

Spektrum

der Wissenschaft

Zeit in der Quanten- mechanik

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

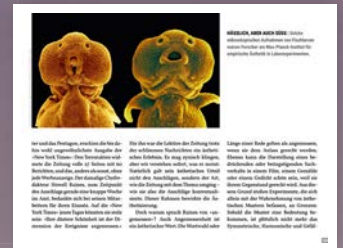
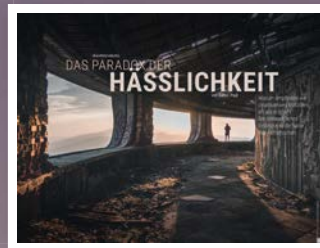
ASTEROIDEN Eine Raumsonde bringt Proben zur Erde
KLIMAWANDEL Wie intensiv verstärkt er Extremwetter?
ÖKOLOGIE Warum selbst Raubtiere den Menschen fürchten



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)

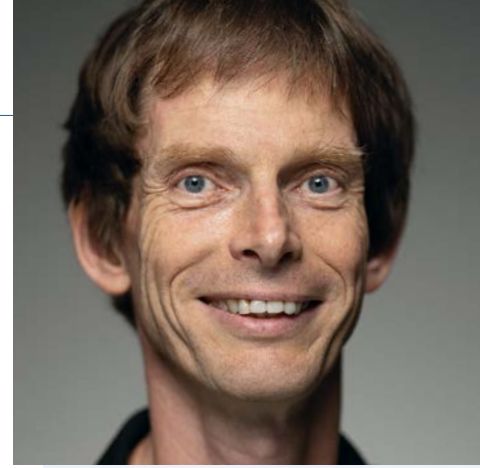
Wer ist schuld?

Es ist Mitte Juli, und es ist – wieder einmal – seit Wochen zu warm und zu trocken. Jedenfalls für Mitteleuropa im Vergleich zu früheren langjährigen Durchschnittswerten. Auch der letzte Winter fiel ein weiteres Mal sehr mild aus, so dass im Garten neben den Oleander- und Zitronenpflanzen sogar die Dahlienknollen problemlos überlebt haben, die ich im Herbst aus Bequemlichkeit im Boden gelassen hatte, weil mir die Blüten nicht besonders gefielen. Im Frühjahr keimte eine Weile die Hoff-

nung, dass der Trend dieses Jahr eine Verschnaufpause einlegen könnte, aber seit Pfingsten ist sie in der überwiegend sengenden Sonne wieder vertrocknet.

Die konkreten Folgen des Klimawandels sind also unstrittig und werden uns allen fast täglich vor Augen geführt, sollte man meinen. Dennoch hört man immer wieder Stimmen, dass alternative Erklärungen für die sich häufenden Wetterextreme nicht genügend berücksichtigt würden – sei es aus ideologischen, politischen oder anderen Gründen. Wie kann man also herausfinden, warum ein bestimmtes Wetter zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort genau so ist und nicht anders?

Das ist das Thema der so genannten Attributions- oder Zuordnungsfor-schung, abgeleitet vom lateinischen »attribuere« für zuteilen, zuweisen. Ihr Ziel ist es, einem außergewöhnlichen Wetterphänomen die wahrscheinlichste Ursache zuzuordnen. Dabei handelt es sich um eine sehr junge Wissenschaftsdisziplin, die in den letzten Jahren rasch den Kinderschuhen entwachsen ist. Denn noch vor einem guten Jahrzehnt waren die zu Grunde liegenden Computermodelle sowie die Methoden und das Wissen um die Zusammenhänge noch nicht zuverlässig genug, um hier belastbare Aussagen zu treffen (siehe S. 42).



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Das hat sich rasant geändert: Inzwischen können Fachleute zu einem Extremereignis wie einer Hitzewelle oder Sturzflut mitunter schon fast in Echtzeit angeben, um wie viel wahrscheinlicher es durch den Klimawandel geworden ist, und damit auch, ob dieser als wesentliche Ursache betrachtet werden kann. Das liefert Richtlinien für die Politik und kann sogar juristische Auswirkungen haben.

Um den Klimawandel und die dadurch verursachten Wetterextreme zu begrenzen, sind unter anderem industrielle Unternehmen gefordert, etwa indem sie ihre Herstellungsprozesse konsequent auf minimale CO₂-Freisetzung hin optimieren oder umstellen. Im dritten und letzten Teil unserer Serie zu diesem Thema beschreibt meine Kollegin Verena Tang ab S. 56, welchen Beitrag die chemische Industrie dazu liefern kann.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihr

In dieser Ausgabe

Asia Murphy

Mit automatischen Kameras beobachtet die Ökologin das Leben wilder Tiere. Ab S. 28 erklärt sie, welche Folgen es hat, wenn selbst Großkatzen sich vor Menschen fürchten.



Friederike Otto

Die Klimawissenschaftlerin sucht nach den konkreten Ursachen für einzelne Extremwetterereignisse. Wie das helfen kann, künftige Katastrophen zu verhindern oder zu lindern, erzählt sie im Interview ab S. 51.



MARISY THIBESDOTTIR

Lydéric Bocquet (links), Alessandro Siria

Indem die beiden Physiker die quantenmechanischen Eigenschaften von Flüssigkeiten auf der Mikroebene untersuchen, wollen sie den Bau von effizienten Osmosekraftwerken ermöglichen (ab S. 70).



- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM

TITELTHEMA

12 **Ein neues Konzept der Zeit**

SERIE: QUANTENZEIT (TEIL 1) Veränderte Regeln könnten die Quantentheorie mit dem expandierenden Universum in Einklang bringen.

Von Charlie Wood

FORSCHUNG AKTUELL

- 20 **Die Kupferzeitfürstin von Sevilla**
Kein Mann, sondern eine Frau: Peptide verraten das Geschlecht menschlicher Überreste.
- 22 **Mehr als nur ein Gummiband**
Die erstaunlichen Eigenschaften von Kollagen.
- 25 **Stern verschluckt Planeten**
Strahlung belegt das Ende eines Riesenplaneten.

IMPRESSUM

SPRINGER'S EINWÜRFE

- 27 **Die beste Medizin**
Armut ist ein eminentes Gesundheitsrisiko.

VERHALTENSFORSCHUNG

- 28 **Ökologie der Angst**
Fast alle Tiere fürchten den Menschen – sogar die an der Spitze der Nahrungskette stehenden Räuber
Das hat weit reichende ökologische Folgen.
Von Asia Murphy

MEDIZIN

- 36 **Siegeszug der CAR-T-Zellen**
Künstlich veränderte Immunzellen bringen die Krebsmedizin entscheidend voran.
Von Heidi Ledford

ATTRIBUTIONSFORSCHUNG

- 42 **Warum das Wetter verrücktspielt**
Heute lässt sich treffsicher und rasch ermitteln, ob der Klimawandel ein Wetterextrem verstärkt hat.
Von Lois Parshley

TITELBILD:
ZFFOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

INTERVIEW

51 **»Wir betrachten nicht nur das Wetter«**

Friederike Otto erklärt, wie Attributionsforschung funktioniert und was sie für aktuelle Politik bedeutet.

55 IM BILD

CO₂-NEUTRALITÄT

56 **Der Umbau der Chemieindustrie**

SERIE: KLIMANEUTRALE INDUSTRIE (TEIL 3) Chemische Fabriken brauchen nicht nur Energie, sondern auch Kohlenstoff. Welche Quellen wird es dazu künftig geben?

Von Verena Tang

PLANETOLOGIE

64 **Lieferdienst aus dem All**

Eine Raumsonde bringt Gesteinsproben von einem Asteroiden auf die Erde.

Von Clara Moskowitz

QUANTENPHYSIK

70 **Überraschende Strömungen in Nanoröhren**

Quanteneffekte könnten den Weg für neue Technologien wie Osmosekraftwerke ebnen.

Von Lydéric Bocquet und Alessandro Siria

80 FUTUR III

82 VORSCHAU

Weitere Beiträge

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

SCHLICHTING!

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

Die Welt ist klein

FREISTETTER

REZENSIONEN



12 Ein neues Konzept der Zeit

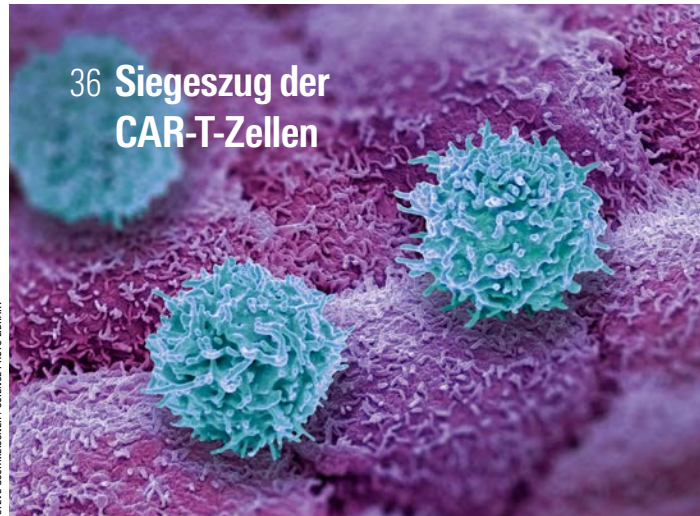
XH4D / GETTY IMAGES / ISTOCK BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ALAMY / NATURE PICTURE LIBRARY / NAVAN KHANOLKAR



28 Ökologie der Angst

STEVE SCHMESSNER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

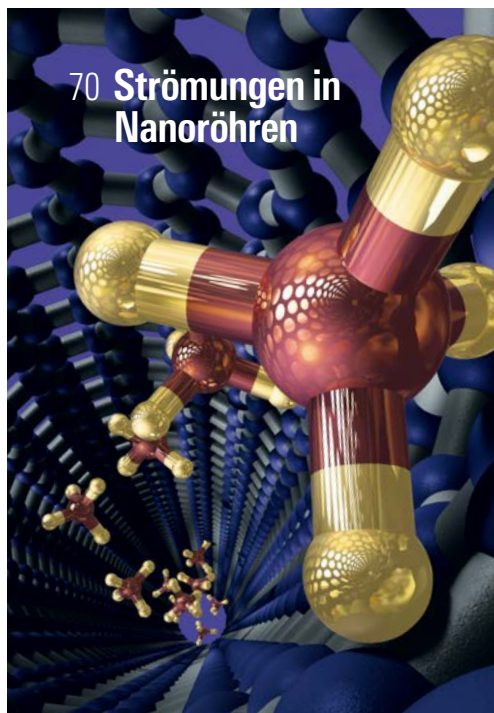


36 Siegeszug der CAR-T-Zellen



64 Gesteinsproben von Asteroiden

NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER / WWW.NASA.GOV/IMAGE-FEATURE/SRIS-REX/BRAS-A-SAMPLE



70 Strömungen in Nanoröhren

THEASS / GETTY IMAGES / ISTOCK



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

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

Galaktische Wiege

Mit einer Entfernung von rund 430 Lichtjahren ist die Rho-Ophiuchi-Wolke eines der nächstgelegenen Sternentstehungsgebiete. Im Vergleich zu anderen stellaren Geburtsstätten ist sie eher klein und beschaulich, was man dieser Infrarotaufnahme des James-Webb-Weltraumteleskops allerdings nicht ansieht. Materieströme, die von jungen Sternen ausgehen, treffen auf das umgebende interstellare Gas und bringen den molekularen Wasserstoff darin zum Leuchten (rot dargestellt).

Die »glühende Grotte« im Bild ist von der Strahlung einer neugeborenen Sonne ausgehöhlt worden. Das hell gefärbte Gas im Innern enthält polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe – eine Klasse von Molekülen auf Kohlenstoffbasis, die im Weltall sehr häufig anzutreffen ist.

Pressemitteilung des JWST-Teams vom 12. Juli 2023



MASA, ESA, STSCL, KLAUS PONTOPPIDAN (STSC), IMAGE PROCESSING: ALYSSA PAGANI (STSC),
(WWW.TELESCOPE.ORG/CONTENTS/MEDIA/IMAGES/2023/23011449193V04069FKK023S10)

ASTRONOMIE

Lebenswichtiger Phosphor auf dem Saturnmond Enceladus

► Der eisbedeckte Saturnmond Enceladus gilt als einer jener Himmelskörper, auf denen die Suche nach außerirdischem Leben am meisten Erfolg verspricht. Eine Forschungsgruppe um Frank Postberg von der Freien Universität Berlin hat jetzt Phosphorverbindungen auf dem Mond nachgewiesen. Diese gelten als wichtige Zutaten des Lebens, wie wir es kennen.

Phosphorverbindungen sind an der Struktur und Funktion biologischer Organismen zentral beteiligt – etwa als Bestandteile der DNA sowie der zellulären Energieversorgung. Allerdings wurden sie noch nie in einem Ozean außerhalb der Erde zweifelsfrei nachgewiesen. Postberg und sein Team haben Daten der Cassini-Raumsonde ausgewertet und kommen zu dem Schluss: Das Meer unter Enceladus' eisiger Kruste scheint Phosphatverbindungen zu enthalten, wie sie auch in irdischen Organismen auftreten. Laut den Analysen könnte das Element dort sogar in 100-mal höheren Konzentrationen vorliegen als in den irdischen Ozeanen.

Enceladus, der sechstgrößte Saturnmond, hat einen Durchmesser von rund 500 Kilometern. Als die NASA-Raumsonde Cassini im Jahr 2004 erstmals Saturn erreichte, waren Fachleute davon überzeugt, der Mond sei ein gefrorener Eisball. Kurz darauf registrierte die Sonde jedoch Fontänen aus Wasserdampf und Eisparkeln, die durch feine Risse in Enceladus' Oberfläche austreten. Sie belegen die Existenz eines Ozeans zwischen dessen Eispanzer und dem felsigen Kern.

Die meisten Phosphate lösen sich in Wasser nur schlecht, was es erschwert, sie in Enceladus' Umgebung nachzuweisen. Doch das Instru-

ment »Cosmic Dust Analyzer« an Bord von Cassini hat zahlreiche Eispartikel analysiert, die aus einem der äußersten Saturnringe und somit großteils von Enceladus stammen (der Mond speist mit seinen Wasserfontänen diesen Ring). Unter 345 Eiskörnern, die das Gerät zwischen 2004 und 2008 untersucht hat, deuten bei neun Partikeln die gemessenen Spektren auf die Existenz von Natriumphosphaten hin. Zusätzliche Laborexperimente lassen vermuten, dass alkalische Lösungen solche Phosphate aus Enceladus' Gesteinskern auswaschen, worauf sie sich im Ozean des Himmelskörpers lösen.

In begleitenden Fachartikeln kritisieren Experten, dass insgesamt nur so wenige phosphathaltige Eiskörner identifizierbar waren und die Ergebnisse deshalb mit relativ großer Unsicherheit behaftet seien. Ungeklärt sei zudem, ob die Phosphate im gesamten Ozean des Saturnmondes vorkommen oder dort nur an bestimmten Stellen hochkonzentriert auftreten. Bestätigen sich die neuen Messergebnisse jedoch, dann steigt die Chance, eines Tages tatsächlich extraterrestrisches Leben auf Enceladus zu entdecken.

Nature 10.1038/s41586-023-05987-9, 2023



EISIGE WELT Bei einem Vorbeiflug im Jahr 2005 nahm die NASA-Raumsonde Cassini hochauflösende Bilder von Enceladus auf.

BIOPHYSIK

Elektrostatik zieht Zecken an

► Wirtstiere fangen sich Zecken üblicherweise ein, indem sie diese im Vorbeigehen von Pflanzen abstreifen. Womöglich gibt es aber noch einen weiteren Weg, auf dem die Parasiten zu ihren Opfern gelangen. Laut einer Forschungsgruppe um Sam England von der University of Bristol nutzen die Blutsauger elektrostatische Anziehungskräfte, um ihren Wirt zu erreichen.

Dass Tiere einschließlich des Menschen sich mitunter elektrostatisch aufladen, weiß jeder, der schon einmal mit Gummisohlen über einen Teppich gelaufen ist und danach eine Türklinke angefasst hat. Auch in der Natur kommt es dazu: Durch Reibung an Gräsern, Sandkörnern und anderen Materialien baut sich elektrische Ladung auf. Sie kann anziehend oder abstoßend auf ein Objekt wirken – je nachdem, ob dieses positiv oder negativ geladen ist.

Die Forscherinnen und Forscher fragten sich: Reicht die elektrische Ladung, die Säugetiere, Vögel und Reptilien in ihrer natürlichen Umge-

bung ansammeln, dafür aus, parasitäre Zecken elektrostatisch anzuziehen? Um das zu testen, brachten sie aufgeladene Kaninchenfelle und andere Naturmaterialien in die Nähe solcher Parasiten und beobachteten, was daraufhin geschah. Tatsächlich wurden die Blutsauger bewegt und durch die Luft katapultiert, und zwar über Entfernungen von mehreren Millimetern bis hin zu wenigen Zentimetern.

England und sein Team nutzten empirische Messwerte zur üblichen elektrostatischen Ladung von Tieren, um Feldstärken zu berechnen, die zwischen Wirtsorganismen und nahe befindlichen Grashalmen mit Zecken darauf wirken. Anschließend platzierten sie Zecken unter einer Elektrode und erhöhten deren Ladung so lange, bis die Parasiten angezogen wurden. Auf diese Weise ermittelten sie die zum Aufsammeln nötige Feldintensität. Sie lag im Bereich der vorher berechneten, typischen Feldstärken zwischen Grashalmen und daran vorbeilaufenden Tieren. Es sei daher wahrscheinlich, dass die Blutsauger in freier Natur dank elektrostatischer Kräfte zumindest kurze Distanzen fliegend überbrücken können, schreiben England & Co. Die Richtung des Felds spiele hierbei nur eine untergeordnete Rolle, weshalb zu vermuten sei, dass der Effekt auf induzierter elektrischer Polarisation beruhe.

Womöglich helfen diese Erkenntnisse dabei, Zecken abzuwehren – etwa mit Hilfe antistatischer Sprays. Darüber hinaus erscheint es möglich, dass noch andere Parasiten, die mangels Mobilität ihr Opfer nicht ohne Weiteres befallen können, elektrostatische Anziehung dazu nutzen.

Current Biology 10.1016/j.cub.2023.06.021, 2023

QUANTENPHYSIK

Frustriertes Quantensystem erzeugt neue Materieform

▶ Bei Versuchen mit speziell angeordneten Halbleitern haben Fachleute eine neue Materieform entdeckt, eine so genannte chirale Bose-Flüssigkeit. Wie das Team um Rui-Rui Du von der Universität Peking berichtet, entsteht die ungewöhnliche Phase in einem »frustrierten« Quantensystem. Die chirale Bose-Flüssigkeit setzt sich aus Elektronen zusammen, die bei sehr tiefen Temperaturen einen geordneten Zustand einnehmen und über lange Strecken hinweg quantenverschränkt sind. Dieser Zustand ist ungewöhnlich stabil; weder Wechselwirkungen mit anderen Teilchen noch zusätzliche

Magnetfelder stören ihn. Das macht die Entdeckung interessant für stabile Datenspeicher in Quantencomputern.

Die Forschungsgruppe bezeichnet ihre Versuchsanordnung als »Frustrationsmaschine« für Elektronen. Sie besteht aus zwei Halbleiterschichten unterschiedlicher Eigenschaften. Die obere Schicht enthält freie Elektronen, die untere beherbergt Elektronen-Leerstellen, die sich wie positiv geladene Teilchen verhalten und mit Elektronen rekombinieren können. Beide vereinigen sich zu Quasiteilchen, so genannten Exzitonen. Das Team konstruierte die Halbleiter so, dass der untere viel mehr Elektronen-Leerstellen enthielt als der obere freie Elektronen. Letztere hatten also die Wahl zwischen jeweils mehreren Leerstellen, mit denen sie sich zu Exzitonen beinahe gleicher Energie vereinen konnten. Dadurch besaß das ganze System keinen klar definierten Grundzustand niedrigster Energie, was Physiker als Frustration bezeichnen.

Unter diesen Bedingungen entsteht die chirale Bose-Flüssigkeit, weil Exzitonen gleicher Energie jeweils in Ensembles wandern, in denen alle Quasiteilchen die gleiche Spin-Orientierung haben. Beim Anlegen eines äußeren Magnetfelds bewegen sich Ensembles unterschiedlicher Spin-Orientierung auseinander, wodurch sich die chirale Bose-Flüssigkeit herausbildet. Diese hat eine Reihe seltsamer Eigenschaften: Ihre Exzitonen sind über recht große Entfernungen hinweg quantenverschränkt und deren gemeinsame Spin-Orientierung erweist sich als sehr stabil gegenüber Störungen.

Neben der zumindest theoretischen Möglichkeit, solche Systeme dereinst in Quantencomputern einzusetzen, sind frustrierte Quantensysteme von grundsätzlichem wissenschaftlichem Interesse. Exotische Materiezustände wie chirale Bose-Flüssigkeiten könnten neue Erkenntnisse darüber liefern, wie Quantenphänomene funktionieren.

Nature 10.1038/s41586-023-06065-w, 2023

IN BEREITSCHAFT Eine Zecke sitzt auf einer Pflanze und wartet darauf, von einem Wirtstier abgestreift oder elektrostatisch von ihm angezogen zu werden.



PALÄOBIOLOGIE

Warmblütiger Riesenhai

Der Riesenhai *Megalodon* (*Otodus megalodon*) lebte zwischen zehn und drei Millionen Jahren vor heute; er wurde vermutlich bis zu 20 Meter lang und bis zu 100 Tonnen schwer. Damit war er der größte bekannte Hai aller Zeiten und eines der gewaltigsten Raubtiere, die je existiert haben. Und er gehörte zu den warmblütigen Tieren, wie eine Forschungsgruppe um Robert Eagle von der University of California in Los Angeles jetzt nachgewiesen hat.

Aus der Isotopenzusammensetzung des Schmelzes verschiedener *Megalodon*-Zähne schließt das Team: *Megalodon* hatte eine Körperkerntemperatur, die rund sieben Grad Celsius über der des umgebenden Wassers lag. Das ist ein größeres Temperaturgefälle als bei anderen Haien und reicht aus, um den Riesen als Warmblüter einzustufen.

Minerale aus der Gruppe der Apatite gehören zu den wichtigsten Bestandteilen von Zähnen. Sie enthalten leichte sowie schwere Kohlen- und Sauerstoffisotope. Deren jeweilige Mengenverhältnisse erlauben es,

auf die Umgebung und Lebensweise des Tiers zurückzuschließen, von dem der Zahn stammt.

Bei den meisten fossilen wie auch heute lebenden Haien stimmt die Körpertemperatur weitgehend mit der des umgebenden Meerwassers überein. Die Isotopenverhältnisse im Apatit spiegeln deshalb jene des Ozeans wider. Bei warmblütigen Tieren hingegen stellen sich wegen der höheren Körpertemperaturen deutlich andere Isotopenverhältnisse ein. Durch Vergleiche mit anderen Haiarten konnten Eagle & Co ermitteln, um wie viel wärmer *Megalodons* Blut gewesen sein muss.

Seine höhere Körperkerntemperatur sorgte vermutlich dafür, dass der riesige Räuber schneller schwimmen und in kältere Gewässer vordringen konnte als andere Haie. Dieser Vorteil stellte aber wohl zugleich einen Nachteil dar, denn um den damit verbundenen intensiven Stoffwechsel aufrechtzuerhalten, dürften die Giganten große Mengen an energiereicher Nahrung benötigt haben – etwa in Form von Kleinwalen. Vor rund 3,5 Millionen Jahren kam es zu einem Klimawandel mit globaler Abkühlung, der weit reichende Folgen für die marinen Ökosysteme hatte. Möglicherweise verknappte er das Nahrungsangebot und leitete damit das Aussterben *Megalodons* ein.

Zum Untergang des Riesenhais könnte eine verschärfte Konkurrenz mit kleineren Arten beigetragen haben, etwa mit Weißen Haien (*Carcharodon carcharias*). Fossilien-

funde legen nahe, dass Weiße Haie vor ungefähr sechs Millionen Jahren in der Pazifikregion entstanden und sich vor vier Millionen Jahren weltweit ausbreiteten. Da sie deutlich kleiner waren als *Megalodon*, benötigten sie weniger Nahrung als dieser und konnten sich mit kleinerer Beute zufriedengeben. Das könnte dazu geführt haben, dass sie ihn im evolutionären Rennen letztlich ausstachen.

PNAS 10.1073/pnas.221815312, 2023

ANTHROPOLOGIE

Bei Wildbeutern jagen auch die Frauen

Eine aktuelle Forschungsstudie nährt weitere Zweifel an der früheren Vorstellung, wonach in Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften die Männer jagen und die Frauen sammeln. Laut den Ergebnissen nehmen in zirka 80 Prozent der untersuchten Wildbeutergruppen auch Frauen an der Jagd teil. Das berichtet eine Arbeitsgruppe um Cara Wall-Scheffler von der University of Washington in Seattle.

Wall-Scheffler und ihr Team haben Berichte und Beobachtungsdaten vorrangig aus den zurückliegenden vier Jahrzehnten untersucht. Dabei ging es um insgesamt 391 Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften. In 63 Berichten sind Jagdpraktiken explizit beschrieben; 50 davon schildern eine Beteiligung von Frauen. Aus ihnen geht hervor, dass Jägerinnen oft flexibler waren als ihre männlichen Pendants, was die Wahl der Methoden und Waffen anbelangt. Sowohl die Jagd mit Hunden ist für sie dokumentiert als auch das Verhalten, beim Erlegen von Tieren die Kinder mitzunehmen. In manchen Gruppen gingen Männer und Frauen gemeinsam auf die Jagd, in anderen Gemeinschaften getrennt. Wenn sich überhaupt eine exklusiv männliche Domäne ausmachen lässt, dann ist es laut den Daten am ehesten das Phänomen, allein oder bei Nacht zu jagen.

MEGABEISSER Der Zahn eines *Megalodons* (links) neben dem eines Weißen Hais vermittelt eine Vorstellung davon, wie gewaltig die Tiere waren.



MARK KOSTICH / GETTY IMAGES / ISTOCK



MICHAEL RUNKEL / ROBERTHARDING / PICTURE ALLIANCE

AUF DER PIRSCH Eine Angehörige der Baka-Pygmäen mit Machete und Netz.

Die untersuchten Wildbeutergruppen entstammten verschiedenen Kontinenten und Kulturen: 19 aus Nordamerika, 6 aus Südamerika, 12 aus Afrika, 15 aus Australien, 5 aus Asien und 6 aus Ozeanien. Nicht immer lagen Informationen dazu vor, ob die Frauen gezielt auf Beutezüge gehen oder während ihrer Streifzüge eher günstige Gelegenheiten ausnutzen, die sich zufällig bieten. Für ersteres Verhalten fand das Team immerhin 36 Belege, für zweiteres lediglich 5. In Gemeinschaften, in denen Jagen die wichtigste Methode der Nahrungsbeschaffung darstellt, beteiligten sich Frauen durchweg aktiv daran. In jeder dritten der

beschriebenen Gruppen erlegten sie dabei auch große Tiere.

Wall-Scheffler & Co weisen darauf hin, was ihre Erkenntnisse für das Interpretieren archäologischer Funde bedeuten. Werde Jagdausrüstung im Grab eines Mannes gefunden, dann werde der Tote für gewöhnlich als Jäger aufgefasst; fände sich solche Ausrüstung dagegen im Grab einer Frau, würde in der Regel nach alternativen Deutungen gesucht. Schon eine Studie aus dem Jahr 2020 war allerdings zu dem Ergebnis gekommen, dass Jagdwaffen in prähistorischen Frauengräbern auf dem amerikanischen Kontinent keine Seltenheit sind. Von 27 Ruhestätten, die Waffen für die Großwildjagd enthielten und bei denen das Geschlecht der bestatteten Person bestimmbar war, ließen sich 11 einer Frau zuordnen.

PLoS One 10.1371/journal.pone.0287101, 2023

TEILCHENFORSCHUNG

Hochenergetische Neutrinos aus der Milchstraße

▶ Mit Hilfe der Detektoranlage »IceCube« in der Antarktis ist es einem internationalen Forscherteam erstmals gelungen, hochenergetische Neutrinos aus unserer Milchstraße nachzuweisen. Zuvor hatte IceCube ausschließlich energiereiche Neutrinos aus fernen Galaxien registriert. Zwar hatten theoretische Überlegungen eine ähnliche Teilchenstrahlung ebenso aus der Milchstraße vorhergesagt, die Suche danach blieb aber bislang vergeblich. Erst moderne Methoden des maschinellen Lernens haben das Signal jetzt in den gesammelten Daten des Detektors sichtbar gemacht, berichtet die »IceCube Collaboration«.

Neutrinos treten mit gewöhnlicher Materie kaum in Wechselwirkung. Um die flüchtigen Elementarteilchen nachzuweisen, sind deshalb große

Mengen aus möglichst reinen Stoffen nötig, die registrierbar mit Neutrinos reagieren können. Ein solcher Stoff ist beispielsweise Wasser, das in der Antarktis massenhaft in gefrorener, ausreichend reiner Form vorliegt. Reagiert ein Neutrino mit einem Wassermolekül, was sehr selten vorkommt, entstehen elektrisch geladene Teilchen, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch das Eis rasen und dabei detektierbares Licht aussenden: die so genannte Tscherenkow-Strahlung.

IceCube besteht im Wesentlichen aus einem riesigen Eiswürfel einer Kantenlänge von einem Kilometer, der insgesamt 5160 Lichtverstärker enthält. Diese fangen das Tscherenkow-Licht ein und bestimmen die Richtung, aus der es eintrifft. Die Fachleute suchen damit nach energiereichen Neutrinos, die bei Sternexplosionen und in der Umgebung extrem massereicher Schwarzer Löcher ferner Galaxien entstehen. Auch unsere Milchstraße bringt, etwa durch Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit Gas und Staub, solche Neutrinos hervor – gemeinsam mit Gammastrahlung. Doch während die Gammastrahlung von Satelliten-Observatorien nachgewiesen werden konnte, blieb die Suche nach den Neutrinos bislang erfolglos.

Mit verbesserten Methoden, die das Messsignal besser vom Hintergrundrauschen trennen, ist es den IceCube-Forschern jetzt gelungen, hochenergetische Neutrinos aus der Milchstraße sichtbar zu machen. Zum einen filterten sie Ereignisse heraus, die vom Südhimmel und damit aus der Richtung des Milchstraßenzentrums stammen. Zum anderen setzten sie ein maßgeblich an der TU Dortmund entwickeltes, auf maschinellem Lernen basierendes Verfahren ein. Damit konnten sie etwa zehnmal mehr Neutrinos für die Auswertung heranziehen als zuvor und deren Herkunftsrichtung besser auflösen. Insgesamt war die Analyse damit dreimal empfindlicher als frühere Suchverfahren.

Science 10.1126/science.adc9818, 2023

QUANTENPHYSIK

Ein neues Konzept der Zeit

Die Vergangenheit und die Zukunft sind in der Quantenmechanik eng miteinander verknüpft. Vielleicht zu eng. Veränderte Regeln könnten die Quantentheorie mit dem expandierenden Universum in Einklang bringen.

» spektrum.de/artikel/2160270



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

ZEITENTWICKLUNG
Physiker überdenken, nach welchen Regeln sich Objekte zeitlich verändern.

SERIE QUANTENZEIT

► TEIL 1: SEPTEMBER 2023

Ein neues Konzept der Zeit

Charlie Wood

TEIL 2: OKTOBER 2023

Eine Quantenversion der Entropie

Philip Ball

TEIL 3: NOVEMBER 2023

Ein Doppelspalt mit Zeitschlitz

Katharina Menne

AUF EINEN BLICK

Gelockertes Zeitverständnis

- 1** Das Prinzip der Unitarität ist tief in der Quantenphysik verankert: Daraus lässt sich unter anderem ableiten, wie sich die Zustände eines Objekts von einem Moment zum nächsten zeitlich entwickeln.
- 2** Untersucht man auf diese Weise unser Universum, das sich immer weiter ausdehnt, stößt man schnell auf Probleme. Der Grund dafür scheint die Unitarität selbst zu sein.
- 3** Physiker haben nun vorgeschlagen, ein abgeschwächtes Prinzip zu verwenden – und so die Quantenmechanik umzuschreiben. Damit würde sie besser zu unserem Kosmos passen.

► Eine tiefe Kluft teilt die moderne Physik. Auf der einen Seite zeichnet die Quantentheorie ein Bild des Mikrokosmos, indem sie subatomare Teilchen mit wellenartigen Eigenschaften verknüpft. Demgegenüber steht die allgemeine Relativitätstheorie, die auf großen Skalen die Schwerkraft auf die Krümmung von Raum und Zeit zurückführt. Seit knapp einem Jahrhundert bemühen sich Physikerinnen und Physiker darum, beide Gebiete miteinander zu verbinden. Sie hoffen auf eine übergeordnete Theorie, die alle Aspekte der Realität grundlegend beschreibt und dabei sowohl die Quantenmechanik als auch die Gravitation einbezieht. Bei der Suche stießen sie aber bisher auf unüberwindbare Hindernisse.

Inzwischen mehren sich Hinweise, dass zumindest ein Teil des Problems in der so genannten Unitarität begründet sein könnte, einem der zentralen Prinzipien der Quantenphysik. Mit Hilfe der Unitarität lässt sich unter anderem ableiten, wie sich Objekte im Lauf der Zeit entwickeln. Die ihr zu Grunde liegenden Annahmen scheinen so offensichtlich, dass sich Fachleute bisher nicht einmal die Mühe machten, sie zu erwähnen – geschweige denn anzuzweifeln. Doch nun beginnen einige Physikerinnen und Physiker die Unitarität in Frage zu stellen.

Im Wesentlichen besagt das Prinzip, dass unter allen möglichen Szenarien stets eines eintritt. Wechselwirken zum Beispiel mehrere Teilchen miteinander, dann muss die Wahrscheinlichkeit der möglichen Ergebnisse zusammengerechnet 100 Prozent betragen. »Die Unitarität ist eine starke Einschränkung, auch wenn sie auf den ersten

Blick trivial erscheinen mag«, erklärt der Theoretiker Yonatan Kahn von der University of Illinois in Urbana-Champaign. Denn die Regel schließt viele Wege dafür aus, wie sich die Zustände von Teilchen zeitlich entwickeln können. Die Unitarität sorgt aber auch dafür, dass alle Prozesse umkehrbar sind: Jeder quantenmechanische Vorgang kann rückwärts ablaufen – zumindest im Prinzip. Diese Richtlinien leiten Fachleute seit Langem bei der Entwicklung der Quantentheorie. Doch was als unverzichtbares Grundgerüst erschien, könnte einer vereinheitlichten Theorie der Quantengravitation entgegenstehen.

Das Hauptproblem besteht darin, dass sich das Universum ausdehnt. Die allgemeine Relativitätstheorie kann diese Expansion gut beschreiben. Aus quantenphysikalischer Sicht ist das aber nicht so einfach, weil die Zukunft des Kosmos völlig anders aussieht als seine Vergangenheit. Die Unitarität, auf der die Quantenmechanik aufbaut, verlangt hingegen eine saubere Symmetrie zwischen Vergangenheitem und Zukünftigem. »Dieses Spannungsfeld gibt viele Rätsel auf, wenn man darüber nachdenkt«, sagt der Quantengravitationstheoretiker Steve Giddings von der University of California in Santa Barbara.

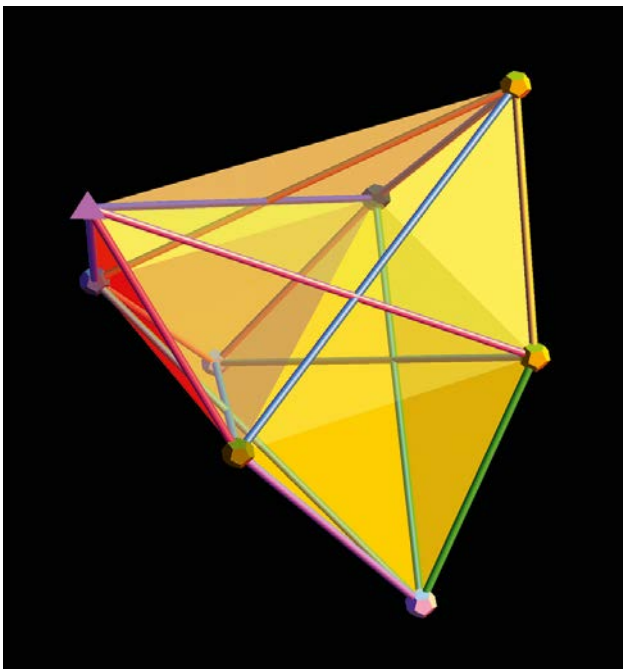
Seit Jahren zerbrechen sich Fachleute den Kopf darüber. Doch Physiker Andrew Strominger und Jordan Cotler von der Harvard University in Cambridge haben möglicherweise einen Weg gefunden, die strengen Anforderungen der Unitarität abzuschwächen, damit die Quantentheorie besser zu unserem expandierenden Kosmos passt. In einer Veröffentlichung vom Januar 2022 argumentierten die beiden Forscher, dass man das Prinzip durch die so genannte Isometrie ersetzen könnte, ohne dabei die wichtigsten Eigenschaften der ursprünglichen Theorie über Bord zu werfen. »Die Unitarität schränkt uns zu sehr ein«, meint Strominger. Der Großteil der Fachwelt scheint dem Vorschlag gegenüber aufgeschlossen, einige andere sind sogar unabhängig voneinander zu ähnlichen Schlussfolgerungen gekommen. Doch die Meinungen unterscheiden sich, ob die Schritte von Strominger und Cotler zu radikal sind – oder ob sie nicht weit genug gehen.

Aus gesundem Menschenverstand folgt direkt Unitarität

In alltagsnahen Situationen sind Ereignisse stets unitär. Wirft man beispielsweise eine Münze, dann wird sie mit Sicherheit Kopf oder Zahl anzeigen; in ganz seltenen Fällen landet sie auf der Kante, wobei dieser Zustand nicht stabil ist. Vor etwa 100 Jahren machten die Pioniere der Quantenmechanik eine überraschende Entdeckung, durch die sich die Unitarität vom gesunden Menschenverstand zu einem wichtigen Prinzip ihrer Theorie erhob. Denn anders als es häufig zu lesen ist, arbeitet die Quantenwelt aus mathematischer Sicht nicht direkt mit Wahrscheinlichkeiten, sondern mit so genannten Amplituden.

