 bereits RNA-Therapien gegen hereditäre Transthyretin-vermittelte Amyloidose (hATTR), eine seltene Erkrankung, zugelassen. Das blieb jedoch weitgehend unbekannt, da nur einer von 2000 Menschen davon betroffen ist. Jetzt sind den RNA-Therapien keine Grenzen mehr gesetzt, und die Forscher machen sich daran, die bedrohlichsten Erkrankungen der Menschheit zu bekämpfen.

Der Blick auf die Zahlen zu diesen »Volkskrankheiten« lässt schauern. So schätzt die International Agency for Research on Cancer (IARC), dass weltweit jährlich etwa 20 Millionen Menschen an Krebs erkranken – für Deutschland bedeutet das, dass jeder zweite irgendwann betroffen ist.

Die Probleme bei der Behandlung von Krebs sind vielfältig. Eines der

größten ist die Fähigkeit der Krebszellen, sich vor dem Immunsystem und vielen Therapien zu verstecken. RNA-Forscher verfolgen nun einen kombinierten Ansatz: Sie entreißen den Krebszellen ihr »Unsichtbarkeitschild« und kombinieren das dann mit einer Impfung.

Gravierender als bei Krebs ist die Situation bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen, wie eine Studie von 2017 mit weltweit zirka 400 Millionen Erkrankten zeigt. Ursache dafür sind laut WHO meist Fettstoffwechselstörungen, wobei der Großteil auf Ernährung zurückzuführen ist. An dieser Stelle kommt der Humor der Autoren gut zur Geltung, wenn sie etwa erwähnen, dass das insbesondere für die Deutschen und ihre geliebte Currywurst schlechte Nachrichten sind. Aber auch hier arbeiten RNA-Forscher an einer Therapie.

Im Impfstoffbereich liegt die Hoffnung weiter bei RNA. Nicht nur

der Traum einer universellen Impfung gegen Grippe könnte wahr werden; auch bei Viren, gegen die es bisher keine Impfungen gibt (wie Hepatitis C und HIV), könnte RNA der Schlüssel sein. Und sogar für multiple Sklerose soll RNA eine Impfung ermöglichen.

Das Buch fasst die wichtigsten Erkenntnisse und zukünftigen Möglichkeiten der RNA-Therapie verständlich und kurzweilig zusammen. Obwohl man durch die scheinbar unbegrenzten Möglichkeiten der RNA-Therapien unweigerlich in Begeisterung verfällt, lassen die Autoren auch den kritischen Aspekt, dass eine viel versprechende Studie noch kein marktreifes Medikament ist, nicht außer Acht.

Victoria Lunz ist Molekularbiologin und Wissenschaftsjournalistin in Linz.

Tricks und Strategien der Natur

Der Natur-Dokumentarfilmer David Attenborough beschreibt unterhaltsam die Tier- und Pflanzengemeinschaften unseres Planeten.

► Der Begriff Vernetzung fällt heutzutage immer wieder, ob bei politischen, wirtschaftlichen oder anderen Herausforderungen. Dabei zeigt uns die Natur schon seit jeher, wie Vernetzung funktioniert: Hier hängt alles mit allem in feiner Abstimmung zusammen – die Strategie gelingt, solange die Eingriffe in die Natur durch uns Menschen die Grenzen nicht überschreiten.

Von den Polen bis zum Äquator, von Vulkanen bis zu den Wäldern der Welt und ihren Baumwipfeln bringt David Attenborough den Leserinnen und Lesern unterschiedliche Ökosysteme als Lebensraum für die faszinierende Vielfalt an Pflanzen und Tieren nahe. Immer wieder veranschaulicht er die Nahrungsket-

ten der »Bewohner« und ihre oft verblüffenden unterschiedlichen Methoden der Fortpflanzung, samt der Brutpflege bei den Tieren.