Eine Amplitude gibt im Wesentlichen an, wie sehr sich ein Teilchen in einem gewissen Zustand befindet. Sie kann positiv, negativ oder eine imaginäre Zahl (das ist eine Wurzel aus einem negativen Wert) sein und ist nicht

AMPLITUHEDRON Anstatt Streuprozesse mit aufwändigen quantenphysikalischen Berechnungen zu beschreiben, kann man stattdessen ein geometrisches Gebilde untersuchen.



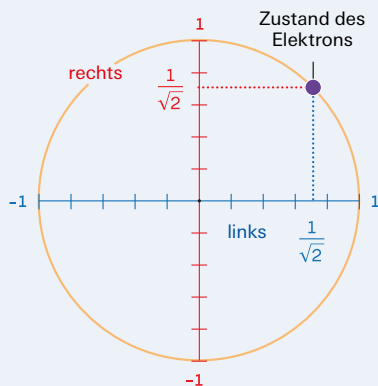
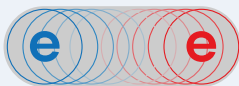
JGM/MESS (COMMONS) WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:AMPLITUHEDRON-0C.PNG / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SYSA/3.0/LEGALCODE)

Unitarität in der Quantenphysik

Das Prinzip der Unitarität besagt, dass sich alle Wahrscheinlichkeiten zu eins addieren. Auch wenn das völlig einleuchtend klingt, schränkt das die Prozesse, die auf Quantenebene ablaufen, erheblich ein.

Hilbertraum

Angenommen, ein Elektron kann sich in einem überlagerten Zustand an zwei verschiedenen Orten aufhalten. Die Amplitude bestimmt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens an der entsprechenden Position.



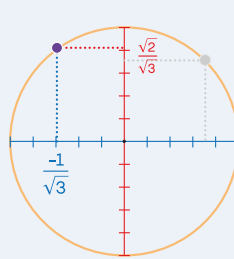
Die beiden Amplituden des Elektrons können auf die Koordinaten eines abstrakten Hilbertraums abgebildet werden.

Die quadrierten Amplituden liefern die Wahrscheinlichkeit, das Elektron an den entsprechenden Orten vorzufinden.

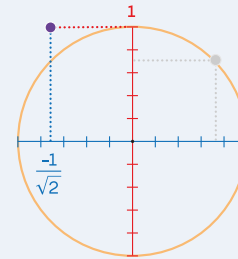
links	rechts
$(\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$	$(\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$
$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ Unitarität erfüllt	

Transformationen im Quantenraum

Die Unitarität erzwingt, dass sich die Zustände auf einem Kreis im Hilbertraum befinden. Damit ist vorgeschrieben, welche Veränderungen möglich sind.



links	rechts
$(\frac{-1}{\sqrt{3}})^2 = \frac{1}{3}$	$(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}})^2 = \frac{2}{3}$
$\frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 1$ Unitarität erfüllt	



links	rechts
$(\frac{-1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$	$1^2 = 1$
$\frac{1}{2} + 1 = 1.5$ Unitarität nicht erfüllt	

MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

direkt messbar. Um herauszufinden, wie wahrscheinlich man ein Objekt in einem bestimmten Zustand beobachten wird, muss man den Betrag der Amplitude quadrieren. Dadurch wird man die imaginären und negativen Anteile los und erhält ein positives Ergebnis, das einer Wahrscheinlichkeit entspricht. Das Unitaritätsprinzip legt fest: Die Summe dieser Wahrscheinlichkeiten (also die Quadrate aller Amplituden) ist gleich eins. Und genau das führt zu Problemen, denn man muss erst die nicht messbaren Amplituden quadrieren, um Ergebnisse zu erhalten, die wir tatsächlich sehen können.

Ändert sich der Zustand eines Teilchens (wenn es etwa durch ein Magnetfeld fliegt oder mit einem anderen Objekt zusammenstößt), variieren auch dessen Amplituden. Um herauszufinden, wie sich ein Partikel zeitlich entwickeln wird oder wie es wechselwirkt, nutzt man stets die Tatsache, dass sich die Summe der quadrierten Amplituden nie verändert. Diese Forderung nach Unitarität führte beispielsweise den britischen Physiker Paul Dirac in den 1920er Jahren zu der nach ihm benannten Gleichung, die unter anderem die Existenz von Antimaterie vorhersagt.

Um sicherzustellen, dass die Quantentheorie der unumstößlich scheinenden Regel folgt, untersuchen Physikerinnen und Physiker, wie sich der Quantenzustand

eines Teilchens im so genannten Hilbertraum bewegt. Dabei handelt es sich um ein abstraktes Konstrukt, das alle möglichen Zustände enthält. Der Zustand eines Teilchens lässt sich mathematisch als Vektor darstellen, der auf den entsprechenden Punkt im Hilbertraum zeigt. Gemäß der Unitarität muss das Betragsquadrat der Amplituden (die Koordinaten des Punkts) eins ergeben. Deshalb haben die Vektoren alle eine Länge von eins.

Will man die Amplituden eines Teilchens – und damit seine Koordinaten – verändern, braucht man Matrizen. Dabei handelt es sich um eine Art Tabelle, die einen Vektor dreht und streckt oder staucht. Das heißt, jeder Prozess, der sich auf den Zustand eines Teilchens auswirkt, lässt sich durch eine Matrix darstellen. Damit die Veränderung dem Prinzip der Unitarität folgt, muss diese eine bestimmte Form haben: Sie ist »unitär«. Eine solche Matrix lässt einen Vektor zwar rotieren, behält aber seine Länge bei. Damit ergibt die Summe der Quadrate der Koordinaten des gedrehten Vektors (der zugehörigen Wahrscheinlichkeiten) weiterhin eins, wie von der Unitarität gefordert.

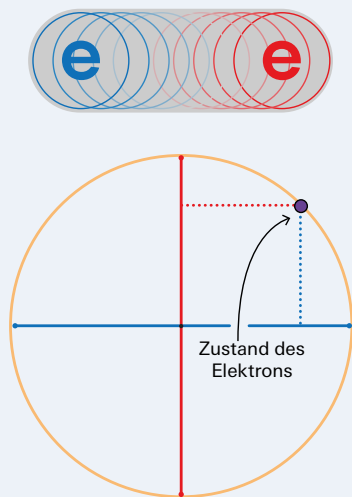
Diese mathematische Beschreibung hat weit reichende Konsequenzen. Kennt man die unitäre Matrix, die der zeitlichen Veränderung eines Teilchens entspricht, kann man den Quantenzustand in die Zukunft oder wieder

Unitarität 2.0: Isometrie

Wenn die Quantenmechanik statt der Unitarität dem Prinzip der Isometrie folgt, dann wächst der Raum aller möglichen Zustände eines Teilchens mit dem expandierenden Universum an.

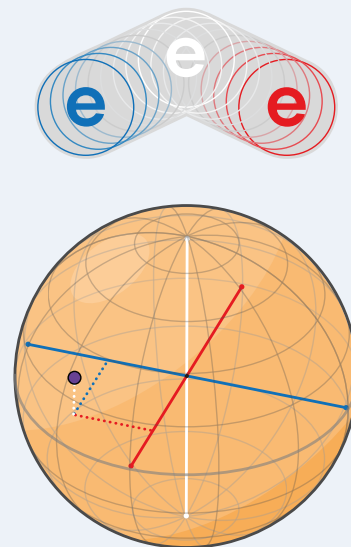
Zwei Möglichkeiten

Zunächst kann sich ein Elektron in einer Überlagerung aus zwei Positionen befinden. Sein Zustand entspricht einem Punkt in einem zweidimensionalen Hilbertraum.



Drei Möglichkeiten

Während weitere Positionen durch die kosmische Ausdehnung möglich werden, gewinnt der Hilbertraum an Dimensionen. Die Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ereignisse summieren sich noch immer zu 100 Prozent.



MERRILL SHEPHERD / QUANTA MAGAZINE, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

zurück in die Vergangenheit transformieren. Auf diese Weise erhält man stets einen zulässigen Zustand im gleichen Hilbertraum. »Die Vergangenheit bestimmt vollständig die Zukunft, und die Zukunft bestimmt vollständig die Vergangenheit«, so Cotler. »Das hängt mit der Aussage zusammen, dass Information weder geschaffen noch zerstört wird.« Und doch scheint diese Grundannahme mit unserem Universum in Konflikt zu geraten.

Seit mehreren Jahrzehnten ist bekannt, dass sich Galaxien immer weiter voneinander entfernen. Für die Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie ist der sich ausdehnende Kosmos eine gültige Lösung. Doch für die Quantenmechanik bringt die Expansion Probleme mit sich. Denn sie bietet den Teilchen zunehmend viele Möglichkeiten, wo sie sich aufhalten und wie sie sich verhalten können. Wenn der Raum wächst, wie kann der Hilbertraum nicht mitwachsen? »Es gibt aktuell definitiv mehr Freiheitsgrade im Universum als in der Vergangenheit«, konstatiert der theoretische Physiker Nima Arkani-Hamed vom Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey. Und auch Strominger bereitet das Sorgen: »Ich bin schon seit vielen Jahren der Meinung, dass das der Elefant im Raum ist.«

Um das Problem zu verdeutlichen, nennt Giddings ein Gedankenexperiment, das in einem expandierenden Universum stattfindet. Man stelle sich den gegenwärtigen Zustand des Kosmos vor und füge ein vermeintlich harmloses Photon hinzu – vielleicht in einem neu geschaffenen Stück Raum auf halbem Weg zwischen uns und der

Andromeda-Galaxie. Der Unitarität zufolge müssten wir in der Lage sein, zu berechnen, wie dieses neue Universum in der Vergangenheit aussah. Aber wenn man dem aktuellen Zustand ein Lichtquant hinzufügt und anschließend zurückspult, führt das zu Problemen. Früher war das All kleiner und somit ebenfalls die Wellenlänge der darin enthaltenen Photonen. Dreht man die Zeit zurück, stellt das zunächst kein Problem dar: Die Wellenlänge der Lichtteilchen schrumpft bis zu dem Moment ihrer Entstehung durch einen subatomaren Prozess (etwa die Verbindung eines Elektron-Positron-Paars). In dem rückwärts abgespielten Szenario verschwindet das Photon plötzlich und verwandelt sich beispielsweise wieder in ein Elektron-Positron-Paar.

Mikroskopische Schwarze Löcher

Das Lichtquant aus Giddings' Gedankenexperiment wurde jedoch nicht durch einen speziellen Prozess erzeugt. Wenn man die Zeit also zurückdreht, wird man es in der theoretischen Beschreibung nicht wieder los. Seine Wellenlänge wird immer kleiner, was zu einer höheren Frequenz und somit auch Energie des Teilchens führt – bis die Energie schließlich so stark angestiegen ist, dass ein Schwarzes Loch entsteht. Giddings' Überlegungen zufolge müssten sich in diesem fiktiven Universum mikroskopisch kleine Schwarze Löcher in Photonen verwandeln. Diese seltsame Konsequenz legt nahe, dass eine naive Verbindung von Unitarität und kosmischer Expansion nicht funktioniert.

Die theoretische Physikerin Bianca Dittrich vom kanadischen Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo ist davon überzeugt, dass man die Unitarität auch aus anderen Gründen in Frage stellen sollte. Während die Quantenmechanik die Zeit als absolute Größe behandelt, bringt die allgemeine Relativitätstheorie das Ticken der Uhren durcheinander. Laut Albert Einstein hängen Zeit- und Längenmessungen vom Beobachter ab – und damit auch von der Position in der Raumzeit. Nimmt eine Person beispielsweise zwei Ereignisse als zeitgleich wahr, können sie sich für jemand anderen nacheinander abspielen. Das verkompliziert die Vorstellung davon, wie sich Zustände von einem Moment zum nächsten entwickeln. »Ich habe mich nie so sehr auf die Unitarität verlassen«, resümiert Dittrich.

Man braucht einen neuen Rahmen, der sowohl die kosmische Expansion als auch den starren mathematischen Formalismus der Quantentheorie berücksichtigt. 2021 wandte sich Strominger daher an Cotler, der nicht nur an Quantengravitationstheorien, sondern auch an der Quanteninformationstheorie forscht. Das Duo stellte fest, dass es in letzterem Gebiet ein inzwischen gut untersuchtes Schema gibt, das nützlich sein könnte: die Quantenfehlerkorrektur, die Informationen aus Quantenzuständen wiederholt in einem größeren System codiert. Vielleicht, so dachten die beiden Physiker, ist der Inhalt des jungen Universums auf ähnliche Weise in der ausgedehnten Form des heutigen Kosmos enthalten.

In ihrer Arbeit von 2022 untersuchen Strominger und Cotler eine neue Klasse von Umwandlungen, so genannte Isometrien, die in der Quantenfehlerkorrektur auftauchen und die Unitarität ersetzen könnten. Isometrische Transformationen ähneln den unitären, besitzen aber etwas mehr Flexibilität – genau das, wonach Physikerinnen und Physiker gesucht hatten.

Angenommen, ein Elektron kann sich an zwei unterschiedlichen Orten aufhalten. Der Zustand des Teilchens ist eine Überlagerung aus diesen beiden Positionen, daher besteht der Hilbertraum aus allen möglichen Kombinationen der dazugehörigen Amplituden. Den ersten Ort kann man sich als x-Koordinate im Raum vorstellen, den zweiten als y-Koordinate. Aus dem Unitaritätsprinzip folgt, dass die Summe der quadrierten Amplituden eins ergibt ($x^2 + y^2 = 1$), man erhält also eine Kreisgleichung. Das heißt, die möglichen Zustände des Teilchens liegen alle auf einem Kreis mit Radius eins im Hilbertraum. Eine unitäre Transformation verschiebt die Amplituden entlang des Kreises. Die Menge der Zustände wird durch Wechselwirkungen und die vergehende Zeit weder erweitert noch verkleinert.

In einer isometrischen Welt könnte sich das Elektron nach einer Transformation auch an einem dritten Ort aufhalten. Der Hilbertraum des Teilchens wächst durch die Isometrie also an, aber auf besondere Weise: Er gewinnt eine weitere Dimension in z-Richtung, ohne die geltenden physikalischen Regeln zu verletzen. Die quadrierte Amplitude nach der Umwandlung ergibt immer noch eins, auch wenn sich der Raum an Möglichkeiten

erweitert hat. Es gilt $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, was der Gleichung einer Kugeloberfläche entspricht. Der ursprüngliche Kreis, auf dem die gültigen Zustände des Elektrons liegen, wird zu einer Kugel, um Mischungen aus allen drei Positionen zu ermöglichen. Die Amplituden nehmen daher zu, jedoch ohne unphysikalische Konsequenzen. »Isometrien sind eine Art Verallgemeinerung der Unitarität«, so Giddings. »Sie behalten die essenziellen Eigenschaften bei.«

Wenn man statt des einfachen Beispiels mit einem einzelnen Teilchen den Zustand des gesamten Universums betrachtet, hat man einen Hilbertraum mit einer unvorstellbaren Anzahl von Dimensionen vor sich. Und diese wachsen mit der Ausdehnung des Raums kontinuierlich an. Das System ist so komplex, dass es unmöglich ist, es theoretisch zu untersuchen.

Deshalb haben sich Strominger und Cotler ein vereinfachtes Modell des expandierenden Universums vorgenommen, um ihre isometrische Theorie zu testen. Sie beschränken sich auf einen Kosmos mit nur einer Raumdimension, der einer Linie mit endlicher Länge entspricht. An deren Ende befindet sich ein Spiegel, der alle ankommenden Wellen reflektiert. Ein solches Modell hat den Vorteil, dass die betreffenden Gleichungen mathematisch exakt lösbar sind. Während der Expansion entfernt sich der Spiegel vom Ursprung der Linie, wodurch der eindimensionale Kosmos an Größe gewinnt. Die beiden Physiker konnten so berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich das vereinfachte Modelluniversum von einer Länge zu einer anderen ausdehnt.

Die Schrödingergleichung erzwingt Unitarität

Für solche Probleme verwendet man in der Quantenmechanik meist die Schrödingergleichung, die vorhersagt, wie sich ein Quantensystem zeitlich entwickelt. Die von der Gleichung beschriebenen Veränderungen sind stets umkehrbar: Sie bildet immer Zustände eines Hilbertraums auf denselben ab. Damit kann man sie nicht auf Modelle anwenden, in denen der Raum der Möglichkeiten anwächst. »Der Hauptzweck der Schrödingergleichung ist es, Unitarität zu erzwingen«, so Arkani-Hamed. Deshalb haben Strominger und Cotler einen anderen Formalismus verwendet, den Richard Feynman entwickelt hat, das so genannte Pfadintegral. Bei dieser Methode berücksichtigt man alle möglichen Pfade im Hilbertraum, die ein Quantensystem von einem Ausgangszustand zu einem Endzustand beschreiten kann. In diesem Rahmen ist es kein Problem, wenn neue Zustände entstehen. Einen derartigen Pfad kann man sich als Verzweigung mit mehreren Endpunkten vorstellen. Strominger und Cotler erhielten durch die Pfadintegralmethode eine Matrix, die das Wachstum ihres eindimensionalen kosmologischen Modells beschreibt. Und wie sich herausstellte, war diese Matrix nicht unitär, sondern isometrisch.

»Wenn man ein expandierendes Universum beschreiben will, funktioniert die Schrödingergleichung in ihrer jetzigen Form einfach nicht«, so Cotler. »Aber in der Feynman-Formulierung klappt alles aus eigenem An-

trieb.« Cotler kommt zu dem Schluss, diese auf Isometrie basierende Form der Quantenmechanik sei »nützlicher, um ein sich ausdehnendes Universum zu verstehen«.

Die Lockerung der Unitarität könnte die Probleme in Giddings' Gedankenexperiment beheben, die ihn und andere Fachleute beunruhigt haben. Möglicherweise verändert eine Quantenphysik, die auf Isometrie basiert, sogar die Art und Weise, wie wir über die Beziehung zwischen Vergangenheit und Zukunft und damit über die Zeit selbst denken.

Um besser zu verstehen, warum Isometrien das Problem lösen, hat Cotler ein weiteres vereinfachtes Modell eines Universums beschrieben. Dieses beginnt in einem Anfangszustand, das einen von zwei möglichen Werten (0 oder 1) annehmen kann. Der Hilbertraum ist anfangs also zweidimensional. Um die Ausdehnung zu beschreiben, stellt Cotler eine isometrische Regel auf: Nach jedem Zeitschritt wandelt sich eine 0 zu der Folge 01 und eine 1 zu 10. Wenn das Universum im Zustand 0 beginnt, wird es sich nach drei aufeinanderfolgenden Schritten zu $0 \rightarrow 01 \rightarrow 0110 \rightarrow 01101001$ ausdehnen, wodurch ein achtdimensionaler Hilbertraum entsteht. Falls der Anfangszustand hingegen 1 ist, entwickelt es sich zu 10010110. Die jeweilige Zahlenfolge erfasst alles, was das Modell des expandierenden Kosmos ausmacht, etwa jede Position der enthaltenen Teilchen. Eine wesentlich längere Folge aus Nullen und Einsen könnte zum Beispiel unser reales Universum beschreiben.

Das vereinfachte kosmologische Modell hat also zu jedem Zeitpunkt zwei mögliche Zustände: einen, der sich aus dem Anfangszustand 0 ergibt, und einen, der aus jenem mit 1 folgt. Die ursprüngliche einstellige Konfiguration wird in einen größeren Zustand »verschlüsselt«. Das ähnelt einer unitären Transformation, da es am Anfang zwei Möglichkeiten gab (0 oder 1) und am Ende ebenfalls (01101001 oder 10010110). Die Isometrie bietet jedoch einen besser geeigneten Rahmen, um das expandierende All und den damit anwachsenden Hilbertraum zu beschreiben.

In diesem Formalismus ist es unmöglich, ein Photon zwischen der Erde und Andromeda hinzuzufügen, was in Giddings' Gedankenexperiment zu Problemen geführt hatte. Angenommen, das Universum befände sich im Zustand 01101001. Wandelt man die erste 0 in eine 1 um (was einer kleinen, lokalen Veränderung wie einem zusätzlichen Photon entspricht), erhält man einen neuen Zustand 11101001, mit einem scheinbar gültigen Satz von Koordinaten im größeren Hilbertraum. Beachtet man aber die isometrische Regel, erkennt man, dass 11101001 keinen Ausgangszustand hat: Das Universum 11101001 hätte niemals aus einer 1 oder 0 entstehen können. »Es gibt einige Konfigurationen in der Zukunft, die nicht mit der Vergangenheit übereinstimmen«, so Cotler. »Es gibt keinen vergangenen Zustand, der sich zu ihnen hätte entwickeln können.«

Giddings hat 2021 ein ähnliches Prinzip vorgeschlagen, um paradoxe Situationen auszuschließen. Sein Ansatz, den er »History matters« nennt, besagt, dass ein be-

stimmter Zustand des Universums nur dann physikalisch möglich ist, wenn er sich rückwärts entwickeln kann, ohne Widersprüche zu erzeugen. »Das war ein langwieriges Rätsel«, sagt er. Strominger und Cotler haben davon ausgehend den Umgang mit der Zeit in der Quantenmechanik grundlegend verändert. Giddings ist der Meinung, dass man ihren Ansatz weiterentwickeln sollte. Das ist auch Dittrichs Einstellung, die vor etwa zehn Jahren zu ähnlichen Erkenntnissen über die Isometrie gelangt war, als sie zusammen mit ihrem Kollegen Philipp Höhn versuchte, ein vereinfachtes Quantengravitationsmodell zu formulieren.

Die Beweise für eine isometrische Regel könnten im Himmel stecken

Die Fachleute hoffen, dass ihre Bemühungen irgendwann zu einer isometrischen Regel führen könnten, der unser Universum folgt – einer komplizierteren Vorschrift als »0 entwickelt sich zu 01«. Eine echte kosmologische Isometrie, so spekuliert Cotler, ließe sich überprüfen, indem man berechnet, welche Muster in der Verteilung der Materie im Kosmos möglich sind und welche nicht, und diese Vorhersagen dann anhand von Beobachtungsdaten überprüft. »Das könnte wirklich nützlich sein«, meint er.

Bis man solche experimentellen Beweise erbringen kann, wird es noch lange dauern. In naher Zukunft muss man sich eher mit Hinweisen aus theoretischen Studien und Gedankenexperimenten begnügen. Diese könnten zeigen, dass die Isometrie dabei hilft, die Ausdehnung des Universums mit der Quantenmechanik in Einklang zu bringen.

Ein weiteres Phänomen, das die Unitarität auf wackelige Füße stellt, sind Schwarze Löcher. Wegen ihrer starken Gravitation kann ihnen in einem gewissen Umkreis nichts mehr entkommen, nicht einmal Licht. Stephen Hawking berechnete 1974, dass Schwarze Löcher langsam mit der Zeit verdampfen und dabei die Quantenzustände von allem auslöschen, was hineingefallen ist. Dass solche Informationen offenbar verloren gehen, verstößt allerdings gegen das Prinzip der Unitarität (das ist das »Informationsparadoxon«).

Wenn die galaktischen Ungetüme aber Hilberträume haben, die sich isometrisch entwickeln, steht man vielleicht vor einem etwas anderen Rätsel als gedacht. »Ich glaube nicht, dass es eine Lösung des Informationsparadoxons geben kann, die das nicht berücksichtigt«, vermutet Strominger.

Indem sie von der Unitarität ablassen, hoffen Fachleute außerdem eine Quantentheorie zu finden, die nicht nur beschreibt, wie der Kosmos wächst, sondern auch, wie alles entstand. »Wir starten mit einem einzelnen Punkt, der sich plötzlich zu einem riesigen Universum entwickelt«, sagt Arkani-Hamed. »Was für eine Art von unitärer Entwicklung soll das sein?« Der Physiker bezweifelt jedoch, dass ein isometrisches Modell alleine weit genug geht. Er ist der Leiter eines Forschungsprogramms, das versucht, sich von vielen

grundlegenden Annahmen der Quantentheorie und der allgemeinen Relativitätstheorie zu lösen – nicht nur von der Unitarität.

Die nächste Theorie könnte eine völlig neue Form annehmen, vermutet Arkani-Hamed. So wie die Quantenmechanik einen klaren Bruch mit den Bewegungsgesetzen von Isaac Newton darstellte. Als Beispiel dafür, wie ein solcher Formalismus aussehen könnte, verweist er auf eine Entdeckung aus dem Jahr 2014, die er zusammen mit seinem damaligen Studenten Jaroslav Trnka gemacht hat: Wenn bestimmte Teilchen kollidieren, entsprechen die Amplituden dem Volumen eines geometrischen Objekts, dem so genannten Amplituhedron (siehe »Amplituhedron« auf S. 14). Wie sie herausfanden, ist es viel einfacher, das Volumen dieses Gebildes zu berechnen, als mit den quantenphysikalischen Standardmethoden mühsam alle Möglichkeiten durchzugehen, wie eine Teilchenkollision von Moment zu Moment ablaufen könnte.

Man braucht zwar keine Unitarität, um das Amplituhedron zu konstruieren, dennoch liefert das Gebilde interessanterweise Antworten, die dem Prinzip gehorchen. Außerdem erfordert das Amplituhedron keine Annahmen darüber, wie sich Teilchen in Raum und Zeit bewegen. Diese rein geometrische Formulierung der Teilchenphysik eröffnet eine neue Perspektive auf unsere Welt – frei von den lieb gewonnenen Prinzipien, die sich derzeit gegenseitig widersprechen. ◀

QUELLEN

Arkani-Hamed, N., Trnka, J.: The Amplituhedron. Journal of High Energy Physics 30, 2014

Cotler, J., Strominger, A.: The universe as a quantum encoder. ArXiv: 2201.11658, 2022

Dittrich, B., Höhn, P.A.: Canonical simplicial gravity. Classical and Quantum Gravity 29, 2012

Giddings, S.B.: Schrödinger evolution of two-dimensional black holes. Journal of High Energy Physics 25, 2021



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Physicists Rewrite a Quantum Rule That Clashes With Our Universe« 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.



Ab Ausgabe
04.23: 3-teilige
Serie »Mensch
und Natur«

Von der Menschwerdung bis in die Neuzeit

Spektrum GESCHICHTE berichtet alle zwei Monate über die großen und kleinen Episoden der Vergangenheit und zeigt, wie Archäologen und Historiker die ungelösten Rätsel der Menschheitsgeschichte entschlüsseln.

Jetzt bestellen und kein Teil der Serie verpassen:

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

service@spektrum.de – Tel. 06221 9126-743



ARCHÄOCHEMIE

Die Kupferzeitfürstin von Sevilla

Unmengen Elfenbein im Grab und ein Dolch aus Bergkristall – ohne Frage, dieser Tote war vor fast 5000 Jahren ein bedeutender Mann gewesen. Nur: Es war gar kein Mann, wie nun eine Peptidanalyse ergab. Die Methode hat das Potenzial, lang gehegte Gewissheiten der Archäologie umzustoßen.

► Von der ägyptischen Königin Hatschepsut bis zu Queen Victoria – es gibt genug historische Belege dafür, dass in der Vergangenheit auch Frauen die höchsten Ämter eines Landes bekleideten. Bei prähistorischen Kulturen, die keine Schriften hinterlassen haben, fällt es hingegen schwerer, die Existenz von Anführerinnen nachzuweisen. Als sicherstes Indiz galt lange Zeit, was Menschen ins Grab gegeben wurde. Lagen neben den Knochen massenweise kunstvolle Artefakte und darunter Waffen, dann war klar: Es war ein Mann und womöglich fürstliche Prominenz. Doch inzwischen gibt es bessere Methoden, um das Geschlecht menschlicher Überreste zu bestimmen – vor allem, wenn Knochen für anatomische oder genetische Analysen zu stark zerfallen sind.

Mit Hilfe einer solchen Methode wurde nun aus einem Mann, den seine Gemeinschaft vor rund 5000 Jahren mit dem größten materiellen Pomp begraben hatte, eine Frau. Wie die Funde nahelegen, war die Verstorbene offenbar gesellschaftlich hochgestellt. Und sie war vielleicht nicht die einzige Frau, die in jener Gemeinschaft der iberischen Kupferzeit eine führende Rolle übernommen hatte.

Ein Team um Marta Cintas Peña und Leonardo García Sanjuán von der Universität Sevilla nutzte dafür die Mittel der Forensik, genauer gesagt die Amelogenin-Analyse. Sie ermöglichen das Geschlecht selbst von jahrtausendealten Toten zu identifizieren. Damit liefert sie Erkenntnisse, die »zusammen mit Methoden wie der Analyse von Isotopen und alter DNA (...) die Erforschung prähistori-

scher Sozialgefüge verändern wird«, sind die Autorinnen und Autoren der Studie überzeugt.

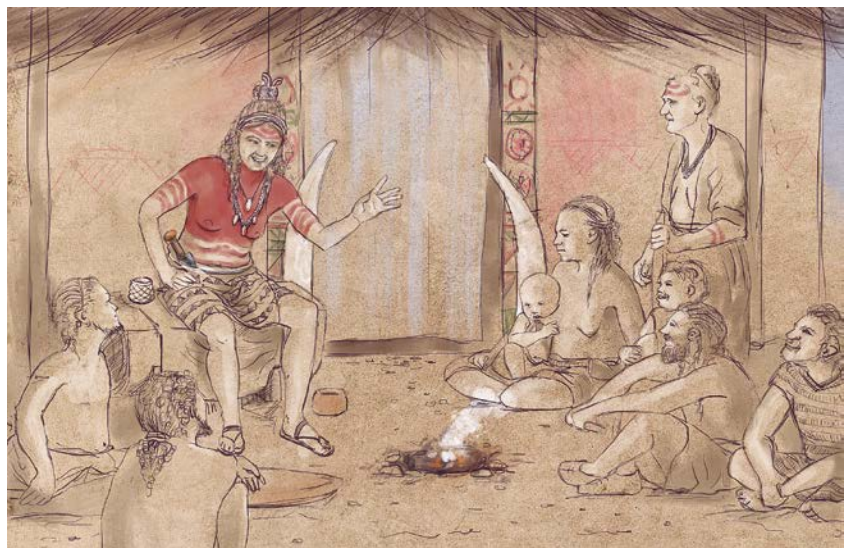
Die Forschergruppe analysierte Zähne einer verstorbenen Person, deren Grabstätte Archäologen 2008 am Fundplatz Valencina de la Concepción unweit der Stadt Sevilla frei gelegt hatten. Dort, im Südwesten Spaniens, entdeckten die Ausgräber die größte bislang bekannte Siedlung der Kupferzeit (Chalkolithikum) auf der Iberischen Halbinsel, also aus der Zeit zwischen 3200 und 2500 v. Chr.

Anders als in den übrigen Gräbern von Valencina, die man im Chalkolithikum immer wieder geöffnet und

darin weitere Verstorbene beigesetzt hatte, war besagtes Grab eine Einzelbestattung, angefüllt mit speziellen Beigaben: zwei Stoßzähnen afrikanischer Elefanten, fast zwei Dutzend Feuersteinklingen – eine davon mit einem Griffknäuf aus Bernstein – und vielen Objekten aus Elfenbein. Einige Zeit nach der Beisetzung legte man weitere Gegenstände in das Grab, die nicht weniger wertvoll waren: einen Dolch aus Bergkristall mit einem Griff und einer Scheide aus Elfenbein, mehr als 50 Feuersteilmesser, zahlreiche Kleinigkeiten aus Elfenbein sowie ein Straußenei.

»Es scheint kaum Zweifel daran zu bestehen, dass der in der Struktur (...) bestattete erwachsene Mann zur aufstrebenden Elite der chalkolithischen Gesellschaft (...) gehörte«, schrieben die Ausgräber 2019 in einem Aufsatz. »Dieses Individuum (...) war in der Lage, Ressourcen für den Bau eines großen megalithi-

WEIBLICHE MACHT Führte vor fast 5000 Jahren eine Frau eine Gemeinschaft auf der Iberischen Halbinsel an? Eine Analyse an menschlichen Zähnen legt diesen Schluss nahe.



MIRIAM LUCÁÑEZ-FRIVARD, CINTAS PEÑA, M. ET AL.: AMELOGENIN PEPTIDE ANALYSES REVEAL FEMALE LEADERSHIP IN COPPER AGE IBERIA (c. 2900–2650 BC). SCIENTIFIC REPORTS 13, 2023, FIG. 5 DOI:10.1038/s41598-023-38863-1 / CC BY 4.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/BY/4.0/LEGALCODE

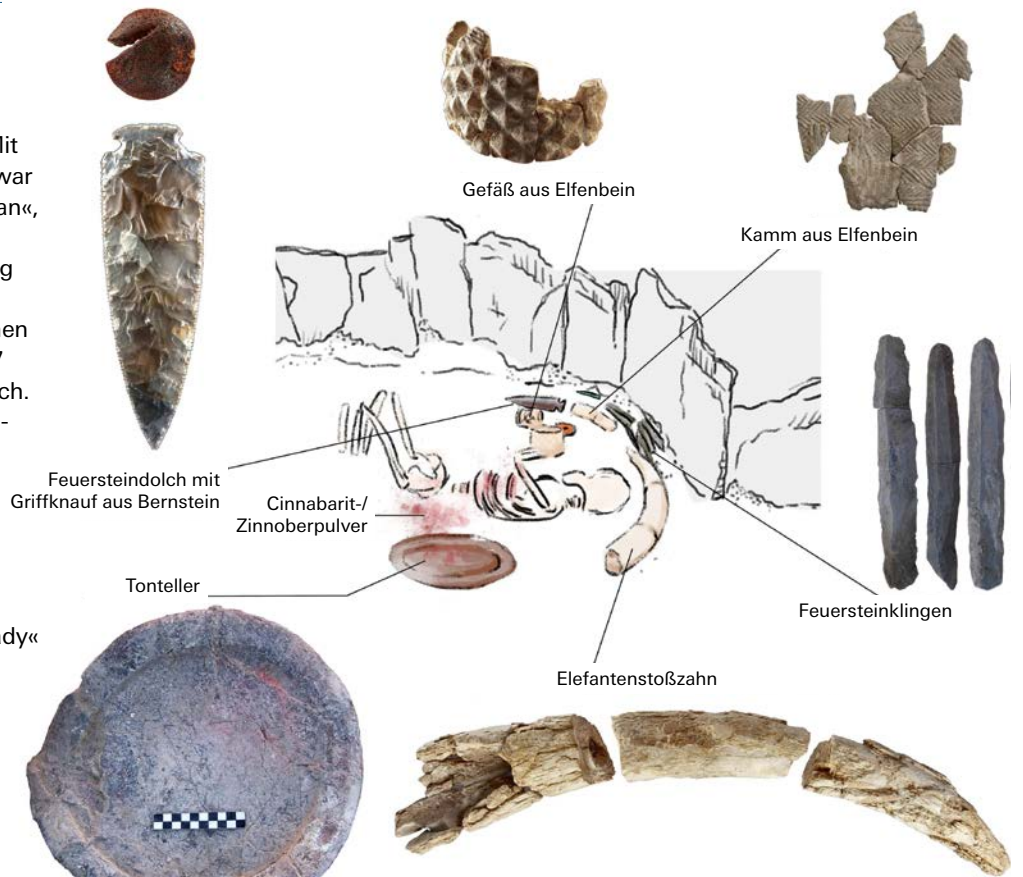
schen Grabes zu mobilisieren, (...) das eine beträchtliche Menge an exotischen Dingen beherbergt.« Mit so vielen Beigaben aus Elfenbein war der Tote ein regelrechter »Ivory Man«, ein Elfenbeinmann.

Eine anatomische Untersuchung aus dem Jahr 2013 hatte ergeben, dass es sich bei dem Toten um einen jungen Mann im Alter zwischen 17 und 25 Jahren handelte. Womöglich. Denn für eine sichere Geschlechtsbestimmung seien die Knochen laut García Sanjuán und seinem Team zu schlecht erhalten. Deshalb führte die Arbeitsgruppe eine Amelogenin-Analyse durch. Das Ergebnis: Es sollte ab sofort von einer »Ivory Lady« die Rede sein.

Mann oder Frau?

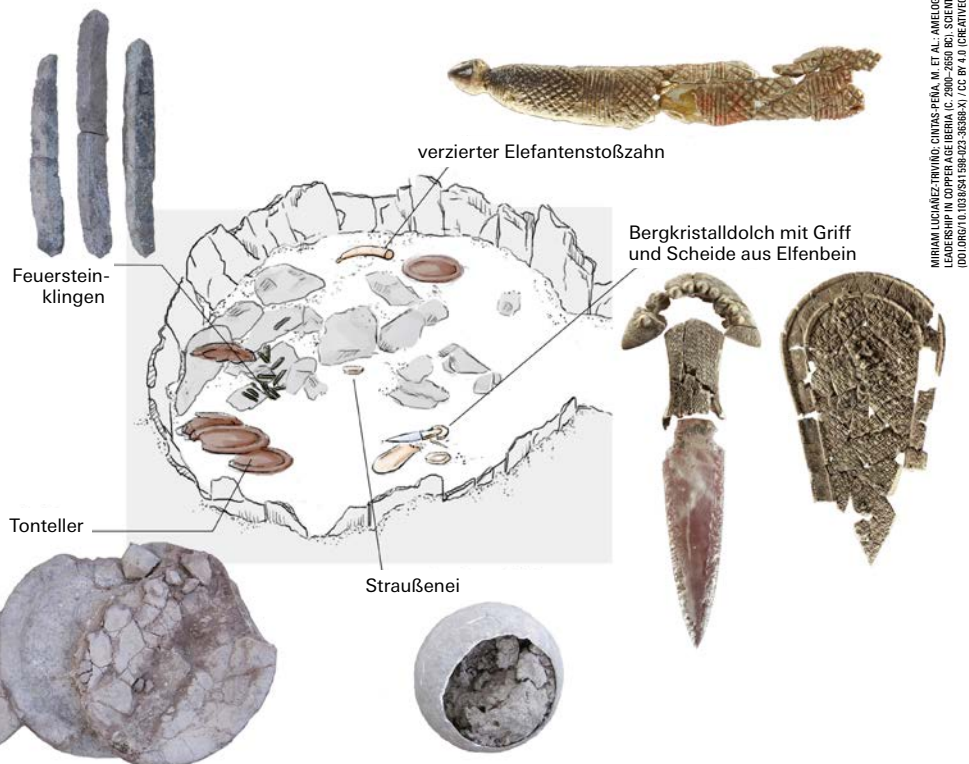
Die Fachleute nahmen dafür eine Probe von einem Zahn der Toten und untersuchten sie mittels der so genannten Flüssigchromatografie mit Massenspektrometrie-Kopplung. Mit dieser Methode wollten sie die für den Zahnschmelz typischen Peptide (Moleküle) des Proteins Amelogenin auslesen. Entscheidend ist dabei, welche Form jener Peptide das Gerät detektiert. Denn das Ergebnis fällt bei Zähnen von Männern anders aus als bei solchen von Frauen. Der Grund: Die Gensequenzen, die das Protein Amelogenin codieren, unterscheiden sich je nach Geschlecht in der Länge. Auf dem X-Chromosom ist der Genabschnitt um sechs Basenpaare kürzer als auf dem Y-Chromosom. Taucht bei der Analyse also kein Nachweis für das Peptid des Y-Chromosoms auf, war der Mensch eine Frau. Gehen sowohl Amel-X- als auch Amel-Y-Peptide ins Netz der Chemiker, handelte es sich um einen Mann.

Fabian Kanz, Forensiker an der Medizinischen Universität Wien und Koautor der Studie, analysierte zunächst einen Schneidezahn. Doch im Ergebnis zeichneten sich nicht genügend Peptide ab.



GRAB DER »IVORY LADY«

Im Inneren der Grablage konnten die Archäologen zwei Phasen unterscheiden: Zuerst war ein Mensch reich bestattet worden (oben), einige Zeit später legte man dann darüber weitere wertvolle Beigaben in der Grabkammer ab (unten).



MIRIAM LUCIANEZ-TRIVINO, CINTAS-PEÑA, M. ET AL.: AMELOGENIN PEPTIDE ANALYSIS REVEAL FEMALE LEADERSHIP IN COPPER AGE BERBA (C. 2900-2650 BC). SCIENTIFIC REPORTS 13, 2023, FIG. 3-4 (DOI:10.1038/s41598-023-36366-x) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/4.0/LEGAL/DDE)

Daher wiederholte Kanz die Untersuchung mit einer Probe eines Backenzahns. Danach stand fest: Die Probe wirft nur Amel-X-Peptide ab. Mit einer Wahrscheinlichkeit, die der einer forensischen DNA-Analyse entspreche, sei das Ergebnis »zu nahezu 100 Prozent« sicher, sagt Kanz auf Anfrage von »Spektrum der Wissenschaft«. Die sterblichen Überreste aus Valencina stammen demnach von einer Frau.

Wenn das Probenmaterial älteren Datums sei, erklärt Nicolas Stewart, Chemiker an der University of Brighton, kann es passieren, dass das Massenspektrometer keine eindeutigen Ergebnisse liefert. Stewart ist Experte für Amelogenin-Analysen, unter anderem an archäologischen Überresten; an der neuen Studie war er nicht beteiligt. Um eine zweifelsfreie Aussage treffen zu können, sei es daher wichtig, genügend Peptide aus einer Probe extrahieren zu können. Zudem sei zu beachten, »dass Amel Y zehnmal weniger exprimiert wird als Amel X«, so der Chemiker. Bei der Analyse würden dann auch deutlich stärkere Signale für letzteres Peptid angezeigt werden als für Amel Y.

Dem Ergebnis von Cintas Peñas, García Sanjuáns und Kanz' Untersuchung stimmt Stewart zu. In dieselbe Kerbe schlägt der Experte Ivan Mikšik von der tschechischen Universität Pardubice, der ebenfalls nicht an der aktuellen Studie mitgearbeitet hat. Auch er hält das Fazit für korrekt, dass vor rund 5000 Jahren kein Mann, sondern eine »Ivory Lady« in Valencina begraben wurde.

Dass Frauen in den iberischen Gemeinschaften der Kupferzeit eine bedeutende Rolle einnahmen, legt ein weiterer Befund aus Valencina nahe. Unweit des Grabes entdeckten die Archäologen eine monumentale Anlage, die sie Montelirio Tholos nannten – als Tholoi werden allgemein runde Bauten bezeichnet. Darin waren zwei oder drei Generationen nach der »Ivory Lady« 25 Menschen beigelegt worden, ebenfalls mit ähnlich wertvollen Beigaben wie die Elfenbeinfrau. Knochenanalysen ergaben, dass 15 Tote aus der Tholos recht sicher Frauen im Alter zwischen 20 und 35 Jahren waren – und offenbar in Verbindung mit der »Ivory Lady« standen: Als sie starben, hatte man der Elfenbeindame weitere Beigaben ins Grab gebracht.

Angesichts der Fundsituation dürfte die »Ivory Lady« eine der mächtigsten Personen der Zeit zwischen 3200 und 2500 v. Chr. auf der gesamten Iberischen Halbinsel gewesen sein – Hinweise auf vergleichbar bedeutende Männer würden bislang hingegen fehlen, schreibt die Arbeitsgruppe um García Sanjuán. Am nächsten stünden ihr die Frauen aus der Montelirio Tholos. »Das legt nahe, dass (damals) Frauen Führungspositionen innehatten«, so das Resümee. ◀

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

QUELLEN

Cintas-Peña, M. et al.: Amelogenin peptide analyses reveal female leadership in Copper Age Iberia (c. 2900–2650 BC). *Scientific Reports* 13, 2023

García Sanjuán, L. et al.: Burial practices and social hierarchisation in Copper Age Iberia: Analysing tomb 10.042 – 10.049 at Valencina. In: Müller, J. et al. (Hg.): *Megaliths, societies, landscapes* 3. Dr. Rudolf Habelt GmbH, 2019

Stewart, N.A. et al.: Sex determination of human remains from peptides in tooth enamel. *PNAS* 114, 2017

BIOPHYSIK

Mehr als nur ein Gummiband

Das Strukturprotein Kollagen ist das häufigste Eiweiß im menschlichen Organismus. Neue Forschungsergebnisse decken unerwartete Eigenschaften auf.

► »Jetzt du!« Die Mutter nimmt kurz Anlauf, dann springt sie ihrem Sohn hinterher ins Wasserbecken. Noch bevor sie eintaucht, spürt sie einen stechenden Schmerz unterhalb der linken Wade. Er kommt von der Achillessehne, wie sich später herausstellt. Gerissen ist sie beim Absprung zum Glück nicht – trotzdem leidet die Mutter anschließend unter wochenlangen Beschwerden beim Gehen.

Sportliche Belastungen, die Kindern keinerlei Probleme bereiten, können im Erwachsenenalter zu Komplikationen führen. Denn während wir altern, nehmen unsere Körpergewebe langsam, aber stetig Schaden. Haut und Knochen, Knorpel und Sehnen erneuern sich immer schleppender und verlieren zunehmend an Stabilität. Oft mit schmerzhaften Folgen – vom Sehnenriss bis zum kaputten Hüftgelenk.

Nach welchen Prinzipien unsere Gewebe altern, wissen wir noch immer nicht genau. Dies zu verstehen, wäre aber nützlich, um entsprechenden Problemen vorzubeugen und sie medizinisch besser behandeln zu können. Überraschenderweise lassen sich manche Mechanismen, die beim altersbedingten Gewebverschleiß eine Rolle spielen, in der Grundlagenforschung an synthetischen Materialien untersuchen.

Zieht man ein Gummiband in die Länge, zerreißen bei jeder Dehnung ein paar chemische Bindungen in den Molekülketten des Gummis, wodurch aus einem lang gestreckten, fadenförmigen Molekül jeweils zwei kürzere werden. An der Bruchstelle bilden sich dabei chemische Radikale, Molekülbestandteile mit ungepaarten Elektronen. Fachleute bezeichnen sie als Mechanoradikale, da sie infolge einer mechanischen Krafteinwirkung entstehen. Radikale sind enorm reaktionsfreudig, hochaggressiv und lösen deshalb unkontrollierbare Stoffumwandlungen aus. Darum schädigen jene im gedehnten Gummiband das umgebende Material mit der Zeit immer stärker. Infolgedessen wird das Band spröde und büßt seine Elastizität und Reißfestigkeit ein.

Materialwissenschaftlern ist die Existenz von Mechanoradikalen seit rund 100 Jahren bekannt. Der deutsche Chemiker Hermann Staudinger, der 1953 für seine Forschungsarbeiten über Polymere den Chemie-Nobelpreis erhielt, hatte diese Spielart der Radikale bereits in den 1930er Jahren in verschiedenen Kunststoffen entdeckt. Mit meiner Arbeitsgruppe untersuche ich, ob sie auch in biologischen Organismen vorkommen. Falls ja: Wie gehen Lebewesen mit solchen aggressiven Stoffen um, wie schützen sie sich davor?

UNTER ZUG Ein Messapparat mit einer eingespannten Tiersehne (Bildmitte) erlaubt es, Kollagen kontrolliert zu belasten.

Mein Team und ich experimentieren mit Kollagen, dem häufigsten Protein im menschlichen Organismus. Die Bindegewebe unseres Körpers bestehen großteils aus diesem Material – seien es Sehnen, Bänder, Knorpel, Blutgefäße oder die Umkleidung der Organe. Das Eiweiß hält uns zusammen, zurrt den Körper in Form, schützt seine Bestandteile und ist dabei ständig mechanischen Belastungen ausgesetzt. Kollagen lässt sich als biologisches Gummiband beschreiben. Ob wir ins Wasser springen, Treppen steigen oder wandern: Das Protein federt die auftretenden Kräfte ab, leitet sie weiter und dämpft einwirkende Stöße. Und es altert. Kollagen eignet sich folglich gut dafür, die Rolle von Mechanoradikalen in Lebewesen zu untersuchen.

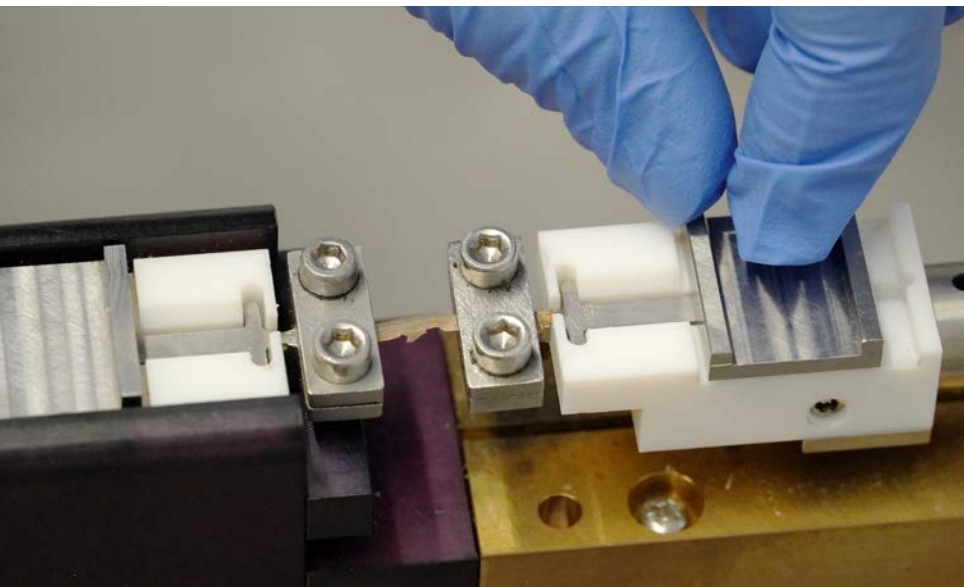
Das Grundprinzip unserer Experimente ist simpel. Wir bringen Achillessehnen, die toten Ratten entnommen wurden, in eine Versuchsausrüstung; dehnen sie auf kontrollierte Weise, um Belastungen zu erzeugen, die jenen im lebenden Organismus gleichen; und ermitteln dann die Menge an Radikalen im Vergleich zu einer nicht belasteten Sehne. Die ungepaarten Elektronen der Radikale besitzen einen elektromagnetischen Spin (eine Art Drehimpuls) und lassen sich deshalb mit Hilfe so genannter Elektronenspinresonanz-Verfahren nachweisen. Dazu wird das Kollagen in ein äußeres Magnetfeld eingebracht und mit Mikrowellen bestrahlt. Die ungepaarten Elektronen in dem Material absorbieren

die Mikrowellen zum Teil, was ein Messgerät registriert. Das erlaubt es, die Mechanoradikale im Kollagen zu detektieren. Aus entsprechenden Experimenten wissen wir, dass im Kollagen einer Achillessehne das Gleiche geschieht wie in einem Gummiband: Mechanische Krafteinwirkungen bringen Radikale hervor, zwar in nur geringen, aber eindeutig bestimmbar Mengen.

Verwickelte Sache

Welche Folgen hat das? Schädigen die reaktionsfreudigen Substanzen das Kollagen und lassen es altern, oder hat die Natur wirksame Schutzmechanismen dagegen hervorgebracht? Um das zu beantworten, müssen wir die Bausteine der Achillessehne unter die Lupe nehmen: die einzelnen Kollagenmoleküle. Sie sind winzig klein – rund einen millionstel Meter lang und einen milliardstel Meter dick. Je drei davon wickeln sich umeinander und bringen so eine dreifache Helixstruktur hervor, eine so genannte Tripelhelix. Einwirkende mechanische Kräfte verteilen sich gleichmäßig auf alle drei Stränge dieser Struktur. Zahlreiche Tripelhelices lagern sich dicht gepackt und parallel orientiert aneinander und vernetzen sich: Am Anfang und am Ende jeder Helix bilden sich Querverstrebungen zu den Nachbarn. In Summe ergibt das ein dichtes Netzwerk aus Kollagensträngen, aus dem unsere Sehnen, Bänder und Knorpel bestehen.

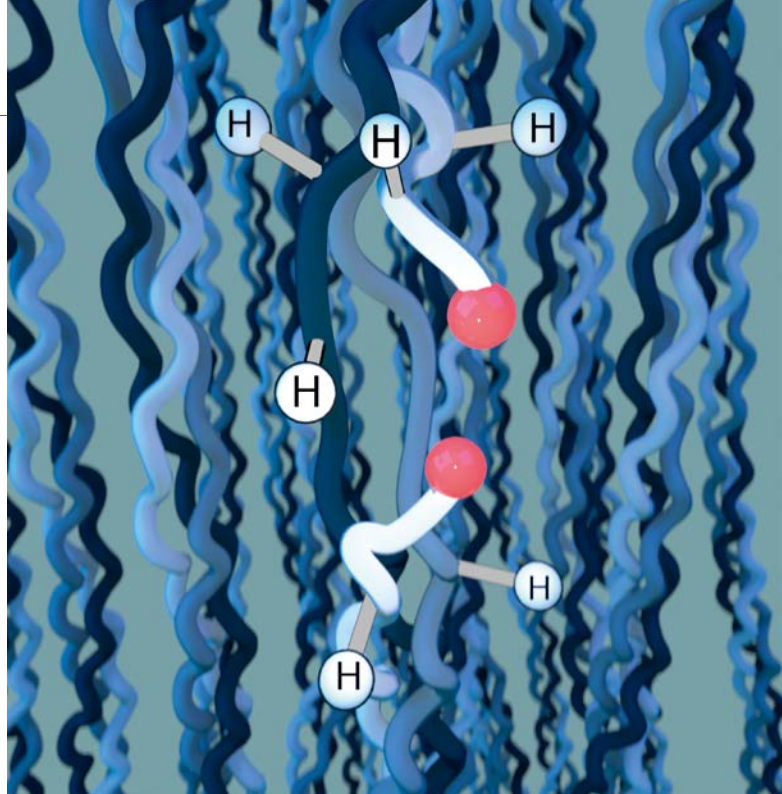
Wo innerhalb des Kollagens Bindungen reißen und Radikale entstehen, lässt sich experimentell nur schwer herausfinden. Uns fehlen momentan die Methoden, um die Bruchstellen genau zu lokalisieren. Doch in Computersimulationen ist es möglich, die Kollagenstruktur Atom für Atom nachzubauen und einer virtuellen Zugbelastung auszusetzen. So können wir analysieren, wie sich die außen angelegte mechanische Kraft im Molekülgerüst verteilt und wo Bindungsbrüche am wahrscheinlichsten auftreten. Bei solchen Simulationen der Proteinstruktur mitsamt dem umgebenden Wasser kommen



einige Millionen Atome zusammen. Das bedeutet einen hohen Rechenaufwand, den nur Supercomputer bewältigen können – selbst wenn sich das Modell auf wenige Dutzend Kollagenmoleküle beschränkt.

Wegen der begrenzten Computerkapazitäten bekommen wir in unseren Simulationen nur einen schmalen Einblick ins Geschehen. Aber das genügt bereits, um wichtige Schlüsse zu ziehen. Ein völlig unerwartetes Ergebnis der Untersuchungen lautet, dass Kollagen spezifische Schwachstellen hat. Sie liegen in den Querverbindungen zwischen den Helices. Manche der Streben haben zwei Arme, von denen einer schnell reißt; man könnte ihn die Achillesferse der Achillessehne nennen. Das Erstaunliche daran: Geht dieser Arm entzwei, bleibt der andere intakt und hält die Querverbindung weiter aufrecht. Materialwissenschaftler bezeichnen das als »sacrificial bond«, deutsch »Opferbindung«. Offenbar wendet die Natur hier einen erstaunlichen Kniff an, der im Kunststoffdesign schon länger eingesetzt wird, ohne dass die Designer vom natürlichen Vorbild wussten. Konstruiert man eine Struktur mit Schwachstellen, die als Erste nachgeben, aber für die Integrität des Materials irrelevant sind, dann wirkt das auf das Gesamtgefüge stabilisierend und sorgt für ein Abfedern selbst starker mechanischer Belastungen.

Unsere Untersuchungen hielten sogar eine noch größere Überraschung parat: Kollagen ist mit abschirmenden Substanzen ausgestattet, um Radikale, die beim Reißen von Bindungen entstehen, in Schach zu halten und weiteren Schaden zu verhindern. Wie ein Schutzschild umgeben diese aminosäureähnlichen Verbindungen (in der Fachsprache als Dihydroxyphenylalanine bezeichnet) die Bruchstellen im Kollagen, wo sie neu auftauchende Radikale direkt abfangen. Sie sind innerhalb der Molekülketten offenbar exakt dort eingebaut, wo sie gebraucht werden. Wir fanden heraus, dass sie in ihrer Fähigkeit, Radikale unschädlich zu machen, dem Vitamin C in nichts



HITS / KARL RIEDMILLER

KOLLAGEN besteht aus dicht gepackten, umschlungenen und quervernetzten Molekülsträngen. Reißen Bindungen in dieser Struktur, bilden sich an der Bruchstelle chemische Radikale (rot). Wasserstoffhaltige (»H«) molekulare Substanzen fangen die Radikale ab.

nachstehen. Kollagen ist somit mehr als bloß ein biologisches Gummiband: Es ist ein aktives Material mit spezifisch ablaufenden biochemischen Prozessen.

Nachlassender Schutz

Wahrscheinlich stellt Kollagen so etwas wie eine Drehscheibe dar, die mechanische Stimuli an die Zellen weitergibt. Diese Erkenntnis trägt hoffentlich dazu bei, die Alterung des Bindegewebes in ihren molekularen Details aufzuklären. Es ist anzunehmen, dass der Pool an Radikalfängern im Kollagen das Altern hinauszögert, aber irgendwann erschöpft ist. Vielleicht lassen sich vor dem Hintergrund manche Krankheiten besser verstehen und neue Diagnose- und Therapiemethoden anwenden. Kandidaten hierfür sind entzündliche Prozesse oder Schmerzen infolge mechanischer Überbelastung, ebenso wie Arthritis oder Fibrose.

Als Nächstes möchten wir unsere Experimente und Simulationen, die momentan mit Rattenkollagen ablaufen, auf andere Arten ausweiten, insbesondere auf den Menschen.

Erste Ergebnisse weisen darauf hin, dass *Homo sapiens* sich diesbezüglich kaum von den Nagern unterscheidet. Ob unsere Erkenntnisse ermöglichen, die eine oder andere Hüftgelenkoperation beziehungsweise manchen Achillessehnenriss zu vermeiden, werden wir hoffentlich in wenigen Jahrzehnten wissen. ◀

Frauke Gräter arbeitet als Professorin für Molekulare Biomechanik an der Universität Heidelberg und leitet die Gruppe »Molecular Biomechanics« am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS).

QUELLEN

Kurth, M. et al.: DOPA residues endow collagen with radical scavenging capacity. *Angewandte Chemie International Edition* e202216610, 2023

Rennekamp, B. et al.: Collagen breaks at weak sacrificial bonds taming its mechanoradicals. *Nature Communications* 14, 2023

Staudinger, H., Heuer, W.: Über hochpolymere Verbindungen, 93. Mitteil.: Über das Zerreißen der Faden-Moleküle des Polystyrols. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft* 67, 1934

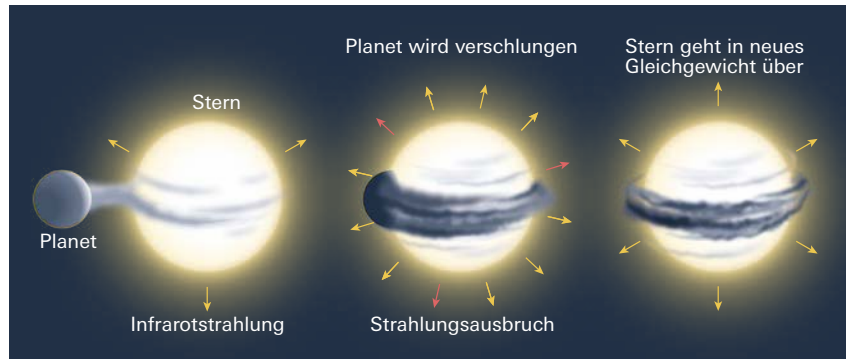
Stern verschluckt Planeten

Die Beobachtung eines ungewöhnlichen Strahlungsausbruchs zeigt erstmals, wie ein Stern einen ihm zu nahe gekommenen Riesenplaneten verschlungen hat.

Es gibt seit Langem Theorien dazu, was passiert, wenn Sterne Planeten verschlingen. Allerdings wurde ein solcher Vorgang noch nie direkt beobachtet – bis jetzt. In einer Veröffentlichung vom Mai 2023 berichtet ein Team um Kishalay De vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge von einer Reihe rätselhafter Beobachtungen. Nach Ansicht von De sind sie darauf zurückzuführen, dass ein Stern einen Riesenplaneten zerrissen hat.

Die Astronominnen und Astronomen beobachteten einen Strahlungsausbruch im Bereich des sichtbaren Lichts. Das Ereignis mit der Bezeichnung ZTF SLRN-2020 dauerte etwa zehn Tage an und wurde anschließend im Lauf von etwa sechs Monaten immer schwächer. Der Beginn fiel mit einer Infrarotemission zusammen, die noch lange nach dem Abklingen des optischen Lichts anhielt. Eine Analyse der Strahlung zeigte eine kontinuierliche Emission bei rötlichen Frequenzen, das heißt, die Farben in diesem Teil des Spektrums gingen fließend ineinander über. Allerdings gab es bei einzelnen Wellenlängen charakteristische Intensitätseinbrüche, die sich auf die Absorption durch bestimmte Atome und Moleküle zurückführen lassen. Diese Informationen halfen der Forschungsgruppe dabei, die genaue Art des astronomischen Ereignisses zu bestimmen, das hinter dem Phänomen stand.

In unserer Galaxie gibt es viele Arten kurzlebiger Strahlungsereignisse, so genannte Transienten. Deswegen verglichen die Fachleute



ENDE EINES RIESEN Die Verschmelzung sorgte für einen kurzen Strahlungsausbruch.

ZTF SLRN-2020 zunächst mit Transienten, die als Zwergnovae und klassische Novae bekannt sind und häufig in der Milchstraße beobachtet werden. Solche Ereignisse treten auf, wenn ein Weißer Zwerg Wasserstoff von einem nahen Begleitstern an sich zieht und in Form einer »Akkretionsscheibe« um sich sammelt. Das Material lagert sich dann als Schicht auf der Oberfläche des Weißen Zwergs ab, wodurch eine Kernfusionsreaktion ausgelöst wird, die wiederum eine helle Eruption verursacht. Die Eigenschaften von ZTF SLRN-2020 unterschieden sich jedoch von denen, die man bei Licht von einer Fusionsreaktion erwarten würde. So enthielt das Spektrum keine Emissionslinien durch einzelne Atome.

Andere typische Transienten in der Milchstraße sind Ausbrüche von heißem Gas, die im Röntgenbereich strahlen. Das Spektrum von ZTF SLRN-2020 zeigt aber keine entsprechenden Emissionslinien. Daraus schloss De, dass das Ereignis nicht mit den hohen Temperaturen in einer Akkretionsscheibe verbunden sein konnte, wie sie rund um kompakte Objekte wie Schwarze Löcher oder Neutronensterne herrschen.

Hingegen schien der Ausbruch einer »Roten Nova« zu ähneln. Das sind rötlich erscheinende astronomische Objekte, die eine langsam verblassende Infrarotstrahlung ausstrahlen. Es gibt Hypothesen, laut denen sich Rote Novae auf die Verschmelzung zweier Sterne zurückführen lassen. ZTF SLRN-2020 erschien zunächst als rotes Objekt, dessen rote Wellenlängen im Lauf der Abstrahlung immer ausgeprägter wurden. Das Verhalten sowie die molekularen Absorptionslinien in seinem Spektrum erinnern an eine Rote Nova, das heißt, womöglich standen am Anfang des Ereignisses zwei sich vereinigende Himmelskörper. Jedoch war die Leuchtkraft von ZTF SLRN-2020 viel geringer als bei anderen Roten Novae. Vermutlich war also ein Objekt beteiligt, das kleiner als ein Stern ist.

Zerstörerisch nahe

Vor dem Ereignis zeigten hochauflösende Bilder an derselben Stelle eine schwach leuchtende Quelle, wohl einen sonnenähnlichen Stern. Aus der Helligkeit in Abhängigkeit von der Zeit und aus Beobachtungsdaten vor dem Ausbruch schloss das Team, dass die Masse des fusionierenden Begleiters etwa der von Jupiter entsprach, vielleicht auch der des deutlich leichteren Neptuns. Damit zeichnete sich die Geschichte des

Ereignisses allmählich ab: Ein Riesenplanet hatte sich zu sehr seinem Mutterstern genähert. Bereits vor dem Ausbruch waren beide eine Zeit lang miteinander in intensive Wechselwirkung getreten. Die Beobachtung von Staub und Gas aus der Zeit vor dem Ausbruch legt nahe, dass diese Phase etwa sechs bis zwölf Jahre dauerte.

Im Vergleich zu einer typischen Verschmelzung zweier Sterne wirkten der Ausbruch und die Menge des ausgestoßenen Materials von ZTF SLRN-2020 weniger imposant. Außerdem änderte sich der Radius des Sterns dabei nicht wesentlich. Somit war das anschließende Abklingen der Infrarotemission wohl ein Zeichen der Rückkehr des Sterns in ein hydrodynamisches und thermisches Gleichgewicht. Die geringe Leuchtkraft des Ereignisses deutet darauf hin, dass die vom Stern freigesetzte Wasserstoffmenge nur einen winzigen Teil seiner Masse ausmachte, etwa ein Hundertstel bis ein Tausendstel. Das führte zu einer relativ konstanten Helligkeit und einer immer röteren Färbung, während die

optische Strahlung zurückging. Die Emission im mittleren Infrarotbereich während jenes Abklingens ist ein Anzeichen für eine warme Hülle aus Staub, die sich langsam abkühlte.

Schon vor dieser Entdeckung galten solche Verschlingungen von Planeten als prinzipiell nachweisbar. Sowohl theoretische Modelle als auch indirekte Beobachtungen ließen das möglich erscheinen. Ob ein Planet letztendlich von seinem Stern verschluckt wird, hängt von bestimmten Voraussetzungen ab. Laut Modellrechnungen können die gravitativen Wechselwirkungen zwischen einem Planeten und anderen Objekten im System (etwaigen weiteren Planeten oder einem Begleitstern) den Planeten langsam in Richtung seines Sterns drücken.

Ebenso können Gezeitenkräfte zwischen einem Stern und einem nahen Planeten Letzteren langsam in den Untergang treiben. Und wenn ein Stern seinen Wasserstoff als Brennstoff im Kern verbraucht hat, schwillt er zu einem »Unterriesen« an und beginnt, die Planeten in engen Umlaufbahnen zu verschlingen.

Andere indirekte Hinweise auf einen geschluckten Planeten geben Sterne, die sich schneller als gewöhnlich drehen und mit gewissen chemischen Elementen angereichert sind. Falls künftige Beobachtungen von ZTF SLRN-2020 ebenfalls derlei Merkmale aufweisen, würde das die Interpretation als ersten direkten Nachweis eines Sterns, der einen Planeten in sich aufgenommen hat, untermauern. Mit solchen Methoden werden sich weitere vergleichbare Ereignisse näher untersuchen und die Mechanismen entschlüsseln lassen, die solche Vorgänge antreiben. ◀

Smadar Naoz ist theoretische Astrophysikerin an der University of California in Los Angeles.

QUELLE

De, K. et al.: An infrared transient from a star engulfing a planet. *Nature* 617, 2023

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 617, S. 38–39, 2023

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 Heinzlmann, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg,

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751,

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzung: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Sebastian Vogel

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 9,80 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 105,60; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 82,10, PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

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

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

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.



Die beste Medizin

Armut ist ein eminentes Gesundheitsrisiko. Gegen die erhöhte Mortalität in Entwicklungsländern bewährt sich eine denkbar simple Sofortmaßnahme.

» spektrum.de/artikel/2160273

Vor 30 Jahren, in der Novemberausgabe 1993, veröffentlichte »Spektrum« einen Artikel unter dem Titel »Lebensstandard und Lebenserwartung«. Darin erinnerte der indische Ökonom Amartya Sen – einige Jahre später mit dem Wirtschafts-Nobelpreis ausgezeichnet – an eine einfache, aber gern unterschätzte Tatsache: Für das echte Wohlbefinden eines Landes ist nicht die Höhe des Bruttoinlandsprodukts ausschlaggebend, sondern zuallererst, ob seine Menschen ein möglichst langes und angenehmes Leben führen.

Lebenserwartung und materieller Lebensstandard klaffen oft gehörig auseinander. In den reichen USA, so Sen, hätten Afroamerikaner geringere Überlebenschancen als Inder im ungleich ärmeren Bundesstaat Kerala, wo dafür Bildung, Gesundheit und Ernährung engagierter gefördert würden.

In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern grassieren Korruption und soziale Ungleichheit. Dort fristen ganze Schichten der Bevölkerung ein Leben in bitterem Elend. Ihr Dasein ist nicht nur härter als das der anderen, sondern überdies kürzer. Chronische Armut ist ein wichtiger – vielleicht der bedeutendste – Krankheitsfaktor.

Als die übliche Langzeittherapie dient internationale Entwicklungshilfe. Sie hat gewisse Nachteile: Sie wirkt langsam, verfehlt oft das Ziel, versandet mitunter in dunklen Kanälen und verschärft oft noch die sozialen Gegensätze. Gibt es eine Maßnahme, die sich schnell und gezielt einsetzen lässt und direkt Wirkung zeigt?

In der Tat haben in den letzten zwei Jahrzehnten mehr als 100 Entwicklungs- und Schwellenländer so genannte Cash-Transfer-Programme aufgelegt, die Bargeld direkt an besonders bedürftige Personen oder Haushalte ausgeben. Das umfasst bedingungslose Transfers, wie sie vor allem im subsaharischen Afrika üblich sind, oder solche, die – wie in Lateinamerika häufiger – an bestimmte Gegenleistungen der Empfänger geknüpft werden.

Im Zuge der Covid-19-Pandemie nahm die Anzahl solcher Programme stark zu. Nach Schätzungen der Weltbank kamen 1,36 Milliarden Menschen – 17 Prozent der Weltbevölkerung – in den Genuss von Bar-

geldtransfers. Nachweislich senken Transfers die Armut, und sie verbessern wirtschaftliche Selbständigkeit, Schulbesuch, Ernährung der Kinder, Gleichberechtigung der Frauen und die Nutzung medizinischer Einrichtungen. Schlägt sich der Erfolg auch in Amartya Sens Hauptkriterium nieder, der Lebenserwartung?

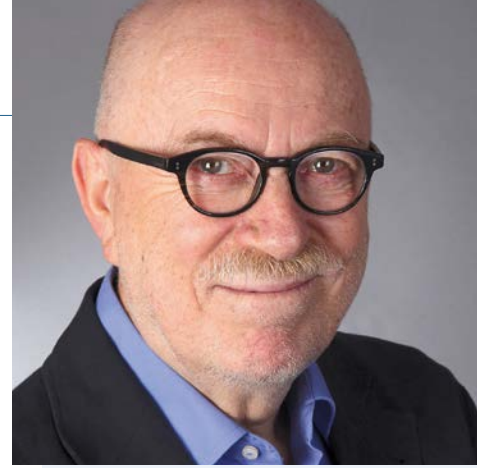
Das hat ein Team um den US-Mediziner Aaron Richterman von der University of Pennsylvania in Philadelphia untersucht. Die Forscher analysierten Daten von mehr als sieben Millionen Menschen zwischen 2000 und 2019, um die Wirkung der Bargeldtransfers auf die Mortalität herauszufinden (*Nature* 618, S.575–582, 2023).

Das Resultat: Die direkten Zahlungen erhöhten insbesondere die Lebenserwartung von Kindern unter fünf Jahren und diejenige von Frauen. Mit der Zeit sank auch die Mortalität der Männer. Es machte kaum einen Unterschied, ob das Bargeldprogramm an Bedingungen geknüpft war oder nicht.

Alle Maßnahmen wirkten sich umso stärker aus, je mehr Menschen sie erfassten, je höher die transferierten Beträge ausfielen und je schlechter der Gesundheitszustand der Bevölkerung schon von Haus aus war.

Bemerkenswert ist, dass die Mortalität der Frauen am stärksten reagierte. Anscheinend profitieren sie am meisten von den Transfers. Offenbar gab es weniger Todesfälle während der Schwangerschaft und kurz nach der Geburt des Kindes. Insofern kommen die Bargeldtransfers jungen Familien besonders zugute – und stellen damit die Weichen für eine gesündere Zukunft.


Die Covid-19-Pandemie hat die Staaten der Erde zu nie da gewesenen Anstrengungen gedrängt, menschliches Leben zu schützen. Die Pest der weltweiten Armut erfordert nicht weniger Initiative.



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

VERHALTENSFORSCHUNG

Ökologie der Angst



ÄNGSTLICHES WESEN? Großkatzen wie dieser Leopard (*Panthera pardus*) brauchen als Spitzenprädatoren eigentlich niemanden zu fürchten. Manche halten sich sogar in der Nähe von Städten auf wie hier in der indischen Metropole Mumbai. Doch die meisten Raubtiere haben Angst vor Menschen.

ALAMY / NATURE PICTURE LIBRARY / NAVAN KHANDKAR

Fast alle Tiere fürchten den Menschen. Sogar die an der Spitze der Nahrungskette stehenden Räuber gehen uns aus dem Weg – mit weit reichenden ökologischen Folgen.

» spektrum.de/artikel/2160276

ALAMY / NATURE PICTURE LIBRARY / NAYAN WHANDUKAR



Asia Murphy ist promovierte Ökologin und hat im Rahmen ihrer Doktorarbeit an der Pennsylvania State University mit Kamerafallen erforscht, wie nordamerikanische Weißwedelhirsche auf Raubtiere reagieren. Zurzeit untersucht sie an der University of California in Santa Cruz, wie sich die Verstädterung auf Räuber-Beute-Beziehungen auswirkt.

Ein einziges Video von einer ferngesteuerten Kamera genügte der Ökologin Justine Smith, die inzwischen an der University of California in Davis forscht, für einen eindrucksvollen Beleg: Auf dramatische Weise demonstrierte es, welche Furcht ein Wesen, das weder Krallen noch Reißzähne oder Gift besitzt, bei einem ausgewachsenen Raubtier auslösen kann.

In einer kalten, regnerischen Nacht im März 2015 zeichnete eine von Smith installierte Kamerafalle in den Santa Cruz Mountains einen Puma auf (siehe »Flucht«). Am Anfang des Videos hört man Frösche quaken, der Puma taucht aus dem Unterholz auf und schaut sich vorsichtig um. Im Bild unten erscheinen die Worte »Frog (control) playback on«. Während die Blätter im Hintergrund im Takt der Regentropfen tanzen, nähert sich die Raubkatze einer undefinierbaren Fleischmasse – vielleicht dem Kadaver eines unglückseligen Maultierhirsches, von dem durch Fraß und Verwesung nur noch der Rumpf übrig geblieben ist. Mit seinen großen Pranken hält der Spitzenprädatoren die Masse fest, während er Fell und Fleisch zerfetzt. Das Video wird schwarz – der Vorhang fällt nach dem ersten Akt des 15 Sekunden langen Schauspiels.

Überstürzter Abgang

Nach einer kurzen Pause kehren im zweiten Akt die Bilder und Geräusche des regennassen Pumas zurück. Wieder nähert er sich seiner Mahlzeit. Als unten im Video die Beschriftung »Human playback on« auftaucht, wird die friedliche Szene durch die Stimme eines älteren Mannes unterbrochen, der nüchtern über einen Gerichtsprozess spricht. Der Puma reagiert blitzschnell mit einem reflexartigen Blick in Richtung des Geräusches; das Tier hat sich bereits für eine Handlungsoption entschieden. Obgleich in Wirklichkeit kein Mensch ihm sein Revier streitig macht – in einer solchen Nacht ist wohl meilenweit niemand zu erwarten –, springt die Großkatze davon, gleitet unter einen Baumstamm und verschwindet nahezu laut-



FLUCHT Diese 2015 per Kamerafalle aufgenommene Videosequenz zeigt, wie sich ein Puma (*Puma concolor*) in den kalifornischen Santa Cruz Mountains an einem Fleischkadaver gütlich tut (links). Als über einen versteckten Lautsprecher eine menschliche Stimme ertönt, schreckt die Großkatze kurz auf (Mitte) und flüchtet (rechts). Das Video ist abrufbar unter spektrum.de/artikel/2160276.

UC SANTA CRUZ, PUMA PROJECT FEEDING STUDY

los. Ein überstürzter Abgang, ausgelöst lediglich durch eine menschliche Stimme.

Wildtiere, selbst die von uns gefürchteten großen Raubkatzen, haben Angst vor uns. Smith hat nicht nur die Furcht dokumentiert; sie konnte zudem zeigen, dass Pumas weit weniger fressen, wenn sie statt Fröschen menschliche Laute hören. Schon seit Jahrzehnten beschäftigen sich Ökologen mit der Rolle der Angst bei der Beziehung zwischen Räuber und Beute wie auch zwischen Spitzenprädatoren und kleineren Beutegreifern, die von Ersteren gejagt werden. In den letzten Jahren hat sich das Interesse allerdings verlagert. Heute gehen wir der Frage nach, wie sich die Angst der Tiere vor Menschen auf verschiedenste Phänomene auswirkt – sei es die Fressrate einzelner Individuen, sei es die Funktionsfähigkeit ganzer Ökosysteme. In einer zunehmend von Menschen beherrschten Welt können Tierschutz und Naturmanagement nur dann funktionieren, wenn sie diese Angst in Rechnung stellen – eine Angst, die lange Zeit unberücksichtigt blieb.