Attenborough ist seit Jahrzehnten als Natur-Dokumentarfilmer bekannt. Für ihn ist die Natur die größte Quelle für Begeisterung, Schönheit und Erkenntnis. In seinem neuesten Buch nimmt er die Leser mit – so wie auf eine »geschriebene Live-Fotoreise«. Beispielsweise wenn er Anpassungen der Fauna im Dschungel an ihr Lebensumfeld schildert: »Besonders lohnend ist es, das Leben in der Krone eines Baumes zu beobachten, der gerade Früchte bildet. Man setzt sich einfach hin und wartet. Ein Feigenbaum auf Borneo mit reifen duftenden Früchten wimmelt

dann nur so von hungrigen Gesellen. Affen huschen in den Ästen hin und her und riechen an jeder Feige einzeln, um ihren Reifegrad zu bestimmen und sie sich dann genüsslich in den Mund zu stopfen ...«

Unter dem Einfluss von Klima und Umwelt

Wald ist nicht gleich Wald, Meer ist nicht gleich Meer: Die morphologischen Anpassungen an die Umwelt, mit denen Pflanzen und Tiere auf die Lebensbedingungen reagieren, wird etwa beim Faultier deutlich. Für Attenborough zählt das Tier, das hängend unter den Ästen lebt, zu den seltsamsten Blattfressern im Blätterdach. »... Seine Krallen sind zu Haken geworden, die Gliedmaßen haben



David Attenborough
Der lebendige Planet

Wie alles mit allem vernetzt ist

Verlag: Kosmos, Stuttgart 2022

€ 28,-

sich in steife Bügel verwandelt. Und die Wuchsrichtung des Felles verläuft im Gegensatz zu anderen Tieren von den Fußgelenken zu den Schultern und von Bauch zum Rücken. Dadurch kann das Wasser auch von ihm ablaufen, wenn es kopfüber hängt.«

Reichlich Beispiele bringt er für alle anderen Klimazonen und Regionen. So gilt es in den Polarregionen, Kälte und monatelange Dunkelheit zu überstehen. In der Tundra kommt ein schneidender Wind dazu. Trotzdem gedeihe hier die Arktis-Weide, schreibt der Autor. Sie wachse halt nicht nach oben, sondern breite sich bis zu fünf Meter lang und nur wenige Zentimeter hoch auf dem Boden aus. Eine Pflanze mit einem nur zentimeterbreiten Stammdurchmesser könne dabei durchaus 400 Jahre alt sein.

In der Wüste, als ein Gegenstück dazu, braucht es stattdessen Strategien, um sich kühl zu halten, mit Wasser zu versorgen und sogar für Nachwuchs zu sorgen. Dabei klären sich allerlei Fragen, die man sich vielleicht schon gestellt haben stellen könnte: Warum eigentlich ist der Kot man-

cher Wüstentiere knochentrocken? Haben die Stachel der Kakteen auch einen anderen Sinn, als vor Fressfeinden zu schützen? ...

Bio-Wissen und Ökologie inklusive

Geschickt baut Attenborough immer wieder biologische und ökologische Grundlagen in seine Beschreibungen ein. Mal erklärt er zum Beispiel im Zusammenhang mit Graslandgebieten und den dortigen Tiergemeinschaften die Staatenbildung – wie es Termiten tun –, mal sind es Stoffwechselwege unterschiedlicher Pflanzen. Während seine Ausflüge in die Evolution zu den wenigen trockenen Passagen gehören, überwiegen sonst eher lockere Beschreibungen, so wie beim Nilpferd als größtem Bewohner der Flüsse Afrikas: Dass die Tiere abends ans Ufer trotten und sich die Bäuche mit Gras vollschlagen, ist laut dem Autor für andere Bewohner im Fluss von großer Bedeutung – denn anschließend deponieren sie ihren Kot und damit reichlich Nährstoffe im Wasser. »Deshalb schwimmen ganze Fischschwärme ununterbrochen um die Hinterteile der Riesen und warten auf die nächste Futterlieferung«, hält Attenborough humorvoll fest.

Im Lauf der schriftlichen Reise um den Globus lernt man immer wieder einzelne oder hier zu Lande fremde Tierarten näher kennen. Bei den Vögeln geht der Autor beispielsweise auf Albatrosse ein, die mit über drei Metern Spannweite die längsten Flügel aller Arten besäßen. Dabei löst er auch das Rätsel, wie die Vögel, ohne einmal mit den Flügeln zu schlagen, stundenlang in der Luft bleiben können. Manche der äußerst lebendig beschriebenen Tiere sind allerdings mittlerweile ausgestorben.