Die Furcht vor Fressfeinden kennen Biologen schon lange. Sie erforschten auch, wie wachsam sich Tiere verhalten und wie sie sich gruppenweise verstecken. Doch erst ab den 1980er und 1990er Jahren begann man damit, Daten darüber zu sammeln, inwieweit sich Individuen der Gefahr bewusst sind, zur Beute zu werden. Demnach versuchen sie aktiv, dieses so genannte Prädationsrisiko zu verringern, was wiederum ähnliche oder sogar größere Auswirkungen nach sich zieht als der direkte Effekt durch einen Beutegreifer. 1999 gaben Joel Brown und seine Kollegen von der University of Illinois in Chicago dem aufkeimenden Fachgebiet einen Namen: Ökologie der Angst.

Dass ein Lebewesen sich davor fürchtet, gefressen zu werden, leuchtet intuitiv ein, doch erst mit dem Konzept einer Angstkologie konnten Fachleute aus der Intuition ein Denkmodell mit logischen – und überraschenden – Schlussfolgerungen entwickeln. Stellen wir uns einmal folgendes Szenario vor: Um nicht als Opfer eines Pumas

AUF EINEN BLICK

Furcht vor dem Menschen

- 1 Tiere versuchen, ihren Fressfeinden möglichst auszuweichen. Daraus resultierende Verhaltensänderungen beeinflussen das gesamte Ökosystem.
- 2 Die meisten Tiere fürchten vor allem den Menschen. Dagegen sind auch Spitzenräuber wie Großkatzen nicht gefeit.
- 3 Selbst auf scheinbar harmlose menschliche Aktivitäten reagieren Tiere empfindlich. Dem muss der Naturschutz Rechnung tragen.



UC SANTA CRUZ, PUMA PROJECT FEEDING STUDY

zu enden, meidet ein Maultierhirsch vielleicht den dichten Wald und begibt sich auf eine Wiese, wo die Raubkatze sich nicht so leicht in einem Hinterhalt verstecken kann. Wenn immer mehr Hirsche aus Sicherheitsgründen das offene Feld dem Wald vorziehen, fressen sie dort auch mehr Pflanzen, und damit verändert sich in beiden Gebieten die Zusammensetzung der Vegetation: Auf den Wiesen gibt es weniger Wildblumen, auf die Bestäuberinsekten angewiesen sind; deshalb sinkt die Zahl der Insekten, von denen sich Frösche und Singvögel ernähren, und das beeinträchtigt wiederum die Beutegreifer, die solche Tiere fressen. Das Innere des Walds wird überwuchert, so dass Vögel, die offenes Unterholz bevorzugen, vertrieben werden. Fehlende Maultierhirsche könnten mehr Eichen sprösslinge heranwachsen lassen, die das Kronendach regenerieren. Wenn auf den Wiesen keine Wildblumen mehr stehen – die vielleicht in einem Nationalpark zur Hauptattraktion gehörten –, bleiben die Touristen aus und mit ihnen die unentbehrlichen Eintrittsgelder.

Wölfe schützen Pflanzen

In der Dekade nach Joel Browns bahnbrechender Arbeit erschien eine Flut an Fachartikeln. Besonderes Augenmerk legten die Wissenschaftler auf Wiedereinbürgerungsprojekte von Wölfen im Yellowstone-Nationalpark (siehe »Spektrum« September 2013, S. 92). Hier gab es zuvor auch andere Beutegreifer, die sich jedoch ökologisch von den Wölfen stark unterschieden. So sind Kojoten zu klein, um Elche oder Bisons zu töten; Pumas erlegen zwar hin und wieder einen Elch, aber die großen Huftiere können den Raubkatzen leicht aus dem Weg gehen, indem sie auf offenen Flächen – unter anderem in den gefährdeten Auengebieten – weiden, die einem Beutegreifer keinen Sichtschutz bieten. Wölfe hingegen jagen nicht aus dem Hinterhalt. Sie hetzen ihre Beute und brauchen dazu offenes Gelände. Außerdem sind sie groß genug – und im Gegensatz zu den einzelgängerischen Pumas auch zahlreich genug –, um einen ausgewachsenen Elch oder Bison zu erwischen. Auf diese Weise können sie den Huftierbestand effektiver unter Kontrolle halten. Wie William Ripple und seine Kollegen von der Oregon State University 2001 nachwiesen, führt allein die Anwesenheit von Wölfen dazu, dass die Elche Auengebiete meiden, woraufhin sich wiederum übermäßig beweidete Pflanzenarten wie Weiden oder Espen regenerieren.

Nicht nur Wölfe versetzen die Beutetiere in Angst und Schrecken, und es geschieht auch nicht nur im Yellowstone-Nationalpark. Wie sich in Studien zeigte, verzichten

Kängururatten in New Mexico in besonders mond hellen Nächten auf die Nahrungssuche – sie fürchten die tödliche Gefahr durch von oben zuschlagende Eulen. In Kenia meiden Zebras tagsüber die von Löwen aufgesuchten Waldstücke, ruhen sich dort dafür nachts aus. Fischschwärme in Norwegens Gewässern weichen mit zunehmender Tageslänge in dunklere Tiefen aus, um sich besser vor größeren Raubfischen zu verbergen. Weil alle Tierarten über Nahrungsketten miteinander verbunden sind, wirken sich Verhaltensänderungen einer Spezies auf das Verhalten einer anderen aus, die wiederum eine dritte beeinflusst, und so weiter, so dass sich der Wandel ausbreitet wie die ringförmigen Wellen nach einem Steinwurf auf einem stillen Teich. Da Furcht augenblicklich einsetzt, ermöglicht sie im Vergleich zu den langsameren Evolutionsprozessen deutlich schnellere Anpassungsreaktionen: Dieselben Kängururatten, die in einer Nacht aus

GEFAHR VON OBEN Aus gutem Grund gehen Kängururatten (*Dipodomys*) in einer mond hellen Nacht nicht auf Nahrungssuche. Denn dann besteht das Risiko, in den Fängen einer Schleiereule (*Tyto alba*) zu enden.

ALAMY / PROF. NUSSBAUMER PHOTOGRAPHY / ROLF NUSSBAUMER



Angst vor dem hellen Mondlicht in ihrem Bau bleiben, gehen in der nächsten vielleicht munter auf Futtersuche, wenn Wolken zufällig das Licht abschirmen und sie so vor ihren natürlichen Feinden verbergen.

Es dauerte nicht lange, bis das Konzept der Ökologie der Angst nicht nur auf die Räuber-Beute-, sondern auch auf die Räuber-Räuber-Beziehung angewandt wurde: Kleinere Fleischfresser wie Füchse, Wildhunde oder Ginsterkatzen verlagern offenbar ihre Aktivitäten in andere Lebensräume, wenn sich größere, für sie gefährliche Raubtiere wie Kojoten, Löwen oder Luchse in der Nähe aufhalten. Die Wölfe des Yellowstone-Nationalparks brachten die Elch- und Bisonbestände auf ein gesundes Niveau und trugen damit möglicherweise zum Schutz der Auengebiete bei. Bevor es dort Wölfe gab, konnten Kojoten Gabelböcke erlegen, die schnellsten Landsäugetiere der westlichen Hemisphäre und einzigen Überlebenden einer sonst im Pleistozän ausgestorbenen Huftierfamilie. Wie sich in einer 2008 veröffentlichten Studie von Kim Berger und ihren Kollegen von der Utah State University herausstellte, reduzierten die Wölfe die Zahl der Kojoten, indem sie diese töteten oder aus bestimmten Gebieten vertrieben, und sorgten so dafür, dass sich die zuvor dezimierten Populationen der Gabelböcke wieder erholten.

Aus Angst agiert ein eigentlich tagaktives Tier plötzlich nur noch nachts. Aus Angst gesellt sich ein typischer Einzelgänger zu Artgenossen. Aus Angst verlässt ein Tier ein nahrungsreiches Waldstück und sucht sein Futter woanders, weil es dort sicherer ist. Angst markiert das Hintergrundrauschen des ständigen und manchmal sich verstärkenden Stresses, der die Größe von Kaulquappen zu Gunsten einer besseren Fluchtmöglichkeit begrenzt, der dazu führt, dass Eiderenten seltener schlüpfen oder dass Heuschrecken zusammen mit Spinnen mit zugeklebten Mundwerkzeugen ebenso häufig sterben wie solche

in Käfigen, in denen sie gefressen werden können. Die Angst zieht sich durch die Nahrungskette und endet erst bei den scharfen Zähnen oder Klauen des dominierenden Beutegreifers, der an der Spitze der ökologischen Pyramide steht. Jeder hat Angst vorm bösen Wolf, dieser aber fürchtet niemanden.

Das hatten wir jedenfalls gedacht. Im vergangenen Jahrzehnt ergab jedoch eine Flut neuer Forschungsergebnisse, dass dem nicht so ist.

Tiere, selbst große Beutegreifer, haben allen Grund, sich vor Menschen zu fürchten. Spitzenprädatoren wurden rund um den Globus immer gejagt – aus Angst, aus Rache oder zu zeremoniellen Zwecken. Aber erst während des europäischen Imperialismus entwickelte sich die Jagd zu einem gezielten, flächendeckenden Vernichtungsfeldzug. Im 17. Jahrhundert waren die meisten großen Beutegreifer im überwiegenden Teil Europas ausgerottet; die ersten Siedler in Nordamerika registrierten daher mit einer gewissen Sorge, dass es in der Neuen Welt Pumas, Grizzlybären, Wölfe und gelegentlich sogar Jaguare gab.

Die »Zähmung« der Wildnis

»Der ganze Kontinent war eine einzige, düstere Wildnis, ein Tummelplatz für Wölfe, Bären und noch wildere Menschen«, notierte 1756 John Adams (1735–1826), einer der Gründerväter der USA, in seinem Tagebuch. Wölfe, Bären und Pumas bedrohten nicht nur das Leben der Siedler, sondern auch deren Lebensunterhalt als Bauern und Freizeitjäger. Offensichtlich hatte die Vorsehung bestimmt, dass es die Aufgabe der Menschen sei, die unzivilisierte Wildnis Nordamerikas zu »zähmen«. »Große Raubtiere, die Vieh und Wild zerstören, haben in unserer fortschreitenden Zivilisation keinen Platz mehr«, meinte 1925 der US-amerikanische Biologe Edward Goldman (1873–1946) vom Bureau of Biological Survey. Also machten sich die europäischen Siedler ans Werk: Sie vernichte-

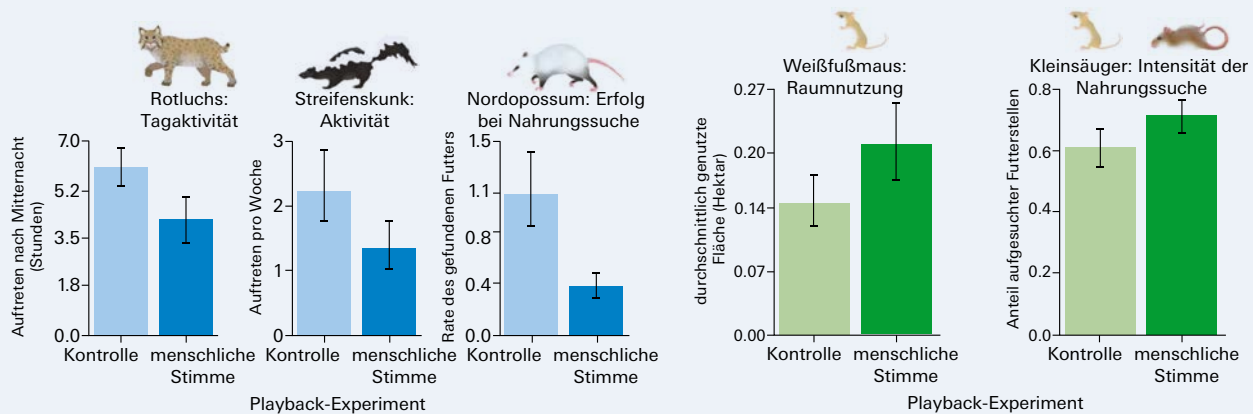
Von Angst geprägte Landschaft

Angst beeinflusst das Landschaftsbild eines Ökosystems. Ohne menschliche Anwesenheit streifen verschiedene Beutegreifer auf größeren Flächen umher, während kleinere Tiere diese Gebiete eher meiden (links). Die Gegenwart von Menschen vertreibt die Raubtiere, so dass nun deren Beutetiere hier nahezu ungestört auf Nahrungssuche gehen können (rechts). Diese Kleinsäuger verteilen wiederum Pflanzensamen – der Mensch kann damit lediglich durch seine Präsenz das Vegetationsbild einer Landschaft indirekt verändern.



Verhaltensänderungen durch menschliche Anwesenheit

Tiere passen ihr Verhalten an, wenn Menschen in der Nähe sind: Pumas (*Puma concolor*) meiden Orte, an denen menschliche Stimmen aus einem Lautsprecher zu hören sind, und agieren dort vorsichtiger (oben). Rotluchse (*Lynx rufus*) werden nachaktiv, Streifen-skunks (*Mephitis mephitis*) treten seltener auf, und Nordopossums (*Didelphis virginiana*) gehen hier kaum noch auf Nahrungssuche (unten links). Nagetiere wie Weißfußmäuse (*Peromyscus*) dagegen nutzen die Veränderung und suchen ihr Futter häufiger an Orten mit menschlicher Aktivität (unten rechts).



ten die bewaldeten Rückzugsgebiete der gefährlichen Störenfriede und fingen, schossen oder vergifteten jeden Spitzenprädatoren, dessen sie habhaft werden konnten. Sie machten ihre Sache so gut, dass die Flächen, auf denen die großen Raubtiere vorkamen, fast um die Hälfte schrumpften, wie 2004 eine maßgebliche Studie von Andrea Laliberte von der New Mexico State University und William Ripple ergab.

Die Ausrottung der großen Beutegreifer blieb nicht auf die Vereinigten Staaten beschränkt. Nach Angaben des Umwelthistorikers Mahesh Rangarajan wurde in Indien während der britischen Kolonialherrschaft innerhalb von 50 Jahren das 50-Fache der heutigen weltweiten Tigerpopulation getötet. Der Beutelwolf, ein Fleisch fressendes Beutetier, wurde Anfang des 20. Jahrhunderts in Australien, Tasmanien und Neuguinea durch die Jagd ausgerottet. Simon Dures von der Zoological Society of London und seine Kollegen konnten 2019 durch DNA-Analysen von Museumsstücken und heutigen Exemplaren nachweisen, dass die Löwenbestände in Botswana, Namibia, Sambia und Simbabwe seit Ende des 19. Jahrhunderts während der britischen und deutschen Kolonialherrschaft plötzlich sehr rasch abnahmen, was zu einem Popula-

tionsflaschenhals führte. Heute bleibt den weltweit 17 Arten von Spitzenprädatoren im Schnitt weniger als die Hälfte ihrer ehemaligen Verbreitungsgebiete.

Ob sich die Ausrottung der Großräuber auf das Erbgut auswirkte oder ob die Tiere auf die heutigen Nachstellungen reagieren – der Effekt ist der gleiche: Auf der ganzen Welt fürchten sie den Menschen. Und diese Angst hat weit reichende Folgen (siehe »Von Angst geprägte Landschaft«).

Heutzutage jagen Eurasische Luchse in der Schweiz in der Nähe von Dörfern – allerdings nur nach Einbruch der Dunkelheit, wenn die Leute schlafen. In ähnlichen Ökosystemen in ganz Europa werden Rehe stärker tagaktiv, weil sie so den nachts jagenden Luchsen aus dem Weg gehen können. Dieses Verhalten bringt sie jedoch in die Schusslinie der menschlichen Jäger, die ja tagsüber unterwegs sind. Nachdem der Wolfbestand in der kanadischen Provinz Alberta aus der Luft dezimiert wurde, gingen die Tiere zu nächtlicher Aktivität über, entkoppelten sich damit aber von ihrer Beute, den Weißwedelhirschen. Dadurch drangen Letztere in weitere Ökosysteme vor, womit sie die ohnehin bedrohten Waldkaribus unter heftigen Konkurrenzdruck setzten.

Huftiere wie Weißwedelhirsche und Elche schützen ihren Nachwuchs, indem sie ihn in der Nähe von Häusern und Dörfern zur Welt bringen; damit nutzen sie die Angst der lokalen Spitzenräuber vor Menschen aus und schaffen für die Nachkommen eine sicherere Umgebung zum Aufwachsen. Um nicht von Menschen überrascht zu werden, verbringen Pumas in Kalifornien möglichst wenig Zeit an einem einzelnen erlegten Beutetier und töten deshalb in Ballungsräumen mehr Hirsche als unter geringerer Stressbelastung. Die Hirsche ihrerseits suchen trotz des wachsenden Drucks auf ihre Population ihre Nahrung näher an Häusern und Wohnvierteln, um den Pumas zu entgehen. Durch ihren Verbiss sorgen sie dafür, dass solche Habitatränder zunehmend verbuschen und schwieriger zu durchdringen sind.

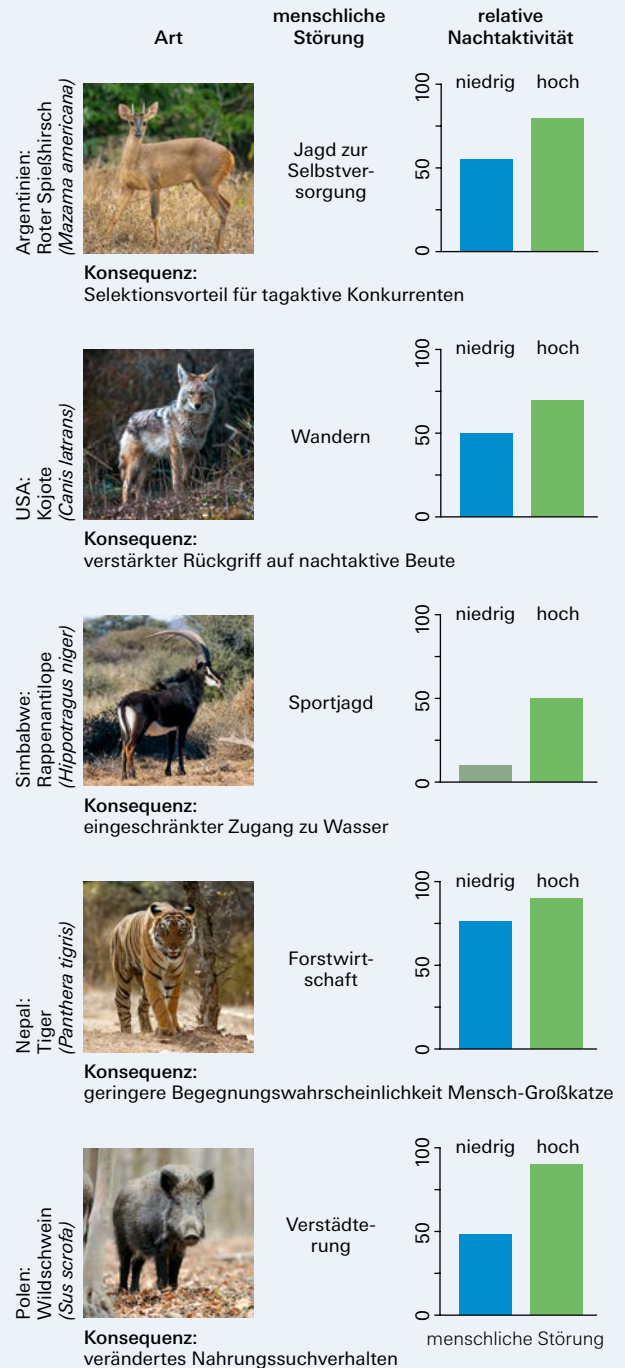
Wanderer vertreiben Bären

Offenbar stören wir also das Leben und die Interaktionen von Tieren und Pflanzen einfach dadurch, dass wir da sind. Aber gilt das nicht nur für die Städte? Es gibt schließlich geschützte Bereiche, Naturschutzgebiete und Nationalparks, wo Großräuber angstfrei und ohne Bedrohung leben sollten. Laut diversen Studien reichen jedoch bereits menschliche Freizeitaktivitäten – darunter harmlose Dinge wie Fahrradfahren, Skilaufen oder sogar Wandern – aus, um bei Wildtieren angstbedingte Verhaltensänderungen auszulösen. Wie Shalene George von der University of Wisconsin und Kevin Crooks von der Colorado State University 2006 nachweisen konnten, ließ die Gegenwart von Wanderern und Radfahrern in einem kalifornischen Naturschutzgebiet die Tagesaktivität von Maultierhirschen um ein Drittel zurückgehen. Jesse Lewis von der Arizona State University und seine Kollegen stellten 2021 fest, dass Rotluchse in Colorado dort, wo sich viele Wanderer aufhielten, seltener auftauchten. Selbst die Grizzlybären in den kanadischen Rocky Mountains gingen Wanderern und Offroadfahrern aus dem Weg, und Weibchen mit Jungen bewegten sich dreimal mehr als gewöhnlich, wenn motorisierte Freizeitaktivitäten stattfanden.

Solche Aktivitäten drängen Wildtiere in immer kleinere Teile der Natur sowie in bestimmte Zeitabschnitte des Tages ab (siehe »Verhaltensänderungen durch menschliche Anwesenheit«). Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Arten, die nur dank sorgfältiger Aufteilung von Raum und Zeit nebeneinander existieren können, zur Interaktion gezwungen werden. Laut mehreren Studien überschneiden sich die Lebensräume verschiedener Spezies zunehmend, wenn sie auch häufiger von Menschen aufgesucht werden. Wie Forscher vom Urban Wildlife Institute in Chicago um Travis Gallo 2019 beobachteten, weichen Baumwollschwanzkaninchen in städtischen Ballungsräumen nicht mehr den Kojoten aus. In meinen eigenen Forschungsarbeiten an der Pennsylvania State University zeigte sich, dass Weißwedelhirschkälber, um Menschen zu meiden, notgedrungen zu den gleichen Tageszeiten aktiv wurden wie Schwarzbären und Rotluchse – zwei Fleischfresser, die sich gern über Kitze hermachen. Die

Konsequenzen der verstärkten Nachtaktivität

Weltweit reagieren Tiere auf menschliche Anwesenheit durch verstärkte Nachtaktivität. Auf Grund der Allgegenwart des Menschen bleiben manchen Arten kaum weitere Ausweichmöglichkeiten.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH GAYNOR, K. M. ET AL.: THE INFLUENCE OF HUMAN DISTURBANCE ON WILDLIFE NOCTURNALITY. SCIENCE 360, 2018. FIG. 3. MAZAMA AMERICANA. AARPHOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK; CANIS LATRANS. GRAPHICPHOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK; HIPPOPOTRAGUS NIGER. NANZIGAP / GETTY IMAGES / ISTOCK; PANTHERA TIGRIS. GANWET77 / GETTY IMAGES / ISTOCK; SUS SCROFA. BYNDRK / GETTY IMAGES / ISTOCK

gleichzeitige Aktivität erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Hirschkälber ihren natürlichen Feinden direkt vor die Schnauze laufen. In einer 2018 in der Fachzeitschrift »Science« erschienenen Metaanalyse belegten Forscher um Kaitlyn Gaynor von der University of California in Berkeley, dass 62 Arten, vom Wildschwein bis zum Tiger, ihre nächtliche Aktivität als Reaktion auf verschiedene menschliche Tätigkeiten wie Jagen oder Wandern durchschnittlich um 36 Prozent steigerten (siehe »Konsequenzen der verstärkten Nachtaktivität«). Die Umwandlung von Lebensräumen in landwirtschaftliche Nutzflächen oder Baugebiete zwingen Wildtiere ebenfalls zur Nachtaktivität, so dass hier abermals Arten, die sich sonst zeitlich aus dem Weg gehen, gleichzeitig auftreten, was die Wahrscheinlichkeit einer Interaktion erhöht.

Man kann die Ökologie der Angst auch zum Guten nutzen, zumal wenn es um Konfliktsituationen zwischen Wild- und Nutztieren oder -pflanzen geht – man denke nur an eine Vogelscheuche. So ließ sich nachweisen, dass Wölfe, Schwarzbären und Füchse präparierte Kadaver meiden, die, aktiviert durch einen Bewegungsmelder, laute Geräusche wie die von schreienden Menschen abspielten.

Wer regelmäßig das Verhalten von Tieren beobachtet, weiß jedoch, dass sie schlau sind und sich in vielen Fällen an Menschen gewöhnen. Auch wenn solche Arten in der Lage sind, sich auf das Anthropozän einzustellen und in unserem Umfeld zu leben, dürfte die Stadtumgebung sie weiterhin mehr belasten als die Natur. Der ständige unterschwellige Stress, den wir Menschen mit unseren Wohnvierteln und Ballungsräumen erzeugen, könnte ihre Reflexe zur Vermeidung natürlicher Feinde einschränken.

In den 1990er Jahren analysierten Steven Lima und Peter Bednekoff von der Indiana State University, wie Tiere auf Situationen mit geringem und hohem Risiko reagieren. Den Schlüssel dazu stellen laut ihrer Risikoverteilungshypothese zeitliche Schwankungen dar: Tiere, die selten vor kurzen Hochrisikosituationen stehen, sollten darauf heftiger reagieren als solche, die sich ständig in einer risikoreichen Lage befinden.

Wachsamer Hirsch

Für diese Hypothese sprechen auch meine eigenen Forschungen. So agierten Weißwedelhirsche wachsamer, je mehr natürliche Feinde auftraten – allerdings nur in großen Waldgebieten. Dagegen bestand in Staatsforsten, die in der Nähe von landwirtschaftlichen Nutzflächen oder Bauland lagen, kein solcher Zusammenhang zwischen der relativen Häufigkeit von Beutegreifern und der Wachsamkeit der Hirsche. Stattdessen zeigten sich die Tiere besonders wachsam am Tag, wenn die Gefahr bestand, dass sich Menschen hier aufhielten. Die Ergebnisse lassen auf zweierlei schließen: Hirsche haben vor Menschen mehr Angst als vor ihren natürlichen Feinden, und irgendein Aspekt in der gestörten Umwelt schafft eine solche chronische Hochrisikosituation, dass die Wachsamkeit der Beutetiere von der relativen Häufigkeit der Beutegreifer entkoppelt wird. Das macht es den

Räubern leichter, Hirschkälber zu erlegen, was die Populationsdichte der Hirsche gefährdet.

Tiere, die Angst vor Menschen haben, wird es immer geben. Was können wir für sie tun? Nationalparks und andere Schutzgebiete könnten die Zahl der täglichen Besucher beschränken und bestimmte Abschnitte zu sensiblen Zeiten, beispielsweise wenn Nachkommen geboren werden, vollkommen sperren. Wir könnten grüne Passagen als Puffer gestalten, so dass Wildtiere in Ballungsräumen mehr Platz haben. Wir könnten unsere Städte so planen, dass die Zersiedelung vermindert wird, und wir könnten die Straßenbeleuchtung ausschalten, um

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[spektrum.de/t/artenvielfalt-und-artensterben](https://www.spektrum.de/t/artenvielfalt-und-artensterben)



FOTOLIA / FRANK WASSERFÜHRER

nachts so wenig wie möglich zu stören. Wildtiere reagieren auf eine unterschiedlich ausgeprägte Gegenwart von Menschen: Hirsche und Wildschweine verändern ihre Aktivitätsmuster, je nachdem, ob gerade Jagdsaison ist oder nicht. Fledermäuse fliegen am Wochenende weniger aus, wenn mehr Menschen draußen sind. Begreifen wir, welche Angst wir bei wilden Tieren auslösen, und verhalten wir uns als respektvolle, umsichtige Mitbewohner unseres Planeten, dann werden wir besser gemeinsam mit anderen Arten leben. ◀

QUELLEN

Brown, J. S. et al.: The ecology of fear: Optimal foraging, game theory, and trophic interactions. *Journal of Mammalogy* 80, 1999

Gaynor, K. M. et al.: Landscapes of fear: Spatial patterns of risk perception and response. *Trends in Ecology & Evolution* 34, 2019

Lewis, J. S. et al.: Human activity influences wildlife populations and activity patterns: Implications for spatial and temporal refuges. *Ecosphere* 12, 2021

Murphy, A. et al.: Threading the needle: How humans influence predator-prey spatiotemporal interactions in a multiple-predator system. *Journal of Animal Ecology* 90, 2021

Ordiz, A. et al.: Effects of human disturbance on terrestrial apex predators. *Diversity* 13, 2021

AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

MEDIZIN

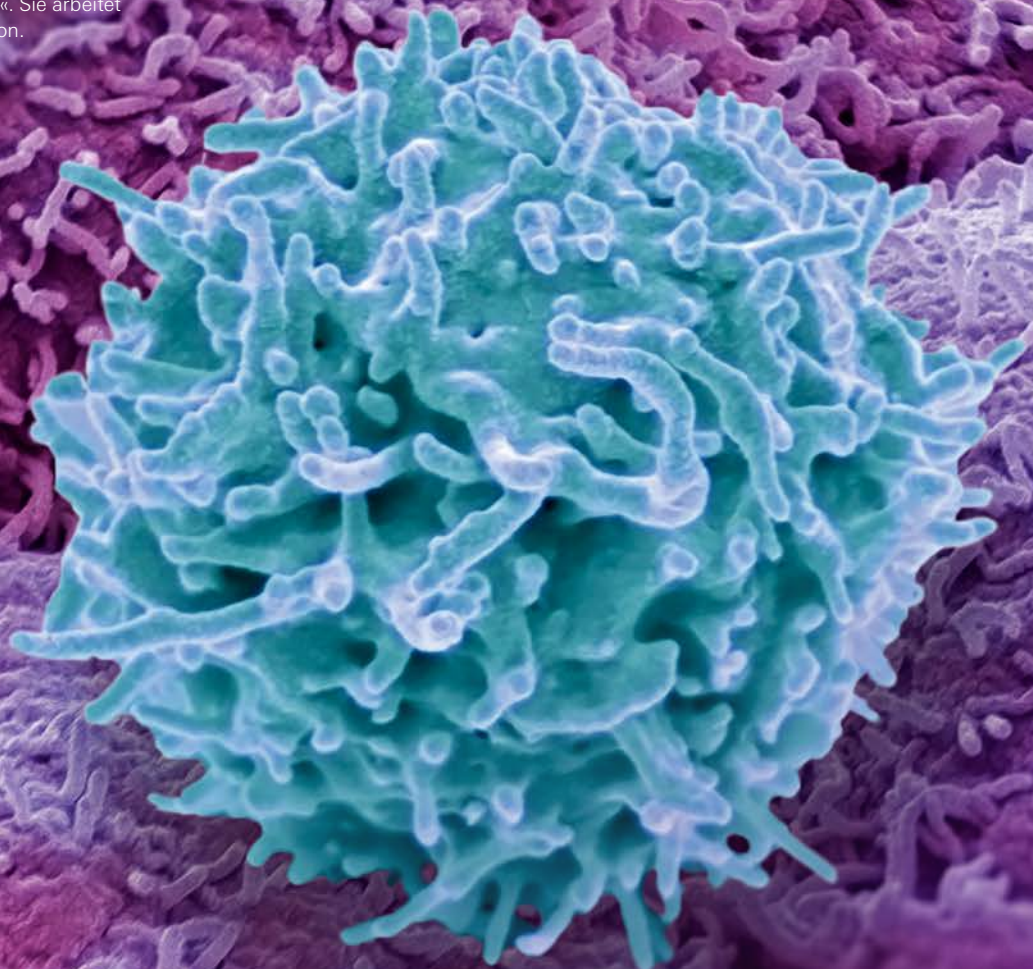
Siegeszug der CAR-T-Zellen

Künstlich veränderte Immunzellen haben die Krebsmedizin entscheidend vorangebracht. Forschungsgruppen rund um den Globus arbeiten daran, die Fähigkeiten dieser Zellen noch weiter auszubauen.

► spektrum.de/artikel/2160279



Heidi Ledford ist leitende Reporterin bei »Nature«. Sie arbeitet in London.





AUF EINEN BLICK

Die Hunde von der Leine

- 1** T-Lymphozyten sind Zellen der Immunabwehr. Sie wandern durch den Organismus und bekämpfen körperfremde Strukturen.
- 2** Mediziner statten T-Lymphozyten mit künstlich hergestellten Rezeptormolekülen namens CAR aus. Damit schalten sie die Zellen gezielt scharf, etwa gegen Krebszellen.
- 3** Gegen Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems hat sich dieser Ansatz schon bewährt. Jetzt entwickeln Forscher ihn weiter, um damit noch andere Leiden zu bekämpfen.

ANGRIFF T-Lymphozyten (blau) des Immunsystems attackieren Prostatakrebszellen (lila). Die Mikroskopaufnahme wurde nachträglich eingefärbt, um die Zellen besser erkennbar zu machen.

Crystal Mackall kann sich gut daran erinnern, wie skeptisch sie reagierte, als sie zum ersten Mal von künstlich veränderten T-Lymphozyten hörte. Es war im Jahr 1996; sie nahm an einer Tagung in Deutschland teil und saß im Publikum eines Vortrags, der davon handelte, ob sich mit modifizierten menschlichen T-Zellen möglicherweise Krebstumoren erkennen und abtöten lassen. Mackall, die als Kinderonkologin arbeitet, flüster-te ihrem Sitznachbarn zu: »Wie absurd. Das ist doch völlig verrückt.«

Inzwischen hat sich ihre Einstellung gewandelt. »Ich muss zugeben, ich lag damals total daneben«, sagt Mackall, die jetzt an der Stanford University in Kalifornien daran mitwirkt, modifizierte T-Lymphozyten für die Behandlung von Hirntumoren zu entwickeln. Die US-Arzneimittelbehörde FDA hat im Jahr 2017 erstmals solche Zellen, die als CAR-T-Zellen bezeichnet werden (CAR steht für chimärer Antigenrezeptor), als Wirkstoff gegen Leukämie zugelassen. In den Folgejahren wurden sie gegen diverse weitere Krebsarten eingesetzt, mitunter enorm erfolgreich. Sechs einschlägige Therapieverfahren haben bis heute die Zulassung erhalten; zehntausende Patientinnen und Patienten sind damit behandelt worden (siehe »Spektrum« Oktober 2017, S. 34).

Einst forschte bloß eine Hand voll Fachleute über CAR-T-Zelltherapien; heute sind es weltweit hunderte Arbeitsgruppen in Universitäten und Unternehmen. Mehr als 500 einschlägige klinische Studien laufen, zahlreiche weitere befinden sich auf dem Sprung vom Labor in die Klinik. Rund um den Globus arbeiten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen daran, modifizierte T-Lymphozyten weiterzuentwickeln und deren Fähigkeiten auszubauen. Dabei bewegen sie sich weit über die Grenzen der Krebsmedizin hinaus.

Fortschritte im Genome Editing – vor allem durch die CRISPR-Cas-Methode (siehe »Spektrum« Oktober 2017, S. 50) – sowie in der Synthetischen Biologie haben immer ausgefeiltere Verfahren hervorgebracht, um T-Zellen zu modifizieren und mit veränderten Eigenschaften auszustatten. Sie ermöglichen es, viele Einschränkungen zu überwinden, mit denen CAR-T-Therapien früher behaftet waren und die zu hohen Herstellungskosten, gefährlichen Nebenwirkungen und einer lediglich auf Blutkrebskrankungen beschränkten Wirksamkeit führten. »Die technische Weiterentwicklung erschließt CAR-T-Zelltherapien ständig neue Anwendungsfelder«, sagt Avery Posey, Krebsimmunologe an der University of Pennsylvania in Philadelphia. »Das bringt uns enorm voran.«

Freilich ist die Herstellung »lebender Arzneistoffe« aus den Zellen betroffener Personen aufwändig und kompliziert. CAR-T-Zelltherapien fallen in diesen Bereich – schließlich beruhen sie darauf, einem Patienten T-Lymphozyten zu entnehmen, sie im Labor mit Hilfe von Gentechnik zu verändern und die modifizierten Zellen anschließend in den Patienten zurückzugeben, damit sie dort die beabsichtigte medizinische Wirkung entfalten. Viele der neuesten CAR-T-Zelltherapien gehen mit Sicherheits- und Produktionsproblemen einher. »Ihre Komplexi-

tät verhindert manchmal, dass sie sich wie gewünscht in eine klinische Umgebung übertragen lassen«, sagt der Immunologe Michel Sadelain vom Memorial Sloan Kettering Cancer Center in New York City.

CAR-T-Zelltherapien machen sich die Fähigkeiten der T-Lymphozyten zu Nutze, jener »Auftragskiller« des Immunsystems, die den Körper durchstreifen und nach Dingen ausschauen, die dort nicht hingehören. Körperfremde oder virusinfizierte Zellen enthalten bestimmte Proteine, die im Organismus normalerweise nicht vorkommen und anhand derer die T-Lymphozyten erkennen, dass hier irgendetwas im Argen liegt. Sie leiten dann Bekämpfungsmaßnahmen dagegen ein – etwa, indem sie eine toxische Molekülmixtur freisetzen, mit der sie die Fremdkörper zerstören. T-Lymphozyten können so auch Krebszellen eliminieren. Leider schaffen es Tumoren aber mitunter, diesem Abwehrmechanismus zu entgehen, indem sie ihre verdächtigen Proteine tarnen oder die Funktion der T-Zellen unterdrücken (siehe »Spektrum« August 2014, S. 30).

CAR-T-Zellen tragen synthetische Proteine in ihren Zellmembranen, die so genannten chimären Antigenrezeptoren, denen sie ihren Namen verdanken. Ein solcher Rezeptor besitzt auf der Zellaußenseite einen Bereich, der wie ein Antikörper funktioniert und jeweils an eine bestimmte Zielstruktur koppelt – beispielsweise eine spezifische Molekülsorte auf der Oberfläche von Krebszellen. Sobald er angedockt hat, stimuliert die Signaldomäne des CAR im Innern des T-Lymphozyten die Abwehrreaktion (siehe »Immunzellen als präzise Lenkwaffen«). CAR-T-Zellen mit einem Rezeptor, der sich gegen Tumorbestandteile richtet, sind hochgezüchtete Krebsbekämpfungsmaschinen.

Wahllose Vernichtung von B-Zellen

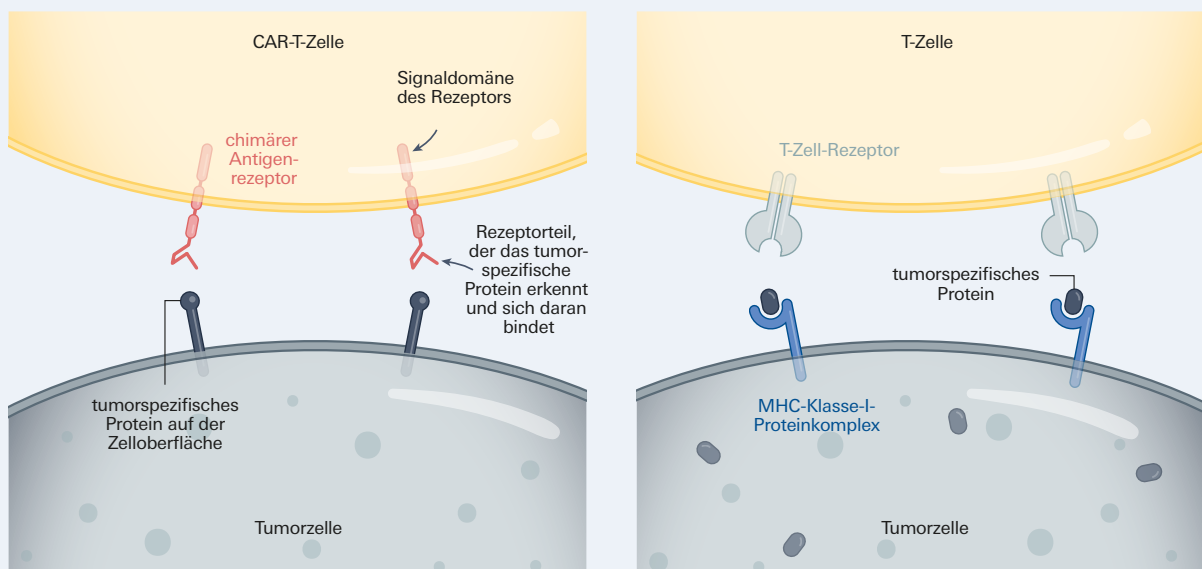
Zu den bisher zugelassenen CAR-T-Zellpräparaten zählen solche, die Proteine auf B-Zellen erkennen – diese gehören ebenfalls zu den Akteuren der Immunabwehr. Die unkontrollierte Vermehrung von B-Zellen hat Krebserkrankungen wie Leukämien und Lymphome zur Folge. CAR-T-Lymphozyten, die sich gegen die auf B-Zellen sitzenden Eiweiße CD19 oder BCMA richten, ermöglichen die erfolgreiche Behandlung solcher Leiden. Leider sind weder CD19 noch BCMA tumorspezifisch: Sie kommen ebenso auf gesunden Immunzellen vor, weshalb eine Therapie mit CAR-T-Lymphozyten die B-Zellen wahllos abtötet. Zum Glück braucht der menschliche Organismus sie nicht unbedingt, um weiterzuleben.

Generell gibt es bei den derzeit verfügbaren CAR-T-Zelltherapien viel Potenzial für Verbesserungen. Obwohl ihre Wirkung lange anhält und manchmal sogar einer Heilung gleichkommt, kehrt bei den meisten Behandelten der Krebs irgendwann zurück. Solide Tumoren, beispielsweise Lungen- und Bauchspeicheldrüsenkrebs, sprechen bislang nur unzureichend auf solche Behandlungen an. Da CAR-T-Zelltherapien eine starke Immunantwort entfesseln, bergen sie das Risiko überschießender Abwehrreaktionen und können dadurch in seltenen Fällen zum Tod führen. Und sie müssen auf jede Patientin und jeden Patienten individuell zugeschnitten werden, wobei deren körpereigene T-Zellen

Immunzellen als präzise Lenk Waffen

Viele Krebsimmuntherapien basieren darauf, Tumoren mit veränderten T-Lymphozyten (Zellen des körpereigenen Immunsystems) zu bekämpfen. Die meisten zugelassenen Behandlungen setzen auf T-Zellen, die so genannte chimäre Antigenrezeptoren besitzen, abgekürzt CAR (links). Das sind künstlich hergestellte Rezeptormoleküle, die jeweils zu einer bestimmten Proteinsorte auf Krebszellen passen und spezifisch nur daran koppeln. Mit Hilfe ihrer CAR-Moleküle können T-Lymphozyten deshalb Tumorzellen präzise erkennen und angreifen.

Andere Therapiemethoden wandeln die natürlichen Rezeptormoleküle der T-Zellen ab. Das erlaubt es den Zellen, Tumormoleküle zu attackieren, die von MHC-Klasse-I-Proteinkomplexen präsentiert werden und normalerweise nicht auf der Oberfläche der Krebszellen sitzen (rechts).



NATURE. MACH PREMIER RESEARCH COMMUNICATIONS BRIEF: INTRODUCTION TO CAR-T CELL THERAPY; LEIBFORD, H. THE RACE TO SUPERCHARGE CANCER-FIGHTING T CELLS. NATURE 513, 2022. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

jeweils als Ausgangsmaterial dienen – was die Behandlung Zeit raubend und teuer macht.

Bislang gibt es für keines dieser Probleme eine simple Lösung. »Wir haben ganz klar noch einen weiten Weg vor uns«, sagt Mackall. »Aber es zeichnet sich Licht am Horizont ab.«

Fortschritte sind etwa beim Bekämpfen solider Tumoren zu verzeichnen. Letztere setzen sich oft aus diversen verschiedenen Zellen mit unterschiedlichen genetischen Mutationen zusammen. CAR-T-Zelltherapien, die auf ein bestimmtes mutiertes Protein abzielen, wirken darum häufig nur gegen eine Untergruppe der Tumorzellen. Zudem erweist sich das dichte Gewebe einer Krebsgeschwulst meist als kaum durchdringbar für die T-Lymphozyten, und es fällt schwer, die CAR-T-Zellen gegen hinreichend tumorspezifische Ziele scharfzuschalten, so dass im gesunden Gewebe möglichst kein Schaden entsteht.

Trotzdem ist es in klinischen Versuchen gelungen, die Wirksamkeit solcher Therapien gegen solide Tumoren zu steigern. Mackall und ihr Team haben CAR-T-Zellen entwickelt, die auf eine Molekülsorte namens GD2 abzielen.

Gliome, die zu den häufigsten Hirntumoren zählen, stellen dieses Molekül in großen Mengen her. Die Mediziner und Medizinerinnen verabreichten Gliom-Patienten entsprechend modifizierte CAR-T-Zellen, zunächst einmalig intravenös, dann mehrmals niedrig dosiert direkt ins Gehirn. Bei drei von vier so Behandelten verbesserten sich die klinischen Symptome; zudem schrumpften die Tumoren. »Der Organismus stößt die modifizierten Lymphozyten bei dieser Verabreichungsmethode offenbar nicht ab, so dass sie ihre Wirkung im Gehirn entfalten können«, resümiert Mackall.

Um solide Tumoren zu bekämpfen, könnten Therapieansätze erforderlich sein, die auf mehrere mutierte Proteine gleichzeitig abzielen – oder die in der Lage sind, entartete Zellen mit abnorm erhöhter Proteinproduktion zu erkennen und anzugreifen. Ein Team um Susan Foy vom Unternehmen PACT Pharma in San Francisco hat dies kürzlich in einer klinischen Studie umgesetzt. Die Forscherinnen und Forscher nutzten die Genschere CRISPR-Cas, um Rezeptoren von T-Lymphozyten individuell gegen tumorspezifische Eiweiße einzelner Krebspatienten-

ten scharfzuschalten. Die Patienten bekamen eine Mischung solcher Zellen verabreicht, die auf bis zu drei verschiedene Proteine parallel abzielte – in der Hoffnung, dass es den Tumoren dann schwerer fällt, eine Resistenz dagegen zu entwickeln. Bei 5 von 16 Studienteilnehmern stellten die Geschwulste 28 Tage nach der Behandlung ihr Wachstum ein. Das Team hofft nun, das Verfahren optimieren zu können, um seine Wirksamkeit zu erhöhen.

Es gelinge immer besser, die Aktivitäten von T-Lymphozyten fein abgestimmt zu verändern und zu kontrollieren, betont der Immunologe Carl June von der University of Pennsylvania. Mit Hilfe fortschrittlicher Einzelzellanalysen können Forscher sowohl das Schicksal der manipulierten Immunzellen verfolgen als auch das der Tumoren, die abgetötet werden sollen. Sie können beispielsweise feststellen, welche T-Lymphozyten in einen Erschöpfungszustand geraten – ein dysfunktionales Stadium, das sich nach permanenter Stimulation einstellt – und welche Tumorzellen eine Behandlungsresistenz ausprägen. Sie können überdies herausfinden, ob in der Umgebung eines Tumors, der mit CAR-T-Lymphozyten attackiert wurde, vermehrt Zellen wie Makrophagen oder regulatorische T-Lymphozyten anzutreffen sind, welche die Immunfunktion unterdrücken. Eine solche lokale Immunsuppression zu überwinden, sei der Schlüssel zur erfolgreichen Bekämpfung solider Tumoren mit modifizierten Immunzellen, betont Yangbing Zhao, leitender Wissenschaftler beim Biotechunternehmen UTC Therapeutics in Singapur, das einschlägige Therapieverfahren entwickelt. »Egal, wie viele Ziele man anvisiert – solange der Tumor die Immunantwort neutralisiert, wird man keinen Erfolg haben«, sagt er.

June und sein Team haben in Einzelzellverfahren untersucht, zu welchen Resistenzen CAR-T-Zelltherapien führen, die auf CD19 abzielen. Sie fanden heraus: CAR-T-Lymphozyten, die T-Helfer-Zellen des Typs T_H2 weniger stark aktivieren, gehen mit einem vermehrten Auftreten von Resistenzen einher. Darüber hinaus analysierte die Forschungsgruppe, warum CAR-T-Zelltherapien, die gegen das Protein Mesothelin gerichtet sind (das auf Pankreaskarzinomzellen übermäßig oft vorkommt), häufig versagen. Es zeigte sich, dass die Ausschaltung zweier Gene namens *SOX4* und *ID3* die Wirksamkeit solcher Therapien gegen solide Tumoren steigern kann. »Wir sind immer besser in der Lage, diese verwickelten Resistenzmechanismen zu verstehen – und mit Werkzeugen wie CRISPR-Cas im gewünschten Sinne zu beeinflussen«, sagt June.

Der Immunologe Alexander Marson von den Gladstone Institutes in San Francisco und sein Team haben CRISPR-Cas eingesetzt, um tausende Gene in T-Zellen zu aktivieren oder zu unterdrücken und jeweils zu analysieren, wie sich das auf die Produktion wichtiger immunregulierender Proteine, so genannter Zytokine, auswirkt. In weiteren Untersuchungen stellten die Wissenschaftler fest: Das Lahmlegen eines Proteins namens RASA2 steigert die Fähigkeit von CAR-T-Zellen, ihre Zielstrukturen zu bekämpfen. »Wir lernen mehr und mehr darüber, welche

Gene wir ein- oder ausschalten können, um die T-Zellen zu dirigieren«, so Marson.

Vertreter der Synthetischen Biologie nehmen ihrerseits T-Lymphozyten ins Visier. Sie entwickeln ausgeklügelte molekulare Schaltkreise, die eine bessere Kontrolle darüber erlauben, wie diese Zellen ihre chimären Antigenrezeptoren und andere immunaktive Proteine ausprägen. Ende 2022 berichteten der Synthetische Biologe Wendell Lim von der University of California in San Francisco und seine Arbeitsgruppe, sie hätten T-Zellen so manipuliert, dass diese sowohl CARs als auch IL-2-Proteine, welche die Immunfunktion regulieren, produzieren. IL-2 kann das Eindringen von T-Zellen in solide Tumoren verbessern und deren immununterdrückenden Signalen entgegenwirken; allerdings ist es toxisch. Indem man die modifizierten T-Lymphozyten dazu bringt, es herzustellen, wirkt das Protein nur lokal am Zielort jener Immunzellen – und vergiftet keine anderen Gewebe.

Vom Labor ans Krankenbett

Weitere synthetische Schaltkreise ermöglichen eine präzise Regulierung der CAR-Produktion, indem man diese unter die Kontrolle von genetischen Elementen stellt, welche als Reaktion auf eine Arzneistoffgabe aktiv werden. Derartige Verfahren sind allerdings komplex; ihre Anwendung am Menschen liegt in weiter Ferne.

Die große Frage lautet, welcher dieser Ansätze es in die klinische Prüfung schaffen wird. »Im Labor kann man viel erfinden – doch nur wenig davon lässt sich in den klinischen Alltag übertragen«, sagt die Onkologin Marcela Maus vom Massachusetts General Hospital in Boston. »Die Zukunft wird zeigen, welche der vielen Ideen das Potenzial besitzt, am Menschen angewendet zu werden.«

CAR-T-Zellen herzustellen, ist ein Ressourcen verschlingender Prozess. Alle bisher zugelassenen Therapien laufen so ab, dass man jeder einzelnen erkrankten Person körpereigene T-Lymphozyten entnimmt und diese individuell so verändert, dass sie den jeweils gewünschten CAR produzieren. Das geht mit hohem Zeitaufwand und enormen Ausgaben einher: Eine einzige Behandlung kostet etliche hunderttausend Euro.

CAR-T-Lymphozyten, die mehreren Menschen verabreicht werden können – quasi »Zellen von der Stange« –, könnten helfen, die Kosten zu senken. Erste einschlägige Forschungsarbeiten deuten aber darauf hin, dass der Weg dorthin noch weit ist, wie der Bioingenieur Rahul Purwar vom Indian Institute of Technology Bombay darlegt. Eines der Hauptprobleme dabei: Da die modifizierten Zellen nicht vom Empfänger selbst stammen, werden sie in dessen Organismus meist abgestoßen und überleben nicht lange. Im Fokus entsprechender Forschungsprojekte steht deshalb, die Zellen so zu modifizieren, dass die Wahrscheinlichkeit eines Abstoßens minimiert wird. »CAR-T-Zellen von der Stange« wären eine großartige Sache«, sagt Purwar. »Diese Technologie wird sicherlich kommen, aber im Moment sind wir noch nicht so weit.«

Außerhalb wohlhabender Länder werden CAR-T-Zelltherapien kaum eingesetzt. In Brasilien war der Hämato-

loge Renato Luiz Guerino Cunha von der Oncoclínicas-Gruppe in São Paulo der landesweit erste Mediziner, der im Jahr 2019 einen Patienten damit versorgte. Er beklagt den langsamen Fortschritt auf diesem Gebiet: Es fehle an Kapazitäten, um die modifizierten Zellen hinreichend schnell und in genügender Anzahl zu produzieren. »In drei Jahren haben wir nur sechs Patienten behandelt«, sagt er. »Wir brauchen neue und bessere Technologien.«

Um CAR-T-Lymphozyten herzustellen, dient meist ein Lentivirus als Genfähre, um die synthetische Erbanlage mit dem Bauplan des CAR in die Zellen einzuschleusen. Doch der Aufschwung der Genterapien (siehe »Spektrum« Juli 2019, S. 12) hat die Nachfrage nach Lentiviren klinischer Qualität enorm erhöht. Forscherinnen und Forscher müssen jetzt oft monatelang warten und viel Geld zahlen, um damit experimentieren zu können. Cunha stellt selbst Lentiviren her, um mit ihrer Hilfe CAR-T-Zellen zu erzeugen – was aber nur in winzigen Mengen möglich ist. Verbesserungen der CRISPR-Cas-Technologie könnten hier Abhilfe schaffen.

Trotz dieser Herausforderungen sind CAR-T-Zelltherapien weiterhin auf dem Vormarsch und dringen dabei in völlig neue Bereiche vor. Seit jüngster Zeit laufen beispielsweise Forschungsarbeiten darüber, ob sich mit dem innovativen Ansatz eventuell Autoimmunkrankheiten wie Lupus erythematoses behandeln lassen. Und im Rahmen einer Studie an Mäusen haben Wissenschaftler kürzlich T-Zellen umprogrammiert, ohne sie hierfür aus dem

Körper zu entfernen, und so CAR-T-Lymphozyten geschaffen, die vernarbtes Gewebe aus dem Herz entfernen sollen.

Ende 2022 stellten Carl June und seine Kollegen weitere Neuerungen vor. Auf der Jahrestagung der American Society of Hematology in New Orleans, Louisiana, gab das Team bekannt: Die Wirksamkeit von CAR-T-Zellen lässt sich steigern, indem man ihre Herstellungszeit verkürzt und sie dazu bringt, ein Protein namens IL-18 zu exprimieren. Das erlaube es, die modifizierten Lymphozyten in niedrigerer Dosis zu verabreichen. »Die Patienten sprachen sehr gut auf die Behandlung mit diesen Zellen an«, schildert Marcela Maus vom MIT in Boston. »In CAR-T-Zelltherapien steckt offensichtlich noch jede Menge Potenzial.« ◀

QUELLEN

Bai, Z. et al.: Single-cell antigen-specific landscape of CAR T infusion product identifies determinants of CD19-positive relapse in patients with ALL. *Science Advances* 8, 2022

Foy, S. P. et al.: Non-viral precision T cell receptor replacement for personalized cell therapy. *Nature* 615, 2023

Majzner, R. G. et al.: GD2-CAR T cell therapy for H3K27M-mutated diffuse midline gliomas. *Nature* 603, 2022

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 613, S. 626–628, 2023

1/2 Spektrum Pluss

ATTRIBUTIONSFORSCHUNG

Warum das Wetter

Immer genauer lässt sich feststellen, wie sehr der Klimawandel Extremwetter im Einzelfall beeinflusst. Das hat Konsequenzen für Politik und sogar für Gerichtsverhandlungen.

► [spektrum.de/artikel/2160282](https://www.spektrum.de/artikel/2160282)



Lois Parshley ist Wissenschaftsjournalistin in den USA.

verrücktspielt

DÜRREN sind mit am schwierigsten zu analysieren, da viele Faktoren hineinspielen.

Im November 2022 sprangen die Frühlingstemperaturen in Südamerika plötzlich von kalt zu glühend heiß. Normalerweise sieht man die Menschen dort zu dieser Jahreszeit beim traditionellen »asado« zusammensitzen, beim gemütlichen Grillen. Doch am 7. Dezember zeigten die Thermometer im Norden Argentiniens, wo das Land an Bolivien und Paraguay grenzt, 46 Grad Celsius an. Damit war die Gegend eine der heißesten auf der Erde. Die Hitze kam zusätzlich zu einer Dürre, die bereits drei Jahre angehalten hatte; der Boden vertrocknete, der Weizen verkümmerte noch vor der Ernte.

Während die argentinische Regierung die Ausfuhr von Weizen einschränkte und die Menschen ermahnte, in ihren Häusern zu bleiben, traf sich eine kleine Gruppe von Forscherinnen und Forschern aus der ganzen Welt per Videokonferenz. Sie gehörten zur World Weather Attribution (WWA), einem Zusammenschluss von Klimawissenschaftlern und Klimawissenschaftlerinnen. Friederike Otto (siehe das Interview ab S. 51) und Geert Jan van Oldenborgh haben die Gruppe im Jahr 2014 ins Leben gerufen, um gemeinsam Antworten auf eine immer häufiger gestellte Frage zu finden: Verschlimmert der Klimawandel Extremwetter – und falls ja, wie sehr? Die WWA hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, konkrete Antworten zu finden, und zwar möglichst zeitnah. So will sie Öffentlichkeit, Medien und Entscheidungsträger informieren, aber auch Katastrophenschützer und Städteplaner mit Fakten versorgen, die sich auf das nächste Extremereignis vorbereiten müssen.

Als sich 2021 eine Hitzeglocke über dem Nordwesten der USA festsetzte, veröffentlichte die Gruppe schon eine gute Woche, nachdem das Phänomen begonnen hatte, eine sorgfältige und umfassende Analyse, die auf bereits veröffentlichten Forschungsarbeiten basierte. Nach den Untersuchungen des Teams wären die extremen Bedingungen ohne den menschengemachten Klimawandel praktisch unmöglich gewesen. Menschengemacht deshalb, weil heute klar ist, dass natürliche Veränderungen durch größere Vulkanausbrüche oder schwankende Sonnenaktivität nur geringen Einfluss haben, verglichen mit den vom Menschen ausgestoßenen Treibhausgasen sowie Aerosolen. Die Temperaturen, schreibt die WWA, waren »so extrem, dass sie weit außerhalb des Bereichs historisch gemessener Temperaturen« lagen. Als Pakistan und Teile Indiens im Frühling 2022 unter gefährlicher Hitze litten, schätzte das Team, dass der Klimawandel die Hitzewelle heißer und wahrscheinlicher gemacht hatte. Die Regenfälle, die Pakistan im Jahr darauf größtenteils unter Wasser setzten, hatte er nach Schätzungen der WWA um zirka 50 Prozent verstärkt.

Fachleute erstellen Extremwetteranalysen heute sehr viel schneller und mit genaueren Ergebnissen als noch vor zehn Jahren. Damals scheuten sich viele Klimawissenschaftler, Aussagen dazu zu treffen, inwiefern der Klimawandel zu einzelnen Ereignissen beigetragen hat. Das Feld »hat sich komplett verändert«, erzählte mir Friederike Otto aus ihrem Büro, wo die Wände mit Weltkarten tapeziert waren. Damals forschte sie an der University of

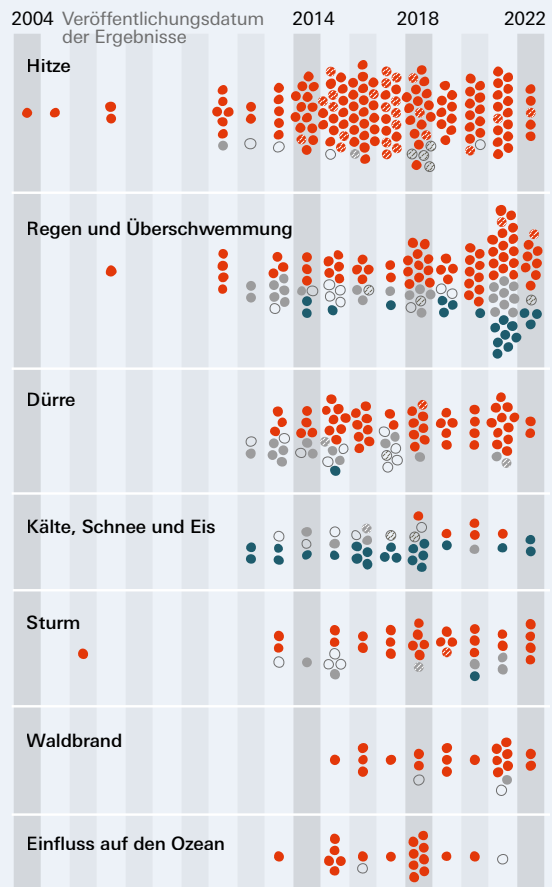
Wie der Mensch das Wetter verändert

Seit 2004 sind mehrere hundert Attributionsstudien erschienen. 71 Prozent von ihnen zeigen, dass der Klimawandel Extremwetterereignisse verstärkt hat (rote Punkte). Nur in 9 Prozent der Fälle hat menschlicher Einfluss sie weniger stark oder weniger häufig gemacht (blaue Punkte). Durch den Klimawandel schlimmer geworden sind 93 Prozent der untersuchten übermäßigen Hitzewellen, 69 Prozent der untersuchten Dürren und 56 Prozent der untersuchten Überschwemmungen oder Starkregenfälle.

Die Wetterextreme sind nach Typ geordnet. Jeder Punkt steht dabei für eine Studie. Schnelle Attributionsstudien sind schraffiert. Die Daten für die 431 veranschaulichten Veröffentlichungen hat Carbon Brief im Mai 2022 erhoben. Das Rechercheportal veröffentlicht Daten, Fakten und Nachrichten rund um Klimawissenschaft und Klimapolitik.

Ergebnis

- stärker oder wahrscheinlicher
- kein Unterschied erkennbar
- nicht eindeutig oder zu wenige Daten
- schwächer oder weniger wahrscheinlich



VON DA. DATEN NACH PROCK, B., MCSWEENEY, B., MAPPER: HOW CLIMATE CHANGE AFFECTS EXTREME WEATHER AROUND THE WORLD. CARBON BRIEF, 2022 / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2023; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ereignisse, die in der Datenbank von Carbon Brief seltener als zehnmal vorkamen, wie etwa Korallenbleichen, wurden nicht berücksichtigt.

Oxford, jetzt ist sie Associate Professor am Imperial College London. Otto wurde in der Nähe von Kiel geboren und ist mittlerweile britische Staatsbürgerin. Wenn »Freddie«, wie ihre Kolleginnen und Kollegen sie nennen, von der Geschichte der Attributionswissenschaft erzählt, ist sie sehr direkt. »Am Anfang sagten die Leute: Das könnt ihr nicht machen, dazu sind die Modelle nicht gut genug.« Und fügt hinzu: »Jetzt können wir es.«

Im Jahr 2014 waren solche Studien noch schwierig zu erstellen und benötigten viel Zeit; teils deshalb, weil es mitunter ein ganzes Jahr dauern kann, bis eine wissenschaftliche Studie den Peer-Review-Prozess durchlaufen hat, bei dem andere Fachleute eine Arbeit vor der Veröffentlichung begutachten. Um diese Verzögerung zu beseitigen, entwickelte die WWA eine wissenschaftlich begutachtete Methodik, anhand derer sie ihre Studien rasch durchführen und mit den Ergebnissen direkt an die Öffentlichkeit gehen kann.

Noch vor gut zehn Jahren bezeichnete der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) die Attributionswissenschaft als »nicht einsatzbereit«. In seinem neuesten Bericht von 2021 hingegen bewertet er den Forschungszweig als »solide«. Dass Forscher und Forscherinnen immer besser in der Lage sind, mit Bestimmtheit zu sagen, welchen Anteil der Klimawandel an einem Extremereignis hat, könnte sich auf alle möglichen Lebensbereiche auswirken – von Versicherungsansprüchen und Gerichtsverfahren bis zu internationalen Verhandlungen darüber, welche Nationen für die Anpassung an den Klimawandel bezahlen sollten. Otto hofft außerdem, dass Regierungen durch die Berichte der WWA erkennen, warum es so wichtig ist, die Treibhausgasemissionen zu senken. Und deshalb machte sie sich zusammen mit ihren Mitstreitern ans Werk, noch während die Menschen in Argentinien, Bolivien und Paraguay im Dezember 2022 bei Höchsttemperaturen schmorten.

Vom Nischenthema zum Dauerbrenner

Eine der ersten viel zitierten Attributionsstudien erschien 2004 im Fachjournal »Nature«, etwa anderthalb Jahre nachdem Europa den heißesten Sommer seit Jahrhunderten erlebt hatte. Ernten waren ausgefallen, Alpengletscher um mehr als zehn Prozent geschrumpft, über 30000 Menschen waren gestorben. Menschlicher Einfluss habe die Rekord-Hitzewelle mindestens doppelt so wahrscheinlich gemacht, schloss der Erstautor der Studie, Peter A. Stott, der am Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services in England forscht.

Zu jener Zeit sei die Frage nach der Rolle des Klimawandels rein akademischer Natur gewesen – interessant, wenn man gern über statistische Wahrscheinlichkeit und Atmosphärenphysik diskutierte, erzählt Stephanie Herring, Klimawissenschaftlerin bei der US-amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Nationale Ozean- und Atmosphärenbehörde). Sie veröffentlichte ab 2012 jährliche Berichte über Extremwetter für die Amerikanische Meteorologische Gesellschaft. »Damals erwartete niemand von uns diesen Grad an

AUF EINEN BLICK

Suche nach den Schuldigen

- 1** Wetterextreme haben viele Ursachen. Die Rolle des Klimawandels dabei herauszufiltern, hielten viele bis vor einigen Jahren für unmöglich.
- 2** Mittlerweile gelingt das mit Hilfe der Attributionsforschung sehr zuverlässig. Zum Teil analysieren Fachleute Ereignisse wie Hitzewellen oder Sturzfluten sogar fast in Echtzeit.
- 3** Die Ergebnisse helfen auch zu verstehen, worauf sich einzelne Regionen einstellen müssen.

öffentlichem Interesse, den das Forschungsfeld letztlich auf sich zog«, erzählt sie rückblickend.

Das Interesse wuchs, nachdem der gewaltige Hurrikan Sandy im Oktober 2012 New York City und New Jersey traf. Alle wollten wissen, warum der Tropensturm so weit nördlich noch so viel Kraft haben konnte. Ein Monate später veröffentlichter Bericht stellte fest, dass früher im Jahr übermäßig viel arktisches Meereis geschmolzen war. So hatten sich weite Bereiche offenen Wassers gebildet, die Sonnenstrahlung und damit Wärme absorbierten, was möglicherweise zusätzlichen Antrieb für Sandy lieferte.

Dennoch wurden die Zusammenhänge lediglich als plausible Theorie bezeichnet. Wissenschaftler neigten dazu, konservativ zu sein und Auswirkungen eher zu unterschätzen, sagt Kevin Trenberth, ein renommierter Wissenschaftler am National Center for Atmospheric Research (Nationalen Zentrum für Atmosphärenforschung) in Boulder, Colorado. Die meisten Fachleute, erzählt er, diskutierten nur zögernd über die Frage, wie der Klimawandel ein einzelnes Unwetter beeinflusst haben könnte.

Dank technischer Fortschritte ist es heute leichter, die Rolle des Klimawandels zu isolieren. In den frühen 2000er Jahren verfügten nur wenige Forschungseinrichtungen über Hochleistungsrechner, auf denen Klimasimulationen mit ihren riesigen Datenmengen gerechnet werden konnten. Dank Cloud-Services lässt sich diese Aufgabe nun von daheim aus am Laptop erledigen. Außerdem ist es dadurch einfacher, Modelle zu kombinieren und die Simulationen mehrfach laufen zu lassen. So erhält man zuverlässigere Ergebnisse. Und auch die Modelle selbst sind genauer und höher aufgelöst, wodurch sie präzisere Informationen zu spezifischen Orten geben können.

Während das Forschungsfeld wuchs, entwickelten sich zwei Methoden. Bei der einen schätzt man ab, wie stark der menschliche Einfluss auf das Klima die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses wie etwa einer Hitzewelle verändert hat. Die Fachleute vergleichen dazu

Modelle für Extremwetterdynamik mit Simulationen einer Welt, in der es den Klimawandel nicht gibt. Auf diese Weise wird deutlich, ob Faktoren wie zusätzliche Treibhausgasemissionen das Ereignis wahrscheinlicher gemacht haben. Die erste Studie der WWA verglich die Temperaturen in fünf französischen Städten während einer Hitzewelle im Jahr 2015 mit denjenigen, die in den Sommern in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts herrschten. So stellte sich heraus, dass der Klimawandel die Wahrscheinlichkeit für die Hitzewelle um das Vierfache erhöht hatte.

Im Gegensatz dazu fragt man beim anderen Ansatz nach spezifischen Vorkommnissen, etwa: Hat der Klimawandel den Regen während des untersuchten Unwetters verstärkt? Bei dieser Methode liegt der Schwerpunkt auf thermodynamischen Veränderungen. So berücksichtigt man beispielsweise die Tatsache, dass wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann.

Laut Trenberth, einem frühen Verfechter des letzteren Ansatzes, war die wissenschaftliche Debatte darüber, welche der beiden Vorgehensweisen die bessere ist, anfangs erbittert. 2014 untersuchte eine Gruppe um Martin Hoerling bei der NOAA großflächige Überschwemmungen in Boulder im US-Bundesstaat Colorado und kam zu dem Schluss, Starkregen sei in der Region durch den Klimawandel nicht wahrscheinlicher geworden. Trenberth und seine Kollegen fochten die Ergebnisse an: Wie sie bemängelten, hatte die Studie nicht berücksichtigt, dass

die Meeresoberfläche vor der Westküste Mexikos ungewöhnlich warm gewesen war. Doch gerade deshalb habe sich deutlich mehr Feuchtigkeit in der Atmosphäre befunden, wodurch die Menge an Niederschlag stieg.

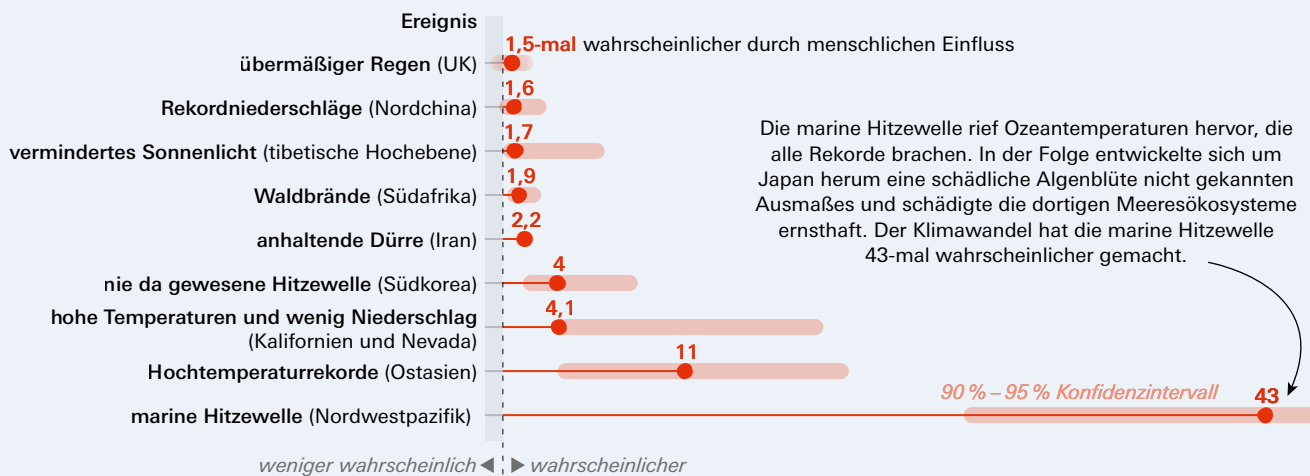
Mit der Zeit erkannten beide Lager, dass sich ihre Ansätze ergänzen können. »Im Idealfall macht man immer beides«, erklärt Otto, »die unterschiedlichen Ansätze betrachten das Problem von verschiedenen Seiten.« Beide Methoden könnten wichtige Informationen zum relativen Risiko liefern, urteilt Elisabeth Lloyd, ein Mitglied der American Academy of Arts and Sciences. Zusammen hätten solche Analysen viel Potenzial: Politische Entscheidungsträger wüssten, ob Straßen und Brücken stärkeren Regengüssen Stand halten müssen, Katastrophenschützer könnten planen, wie häufig sie künftig nach einem Unwetter kontrollieren, ob ebendiese Straßen und Brücken noch zugänglich sind.

Echtzeit-Analyse eines Hurrikans

Das Forschungsfeld machte einen weiteren Satz vorwärts, als der Hurrikan Harvey 2017 tagelang über der Region um Houston in Texas verweilte und währenddessen stellenweise bis zu 1500 Millimeter Regen ablud – das übertraf die bisherigen Rekorde bei Weitem. Trenberth fand heraus, dass mehr Wasserdampf über dem Golf von Mexiko aufgestiegen war, weil das Wasser dort zu jener Zeit sehr warm war. Der übermäßige Regen war eine

Mehr Hitze, mehr Regen, weniger Sonne

Neun detaillierte Fallstudien zeigen, wie stark der Klimawandel Extremwetter beeinflusst. Untersucht wurden etwa exzessiver Regen in Kalifornien, eine anhaltende Dürre in Iran oder verminderte Sonneneinstrahlung auf der tibetischen Hochebene, wo in der Folge weniger wuchs. Die Studien erschienen 2021 und 2022 in der Fachzeitschrift »Bulletin of the American Meteorological Society«.



direkte Folge davon. Nach einer eigenen Untersuchung von Otto und ihrem Team hatte der Regen durch den Klimawandel um 15 Prozent zugenommen. Die Regierungen in Hurrikan-Gebieten hätten künftig mit stärkeren Überflutungen zu rechnen, schrieb Trenberth, und gleichzeitig müssten sie Evakuierungsstrecken, Bauordnungen sowie Stromnetze verbessern.

Das war genau die Art von politischer und sozialer »Empfehlung«, wegen der Kritiker immer wieder fordern, Klimawissenschaftler sollten »bei ihrer Sache« bleiben: Sie sollten forschen, aber sich nicht zu den Implikationen äußern. Man habe ihr manchmal schon vorgeworfen, sie sei zu politisch, erzählt Friederike Otto. Dazu vertritt sie einen klaren Standpunkt: »Eine neutrale Wissenschaftlerin gibt es nicht. Die Fragen, die wir stellen, sind immer durch unsere Werte, durch unsere Geldgeber, durch unseren Wohnort beeinflusst. Gute Wissenschaft entsteht, indem man diese Zusammenhänge transparent macht – nicht, indem man so tut, als gebe es sie nicht.«

Anfangs analysierte die WWA nur einige Ereignisse im Jahr. Derzeit treffen sich die Mitglieder fast jede Woche online, um über irgendeine Katastrophe zu diskutieren. Sie müssen priorisieren, welche Ereignisse sich zu untersuchen lohnen. Viele der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler machen die Attributionsarbeit in ihrer Freizeit und schneiden sich die Zeit dafür zwischen Forschung, Lehre und weiteren Verpflichtungen aus den Rippen.

Um zu entscheiden, ob sie ein Ereignis untersuchen, schätzen die Fachleute ab, wie stark es die Menschen beeinträchtigen wird. Dazu hat die WWA für verschiedene Arten von Wetterextremen Kriterien aufgestellt. Bei Hitzewellen beispielsweise betrachtet die Gruppe unter anderem Todesfälle, ob das betroffene Gebiet stark besiedelt ist oder besonders anfällig. Tendenziell untersucht die WWA eher Vorkommnisse, die viele Menschen betreffen, doch auch die regionale Verteilung spielt eine Rolle: »Wir wollen nicht bloß Studien im globalen Norden durchführen, nur weil wir zufällig dort arbeiten«, fasst es Sarah Kew zusammen, die am Königlich-Niederländischen Meteorologischen Institut forscht. Neue wissenschaftliche Wege einzuschlagen sei ein weiteres Kriterium, ergänzt Otto. So entschied sich das Team dagegen, eine Kältewelle zu untersuchen, die Ende 2022 mehreren Millionen Menschen in den USA gefährlich wurde. Denn die Gruppe hatte bereits zuvor ähnliche extreme Kälteperioden in Nordamerika unter die Lupe genommen und versprach sich daher keine neuen Erkenntnisse.