Lesenswert mit kleinen Einschränkungen

Gleich eingangs betont Attenborough, keinen Anspruch auf Korrektheit zu erheben. Manche Stellen machen aber doch unnötig stutzig, unter anderem bei der vagen Beschreibung der Fotosynthese oder wenn er bei den Vulkanen einfach

mal von Lava, Basalt oder Magma spricht. Fragen dürfte man sich auch, ob alle genannten Zahlen immer ganz glaubhaft sind.

Abgesehen davon lohnt sich die Lektüre des Buchs mit seinen hervorragenden Fotostrecken unbedingt. Attenborough gelingt es, in seinen lebendigen Schilderungen quasi nebenbei die Schutzwürdigkeit der diversen Naturräume bewusst zu machen. Im Nachwort verrät er dann auch: Es gehe ihm weder darum, vor den Schäden zu warnen, die wir unserem Planeten zugefügt haben, noch direkt darum, was zu tun ist. Vielmehr wolle er Tier- und Pflanzengemeinschaften beschreiben, um ihr Funktionieren zu verstehen. Denn: »Nur mit diesem Verständnis wird es uns gelingen, die Schäden zu beheben, die wir unserem Planeten zugefügt haben.«

Bettina Pabel ist promovierte Lebensmittelchemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Aschaffenburg.

Mit Büstenhalter-Technik zum Mond

E-Auto, Trolley oder Rollator: Marçal schildert amüsant, warum manche Erfindungen jahrzehntelang brachliegen.

► Warum haben es einige tolle Innovationen so schwer, sich durchzusetzen und die Welt schnell besser zu machen? Wieso verschwinden viele Ideen oft jahrzehntelang in den Schubladen der Erfinder? Schon seit 100 Jahren hätten elektrische Autos leise und ohne Abgase durch die Straßen surren können. Selbst ein scheinbar so simpler Rollkoffer brauchte erstaunlich lange bis zur Realisierung.

Die schwedische Journalistin Katrine Marçal berichtet mit großartiger Erzählkunst von den Gründen, warum es einige Erfindungen so schwer haben, bis es dann doch irgendwann klappt. Oft liegt es nicht an der Erfindung an sich, sondern weil Frauen die Ideen hatten, weil die Technik als »unmännlich« galt oder weil die Erfinder die »falsche« (weibliche) Zielgruppe im Sinn hatten.

Schleppen als Männlichkeitssymbol

Gepäck zu tragen galt als männlich – egal wie schwer es war. Auch wenn Rollen unter Gepäckstücken als Trageerleichterung schon lange erfunden waren, konnte sich das Produkt nicht durchsetzen. Selbst als die NASA ihre Astronauten ins Weltall schickte, mussten diese ihr Gepäck noch selbst schleppen. Erst seit Kurzem hat sich das Bild des Managers im Anzug und Trolley durchgesetzt, der nun sogar eine freie Hand für digitale Meetings mit dem Smartphone hat.

Eine Umdeutung war auch für das E-Auto nötig. Die abgasfreie Alternative hätte schon lange auf unseren



Katrine Marçal

Die Mutter der Erfindung

Wie in einer Welt für Männer gute Ideen ignoriert werden

Verlag: Rowohlt, Berlin 2022

€ 20,-

Straßen fahren können, die Technik scheiterte allerdings vor 100 Jahren – aber nicht an der damals noch schlechten Batterietechnik. Die Fahrzeuge wurden zu einseitig als weibliches Fortbewegungsmittel angepriesen und galten daher als »Weiberwagen«. Um die an den Mann zu bringen, brauchte es, wie die Autorin sagt, einen ganz schön langen Atem: »Leute wie Musk haben lange gebraucht, um diese Technologie wiederzuentdecken und dann auf eine männlichere Weise zu branden: Heute fahren mehr Männer als Frauen E-Autos. Unsere Wahrnehmung von Geschlecht verändert sich. Es war ein Irrtum zu sagen, diese Autos seien feminin, undenkbar für einen Mann, so etwas zu fahren. Und heute ist es genau andersrum.«

Einen weibischen Aspekt wollte auch die NASA um jeden Preis vermeiden, nicht nur bei den Rollkoffern. Denn die besten Entwickler der Anzüge für Weltraumfahrer waren Hersteller von (von Frauen vernähten) Büstenhaltern. Die Entwicklung eines

Raumanzugs in die Hände eines Miederherstellers zu legen, schien damals unmöglich. Allerdings versagten alle anderen Hersteller. »So kam es, dass die Mitglieder der Apollo-11-Mission schließlich weiche, von auf Unterwäsche spezialisierten Näherinnen handgefertigte Anzüge trugen«, schreibt Marçal.