Die südamerikanische Hitzewelle erfüllte gleich mehrere Kriterien der WWA: Rekordtemperaturen, noch dazu sehr früh im Sommer und in einer verwundbaren Region. In der ersten Videokonferenz zu dem Ereignis im November 2022 hielt sich niemand mit Smalltalk auf. »Wir haben

die argentinische Hitzewelle, die sich nach Norden ausgebreitet hat«, begann Maja Vahlberg, die mit dem Klimazentrum der internationalen Rotkreuz- und Rothalbmond-Bewegung (Red Cross Red Crescent Climate Centre)

zusammenarbeitet. »Hängt das mit La Niña zusammen?«, fragte Otto und bezog sich damit auf das großräumige Zirkulationsmuster im Pazifik, das Hitzewellen in der Gegend um Argentinien begünstigen kann. In einer lebhaften Diskussion entschloss sich das Team, mehr Informationen von Kolleginnen und Kollegen aus Südamerika einzuholen, und legte ein weiteres virtuelles Treffen für Anfang Dezember fest. Zwölf Minuten nach dem Start war das Meeting beendet.

Wann immer möglich, arbeitet die WWA mit Experten und Expertinnen von Ort zusammen. Denn sie wissen am besten, welche Datensätze die umfassendsten Informationen zu einer bestimmten Gegend enthalten oder wie man dort an meteorologische Daten gelangt. Beim zweiten Treffen Anfang Dezember erschien deshalb eine weitere Zoom-Kachel auf dem Bildschirm, die Juan Antonio Rivera in seinem Büro im argentinischen Mendoza zeigte. Der Klimawissenschaftler forscht am Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (Institut für Schnee, Glaziologie und Umweltwissenschaften). Die jüngste Dürre habe Nordargentinien, Südbrasilien, Uruguay und Paraguay betroffen, berichtete er. In weiten Teilen dieser Regionen gebe es aber kein dichtes Netzwerk an Wetterstationen. Zunächst müsse man daher herausfinden, welche Daten zur Verfügung stünden, anhand derer sich analysieren ließe, wie sich die Dürre mit der Zeit verstärkt hätte. Dabei könne er der Gruppe behilflich sein.

Die Fachleute besprachen Möglichkeiten, den Einfluss der Hitze auf die Dürre herauszuarbeiten. »Mit jeder Hitzewelle verschlimmert sich die Dürre«, berichtete die in Buenos Aires lebende Anna Sörensson, Forscherin am Instituto Franco-Argentino sobre Estudios de Clima y sus Impactos (Französisch-Argentinisches Institut für Klima- und Klimafolgenforschung). Niedrige Flusspegel hatten eine wichtige Exportroute für landwirtschaftliche Waren unterbrochen und Wasserkraftwerke stillgelegt. Eine Transportgesellschaft hatte sie sogar angesprochen und nach Rat gefragt, weil sie neue Schiffe entwerfen wollte, die in dem niedrigen Wasser fahren können sollten.

Die Frage des Blickwinkels

Das Team muss jedes Ereignis auf sinnvolle Weise definieren. Für jede Attributionsstudie gelte es zunächst herauszufinden, welche Parameter überhaupt messbar seien, erzählte mir Otto später. Bei Hitzewellen betrachtet die Gruppe Temperaturen, die in einem bestimmten Zeitraum einen Grenzwert überschreiten. Dürren sind komplexer, denn sie lassen sich auf verschiedene Weise beschreiben – durch ausbleibenden Regen, durch Bodenfeuchtigkeit oder durch Wasserstände von Oberflächengewässern. Für eine Definition ist es mitunter nötig, mehrere Messgrößen zu berücksichtigen. »Bei hohen

Temperaturen verdunstet sehr viel Wasser, daher fließt weniger ab, was große Auswirkungen auf die Wirtschaft hat. Das sieht man nicht, wenn man nur die Regenmenge betrachtet«, führt die Forscherin aus.

Otto besprach mit ihrem Team, ob sich allein aus der Messung von Temperatur und Niederschlag rasch eine aussagekräftige Analyse machen ließe. Sie wogen die Optionen ab: Hitzewellen sind relativ unkompliziert zu analysieren, da viele bereits untersucht und mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht wurden. Einige Mitglieder der WWA plädierten hingegen für eine umfassendere

Analyse der Dürre, die aber länger dauern würde. »Könnte man nicht beides machen?«, fragte eine der Beteiligten schließlich.

Rivera bekräftigte den anderen gegenüber nochmals, wie außergewöhnlich hoch die Temperaturen in seiner Heimat waren. »Das war der wärmste November, der in Argentinien jemals aufgezeichnet wurde«, sagte er. Lang-

Turboantrieb für Wirbelstürme

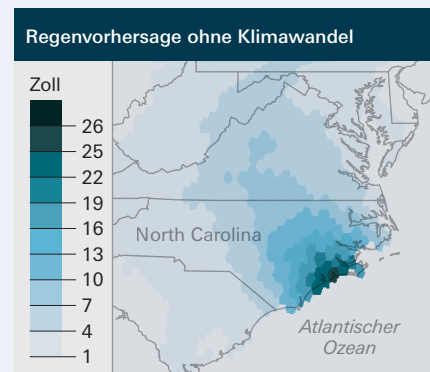
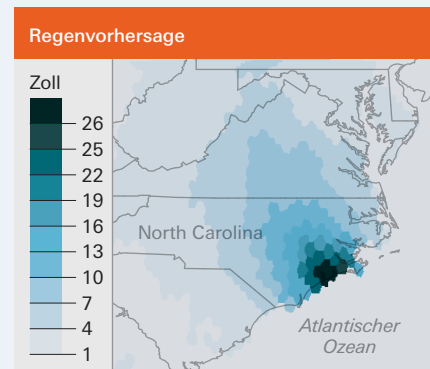
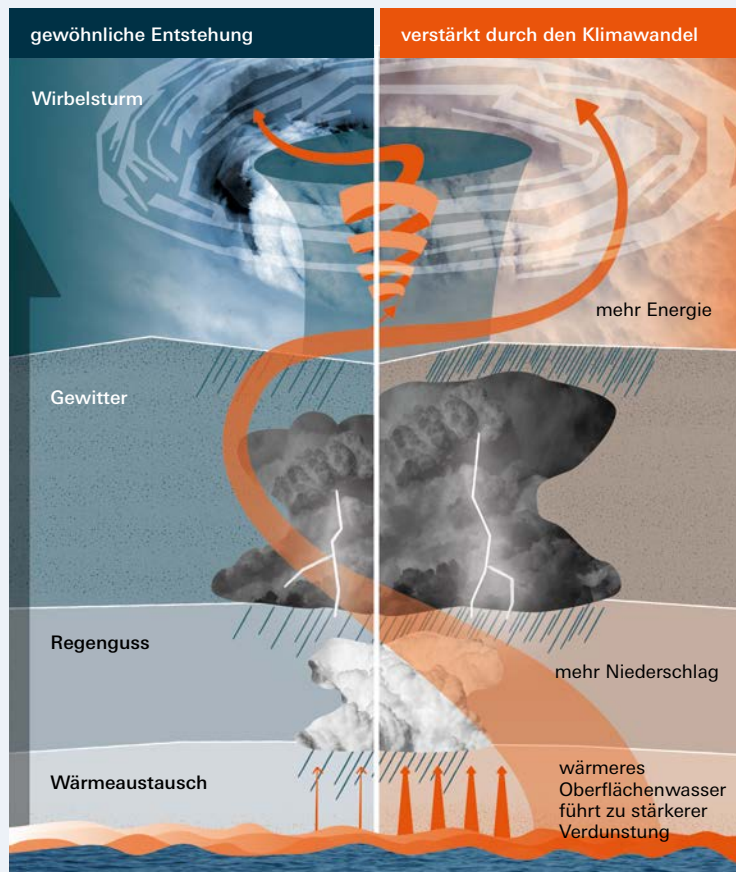
Durch den Klimawandel erwärmen sich die Atmosphäre und die Ozeane. Die zusätzliche Wärme kann Regengüsse, Schneestürme, Gewitter und Hurrikans verstärken, was mehr Todesfälle und größere Schäden nach sich zieht. Mit Hilfe der Attributionswissenschaft lässt sich bestimmen, ob und wie sehr der Klimawandel ein bestimmtes Unwetter verstärkt hat.

Wie der Klimawandel Hurrikans verstärkt

Über einem warmen Ozean verdunstet sehr viel Wasser. Der reichlich vorhandene Wasserdampf in der Luft kondensiert beim Aufsteigen, dadurch fällt starker Regen. Das setzt wiederum Wärme frei und Luft wird nach oben gezogen. So können starke Aufwinde und Gewitter entstehen. Wenn eine atmosphärische Störung vorbeizieht, beginnen die Sturmsysteme mitunter zu rotieren und können sich zu einem Hurrikan (Wirbelsturm) entwickeln. Durch den Klimawandel erwärmen sich Wasser und Luft noch weiter – dadurch verdunstet mehr Wasser, mehr Niederschlag fällt, und die rotierenden Wettersysteme enthalten mehr Energie.

»Florence« bringt zusätzlichen Regen

Die Attributionswissenschaft kann fast in Echtzeit voraussagen, wie viel mehr Regen ein Hurrikan abladen wird. Kevin Reed und Michael Wehner sagten die Niederschläge für den Hurrikan Florence vorher, als er im September 2018 auf North Carolina traf. Sie prognostizierten fünf Prozent mehr Regen (oben) als in einer Welt ohne den Klimawandel (unten). Ihre Vorhersage stimmte gut mit den Werten überein, die Florence schließlich tatsächlich brachte.



sam begeisterte sich die Gruppe dafür, die Hitze in einer raschen Analyse zu untersuchen und sich für die kompliziertere Studie zur Dürre die nötige Zeit zu nehmen. »Eine zweiteilige Studie haben wir noch nie gemacht«, grübelte Otto. Nach Verteilung der Aufgaben loggten sich alle aus der Konferenz aus und kehrten in die physische Wirklichkeit zurück.

Innerhalb weniger Wochen verglichen die Fachleute mit Hilfe fünf verschiedener Sätze an Computermodellen die heutigen klimatischen Eigenschaften mit denen, wie sie ohne den Klimawandel herrschen würden. Dabei konzentrierten sie sich auf die heißeste Woche Anfang Dezember in Nordargentinien und Paraguay. Resultat: Der Klimawandel hatte die Hitzewelle 60-mal wahrscheinlicher gemacht. Die Temperaturen in Argentinien waren laut ihren Ergebnissen rund 1,5 Grad Celsius höher gelegen, als sie es sonst gewesen wären. Einer anderen Studie nach steigt bei extrem hohen Temperaturen in südamerikanischen Städten das Risiko für hitzebedingte Todesfälle mit jedem Grad Celsius um zirka 5,7 Prozent. Die WWA veröffentlichte ihre Ergebnisse Ende Dezember, als sich eine weitere Hitzewelle über Argentinien legte. »Es ist bemerkenswert, dass diese Rekordtemperaturen noch vor dem Beginn der Sommersaison auf der Südhalbkugel auftraten. Dadurch ist sie besonders außergewöhnlich«, schrieb die Gruppe.

Als sich das Team daranmachte, die Dürre zu untersuchen, fiel in Teilen von Buenos Aires der Strom aus. In Nordargentinien und im Nachbarland Chile brachen Waldbrände aus.

»Was ein Wetterereignis in eine Katastrophe verwandelt, ist immer eine Mischung aus Vulnerabilität und Exposition«, drückt es Otto aus. Will heißen: Ob ein Extremereignis schlimme Konsequenzen hat, hängt stark davon ab, wie anfällig eine Region für die Auswirkungen ist und wie viele Menschen den Bedingungen ausgesetzt sind. Hitzerekorde allein sagen nichts darüber aus, wie stark die Bevölkerung leidet. Wenn man wissenschaftliche Forschung und Katastrophenschutz nicht gemeinsam betrachte, »versteht man nicht, was Klimawandel bedeutet«, so Otto. In Lateinamerika etwa herrscht große soziale Ungleichheit; marginalisierte Gruppen sind anfälliger für die gesundheitlichen Folgen extremen Wetters. Rivera erinnerte sich an ein Treffen, bei dem verzweifelte Bauern auf dem ausgetrockneten Boden knieten und um Regen beteten.

Argentiniens Misere machte nördlich des Äquators kaum Schlagzeilen. Doch ihre Auswirkungen werden weltweit zu spüren sein. Das Land ist einer der größten Weizenexporteure; eine Handelsgruppe schätzt, dass im Jahr 2023 die Hälfte der globalen Weizenernte auf Grund der Dürre ausfallen wird, alle argentinischen Ernteaufträge insgesamt werden sich auf zehn Milliarden Dollar belaufen. Analysten warnten davor, dass die Missernten des Landes die Lebensmittelpreise rund um die Welt weiter in die Höhe treiben könnten.

Weil sie soziale Themen wie solche direkt anspricht, sticht die WWA innerhalb der Klimawissenschaft heraus.

Otto verweist auf eine Studie von 2022 zur Sahelzone in Afrika. 2021 setzte die Regensaison dort verspätet ein. Die daraus resultierenden Probleme hätten im Grunde nichts mit dem Wetter zu tun gehabt, erzählt die Wissenschaftlerin. Allerdings hängt die Wirtschaft der Region – sowohl die Bewässerung der Felder als auch die Viehzucht – stark vom Regen ab. Weil sich die Niederschläge verspäteten, waren letztlich nicht genügend Lebensmittel vorhanden. »Wenn sich die Regenfälle nur geringfügig ändern, hat das bereits Auswirkungen auf die ohnehin eingeschränkte Lebensmittelversorgung«, schrieb die WWA. Durch große Unsicherheiten in den Datensets konnten die Fachleute nicht ermitteln, ob der Klimawandel auf die Verschiebung der Regenfälle Einfluss hatte. Aber sie warnten: Die Region sei »anfällig für künftige Auswirkungen des Klimawandels auf die Kornkammern weltweit«.

Erst allmählich kommen die Ergebnisse in der Politik an

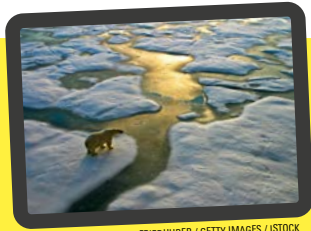
Wie manche Experten anmerken, würde die Attribution zwar immer besser, doch die Klimawissenschaftler und Klimawissenschaftlerinnen verkauften ihre Schlussfolgerungen immer noch unter Wert – ein wichtiger Faktor, da das Forschungsfeld derzeit heraus aus der akademischen Diskussion und hinein in öffentliche Vorgänge wie Gerichtsverfahren diffundiert. Und die Beweise, die vor Gericht angeführt werden, hinken der neuesten Forschung oft hinterher. 2021 haben Otto und Kollegen 73 Klimaklagen weltweit untersucht und herausgefunden, dass die vorgelegten Beweise schon zehn Jahre veraltet waren. »Es braucht einige Zeit, bis neue Forschungsergebnisse ihren Weg in die Politik finden«, sagt Otto. »Das sollte schneller passieren.«

Zumindest einen Gerichtsbeschluss hat die Arbeit der WWA beeinflusst: Laut ihrer Untersuchung der verheerenden australischen Waldbrände von 2019 bis 2020 hat der Klimawandel dazu beigetragen, dass das allgemeine saisonale Feuerrisiko um das Neunfache gestiegen ist. Ein australisches Gericht berücksichtigte dieses Ergebnis und befand, die Umweltschutzbehörde des Bundesstaats New South Wales habe beim Umweltschutz versagt und der Staat müsse seine Treibhausgasemissionen senken.

Da Extremwetter immer häufiger auftritt, ist es schwierig, stets auf dem neuesten Stand zu bleiben. Im Winter 2022/23 starben in Kalifornien mehr als 20 Menschen bei Unwettern, die durch atmosphärische Flüsse hervorgerufen wurden. Die WWA untersuchte die daraus resultierenden Fluten nicht – unter anderem deshalb, weil die vielen Unwetter die Kapazitäten des Teams übersteigen. »Es ist eine kleine Gemeinschaft mit wenig Fördergeld«, kommentiert Michael Wehner, Klimawissenschaftler am Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien.

Wehner und sein Kollege Kevin Reed an der Stony Brook University im US-Bundesstaat New York versuchen, ähnlich wie die WWA, Attributionsstudien quasi in Echtzeit zu erstellen. Im September 2022 analysierten sie den Hurrikan Ian, während er über Florida wütete. Die Wissen-

schaftler waren teilweise deshalb so schnell, weil sie kurz vorher eine Studie zur Hurrikansaison 2020 herausgegeben hatten. Darin waren sie zu dem Ergebnis gekommen, dass die Saison fünf Prozent nasser war, als sie es ohne den Klimawandel gewesen wäre. Also fütterten sie die Bedingungen von Ian in ihre Modelle ein. »Vermutlich



SEPPRIEDHUBER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/klimawandel

wären wir noch schneller gewesen, doch Kevin war zum Abendessen verabredet«, witzelt Wehner. Sie veröffentlichten eine zeitnahe Stellungnahme vor dem Peer-Review-Prozess und erklärten, dass der Klimawandel den Regen um zehn Prozent verstärkt hatte.

Oft muss Wehner Anfragen ablehnen. Aus diesem Grund schrieb er 2022 im Fachmagazin »PLOS Climate«, Attributionsstudien seien mittlerweile Routine und sollten sich aus der akademischen Forschung heraus in die Praxis bewegen. Die Wissenschaft sei gereift. »Sie könnte in den laufenden Betrieb übergehen, so wie Wettervorhersagen«, schlägt Wehner vor. Für Otto wäre diese Veränderung willkommen. »Ich würde mir wirklich wünschen, dass die NOAA das übernimmt«, erzählt sie, »oder Copernicus«, das europäische Erdbeobachtungsprogramm. »Dann könnte nicht nur die wissenschaftliche Gemeinschaft viel mehr tun, die Studien würden außerdem direkter in nationale Politik einfließen.«

Attribution per Wetterdienst

In den USA hat die NOAA kürzlich ein Pilotprojekt dazu gestartet. Unter der Leitung von David Easterling, dem Direktor für nationale Klimabeurteilung bei der NOAA, will die Organisation Kapazitäten dazu aufbauen. Die Vorteile liegen auf der Hand: Die NOAA erhält in Echtzeit Informationen von Wetterstationen im ganzen Land und hat Zugang zur Klimamodellentwicklung des Geophysical Fluid Dynamics Laboratory an der Princeton University. Außerdem, merkt Easterling an, sei sie als unvoreingenommene Institution bekannt. »Wenn die NOAA sagt, dass der Klimawandel ein Ereignis um 15 Prozent wahrscheinlicher gemacht hat, dann wird das die Einstellung vieler Menschen ändern«, hofft er mit Blick auf diejenigen, die daran zweifeln, ob der Klimawandel existiert.

Die Attributionsforschung könnte durch ihre Fortschritte eine wichtige Rolle dabei spielen, die Gesellschaft auf größere Risiken vorzubereiten – sei es durch neue Bauvorschriften oder indem sie zeigt, wie dringend notwen-

dig drastische Emissionsenkungen sind. Diese Einschätzung hegt die Sozialwissenschaftlerin Susanne Moser, die als Beraterin auf Klimafolgenanpassung spezialisiert ist. Professionelle Ingenieursverbände setzen bereits auf anpassungsfähige Strukturen, etwa Dämme, die sich dank eines breiteren Fundaments erhöhen lassen, wenn der Meeresspiegel steigt. Kalifornien und andere US-Bundesstaaten untersuchen laut Moser zunehmend, wie sie Informationen zum Klimawandel in ihre Infrastrukturpläne einbeziehen können.

Manche Länder werden es deutlich leichter haben als andere, solche Anpassungen zu finanzieren. Daher hat die Klimakonferenz der Vereinten Nationen (COP27) im Jahr 2022 einen Klima-Entschädigungsfonds (»loss and damage fund«) ins Leben gerufen, der Ländern mit geringem Einkommen und relativ niedrigen Treibhausgasemissionen zugutekommen soll. Bislang existiert allerdings noch immer keine Definition dafür, was als Klimaschaden zählt, berichtet Otto. »Welche Beweise braucht es dazu, und wer liefert sie?«, fragt sie. Weitere Arbeit in der Attributionswissenschaft sei nötig, um internationale Haftung oder die Höhe von Kompensationszahlungen festzulegen.

In letzter Zeit sei ihre Arbeit immer stressiger geworden, erzählte Otto kürzlich bei einem Videocall. »Anfangs stand unsere Forschung noch nicht so im Rampenlicht – man spürte keinen großen Druck«, berichtete sie. 2021 stand Otto auf der Liste der 100 einflussreichsten Personen des »Time«-Magazins. Heute erkennen die Leute sie beim Einkaufen oder in ihrem Tanzstudio.

Wäre die Attributionswissenschaft schon vor einigen Jahrzehnten entstanden, wäre es wohl weniger beängstigend gewesen, sich damit zu beschäftigen. Jetzt jedoch ist ihre Arbeit ein Wettlauf gegen die Zeit. »Menschen leiden«, erklärt Otto, »und sie kommen mit den Folgen des Klimawandels nicht zurecht.« ◀

QUELLEN

Philip, S. et al.: A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography* 6, 2020

Rivera, J.A. et al.: Climate change made record breaking early season heat in Argentina and Paraguay about 60 times more likely. *World Weather Attribution*, 2022. <https://tinyurl.com/yc68pbd7>

Stott, P.A. et al.: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432, 2004

Trenberth, K.E. et al.: Hurricane Harvey links to ocean heat content and climate change adaptation. *Earth's Future* 6, 2018

Van Oldenborgh, G.J. et al.: Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017. *Environmental Research Letters* 12, 2017

WEBLINK

www.worldweatherattribution.org

World Weather Attribution

Hier sind alle Extremwetteranalysen der WWA zu finden.

»Wir betrachten nicht nur das Wetter«

Friederike Otto sucht nach den Ursachen für Extremwetterereignisse. Im Gespräch mit »Spektrum« erzählt die Wissenschaftlerin, wie man den Anteil des Klimawandels herausfiltert und was ihre Arbeit für politische Entscheidungen bedeutet.

» spektrum.de/artikel/2160285

Ob tödliche Hitze in weiten Teilen Südeuropas oder Sturzfluten in Italien: Extremes Wetter erzeugt jedes Mal auch eine Debatte, wie stark der Klimawandel dazu beigetragen hat. Denn Naturkatastrophen gab es schon immer – hätte es diese hier ohne Klimawandel nicht gegeben? Friederike Otto untersucht seit zehn Jahren, wie man die Frage für einzelne Ereignisse beantwortet: Sie betreibt Attributionsforschung. Manche wären demnach ohne die Erderwärmung quasi unmöglich gewesen, bei anderen wiederum offenbart sich vor allem menschliche Fehlplanung.

»Spektrum«: Frau Dr. Otto, heute, am Tag unseres Gesprächs, ist der 25. April. Für die nächsten Tage sind in Teilen Spaniens Temperaturen von 35 bis 40 Grad vorhergesagt. Wenn Sie zu dieser Hitzewelle eine Attributionsstudie erstellen würden, wie würden Sie vorgehen?

Wir machen eine Attributionsstudie, wenn ein Ereignis viele Menschen beeinträchtigt. Das ist das wichtigste Kriterium für uns. Hier wäre das wahrscheinlich der Fall, denn es ist extrem früh im Jahr für derart hohe Temperaturen. Hitzewellen sind ohnehin mit Abstand die tödlichsten Extremereignisse; besonders gefährlich sind sie aber am Anfang der Saison, wenn die Menschen noch nicht an die Hitze gewöhnt sind.

Welchen Unterschied macht es, wenn die Hitze früher kommt?

Die Todeszahlen sind bei früheren Hitzewellen höher. Im Hochsommer rechnen die Menschen damit und verhalten sich anders, bleiben etwa tagsüber in ihren



MAISY THORSDOTHR

FRIEDERIKE OTTO ist Associate Professor für Klimawissenschaften am Grantham Institute for Climate Change and the Environment am Imperial College London. Die Physikerin promovierte 2011 an der Freien Universität zu Berlin im Fach Philosophie und forschte anschließend an der University of Oxford, wo sie das Environmental Change Institute leitete. Otto leitet die Initiative »World Weather Attribution« zur raschen Attribution von Extremwetterereignissen auf der ganzen Welt und hat sie mit gegründet. Außerdem wirkte sie als Leitautorin am 6. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mit.

Häusern. In Spanien sind die meisten Städte immerhin auf hohe Temperaturen ausgelegt, anders als etwa London, wo im Sommer 2022 bis zu 40 Grad Celsius herrschten.

Nehmen wir an, Sie entscheiden sich, die Studie durchzuführen. Was folgt dann?

Wir definieren das Ereignis. Denn je nachdem, wie man eine Hitzewelle betrachtet, erhält man ein anderes quantitatives Ergebnis für den Einfluss des Klimawandels. Würde man die Temperaturen gemittelt über den gesamten April in Spanien erfassen, erhielte man ein anderes Ergebnis, als wenn man sich etwa auf die Maximaltemperaturen über zwei oder drei Tage in den am meisten betroffenen Gebieten fokussiert. Letzteres würde man vermutlich eher tun, denn dieser Faktor ist besonders wichtig, was die Auswirkung auf die Gesundheit angeht. Ebenso könnte man sich Hitzestress anschauen, also die Kombination von Feuchtigkeit und Hitze. Das wäre beispielsweise in tropischen Regionen sinnvoll.

Dann haben Sie definiert, was genau Sie untersuchen wollen ...

Dann werten wir die Beobachtungsdaten zu den Variablen aus, die wir ansehen wollen. Zum einen prüfen wir: Wie heiß war es wirklich, was ist das tatsächliche Ereignis? Danach folgt die Attribution. Anhand von Klimamodellen bestimmen wir, wie wahrscheinlich das gemessene Ereignis in unserer heutigen Welt ist – ist es ein Jahrhundertereignis, ein Jahrzehntereignis? *[Das Team um Friederike Otto hat die Studie anschließend durchgeführt: Die extreme April-Hitze in Spanien, Portugal, Marokko und Algerien wäre ohne den Klimawandel demnach praktisch unmöglich gewesen. Anm. d. Red.]*

Weil wir sehr genau wissen, wie viele Treibhausgase seit Beginn der industriellen Revolution in die Atmosphäre gelangt sind, können wir sie in Klimamodellen aus der Atmosphäre entfernen und damit die Welt simulieren, wie sie ohne Klimawandel wäre. Dann vergleichen wir: Wäre dort das beobachtete Ereignis ähnlich wahrscheinlich? Wenn ja, schließen wir darauf, dass der Klimawandel keinen Einfluss hat. Wenn sich aber herausstellt, dass wir jetzt alle zwei Jahre mit einem Ereignis rechnen müssen, das in der hypothetischen Welt ein Jahrhundertereignis gewesen wäre, dann ist der Unterschied dem Klimawandel zuzuordnen. Das ist der eigentliche Attributionsschritt.

Für das Wetter in der realen Welt nutzen Sie sowohl Beobachtungsdaten als auch Simulationen?

Wir haben Beobachtungsdaten aus den letzten zirka 100 Jahren. Während dieser Zeit hat sich zum einen das Klima verändert – noch in den 1950er Jahren waren die klimatischen Bedingungen ganz andere als heute. Doch auch etwa die zunehmende Urbanisierung und Abholzung von Wäldern haben einen Einfluss auf die Temperatur. In den Modellen können wir jeweils nur einen einzelnen Faktor variieren und die anderen konstant lassen, etwa die Treibhausgase, um seinen Einfluss damit zu quantifizieren.

Zum anderen zeigen Beobachtungsdaten nur eine einzige Realisierung möglichen Wetters – dasjenige, das tatsächlich stattgefunden hat. Wir wollen jedoch wissen, was überhaupt an Wetter möglich ist in der Welt, in der wir jetzt leben. Und letztendlich kann man allein auf Grundlage von Beobachtungen aus 100 Jahren keine Aussage über ein Jahrhundertereignis treffen. Man muss zumindest statistische Modelle hinzuziehen.

Es gibt demnach zwei Gründe für Simulationen: Einerseits brauchen wir mehr Daten, um überhaupt Statistik zu Extremereignissen betreiben zu können. Andererseits wollen wir den Klimawandeleffekt isolieren.

Wie oft lassen Sie ein Modell laufen, um das heutige Wetter zu simulieren?

Wir nutzen immer so viele verschiedene Modelle wie möglich, denn keines ist perfekt. Meist haben wir anfangs etwa 70 davon, von denen jedes zwischen 2 und 200 Simulationen beinhaltet. Wir haben also sehr viele Daten.

Glossar

Klimamodell

Ein Klimamodell ist ein mathematisches Modell, das die klimatischen Bedingungen auf der Erde in Form von Gleichungen abbildet. Dazu wird der Globus in viele dreidimensionale Felder unterteilt, als würde man ein Gitter oder Netz darüberlegen. Je enger die Gitterpunkte zusammenliegen, desto genauer, aber auch rechenintensiver ist das Modell.

Das Erdsystem in seiner Komplexität exakt nachzubilden, ist nicht möglich – dementsprechend ist jedes Klimamodell eine Annäherung mit gewissen Vereinfachungen (siehe »Wie ein Klimamodell entsteht«, »Spektrum« November 2020, ab S. 54).

Simulation

Mit einem Klimamodell lassen sich verschiedene Szenarien simulieren, etwa Niederschläge oder Temperaturen in einer bestimmten Region. Jede Simulation ist nur ein mögliches Ergebnis, daher werden Vorhersagen zuverlässiger, wenn man mehrere Simulationen durchführt.

Wetter und Klima

Als Klima bezeichnet man das durchschnittliche Wetter aus zirka 30 Jahren. In diesem Sinne ist Klima das mögliche Wetter. Die Wettervorhersage funktioniert nach ähnlichen Prinzipien wie Klimaprognosen. Anders als Letztere ermittelt sie allerdings keinen statistischen Wert, sondern hat zum Ziel, das wahrscheinlichste Wetter an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit vorauszusagen.

Aber bevor wir den Attributionsschritt machen, müssen wir jedes Modell daraufhin evaluieren, ob es das untersuchte Ereignis sinnvoll simulieren kann. Dann endet man nicht mit 70 Modellen, sondern in günstigen Fällen mit zehn – oder auch mal mit gar keinem.

Wann ist das der Fall?

Es gibt Extremereignisse, die derzeit kein Klimamodell sinnvoll simulieren kann. Wir werden beispielsweise immer wieder gebeten, Attributionsstudien zu Tornados zu machen. Diese finden allerdings auf so kleinen Skalen statt, dass die vorhandenen Modelle das nicht auflösen. Zwar gibt es inzwischen welche, die eine Auflösung von wenigen Kilometern haben, doch dazu existieren vielleicht ein oder zwei Simulationen. Damit kann man keine Statistik über Extremereignisse machen.

Im Grunde wissen wir ja bereits, dass der Klimawandel Extremwetter wahrscheinlicher macht: ob Hitzewellen oder Starkregen, möglicherweise auch Hurrikans ...

Nein, das stimmt nicht für alle. Hitzewellen ja, Starkregen ebenfalls. Und genauso die Regenfälle, die mit Hurrikans assoziiert werden. Doch es gibt keine Trends zu mehr Hurrikans, schon gar nicht global. Und auch im Bezug auf Dürren verhält es sich von Region zu Region sehr unterschiedlich.

Warum ist es wichtig, für einzelne Ereignisse den Anteil des Klimawandels auszumachen?

Für eine Hitzewelle bräuchte man im Grunde keine Studie mehr. Wir wissen, dass Hitzewellen deutlich wahrscheinlicher, länger und intensiver geworden sind. Ginge es rein darum herauszufinden, ob der Klimawandel einen Einfluss hat oder nicht, wäre keine Studie nötig. Für die meisten Ereignisse ist es aber nicht von vornherein klar, zumindest in bestimmten Regionen. Außerdem finden wir keineswegs nur heraus, wie viel wahrscheinlicher ein Ereignis ist. Letztes Jahr haben wir beispielsweise die extremen Überschwemmungen in Nigeria untersucht und waren sehr überrascht, wie groß die Rolle des Klimawandels ist: Die Wahrscheinlichkeit für das Extremereignis hatte sich um den Faktor 80 erhöht. Die Erwärmung kann also nicht der einzige Grund sein, denn dadurch würde sich die Wahrscheinlichkeit vielleicht verdoppeln. Es hat sich demnach auch etwas in der atmosphärischen Zirkulation verändert. Solche wichtigen Erkenntnisse erhält man erst durch Attributionsstudien.

Sie betrachten aber auch andere Aspekte.

Wir sehen uns nicht nur das Wetter an, sondern fragen auch: Wen hat das Wetter beeinträchtigt, welche Teile der Bevölkerung haben am meisten gelitten und warum? Gab es Frühwarnsysteme und falls ja, haben sie diese Menschen erreicht? So wollen wir herausfinden, welche Faktoren maßgeblich zu den Schäden beigetragen haben. Letztendlich können wir dann Informationen liefern, auf welche Bereiche man sich mit Anpassungsmaßnahmen fokussiert.

In welchen Fällen waren andere Einflüsse ausschlaggebender für eine Katastrophe als der Klimawandel selbst?

Die schwere Dürre in Madagaskar von 2019 bis 2021 etwa war ein extrem seltenes Ereignis, doch der Klimawandel hatte auf den Regen keinen großen Einfluss. In der Gegend gibt es immer wieder Jahre mit sehr wenig Niederschlag. Doch das große Problem ist, dass die Menschen in der Region ausschließlich von Landwirtschaft leben. Wenn der Regen einmal ausbleibt und diese Einkommensquelle wegbricht, hat das katastrophale Konsequenzen. Hinzu kamen Reisebeschränkungen durch die Pandemie, wodurch die Menschen nicht in andere Landesteile ausweichen und dort auf andere Weise Einkommen erwirtschaften konnten. Es kamen also viele verschiedene Faktoren zusammen. Das ist aber meistens der Fall, ebenso bei den Überschwemmungen in Deutschland 2021.

Was haben Sie zu diesen herausgefunden?

Der Klimawandel spielte dabei zwar eine Rolle. Daneben war jedoch die Geografie ein Problem, weil die Niederschläge in sehr engen Tälern fielen und die Flüsse damit extrem schnell vollliefen. Zudem sind dort fast alle Böden versiegelt. Das Wasser konnte daher nicht versickern, wodurch die Pegel wahnsinnig schnell angestiegen sind.

Außerdem haben die Frühwarnsysteme nicht funktioniert. Der Wetterdienst hat Warnungen herausgegeben, doch die haben die Bewohner in den meisten Fällen nicht erreicht – und wenn doch, dann wussten die Leute nicht, was sie mit der Information anfangen sollen. Es gab keine Evakuierungspläne oder Informationen, welche Straßen noch sicher sind. Diese Faktoren spielen gerade bei den Todeszahlen eine viel größere Rolle als der Klimawandel.

Heute analysieren Sie Extremereignisse mit dem Team der World Weather Attribution fast in Echtzeit, früher dauerte es Monate. Wie funktioniert das so schnell?

An einer Studie arbeiten rund 20 Personen. Ein Teil von ihnen, das Core-Team, bleibt stets gleich. Mit mir am Imperial College London arbeiten zwei Postdocs, drei arbeiten in den Niederlanden, und schließlich sind noch drei Personen vom Roten Kreuz immer dabei. Diese machen die Vulnerabilitäts-Analysen, das heißt, sie untersuchen etwa, ob es Hitzeaktionspläne gab oder welche Bevölkerungsgruppen am meisten litten. Neun bis zehn Leute sind also jedes Mal beteiligt und seit vielen Jahren ein eingespieltes Team. Deshalb funktioniert das Ganze so schnell.

Spielt Rechenzeit eine Rolle?

Fast nicht.

Wirklich? Sie hatten aus dem Grund einmal ein spannendes Projekt namens weather@home. Dabei haben Sie einzelne Teile Ihrer Simulationen auf privaten Rechnern von Freiwilligen laufen lassen ...

Als ich vor zehn Jahren angefangen habe, Attributionsforschung zu betreiben, gab es von den großen Klimamodellen vielleicht eine oder zwei Simulationen. Man konnte sie für Extremwetter daher im Grunde nicht verwenden. Und darum wurde an der University of Oxford, an der ich damals geforscht habe, das Projekt »weather@home« gestartet. Es teilte ein vom britischen Wetterdienst entwickeltes Klimamodell sozusagen in kleine Stückchen auf, die anschließend auf den PCs von Privatpersonen liefen. Damit erhielten wir viele Simulationen möglichen Wetters. Zum damaligen Zeitpunkt war das die einzige Möglichkeit, solche Studien zu machen. Das hat sich aber seither geändert.

Welche Infrastruktur nutzen Sie aktuell?

Die Kapazität von Großrechnern hat sich stark verändert. Die großen Klimarechenzentren – das britische Met Office, die amerikanische National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und die Max-Planck-Gesellschaft, die alle ihre eigenen Klimamodelle haben – verfügen heute über zahlreiche Simulationen, so dass sie sich für unsere Attributionsstudien eignen. Damit ist es uns jetzt möglich, viele verschiedene Modelle zu verwenden, und wir können die systematischen Fehler einzelner Modelle zumindest erkennen – allerdings nicht umgehen.

Sie haben 2021 eine Anleitung für Attributionsstudien veröffentlicht – auch, um die Attribution in die Anwendung zu bringen, so dass etwa Wetterdienste den Service übernehmen können. Geschieht das bereits?

Der Wetterdienst im Vereinigten Königreich, das Met Office, hat ein »Attribution Team«, das ab und zu schnelle Studien durchführt. Das Bureau of Meteorology in Australien hat ebenfalls ein solches Team. Es hat allerdings noch nicht aktiv mit der Arbeit begonnen, weil gerade in Australien das politische Klima lange Zeit etwas schwierig war. Doch ich nehme an, dass sich das innerhalb des nächsten Jahres ändern wird.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) verweist bislang auf die World Weather Attribution.

Der DWD wollte das ursprünglich machen, hat aber kein Personal dafür. Das Einzige, was man dazu braucht, sind Menschen, die wissen, wie es geht. Man benötigt kaum Rechenzeit, es ist auch nicht wahnsinnig kompliziert. Man bräuchte ein drei- bis vierköpfiges Team, das genau dann eine Studie erstellt, wenn ein Extremereignis stattfindet.

Was ist für Sie jetzt das Wichtigste, was man bei der Attributionsforschung verbessern muss?

Ich würde mir wirklich wünschen, dass die großen Wetterdienste Extremereignisse wie die Hitzewelle in Spanien untersuchen. Wenn das sonst keiner tut, sehe ich jedoch nach wie vor einen Mehrwert darin, wenn wir diese Studien durchführen. Denn die Frage nach der Rolle des Klimawandels wird immer wieder aufkommen. Wenn die Wissenschaft dazu schweigt, geben andere Men-

schen alle möglichen Antworten. Insofern bringt die Attribution zum einen Evidenz in die Debatte, die ohnehin stattfindet.