Die Autorin berichtet auch von Männern, die als Erfinder scheiterten, sowie von erfolgreichen Frauen, die nicht nur den Rollator erfanden. Im Zweiten Weltkrieg waren sie beispielsweise hervorragende Programmiererinnen. In Großbritannien verzichtete man aber anschließend auf deren Expertise. So entstand das Silicon Valley eben später und in den USA, notiert die Autorin. Und auch hier musste die Arbeit umgedeutet werden: »Als Frauen Computer programmierten, galt das als etwas, zu dem jede und jeder fähig war; als Männer anfangen, sich damit zu beschäftigen, brauchte es plötzlich ein geniales Nerd-Gehirn«, beschreibt sie.

Marçal wirft zum Schluss einen Blick in die Zukunft. Durch die Bedrohungen durch die Klimakrise sei die Zeit zu knapp, um lange auf wichtige Innovationen zu warten. So fließe in Großbritannien immer noch weniger als ein Prozent des Geldes aus Risikofonds an Unternehmen, die von Frauen gegründet wurden. Nur unwesentlich mehr sei es im als fortschrittlich geltenden Schweden, der Heimat der Autorin. Diesen männlichen Tunnelblick könnten wir uns allerdings schon jetzt nicht mehr leisten, beklagt Marçal.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

Zustellung ungewiss!

Wolfgang Struck erzählt, wie die Flaschenpost Eingang in die Ozeanografie fand. Damit verknüpft er Geschichten, die sich beim Absenden und Entdecken der Botschaften auf den Weltmeeren zugetragen haben.

▶ Als Postboten sind Glasflaschen auf dem Meer bestenfalls bedingt geeignet. Übergibt man der See Botschaften verpackt in Glasbehältern, wird die Zustellung zum reinen Glückspiel. Das Meer erlaubt dem Absender nicht einmal, den Empfänger zu bestimmen. Und dennoch hat die Flaschenpost ihren Reiz. Die Reise ins Ungewisse fasziniert. In Form der Flaschenpost findet sie im Kleinen statt und ist, zumindest für den Absender, ungefährlich. Dringende Fragen begleiten das Versenden: Wo landet meine Nachricht, die ich gerade mitten im weiten Ozean über Bord geworfen habe? Wer wird meine Botschaft finden? Vielleicht trifft meine Post ja auf jemanden, der sie auf einem verlässlicheren Weg wieder zurückschickt. Welche Nachricht bekomme ich dann hoffentlich zusätzlich vom Finder?

Mehr als 600 Briefe per Flaschenpost

Ähnlich hat wohl Georg Balthasar Neumayer (1826–1909) gedacht, als er sich der Flaschenpost bediente, um die Strömungen der Weltmeere besser zu verstehen. In der damaligen Deutschen Seewarte wertete er mehr als 600 standardisierte Botschaften aus. Ausgesetzt wurden sie als Flaschenpost von Passagieren, Offizieren und Kapitänen auf hoher See. Irgendwo auf der Welt, viele Monate, meist sogar Jahre später, beendeten sie ihre Reise an irgendeiner Küste und wurden von Spaziergängern, Strandgutsammlern oder Fischern gefunden. Wenn es besonders gut lief, fand der Inhalt der Flaschen seinen Weg zurück zur Hamburger Seewarte. Darauf vermerkt: der Fundort der Flaschenpost. Heute werden die Fundstücke in vier Alben in der Bibliothek des Bundesamts für Schifffahrt und Hydrographie aufbewahrt.

Wolfgang Struck hat sich tief in diese Archive gewühlt. In seinem Buch erzählt der Professor für Neuere deutsche Literatur an der Universität Erfurt die Geschichten, die sich hinter den nüchternen Zahlen aus Koordinaten des Absende- und Fundorts verstecken. Struck schlägt damit geschickt einen Bogen von den Ursprüngen der Ozeanografie zu den Anekdoten, die sich in Zusammenhang mit den Botschaften auf den Weltmeeren zugetragen haben.

So setzte Kapitän Gustav Tooren gleich zehn Nachrichten per Flaschenpost in der Mitte des Atlantischen Ozeans im Februar 1893 aus, ein wenig nördlich des Äquators. Zwei von ihnen wurden mehrere hundert Tage später gefunden, aber erstaunlicherweise weit voneinander entfernt. Die eine landete an der Küste Afrikas, die andere in Nicaragua. War es nun der Wind oder der Strom, der die Flaschen antrieb? Was sich für die Rekonstruktion der Meeresströmungen als rätselhafte Anomalie darstellte, repräsentiert auf geradezu unheimliche Weise ganz andere Strömungen, schreibt Struck. Fügt man nämlich beide Kurse zusammen, ergibt das genau die berühmte »middle passage«, auf der jahrhundertlang Männer, Frauen und Kinder in die Neue Welt verschleppt worden sind.

Wolfgang Struck lässt die Leserinnen und Leser in den Kosmos der unkonventionellen maritimen Postzustellung eintauchen. Dazu zeigt er eine kleine Bildauswahl jener Nachrichten aus den Alben der Deutschen Seewarte. Zur Rekonstruktion der Historie hinter den Datenblättern gesellen sich Essays, welche Rolle etwa die Flaschenpost bei Schriftstellern über die Jahrhunderte oder bei der Übermittlung letzter Botschaften vor dem Untergang eines Schiffs



Wolfgang Struck

Flaschenpost

Ferne Botschaften, frühe Vermessungen und ein legendäres Experiment

Verlag: mare, Hamburg 2022

€ 36,-

eingenommen hat. So vermittelt der Autor ein Gefühl dafür, welche kleine, aber feine Rolle die Flaschenpost für die Anfänge der Ozeanografie bedeutet hat, die sich zugleich zu einer Art internationalem Kulturgut der Menschheit entwickelte.

Im Zeitalter der mit Lichtgeschwindigkeiten übermittelten Botschaften hat die Flaschenpost ihren Charme keineswegs eingebüßt, da kann sie noch so unzuverlässig sein. Ihre Faszination liegt im Erratischen, obwohl die Meeresströmungen heute vergleichsweise gut erforscht sind. Es bleibt immer spannend, wo eine irgendwo in den Weiten des Meeres ausgesetzte Botschaft das Ende ihrer Reise findet.

Thorsten Naeser ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

Im Zweifel für den Angeklagten?

Der Ägyptologe Michael Höveler-Müller reevaluiert einen jahrtausendealten Fall von Neid, Intrigen und übler Nachrede unter den Erschaffern der Königsgräber des Neuen Reichs.

► 3200 Jahre sind eine lange Zeit, um Gerechtigkeit zu erfahren. Michael Höveler-Müller, Sachbuchautor und ehemaliger Leiter des Ägyptischen Museums in Bonn, hat sich dennoch darangemacht, sie einem möglicherweise fälschlich Verurteilten zukommen zu lassen: Pa-neb, Vorarbeiter in den Königsgräbern von Ägyptens 19. Dynastie im Tal der Könige bei Theben.

Eine dreiseitige Anklageschrift auf Papyrus, adressiert an den Wesir Hori (den höchsten Beamten des ägyptischen Staats), erwarb ein britischer Kolonialbeamter im 19. Jahrhundert. Darin werden Pa-neb schwere Vergehen zur Last gelegt, darunter Grabraub, Erpressung, Bestechung von Staatsbeamten sowie Gewaltverbrechen. Die Sekundärliteratur beschreibt den Vorarbeiter dementsprechend meist als üblen Schurken. Es wurde sogar die These aufgestellt, der Arm des Gesetzes habe ihn letztlich doch erreicht und er sei hingerichtet worden. Michael Höveler-Müllers neues Werk bietet einen neuen, weit differenzierteren Blick auf den Fall Pa-neb, in dem er nicht nur den anklagenden Text selbst, sondern auch die historischen Begleitumstände für ein breites Publikum allgemein verständlich aufarbeitet.

Zu Unrecht verurteilt?

Das erste von drei Kapiteln des Buchs führt das Publikum an Ort und Zeit des Geschehens heran. Der Autor verliert sich hier leider in weitschweifigen Erläuterungen der begleitenden Umstände, etwa der Bedeutung von Theben-West für den Totenkult des Neuen Reichs, der politischen Quere-

len in der Thronnachfolge der Pharaonen Merenptah und Sethos II. sowie des täglichen Lebens in Deir el-Medina. Das alles liest sich zwar recht flüssig und interessant, stellt jedoch keinen klaren Bezug zum Thema des Buchs, der angestrebten Entlastung des Vorarbeiters Pa-neb, her.