Zum anderen haben wir bislang kein Inventar über die globalen Auswirkungen des Klimawandels. Das Bild davon, was er konkret bedeutet und wie er uns oder unsere Gesellschaft beeinträchtigt, ist noch sehr lückenhaft. Wir haben lediglich ein paar Schnappschüsse. Vor allem gibt es bisher viele Studien im globalen Norden, in vielen Ländern des globalen Südens dagegen sehr wenige. Genauso müsste man viel systematischer untersuchen, welche Teile der Bevölkerung ein Ereignis am meisten betrifft, um anhand solcher Informationen konkrete Anpassungsmaßnahmen in die Wege zu leiten.

Was verstehen Sie unter Anpassung?

Bei Anpassung denken die meisten Menschen an Infrastruktur, etwa Staudämme. Doch um mit den Folgen des Klimawandels klarzukommen, braucht es andere Dinge, beispielsweise Frühwarnsysteme. Die gilt es nicht nur aufzubauen, sondern man muss in Menschen investieren, in Informationen, soziale Systeme, Gesundheitssysteme. All das leistet einen viel größeren Beitrag dazu, Gesellschaften für die Folgen des Klimawandels weniger anfällig zu machen. Ich sehe eine große Aufgabe darin, das noch deutlicher mit Zahlen und Evidenz zu belegen und so zu kommunizieren, dass es wirklich verstanden wird.

Angesichts der Katastrophen, mit denen Sie sich beschäftigen: Wie blicken Sie trotzdem hoffnungsvoll in die Zukunft?

Wir finden in den Studien fast immer heraus, dass viele der Schäden durch lokale Entscheidungen entstehen. Das ist einerseits tragisch, andererseits eröffnet es unglaublich großen Handlungsspielraum. Natürlich müssen wir global aufhören, fossile Ressourcen zu verbrennen. Das ist ein ganz wichtiger Faktor. Doch zusätzlich lässt sich auf der Ebene von Städten, Gemeinden oder Regionen viel unternehmen, um mit den Auswirkungen des Klimawandels besser klarzukommen. Das ist im Prinzip eine gute Nachricht.

Es ist zwar frustrierend, wenn sich die gesamte politische Debatte auf unsinnige Themen wie eine hypothetische CO₂-Abscheidung aus der Luft fokussiert. Doch wenn man lokal mit Entscheidungsträgern zusammenarbeitet, eröffnet das meist sehr viele Möglichkeiten. Man merkt, dass man an den wichtigen Stellschrauben drehen kann – auch ohne die einhellige Zustimmung von allen Regierungsvertretern der Welt zu bekommen.

Sie zerteilen die globale Bedrohung Klimawandel in einzelne lokale Aufgaben?

Die Hürden sind hier immer noch sehr hoch, aber alles ist machbar. Es ist kein Asteroid, der uns auf den Kopf fällt. ◀

Die Fragen stellte »Spektrum«-Redakteurin **Verena Tang**.

Fluch der späten Geburt

Wer heute jung ist, wird in seinem Leben viel häufiger unter Extremwetterereignissen leiden, als dies bei Älteren der Fall ist.

Text: Andrea Thompson, Grafik: Amanda Montañez

Heute geborene Babys haben ein Leben vor sich, das weit stärker vom menschengemachten Klimawandel überschattet sein wird als das ihrer Eltern und Großeltern. Ein Forschungsteam um Wim Thiery von der Freien Universität Brüssel (Belgien) kombinierte Klimamodellprojektionen für drei verschiedene Erwärmungsszenarien mit demografischen Daten. Das ermöglichte es den Wissenschaftlern, Durchschnittswerte dafür zu berechnen, wie oft Menschen während ihrer Lebenszeit von extremen Wetterereignisse betroffen sind – und zwar für alle Generationen, die zwischen 1960 und 2020 auf die Welt gekommen sind.

Junge Menschen im Nahen Osten, in Afrika südlich der Sahara sowie generell in einkommensschwachen Ländern werden am stärksten zu leiden haben. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass Extremwetterereignisse künftig stärker werden und länger andauern: Die Berechnungen von Thiery & Co. liefern lediglich Angaben dazu, wie sich deren Häufigkeit ändert. »Die jüngsten Generationen müssen die größten Verluste infolge des Klimawandels hinnehmen«, resümiert der Forscher. Was im Umkehrschluss aber auch bedeutet: Junge Menschen würden am stärksten von einer möglichst raschen Minderung der Treibhausgasemissionen profitieren.

Die Farbsättigung zeigt an, um welches Erwärmungsszenario es sich jeweils handelt: je intensiver, desto heißer

- globale Erwärmung um 1,5 Grad Celsius im Jahr 2100 (schwache Farbsättigung)
- globale Erwärmung um 2,0 Grad Celsius im Jahr 2100 (mittlere Farbsättigung)
- globale Erwärmung um 2,4 Grad Celsius im Jahr 2100, entsprechend dem momentan wahrscheinlichsten Szenario (starke Farbsättigung)

Die Balken zeigen an, um wie viel öfter das jeweilige Extremereignis erlebt wird, verglichen mit der vorindustriellen Zeit und aufgeschlüsselt nach Altersgruppen

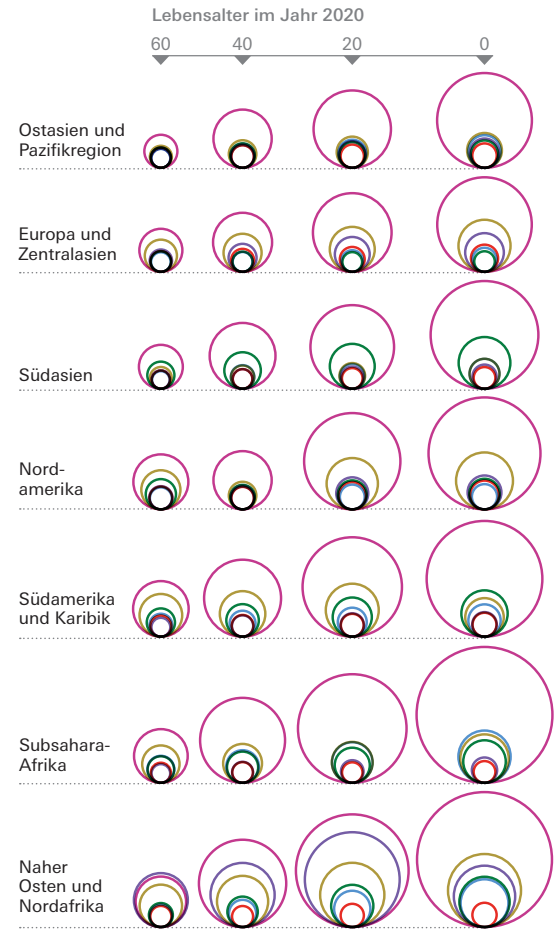
Anzahl der erlebten Extremereignisse (je nach Altersgruppe)



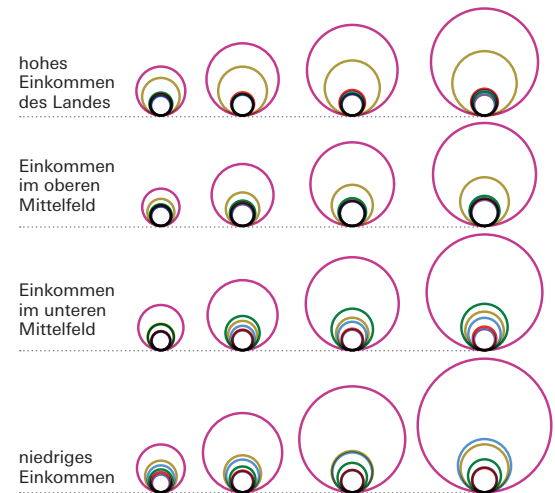
Die Größe der Kreise zeigt an, um welchen Faktor die Häufigkeit des jeweiligen Extremereignisses zunimmt – gestaffelt nach Altersgruppe und unter Annahme des 2,4-Grad-Szenarios



Unterschiede zwischen verschiedenen Weltregionen



Unterschiede zwischen reichen und armen Staaten



AMANDA MONTAÑEZ, DATEN NACH THIERY, W. ET AL., INTERGENERATIONAL INEQUITIES IN EXPOSURE TO CLIMATE EXTREMES, SCIENCE 374, 2021 / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2022; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

CO₂-NEUTRALITÄT

Der Umbau der Chemieindustrie

In chemischen Fabriken entstehen täglich zigtausende Stoffe, die wir – oft unbewusst – nutzen. Um klimaneutral zu werden, muss der Industriezweig zum einen seine Energieversorgung umstellen, zum anderen eine neue Rohstoffbasis aufbauen. Verschiedene Ansätze zeigen, wie das gehen kann.

» spektrum.de/artikel/2160294



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

RUND UM DIE UHR arbeiten chemische Anlagen, hier ein Steamcracker bei der BASF in Ludwigshafen. Die Industrie steht vor einer massiven Neuausrichtung.

SERIE KLIMANEUTRALE INDUSTRIE

TEIL 1: JULI 2023

Mit Wasserstoff zu sauberem Stahl

Davide Castelvechi

TEIL 2: AUGUST 2023

Neuerfindung eines alten Baumaterials

M. Mitchell Waldrop

▶ TEIL 3: SEPTEMBER 2023

Der Umbau der Chemieindustrie

Verena Tang



Die Luke öffnet sich. Unmittelbar schlägt Gluthitze mit einem lauten Fauchen heraus, gleißendes Licht sticht in die Augen. Hinter der flimmernden Luft in der Kammer sind auf der rechten Seite rotorange glühende Rohre zu erkennen. Länger als ein paar Sekunden kann man nicht hineinschauen, dann müssen sich Augen, Ohren und Haut kurz erholen.

Luke zu. Es ist wieder sonnig-warm an diesem Junitag in Ludwigshafen, 25 Grad Celsius, fast windstill, im feuerfesten Blaumann nicht gerade erfrischend. Neben uns dröhnt und röhrt die Anlage, von außen fühlt sie sich an wie eine Herdplatte mit Restwärme. Acht Stockwerke hoch erstrecken sich ihre Stahltürme in den blauen Himmel. Meterdicke Rohre führen zu einem weiteren, riesigen runden Turm, dann verzweigt sich alles zu einem Netzwerk verschiedener Kolonnen und Tanks, die in der Ferne mit den zahlreichen anderen Fabriken verschmelzen. Der Steamcracker, so formuliert es der Kollege aus der Pressestelle, sei das Herz der BASF.

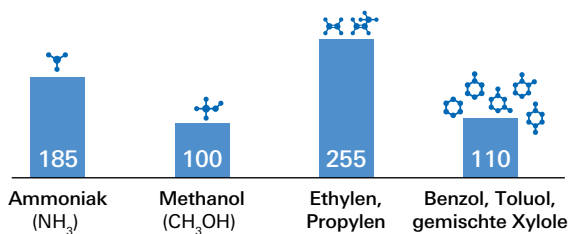
Überall auf der Welt stehen solche Anlagen. Stunde um Stunde verwandeln sie eine gelbliche Flüssigkeit, die Chemiker Naphtha nennen, in ein Sortiment kleiner Bausteine, die anschließend als Ausgangsstoffe für etliche Substanzen dienen. Die wichtigsten dieser Bausteine heißen Ethylen und Propylen, Benzol, Toluol und Xylol. Zusammen mit Methanol und Ammoniak bilden sie die sieben Primärchemikalien, auf denen fast die gesamte industrielle organische Chemie basiert: die Substanzen, aus denen Plastiktüten, Zahnpasta, Textilfasern, Waschmittel, Aromen, Dämmstoffe, Medikamente, Flugzeugsitze, Farbpigmente, Treibstoffe und vieles mehr bestehen. Mehrere zigtausend chemische Produkte fabriziert und nutzt die Welt täglich. Rund 70 Prozent der dabei anfallenden CO₂-Emissionen entstehen beim Erzeugen der sieben Primärchemikalien.

AUF EINEN BLICK

Doppelte Neuausrichtung

- 1 Die chemische Industrie verbraucht so viel Energie wie keine andere Branche. Außerdem ist sie nach der Stahl- und Zementindustrie der drittgrößte Emittent von Kohlenstoffdioxid.
- 2 Fossile Rohstoffe dienen ihr zum einen als Energielieferanten, zum anderen als Quelle für Kohlenstoff, die Bausubstanz für die meisten ihrer Produkte.
- 3 Neben neuen Techniken, etwa um Prozesse elektrisch zu beheizen, suchen Fachleute daher nach alternativen Herstellungswegen für massenhaft benötigte Chemikalien.

Weltweite jährliche Produktionsmengen der sieben Primärchemikalien (in Mio. Tonnen)



DIE SIEBEN WICHTIGSTEN PRIMÄR-CHEMIKALIEN werden in riesigen Mengen hergestellt (hier: Jahresproduktion weltweit in Millionen Tonnen, Zahlen von 2018). Das verursacht zusammengekommen rund 70 Prozent der CO₂-Emissionen der chemischen Industrie.

Bis 2050 soll die Chemieindustrie klimaneutral sein – weltweit, wenn es nach den Zielen des Pariser Klimaabkommens geht. Eine große Aufgabe, denn die Branche belegt nach der Stahl- und der Zementindustrie Platz drei in der Rangliste der größten Kohlenstoffdioxid-Emittenten. 1,4 Milliarden Tonnen waren es weltweit im Jahr 2021, rund vier Prozent der globalen Emissionen.

»Wenn wir den Steamcracker elektrisch beheizen, können wir bis zu 90 Prozent des dort entstehenden CO₂ vermeiden«, erzählt Andrea Haurert. Die Ingenieurin leitet bei der BASF die Entwicklung des »eFurnace«, eines komplett elektrisch arbeitenden Steamcracker-Ofens. Gerade hat sie durch den konventionellen Steamcracker geführt und dabei erläutert, was ein »Seitenbrennerofen« ist: An der Seite der Brennkammer, durch welche die Rohre mit dem Dampf-Naphtha-Gemisch führen, sind zahlreiche riesige Gasbrenner nebeneinander angebracht, pro Ofen dreimal 24 Stück. Die überdimensionierten Campingkocher bringen die Kammer auf zirka 1100 Grad. 850 Grad kommen noch in den Rohren an, wo die Spaltung des Naphtha abläuft. Nach rund 60 bis 100 Tagen hat sich an den Innenwänden der Rohre eine dicke Schicht Koks gebildet. Dieses Abfallprodukt wird anschließend wie bei der Pyrolysefunktion eines Backofens mit Hilfe von Dampf und Luft zersetzt. Der Steamcracking-Prozess ist einer der energieintensivsten in der Branche.

Tatsächlich ist die Chemieindustrie der größte Energiekonsument überhaupt. Sie setzt ein ganzes Zehntel der weltweit erzeugten Energie um, mehr als jede andere Industrie. 2021 bezog sie laut der Internationalen Energieagentur (IEA) Prozessenergie von 889 Terawattstunden (TWh) aus Kohle, 1361 TWh aus Erdgas, 194 aus Strom, 28 aus Erdöl. Viele Prozesse sind heute zwar stark optimiert: Wärme, die durch die chemischen Reaktionen entsteht, wird möglichst an anderer Stelle wieder eingesetzt. Dank solcher und anderer Verbesserungen sind die Emissionen seit den 1990er Jahren stark gesunken, wie Vertreter von Chemieunternehmen immer wieder beto-

nen. Doch nun muss sich etwas Grundlegendes ändern, um den CO₂-Fußabdruck weiter substanziell zu senken. Einer der großen Hebel ist es, die energiehungrigsten Prozesse mit grünem Strom zu betreiben.

Elektrische Heizung statt Gasbrenner

Die Fachleute in Ludwigshafen erproben im Zuge des Projekts eFurnace zwei Möglichkeiten, um die Hitze für den Steamcracker elektrisch zu erzeugen. Die erste, die indirekte Heizung, funktioniert ähnlich wie die konventionelle: Mit Hilfe von elektrischem Strom wird eine Kammer rund um den Reaktionsbereich der Rohre aufgeheizt. Das Gemisch darin erhält seine Temperatur durch Wärmestrahlung. Bei der zweiten, direkten Methode hingegen fließt der elektrische Strom unmittelbar durch die Rohre und erzeugt genau dort durch elektrischen Widerstand die nötige Hitze. Die stromführenden Rohre neu zu entwickeln und so mit der Stromquelle zu verbinden, dass es funktioniert, sei der Knackpunkt gewesen, berichtet Hauernert. Wie sie das Problem gelöst haben, ist jedoch ein Firmengeheimnis. Für das Projekt eFurnace hat sich die BASF mit dem Anlagenbauer Linde und der saudi-arabischen Chemiefirma Sabic zusammengetan. Alle gemeinsamen Entwicklungen werden gemeinsam patentiert.

STEAMCRACKER-OFEN bei der BASF in Ludwigshafen. Hier werden bei 850 Grad Celsius Grundbausteine für Chemikalien hergestellt.

Welche Methode besser funktioniert, muss sich erst zeigen. Bislang stehen der kleine, dicke und der große, dünne Stahlurm still nebeneinander hinter einem Bauzaun. Einige Messgeräte und Rohre fehlen noch, im Winter 2023 soll die Pilotanlage ihren Betrieb starten und dann drei Jahre lang laufen. Zunächst sollen die Öfen etwa vier Tonnen Naphtha pro Stunde verarbeiten. Von der späteren Auslegung sei das gar nicht so weit entfernt, ordnet Hauernert ein: Eine Skalierung auf die zehnfache Größe wäre ausreichend für den Ersatz eines konventionellen Ofens. Denn in derzeit aktiven Steamcrackern arbeiten typischerweise sechs bis zehn Öfen parallel. Ist das Konzept erfolgreich, lassen sich bestehende Anlagen also im besten Fall schrittweise umrüsten.

»Man kann ziemlich viel CO₂ einsparen, wenn man Steamcracker durch elektrischen Strom beheizt statt wie bislang durch die Verfeuerung von Erdgas«, sagt auch Kurt Wagemann. Der Chemiker war von 2010 bis 2021 Geschäftsführer der DECHEMA – Gesellschaft für chemische Technik und Biotechnologie. Trotzdem ist die Umrüstung für ihn erst der Anfang: »Die Frage ist: Was ist der Rohstoff? Bislang ist das Naphtha, ein Nebenprodukt aus der Kraftstoffproduktion. Wenn wir einen Schritt weitergehen und fragen, wie man noch mehr CO₂ einsparen kann, dann wird man einen Rohstoffwechsel vollziehen.«

Um in einer Welt ohne fossile Ressourcen zu bestehen, muss sich die chemische Industrie also nicht nur neue Energieträger, sondern auch neue Bausubstanzen suchen.



»Wir brauchen Kohlenstoff«, bringt es Andrea Hauernert auf den Punkt. Egal, ob Plastiktüte, Ibuprofen-Tablette, Waschmittel oder Anstrichfarbe – alle petrochemischen Produkte besitzen ein Grundgerüst aus Kohlenstoffatomen, die bislang günstig aus Erdöl und Erdgas zu erhalten waren. Künftig könnten Biomasse, Kunststoffabfälle und CO₂ die neue Rohstoffbasis bilden. Sie alle enthalten Kohlenstoff, doch um ihn verwertbar zu machen, bedarf es anderer Mittel als jener, die bereits etabliert sind.

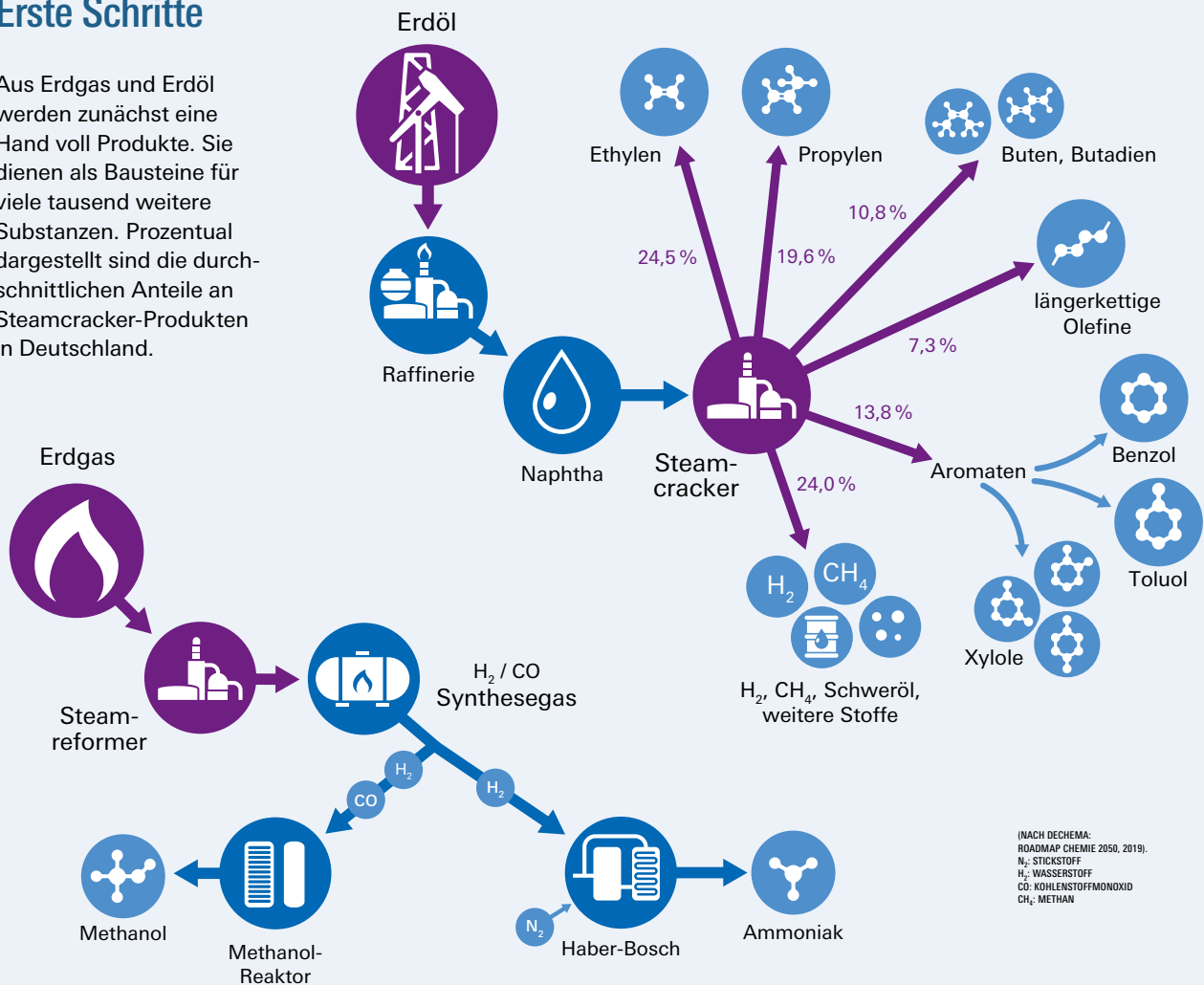
»CH_x ist quasi die Formel für die fossilen Rohstoffe, denn die bestehen nur aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H). Die anderen Elemente bauen wir dann ein«, veranschaulicht Walter Leitner, Katalyseforscher und Direktor am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion CEC, die traditionelle Denkweise. Er hat sich darauf spezialisiert, das notorisch reaktionsträge CO₂ zur Reaktion zu bringen, um wieder nützliche Substanzen

daraus herzustellen. CO₂ ist aus chemischer Sicht eigentlich ein Endprodukt: Es entsteht, wenn kohlenstoffhaltiges Material zersetzt wird oder verbrennt. Nutzt man es wieder als Ausgangsstoff, um neue Stoffe herzustellen, schafft man einen Kreislauf, was Ressourcen spart und Emissionen vermeidet. Es ist aber nicht ganz trivial. Zum einen besteht die Kunst darin, das Molekül aus seinem energetischen Tief heraus zu aktivieren, was mit Hilfe geeigneter Katalysatoren gelingt. Zum anderen benötigt man, um aus CO₂ wieder einen nützlichen Baustein herzustellen, Wasserstoff. Und klimaneutral hergestellter Wasserstoff ist bislang noch ein äußerst knappes Gut.

Schon heute verbraucht die chemische Industrie weltweit rund die Hälfte des leichten Gases, 2022 waren es 46 von 94 Millionen erzeugten Tonnen. Es dient hauptsächlich dazu, Methanol und Ammoniak herzustellen, zwei der am meisten produzierten Chemikalien überhaupt. Metha-

Erste Schritte

Aus Erdgas und Erdöl werden zunächst eine Hand voll Produkte. Sie dienen als Bausteine für viele tausend weitere Substanzen. Prozentual dargestellt sind die durchschnittlichen Anteile an Steamcracker-Produkten in Deutschland.



nol (CH₃OH) bildet die Ausgangsbasis für eine breite Palette an Produkten, drei Viertel des hergestellten Ammoniaks (NH₃) werden zu Dünger weiterverarbeitet.

Aus Wasserstoff und CO₂ ließe sich Synthesegas erzeugen, ein Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff. Synthesegas ist eine universelle Basis, um verschiedenste Kohlenwasserstoffe herzustellen. Dann bieten sich zwei Wege an: Man könnte daraus eine Art künstliches Naphtha herstellen und dieses wiederum im Steamcracker zu den üblichen Produkten umsetzen. Oder Methanol erzeugen und die klassischen »Crackerprodukte« auf alternativen Routen herstellen.

Der zusätzliche Wasserstoffhunger wäre enorm. In einer im März 2023 veröffentlichten Studie haben der Verband der Chemischen Industrie (VCI) und der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) drei verschiedene Szenarien untersucht, wie die chemische Industrie in Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral werden kann. Die Experten haben Rohstoff- und Energiebedarf akribisch ermittelt. Demnach erzeugt und verbraucht die hiesige Chemieindustrie derzeit 1045 Kilotonnen Wasserstoff im Jahr. Hinzu kommen – je nachdem, ob man Grundstoffe künftig aus Methanol oder künstlichem Naphtha herstellt – zwischen 6998 und 5775 Kilotonnen, dazu 627 Kilotonnen H₂ als Brennstoff für Hochtemperaturprozesse, die sich nicht elektrisch in Gang setzen lassen. Insgesamt sind also zwischen 7447 und 8670 Kilotonnen emissionsfreier Wasserstoff nötig. Die bereits vorhandenen Wasserstoffkapazitäten werden nicht mitgezählt, denn sie müssen komplett ersetzt werden: Die Wasserstoffproduktion, wie sie heute betrieben wird, ist einer der emissionsreichsten Prozesse in der gesamten Chemie (siehe »Spektrum der Wissenschaft« Januar 2020: »Wege zum Wasserstoff«, S. 56). Elektrolyseanlagen, die Wasser mit Hilfe von grünem Strom spalten und das begehrte Gas klimaneutral erzeugen, findet man bislang nur sporadisch.

Derzeit laufen viele Projekte nicht an, weil grüner Wasserstoff fehlt

Deshalb laufen Projekte wie Methanolanlagen auf Basis von CO₂ und H₂ noch nicht in großem Stil an. »Es gibt die Katalysatoren und die Verfahren dazu. Woran es mangelt, ist emissionsfrei hergestellter Wasserstoff«, sagt auch Lars Kissau, der bei der BASF für das Erreichen der Netto-Null-Ziele bis 2050 verantwortlich ist. »Diese Technologie ergibt nur Sinn, wenn emissionsfreier Wasserstoff in ausreichender Menge zur Verfügung steht.« Das gehe nicht von heute auf morgen, gibt Kurt Wagemann von der DECHEMA zu bedenken. »Die Zahl der Elektrolyseure nimmt zu, genau wie die Zahl der Ideen, grünen Wasserstoff mit Hilfe von Fotovoltaik oder Windkraft an günstigen Standorten zu produzieren«, urteilt der Experte. In Südchile betreiben Porsche und Siemens einen mit Strom aus Windkraft betriebenen Elektrolyseur, Deutschland baut Wasserstoffpartnerschaften mit Namibia oder Saudi-Arabien aus. Die DECHEMA plädiert allerdings dafür, solche Standorte auch innerhalb Europas aufzubauen und einen großen Teil des benötigten Wasserstoffs in

Deutschland oder Europa herzustellen. »Wenn Wasserstoff woanders günstig produziert wird, dann kann vor Ort schnell die Idee aufkommen, auch den Folgeschritt zu etablieren und direkt Methanol oder Ammoniak herzustellen«, führt Wagemann aus. Das könnte die hier ansässige Grundstoffindustrie direkt gefährden. Um sie hier zu halten, sei es demnach wichtig, günstigen »grünen« Strom in Deutschland und der EU bereitzustellen, damit der Wasserstoff direkt auch hier produziert werden kann.

Auf dem BASF-Werk in Ludwigshafen liefern derzeit drei Gaskraftwerke mehr als fünf Terawattstunden (TWh) Strom im Jahr, damit ist der Standort rechnerisch energieautark. »Wenn wir Prozesse elektrifizieren, die bisher auf fossilen Brennstoffen basieren, werden wir an großen Standorten wie Ludwigshafen doppelt bis dreimal so viel Strom benötigen wie heute«, prognostiziert Kissau. Und dieser Strom soll nach Möglichkeit aus erneuerbaren Quellen stammen. Anfang 2022 hat die BASF daher die Tochterfirma BASF Renewable Energy GmbH gegründet, die durch langfristige Lieferverträge große Mengen erneuerbarer Energie beschafft oder für die Versorgung der Werke mit Strom direkt in Wind- und Solarparks investiert. So entsteht beispielsweise vor der holländischen Küste einer der weltweit größten Offshore-Windparks mit 1,5 Gigawatt Leistung. Neben dem Chemiekonzern sind der Energielieferant Vattenfall und der Versicherer Allianz an dem Projekt beteiligt, die BASF erhält knapp die Hälfte des dort erzeugten Stroms. Der Windpark soll noch 2023 in Betrieb gehen.

Wolle man die ganze fossile Rohstoffbasis durch CO₂ ersetzen, benötige die deutsche Chemieindustrie im Jahr 2045 zwischen 464 und 508 TWh Strom, rechnen VDI und VCI in ihrer Studie vor. Zum Vergleich: 2021 verbrauchte sie gemeinsam mit der Pharmabranche insgesamt rund 224 TWh Energie, also weniger als die Hälfte. Und davon deckte sie knapp ein Viertel – 53 TWh – durch Strom, was rund 10 Prozent des bundesweiten Verbrauchs entsprach.

Ist das ganze Vorhaben also ein Ding der Unmöglichkeit? Walter Leitner erinnert daran, dass es nicht gleich einen vollständigen Umbau braucht, um etwas zu verändern. »Es gibt Fälle, bei denen CO₂ heute schon ein günstigerer Rohstoff sein kann, selbst unter fossiler Energieversorgung«, berichtet er. Etwa, weil andere Chemikalien eingesetzt werden oder der neue Syntheseweg »eleganter« ist, das heißt weniger Schritte beinhaltet und weniger Ressourcen verbraucht. »Wir forschen intensiv an Technologien für großskalige Lösungen wie etwa Methanol aus CO₂, die sozusagen an der Wurzel der chemischen Wertschöpfung ansetzen. Gleichzeitig arbeiten wir stark daran, neue Wege zu ermöglichen – damit wir nicht warten müssen, bis das Energiesystem umgestellt ist, sondern vielmehr die Transformation beschleunigen«, erzählt der Chemiker weiter. Leitner hat Wege gefunden, CO₂ in speziellere Stoffe wie Ameisensäure oder organische Karbonate umzuwandeln, die wiederum zu neuartigen Kunststoffen umgesetzt werden. Solche Moleküle lassen sich in den »Wertschöpfungsbaum« der Chemie



einbauen. Zwar werden diese in viel kleineren Mengen produziert als Grundchemikalien wie Methanol, und entsprechend betrifft eine verbesserte CO₂-Bilanz einen überschaubaren Teil der Chemie. Doch »weil diese Stoffe vom Erdöl aus gesehen schon einige Herstellungsschritte beinhalten, haben sie bereits einen recht großen CO₂-Rucksack«, veranschaulicht der Chemiker. Daher könne man durch solche Neuerungen rasch und mit weniger Energieaufwand eine Verbesserung erreichen.

Nebenbei entstehen so alternative Materialien, die wiederum Chancen eröffnen, wie Leitner erwähnt. So seien schon Polymere entwickelt worden, die sich leichter durch chemisches Recycling in ihre Bestandteile zurückspalten lassen als ihre herkömmlichen Pendanten, oder synthetische Kraftstoffe, die bei der Verbrennung geringere Mengen an schädlichen Stickoxiden ausstoßen.

Die Studie von VCI und VDI nimmt aber noch ein drittes Szenario unter die Lupe: eines, bei dem man möglichst viel Kohlenstoff aus Kunststoffabfällen und Biomasse gewinnt. Dann würde der Bedarf auf 325 TWh Strom sinken, und man bräuchte bloß Wasserstoff mit einem Energiewert von 148 TWh im Jahr 2045.

Kunststoffabfälle lassen sich entweder mechanisch recyceln, durch chemische Prozesse in ihre Grundbausteine zerlegen – oder bei hohen Temperaturen unter Luftausschluss pyrolysieren. So erhält man wieder eine dem Naphtha ähnliche Substanz, die genau wie ihr fossiles Pendant in den Steamcracker gefüttert werden kann. Letztere Option favorisiere die chemische Industrie weltweit, sagt Wagemann. »Daran wird intensiv gearbeitet. Das ist die einfachste Variante für gemischte Kunststoffe.«

Teilweise geschieht das bereits, auch die BASF setzt rezyklierte Kunststoffe als Grundstoff ein, jedoch bislang auf Kundenwunsch und in kleinen Mengen.

Eine weitere mögliche Kohlenstoffquelle ist Biomasse – also im besten Fall Pflanzenmaterial, das sich nicht für Nahrungsmittel verwenden lässt. Selbst das könnte man durch Pyrolyse in eine Art Bio-Naphtha verwandeln, oder durch Gasifizierung in eine Art Synthesegas. Das stößt aber längst nicht bei allen Experten auf Zustimmung. »Mir blutet ein wenig das Herz angesichts solcher Ansätze«, sagt Christine Rasche, die am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB in Leuna das Geschäftsfeld »Nachhaltige Chemie« leitet. Sie plädiert dafür, die wertvollen Strukturen zu nutzen, die von den Pflanzen bereits aufgebaut wurden. »Wir haben hier eine einzigartige Syntheseleistung der Natur«, betont sie.

Strukturen von Lignocellulose nutzen

In Leuna steht seit 2012 die Lignocellulose-Bioraffinerie, eine Pilotanlage, die täglich bis zu 70 Kilogramm Trockenmasse von Holzhackschnitzeln, Stroh oder anderem Biomaterial verarbeiten kann. Solche holzigen Pflanzen bestehen zum Großteil aus Lignocellulose, einem höchst komplexen Biopolymer. Anders als Polymere aus konventionellen Kunststoffen besitzt es nicht bloß Ketten von zwei oder drei sich immer wiederholenden Bausteinen, sondern stützt sich auf drei verschiedene, teils miteinander verbundene Strukturelemente. Das ist erstens Zellulose, eine lange Kette von Zuckern, die auch den Hauptbestandteil von Pflanzenstielen und -blättern bildet – oder von Papier. Zweitens Hemicellulose, ein verzweigtes

HOLZHACKSCHNITZEL oder andere Biomasse könnten als Rohstoff für die chemische Industrie dienen, allerdings nur zu einem geringen Anteil. Die vielversprechendste Anwendung liegt vermutlich in spezialisierten Materialien.

Polymer aus anderen Zuckern. Und schließlich Lignin, ein Verbund verschiedener Aromaten mit unterschiedlicher Zusammensetzung je nach Pflanzensorte.

»Lignin bringt aromatische Strukturen und spezifische Funktionalitäten mit. Davon sind viele sehr interessant für viele Materialien, die wir ersetzen müssen«, erläutert Rasche. Lange galt Lignocellulose, vor allem das enthaltene Lignin, jedoch als zu schwierig für eine weitere Nutzung. In der Papierindustrie fällt es als Abfall an und wird verbrannt, um Prozessenergie zu liefern. Doch es lohne sich, Wege zu finden, die Strukturen des Lignins zu nutzen, findet auch Wagemann: »Es ist sicher komplizierter, aber man sollte sich immer bemühen, das, was schon an Aufbauleistung drinsteckt, möglichst weitgehend wieder nutzbar zu machen.«

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Fraunhofer IGB haben ein Verfahren zur Auftrennung von Lignocellulose aus den 1930er Jahren in den Pilotmaßstab überführt und die Methode effizienter und wirtschaftlicher gemacht, so dass sie praxistauglich ist. Auch das Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme war beteiligt, um einen Weg zu finden, speziell Lignin von den weiteren Bestandteilen zu isolieren. Holzhackschnitzel oder anderes Biomaterial wird dazu mit einer Mischung aus Ethanol und Wasser bei hohem Druck und hoher Temperatur »gekocht«, dann werden Zellulose, Hemicellulose und Lignin durch verschiedene Fällungs- oder Trennverfahren separiert. Zellulose kann danach in Zuckermoleküle gespalten werden, die Bakterien oder Enzyme anschließend in Bioreaktoren umsetzen, beispielsweise zu Ethanol. Die Hemicellulose-Moleküle lassen sich ebenfalls in ihre Zuckerbestandteile auftrennen und fermentativ weiterverarbeiten.

Die Bausteine des Lignins sind Phenolderivate, aus denen sich bei der Spaltung des Polymers die Phenole Guajakol, Catechol, Vanillin, Syringol und Phenol gewinnen lassen. Deren aromatisches Grundgerüst ist für zahlreiche chemische Stoffe zentral, man braucht es etwa für Medikamente, Pestizide oder Aromastoffe. In der klassischen Synthese nutzt man für deren Aufbau die aus dem Steamcracker erhaltenen Aromaten Benzol, Toluol und Xylol. »Es gab anfangs Bestrebungen, aus Lignin tatsächlich Lösemittel wie Benzol oder Phenol herzustellen«, erzählt die Lebensmittelchemikerin Rasche. Die Leunaer Fachleute sind davon allerdings abgekommen, denn es hat sich als sehr aufwändig erwiesen, die aromatischen Monomere – also Einzelmoleküle – aus Lignin zu gewinnen. Zu große Mengen an Lösungsmitteln und zu viel Energie braucht es, um substanzielle Mengen davon zu erhalten. »Interessanter ist es zu schauen, wo solche Phenole angewandt werden«, erklärt Rasche. Das sind oft

Phenolharze, Beschichtungen oder Polyurethanschäume. Häufig reiche es für diese Zwecke aus, Lignin in Oligomere zu spalten, das sind zwei bis zehn miteinander verbundene Monomere. Mitunter lässt sich sogar das intakte Polymer nutzen. »Man muss dann schauen, welche intrinsischen Eigenschaften des Lignins nützlich sind, etwa der mitgebrachte UV-Schutz«, gibt Rasche ein Beispiel.