Auf die »W-Fragen« reduziert könnte man sagen: Das erste Drittel des Buchs beschäftigt sich ausführlich mit dem »Wo« und »Wann« des Falls, während das »Wer« (Pa-neb) und »Was« (die gegen ihn vorgebrachten, womöglich falschen Anschuldigungen) nur beiläufig erwähnt werden. Eine klare Vorstellung des Falls hätte dem Werk gut getan. Für ein Buch, das einen frischen Blick auf die Geschichte verspricht, könnte die historische Einführung so auch in fast jeder populärwissenschaftlichen Geschichte Altägyptens seit den 1960er Jahren stehen. Mithin ergibt sich aus dem ersten Kapitel zunächst kein direkter Mehrwert, da die Relevanz für das Thema nicht deutlich wird.

Im zweiten und dritten Kapitel macht sich der Autor jedoch ans Eingemachte, nämlich die Neuübersetzung des »Papyrus Salt 124« (benannt nach Henry Salt, dem britischen Generalkonsul in Ägypten, der das Stück Anfang des 19. Jahrhunderts kaufte). Jener Text enthält die Anschuldigungen gegen Pa-neb. Ab hier wird das Buch tatsächlich richtig spannend, denn es bietet die Möglichkeit, sich ein eigenes Bild über die Quellenlage zum Fall Pa-neb und die Verbrechen, die ihm vorgeworfen wurden, zu machen. Höveler-Müller stellt die Indizien aus dem Papyrusdokument und anderen kontemporären Schriftzeugnissen vor. Nun erklärt sich endlich auch die Relevanz der ausführlich beschriebenen politischen Wirren in der Regierungszeit Sethos' II. Wer sich noch nicht eingehend mit dem Ende der 19. Dynastie befasst hat, muss erst einmal zurückblättern, um den Erläuterungen folgen zu können.

Schließlich ergibt sich aus den Hinweisen ein Bild von Pa-neb, das nicht ganz dem in der Sekundärliteratur entspricht. Er mag eine streitbare

Persönlichkeit gewesen sein und zeitweise politisch auf der »falschen Seite« (also der letztlich unterlegenen) gestanden haben – aber der Erzverbrecher, als der er dargestellt wird, war er wohl nicht. Der Autor macht außerdem klar, welche der Anschuldigungen aus dem ursprünglichen Text und welche aus dem ständigen Abschreiben älterer Übersetzungen stammen: eine Erinnerung, dass Papier wie Papyrus geduldig ist.

Das Buch ist für ein breites Publikum interessant. Es beleuchtet, welche voreiligen Schlüsse in der Archäologie und Geschichtsschreibung gezogen wurden und bisweilen bis heute überdauert haben. Der Schreibstil ist gut zu lesen – und nicht zuletzt ist auch der Fall selbst interessant: ein Indizienprozess mit Gerüchten, Intrigen, Neid und übler Nachrede. Um die Leserschaft von Anfang an zu fesseln, wäre allerdings ein besserer Aufbau des Werks nötig gewesen.

Luise Loges arbeitet als Wissenschaftsjournalistin sowie Übersetzerin und promoviert derzeit im Fach Vorderasiatische Archäologie in Glasgow, Schottland.



Michael Höveler-Müller
Tatort: Tal der Könige

Verlag: Nünnerich-Asmus
€ 20,-

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **07**
16.02.
2023

GEOPHYSIK
Wie Glasfaserleitungen bei der Erdbebenfrühwarnung helfen
Seismometer erkennen Bodenbewegungen, Glasfasern können das noch besser. Mit ihnen lassen sich Ort und Stärke von Erdbeben schnell ermitteln – und das sehr genau.

VOGELGRIPPE H5N1
Auf tödlichem Erfolgskurs

MUKOVISZIDOSE
»Ich traue mich jetzt das erste Mal, in die Zukunft zu blicken«

» Richard Wagner: Das Heiligtum der Opernfantasten
» Acht Länder rotten Tropenkrankheiten aus
» Erdbeben in Türkei und Syrien hat Gelände langfristig verändert
» Eine Brücke zwischen Quantenchips geschlagen

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

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

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