Möglicherweise sind solche speziellen Anwendungen genau das Richtige für die Nutzung von Biomasse, gerade weil sie nicht im Überfluss verfügbar ist. »Wir haben begrenzte Flächen, die ja auch eine ökologische Bedeutung haben, etwa für die Biodiversität. Man kann nicht beliebig Rohstoffe aus der Natur ziehen«, merkt Wagemann an. In Sachen Rohstoffverfügbarkeit haben VDI und VCI aber auch hinsichtlich der Kunststoffe eine ernüchternde Nachricht: Nur sechs Prozent der »high-value chemicals« – der Olefine und Aromaten aus dem Steamcracker – ließen sich künftig auf Basis recycelten Plastiks herstellen. Für mehr reicht es nicht, denn von den Kunststoffen, die jedes Jahr in wachsenden Mengen produziert werden, wird nur wenig recycelt. Der größte Teil landet in Deponien oder Meeren, ein ebenfalls großer Part wird verbrannt. »Es steht also nicht so viel zur Verfügung, wie man gern hätte,« schließt Wagemann.

Knappes CO₂?

Ironischerweise könnte mittelfristig auch das CO₂ knapp werden. Die Emissionen eines fahrenden Autos kann die chemische Industrie nicht auffangen, ebenso wenig die von Gebäudeheizungen oder anderen verteilten Quellen. In Zukunft bleiben für Chemiewerke daher schwer vermeidbare Restemissionen aus anderen Industrien oder das direkte Abtrennen aus der Luft (direct air capture, DAC). »Die chemische Industrie spekuliert auf den Rohstoff CO₂ aus der Zement- und Kalkindustrie«, verrät Branchenexperte Wagemann, außerdem auf dasjenige aus Biogasanlagen, biotechnologischen Fermentationsanlagen sowie der Abfallverbrennung.

Leitner warnt gleichzeitig davor, das Auffangen und Nutzen von Kohlenstoffdioxid (carbon capture and utilization, CCU) als bequeme Emissionsminderung zu sehen. »Man sollte die CO₂-Nutzung nicht als einen Weg betrachten, um die fossile Welt weiter zu erhalten und das CO₂, das dabei entsteht, in Chemieprodukte umzuwandeln. Es ist kein Weg, das Gas loszuwerden, sondern der notwendige Weg, um von fossilen Rohstoffen loszukommen.« ◀

QUELLEN

Artz, J. et al.: Sustainable conversion of carbon dioxide: An integrated review of catalysis and life cycle assessment. *Chemical Reviews* 118, 2018

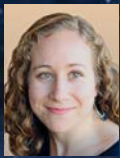
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V., FutureCamp Climate GmbH (Hrsg.): Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. 2019

VCI, VDI (Hrsg.): Chemistry4Climate – Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht 2023.

Lieferdienst aus dem All

Im September 2023 bringt eine Raumsonde Gesteinsproben von einem Asteroiden auf die Erde. Laboruntersuchungen des gesammelten Materials sollen Einblicke in die Frühzeit des Sonnensystems gewähren.

► spektrum.de/artikel/2160288

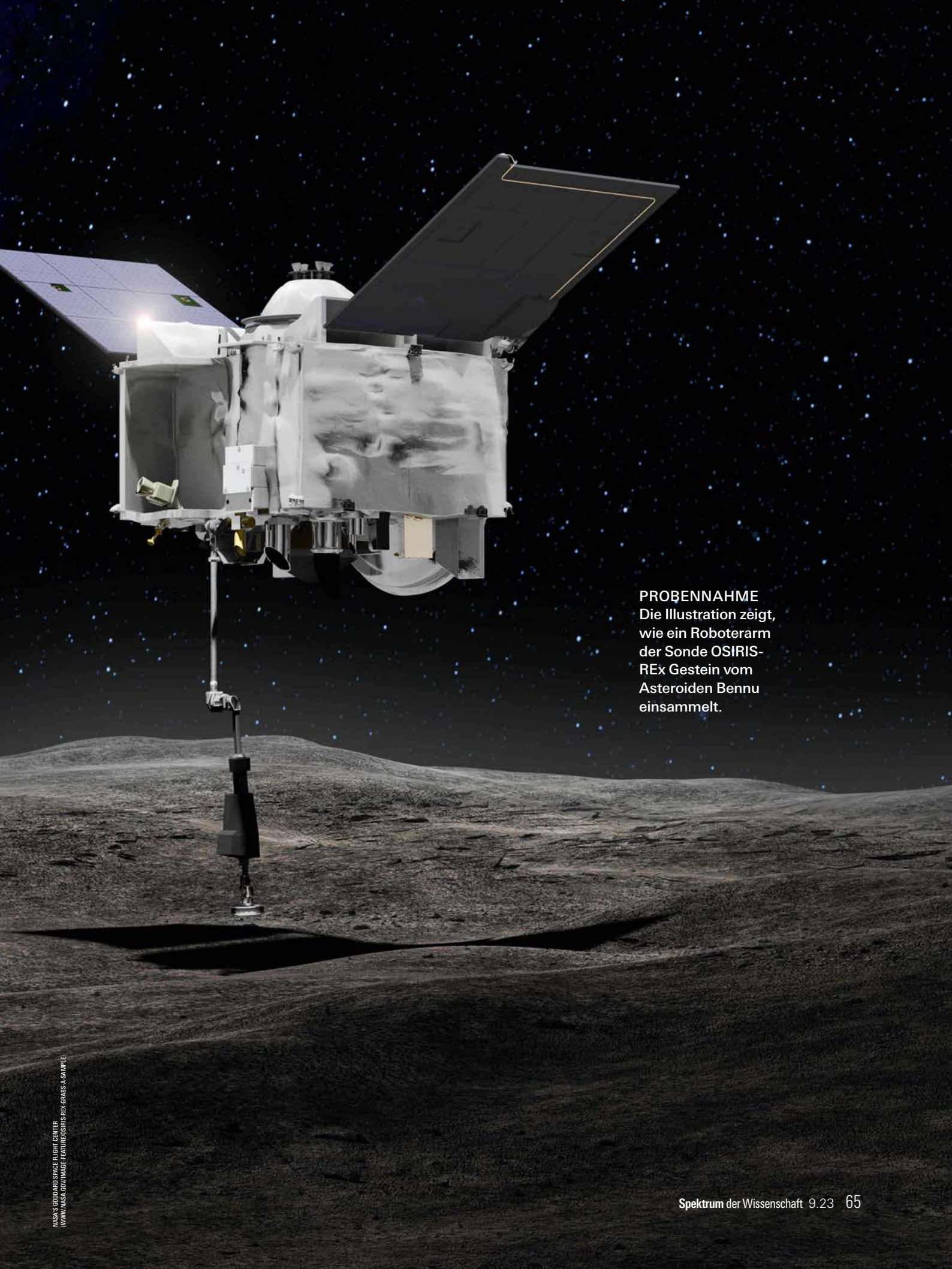


Clara Moskowitz ist leitende Redakteurin für Physik bei »Scientific American«.

AUF EINEN BLICK

Eine Hand voll Sonnensystem

- 1** Nach mehrjähriger Mission kehrt die Raumsonde OSIRIS-REx im September 2023 zurück zur Erde. Hier wirft sie eine Kapsel mit Oberflächenmaterial des Asteroiden Bennu ab.
- 2** Forschungsteams auf der ganzen Welt werden Teile der Probe detailliert untersuchen. Die chemischen und physikalischen Analysen sollen viele Fragen zur Beschaffenheit von Asteroiden klären.
- 3** Unterdessen fliegt OSIRIS-REx bereits zum nächsten Ziel: 2029 soll die Sonde einen weiteren erdnahen Gesteinsbrocken erreichen.



PROBENNAHME
Die Illustration zeigt,
wie ein Roboterarm
der Sonde OSIRIS-
REx Gestein vom
Asteroiden Bennu
einsammelt.

Rückkehr von Bennu

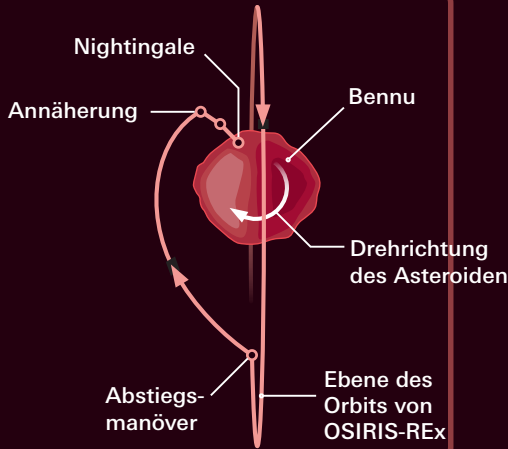
Die NASA-Raumsonde OSIRIS-REx hat sich 2020 im Rahmen eines präzise geplanten Manövers dem Asteroiden Bennu bis auf wenige Meter genähert und mit einem Roboterarm Proben gesammelt. Ebenso fein abgestimmt ist die Rückführung zur Erde, die am 24. September 2023 mit Hilfe eines Fallschirms erfolgt.



Entnahme und Einlagerung

Annäherung

Nach knapp zwei Jahren Beobachtung aus einer Umlaufbahn wurde eine Nightingale genannte Stelle nahe dem Nordpol des Asteroiden als geeigneter Aufsetzpunkt identifiziert.



Ausklappen

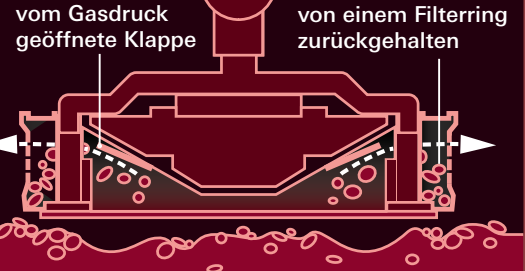
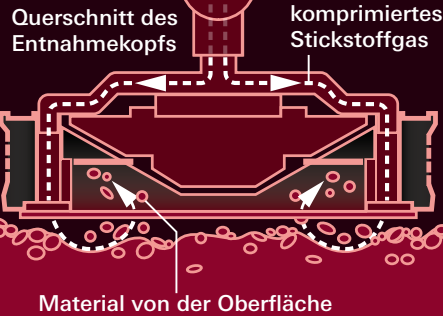
Am Ende eines ausfahrbaren Roboterarms befand sich der runde Kopf des TAGSAM genannten Mechanismus.

Probenrückführkapsel (SRC)

ausgefahrener Arm
TAGSAM-Kopf

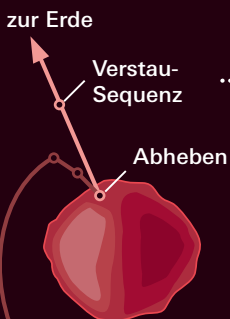
Aufsetzen

Während einer mehrere Sekunden dauernden Berührungsphase wirbelte herausgeschossenes Stickstoffgas das Gestein an der Oberfläche auf.



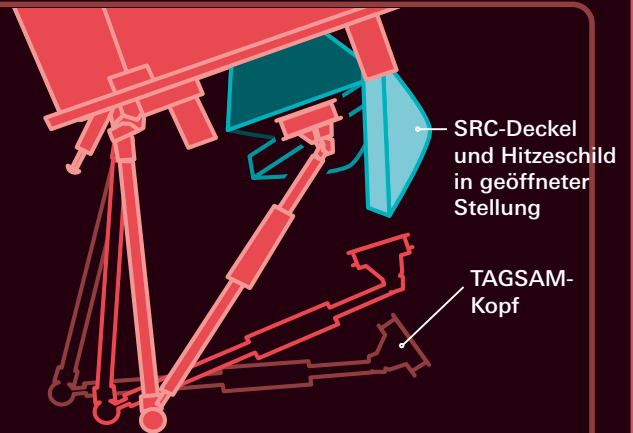
Aufbruch

Mit den Proben im Gepäck zündete die Sonde ihre Triebwerke und verließ Bennu.



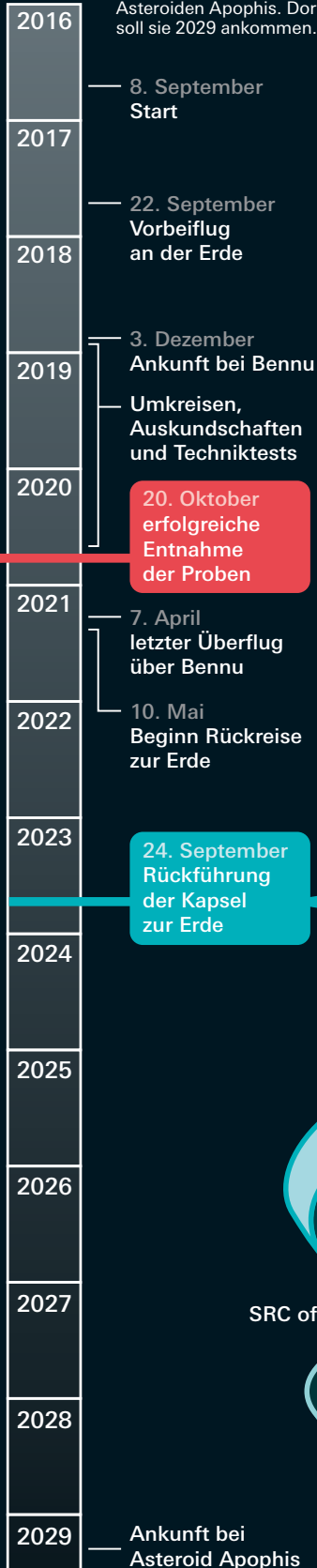
Verstauen

Der Roboterarm beförderte den Entnahmekopf in die Rückführkapsel, stellte durch Rütteln einen guten Sitz sicher, koppelte sich ab und klappte an die Seite der Raumsonde. Für die lange Rückreise versiegelte sich die Kapsel.



Verlauf der Mission

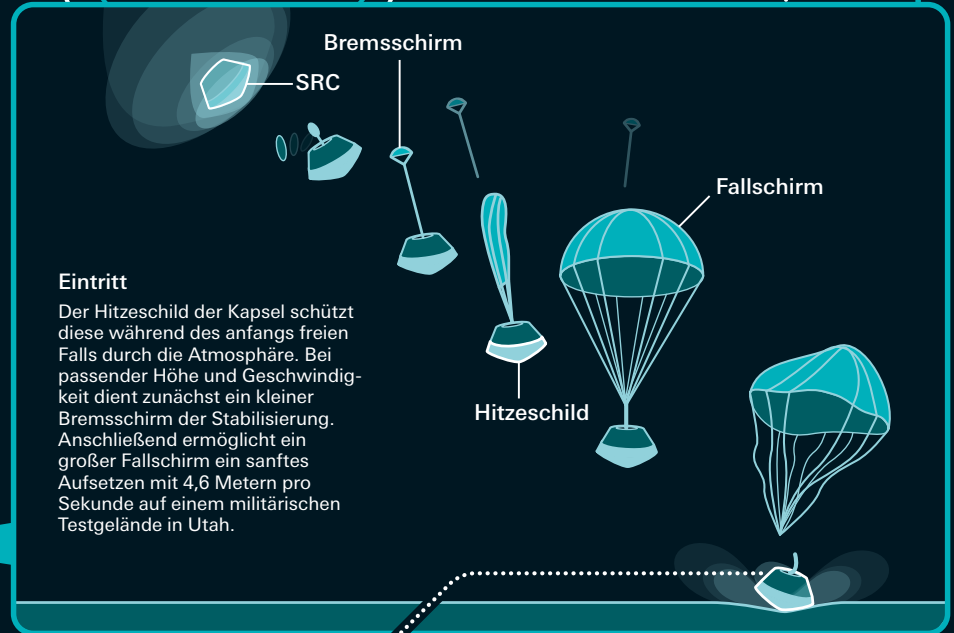
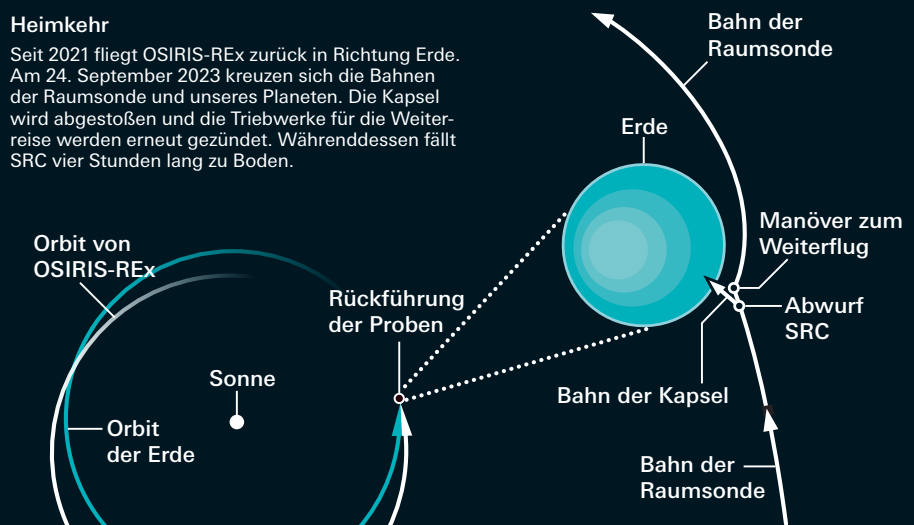
Für OSIRIS-REx gehen die Aufgaben auch nach erfolgreicher Auslieferung der Proben weiter. Im Rahmen einer erweiterten Mission reist die Sonde zum erdnahen Asteroiden Apophis. Dort soll sie 2029 ankommen.



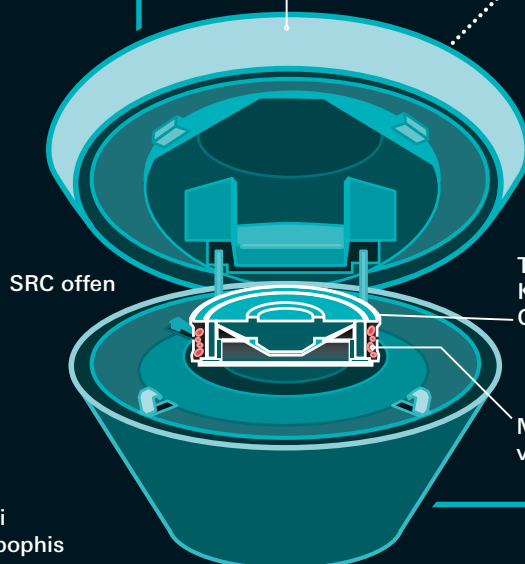
Rückführung

Heimkehr

Seit 2021 fliegt OSIRIS-REx zurück in Richtung Erde. Am 24. September 2023 kreuzen sich die Bahnen der Raumsonde und unseres Planeten. Die Kapsel wird abgestoßen und die Triebwerke für die Weiterreise werden erneut gezündet. Währenddessen fällt SRC vier Stunden lang zu Boden.

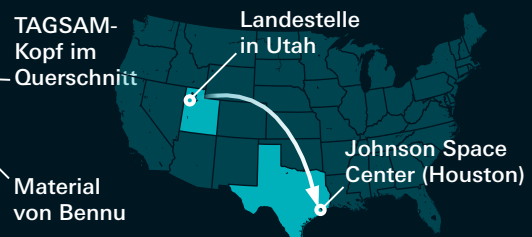


Hitzeschild



Abholen

Mit einem Helikopter fliegt ein Team zur Landestelle. Es befördert die Kapsel zu einem mobilen Reinraum, wo Hitzeschild und Rückwand entfernt werden, um den innen liegenden Kanister mit den Proben frei zu legen. Innerhalb von 24 Stunden werden alle Teile nach Houston gebracht, wo im Johnson Space Center unter größten Sicherheitsvorkehrungen das enthaltene Gestein entnommen wird.



JEN CHRISTENSEN, NICHOLAI T. ET AL. OSIRIS-REx: RETURNING THE ASTEROID SAMPLE. IEEE AEROSPACE CONFERENCE PAPER, 2015. SCIENTIFIC AMERICAN, JULI/AUGUST 2023, BARRETT/DALLAS, SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Wie fühlt es sich an, ein Stück Weltraum in Händen zu halten? Nicht viele Menschen haben das Glück, eine Antwort darauf zu kennen. Nach dem 24. September 2023 wird es einige mehr von ihnen geben. Dann kehrt die NASA-Raumsonde OSIRIS-REx (kurz für Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security-Regolith Explorer) von ihrer siebenjährigen Mission zurück. Die Sonde soll eine Kapsel mit einer Hand voll Steinchen und Staub zur Erde werfen, die sie der Oberfläche des erdnahen Asteroiden Bennu entnommen hat. »Bennu ist eine Zeitkapsel des frühen Sonnensystems«, sagt die an der Mission beteiligte Isotopengeochemikerin Amy Hofmann vom Jet Propulsion Laboratory der NASA. »Wir werden die Ersten sein, die sie öffnen und ihren Inhalt sehen.«

Hofmann gehört zu den rund 200 Fachleuten, die Teile der Beute von OSIRIS-REx erhalten werden. Die Kapsel zur Rückführung der Proben wird durch die Erdatmosphäre stürzen und mit einem Fallschirm auf einem Übungsgelände des US-Militärs in Utah landen. Bergungsteams bringen sie mit einem Hubschrauber in einen mobilen Reinraum und entfernen dort den Hitzeschild und die Rückwand. Dann geht es weiter zu einer speziell vorbereiteten Einrichtung im Johnson Space Center in Houston. Erst dort, in einem gut von allen denkbaren Verunreinigungen abgeschirmten Handschuhkasten, wird das Innerste der Kapsel frei gelegt. Darin befinden sich einige der wenigen ursprünglichen Asteroidenstücke, die jemals die Erdoberfläche erreicht haben. Zwar gibt es jede Menge Meteoriten, aber sie alle wurden durch die hohen Temperaturen beim Durchqueren der Atmosphäre dramatisch verändert.

Asteroiden sind Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystems. Die Proben werden deswegen Aufschluss darüber geben, wie es damals beschaffen war und welche Aminosäuren und anderen chemischen Verbindungen vorhanden waren, die heute für biologische Vorgänge unabdingbar sind. »Das O in OSIRIS-REx verweist letztlich auf den Ursprung des Lebens«, erklärt der leitende Forscher der Mission, Dante S. Lauretta von der University of Arizona. »Wir wollen verstehen, welche Rolle solche kohlenstoffreichen Asteroiden dabei gespielt haben, die Bausteine des Lebens auf die Erde zu bringen.«

OSIRIS-REx ist 2016 gestartet und kam 2018 bei Bennu an. Die Sonde verbrachte zwei Jahre bei dem Asteroiden und vermaß ihn mit ihren Kameras, Spektrometern und anderen mitgeführten Instrumenten. Das verriet bereits eine Menge über Bennu und seine Struktur. Offenbar handelt es sich dabei eher um einen recht lockeren Geröllhaufen als um ein festes, kompaktes Objekt. Zudem ist in seinen Mineralen Wasser gebunden.

Der erkenntnisträchtigste Teil der Mission wird allerdings mit den Proben kommen. »Hier auf der Erde haben wir Zugang zu den modernsten Technologien«, erläutert Planetologin Michelle Thompson von der Purdue University in West Lafayette. »Uns stehen genügend Zeit sowie ein großes Team zur Verfügung. Wir können koordinierte Analysen durchführen und dieselbe Probe mit mehreren

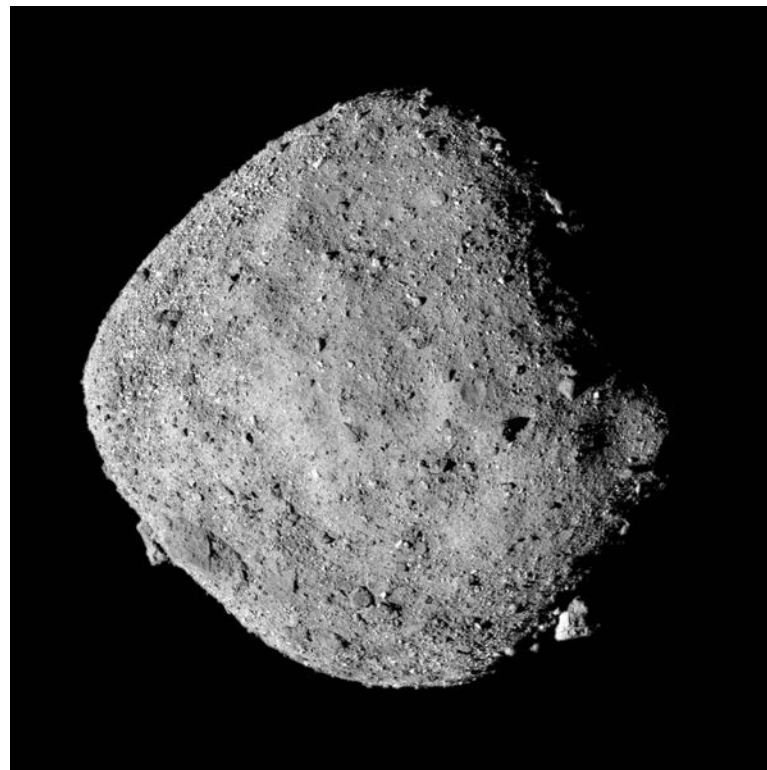
verschiedenen Techniken untersuchen. Das ist durch nichts zu ersetzen.«

Im Oktober 2020 näherte sich die Sonde dem Asteroiden und berührte die Oberfläche kurz mit ihrem Roboterarm TAGSAM (Touch-and-Go Sample Acquisition Mechanism). Ein Stoß aus Stickstoffgas wirbelte Staub und Gestein auf, die sich in einem speziellen Behälter sammelten. »Er sieht aus wie ein Luftfilter, nur dass wir die Luft mitgebracht haben«, erklärt Lauretta. Fotos, die während des Vorgangs angefertigt wurden, zeigen viel aufgenommenes Material. Zusätzlich blieben Stückchen sogar an der Außenseite von TAGSAM hängen.

Ein Schatz wird aufgeteilt

Nach der Öffnung der Kapsel auf der Erde hat das OSIRIS-REx-Team Anspruch auf ein Viertel der Ausbeute. Das Gestein wird vom Johnson Space Center aus an Labors in aller Welt verteilt. Außerdem erhält das an der Mission beteiligte Kanada vier Prozent der Probe. Mindestens 0,5 Prozent wiederum gehen an Japan, einen Pionier der Probenrückführung: Mit dessen beiden Hayabusa-Missionen kamen 2010 und 2020 die ersten Gesteinsproben von Asteroiden überhaupt zur Erde. Die restlichen 70 Prozent des eingesammelten Materials bleiben unberührt, zumindest vorerst. »Wie beim Apollo-Programm wollen wir den Großteil der Proben für künftige Wissenschaftler bewahren«, sagt der Leiter der OSIRIS-REx-Arbeitsgruppe für die physikalische und thermische Analyse Andrew Ryan, der ebenfalls an der University of Arizona arbeitet. »Es werden sich neue Fragen ergeben und andere Werkzeuge zur Verfügung stehen, und bis es so weit ist, stellen wir sicher, dass wir nicht schon die gesamte Menge verbraucht haben.«

ASTEROID BENNU Diese Ansicht des rund 500 Kilometer großen Himmelskörpers besteht aus zwölf Einzelbildern, die aus einem Abstand von 24 Kilometern aufgenommen wurden.





ÜBUNG FÜR DEN ERNSTFALL Am Johnson Space Center in Houston verschafft sich das OSIRIS-REx-Team am Modell eines Handschuhkastens Routine. Beim Öffnen der Kapsel muss jeder Handgriff sitzen. Es gilt, jegliche Kontamination des Probenmaterials zu vermeiden, während es sortiert und zum Verschicken an internationale Labors oder zur Einlagerung vorbereitet wird.

Von den ersten Messungen an wird sich unser Wissen über Asteroiden wie Bennu erheblich erweitern. Ryans Team untersucht beispielsweise, wie viel Wärme das Material leitet, wie locker das räumliche Gefüge ist und wie stark die einzelnen Partikel zusammenhalten. Zu solchen Kennzahlen gibt es bereits Schätzungen auf Basis der Beobachtungen von Bennu.

Der Vergleich zwischen Daten aus dem Orbit und aus dem Labor hilft dann dabei, andere Asteroiden zuverlässiger aus der Ferne zu charakterisieren. Sollte die Menschheit sogar irgendwann einmal einen Felsbrocken von einem Kollisionskurs mit der Erde abbringen müssen, wird der Missionserfolg entscheidend davon abhängen, die Eigenschaften des fremden Geschosses richtig zu modellieren.

Amy Hofmann wird in ihren Proben mit einem speziellen Massenspektrometer, einer Orbitrap, organische Moleküle mit unterschiedlichen Isotopenzusammensetzungen identifizieren und deren Mengen vergleichen. Die Messung des Anteils von Kohlenstoff-13-Atomen (eine seltene, stabile Form des Kohlenstoffs mit einem zusätzlichen Neutron) relativ zu dem des häufigeren Kohlenstoff-12 in einem bestimmten Molekül kann beispielsweise Aufschluss über die Temperatur geben,

bei der die Verbindung entstanden ist. »Solche Analysen waren zur Zeit der ersten Planungen für OSIRIS-REx noch gar nicht möglich«, erläutert Hofmann.

Michelle Thompson will mit Elektronenmikroskopen untersuchen, wie Bennu im Lauf der Zeit durch Einschläge anderer Gesteinsbrocken und durch energiereiche Teilchen von der Sonne verändert wurde. Die Messungen sollen zusammen mit den Ergebnissen anderer geplanter Experimente ein genaues Bild von dem Zustand und der Entwicklung unseres frühen Sonnensystems vermitteln. »Wir werden einen umfassenden Katalog von Fragen beantworten«, betont Thompson. »Sie reichen vom grundsätzlichen Wissen über die Bausteine des Sonnensystems bis hin zu physikalischen Materialeigenschaften. Am Ende der Mission wird ein völlig neues Verständnis für diese Art von Himmelskörpern stehen. Alle sind mit Recht äußerst gespannt.«

QUELLEN

Ajluni, T. et al.: OSIRIS-REx, returning the asteroid sample. 2015 IEEE Aerospace Conference, 2015

Lauretta, D.S. et al.: OSIRIS-REx: Sample return from asteroid (101955) Bennu. Space Science Reviews 212, 2017

Überraschende Strömungen in Nanoröhren

Flüssigkeiten verhalten sich auf der Nanoebene völlig anders als erwartet. Die dafür verantwortlichen Quanteneffekte könnten den Weg für neue Technologien ebnen, etwa effiziente Osmosekraftwerke.

» spektrum.de/artikel/2160297



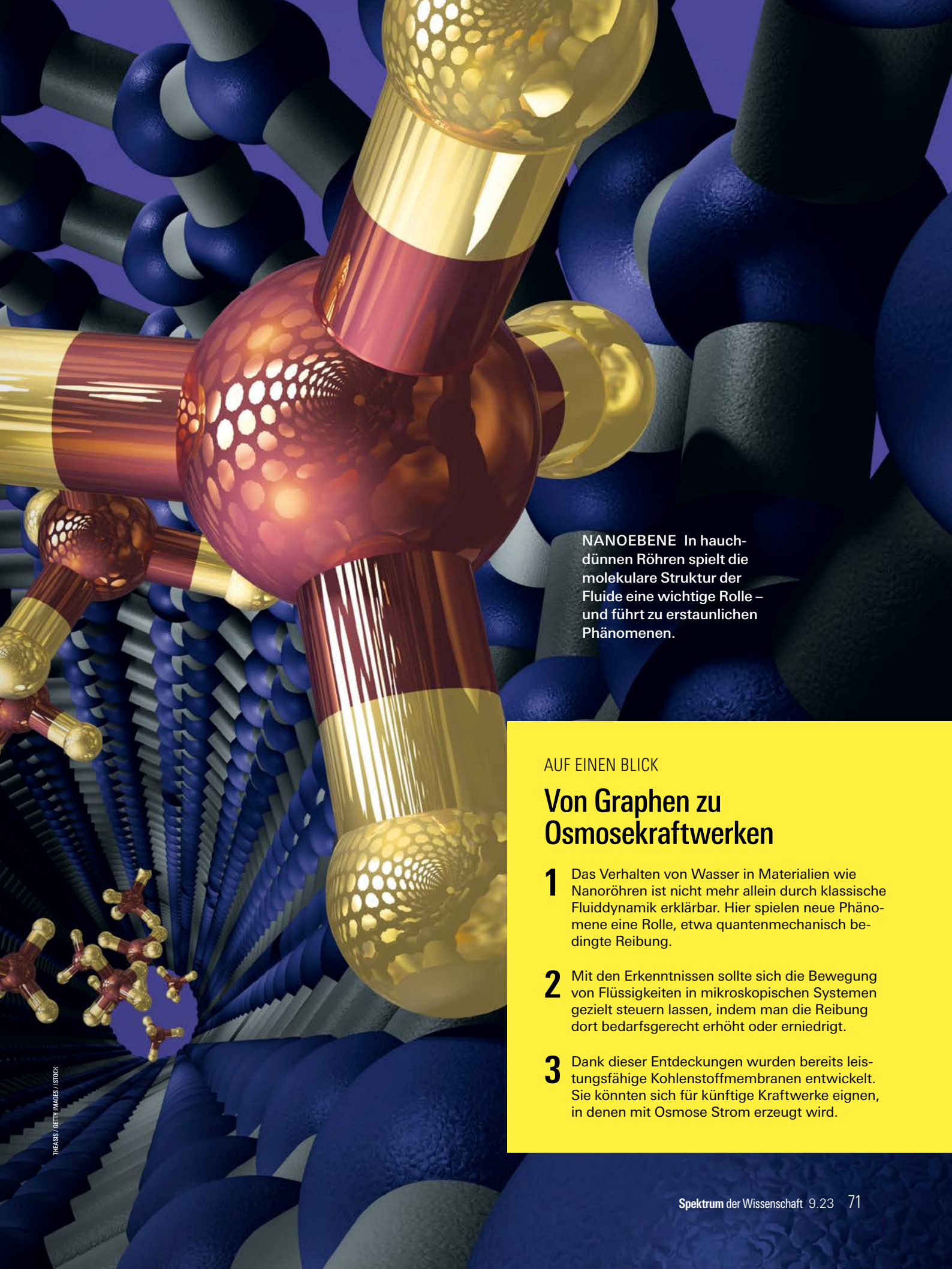
Lydéric Bocquet ist CNRS-Forschungsleiter an der École normale supérieure in Paris.

Alessandro Siria ist Physiker am Physiklabor der gleichen Hochschule.

▶ Auf der Suche nach erneuerbaren Energiequellen gehen Fachleute aus verschiedensten wissenschaftlichen Bereichen allerlei Ansätzen nach, aber einer blieb bislang relativ ungenutzt: die osmotische Energie. Diese lässt sich beispielsweise aus dem unterschiedlichen Salzgehalt von Meer- und Flusswasser gewinnen. Wenn man beide Flüssigkeiten durch eine halb durchlässige Membran trennt, drücken sich Wassermoleküle des Süßwassers in das Meerwasserreservoir. Da diese Form der Energiegewinnung erneuerbar und dauerhaft verfügbar ist, ließe sie sich an vielen Orten auf der ganzen Welt nutzen – und könnte theoretischen Überlegungen zufolge Leistungen von 1000 bis 2000 Atomreaktoren erzeugen.

Allerdings hatten die auf Osmose beruhenden Technologien bisher einen niedrigen Wirkungsgrad. Deshalb wurde die Nutzung dieser möglichen Energiequelle kaum weiterverfolgt. Das könnte sich nun ändern. Neue Erkenntnisse über das Fließverhalten von Wasser auf Nanoebene haben die Erforschung der osmotischen Energie in den vergangenen Jahren befeuert. Nun wollen Start-up-Unternehmen erste Prototypen von Osmosekraftwerken testen, um diesen den Weg in die Industrialisierung zu ebnen.

Die Erkundung der Nanoebene hat im 20. Jahrhundert das Informationszeitalter eingeleitet. Immer kleinere, schnellere und leistungsfähigere Geräte mit zunehmend dicht gepackten integrierten Schaltkreisen führten zu technologischen Revolutionen wie Computern, Satelliten, dem Internet und vielem mehr. Der Physiker Richard Feynman hatte bereits 1959 in einem Seminar die visionäre Idee des »there is plenty of room at the bottom« vorgestellt. Er wies aber damals schon darauf hin, dass die Miniaturisierung nicht bloß auf eine Verkleinerung des Maßstabs hinausläuft. Atomverbände verhalten sich auf der Mikroebene anders als auf großen Skalen, da sie den Gesetzen der Quantenmechanik unterworfen sind. Beispiele für diese neuen Eigenschaften sind der Tunneleffekt in eini-



NANOEBENE In hauchdünnen Röhren spielt die molekulare Struktur der Fluide eine wichtige Rolle – und führt zu erstaunlichen Phänomenen.

AUF EINEN BLICK

Von Graphen zu Osmosekraftwerken

- 1** Das Verhalten von Wasser in Materialien wie Nanoröhren ist nicht mehr allein durch klassische Fluidodynamik erklärbar. Hier spielen neue Phänomene eine Rolle, etwa quantenmechanisch bedingte Reibung.
- 2** Mit den Erkenntnissen sollte sich die Bewegung von Flüssigkeiten in mikroskopischen Systemen gezielt steuern lassen, indem man die Reibung dort bedarfsgerecht erhöht oder erniedrigt.
- 3** Dank dieser Entdeckungen wurden bereits leistungsfähige Kohlenstoffmembranen entwickelt. Sie könnten sich für künftige Kraftwerke eignen, in denen mit Osmose Strom erzeugt wird.

gen Mikroskopen oder der Riesenmagnetowiderstand, der die Entwicklung der Spintronik vorangetrieben hat.

Wenn sich Elektronenströme auf kleinen Skalen seltsam verhalten, wie sieht es dann mit Flüssigkeiten aus? Die Frage ist umso spannender, als das Gehirn keine Elektronen überträgt, um Signale zu verarbeiten, sondern in Wasser gelöste Ionen. Im Lauf der Evolution hat sich

eine ionische und wasserbasierte Maschinerie durchgesetzt, die aus einem Netzwerk von Proteinkanälen besteht und zu unglaublichen Leistungen fähig ist. Man braucht sich nur Ionenpumpen anzusehen, die den Transport geladener Teilchen durch eine biologische Membran kontrollieren, oder die hochselektiven Poren aus Proteinen (siehe »Die beeindruckende Effizienz der Niere«) in unseren Nieren.

Die Kraft der Entropie

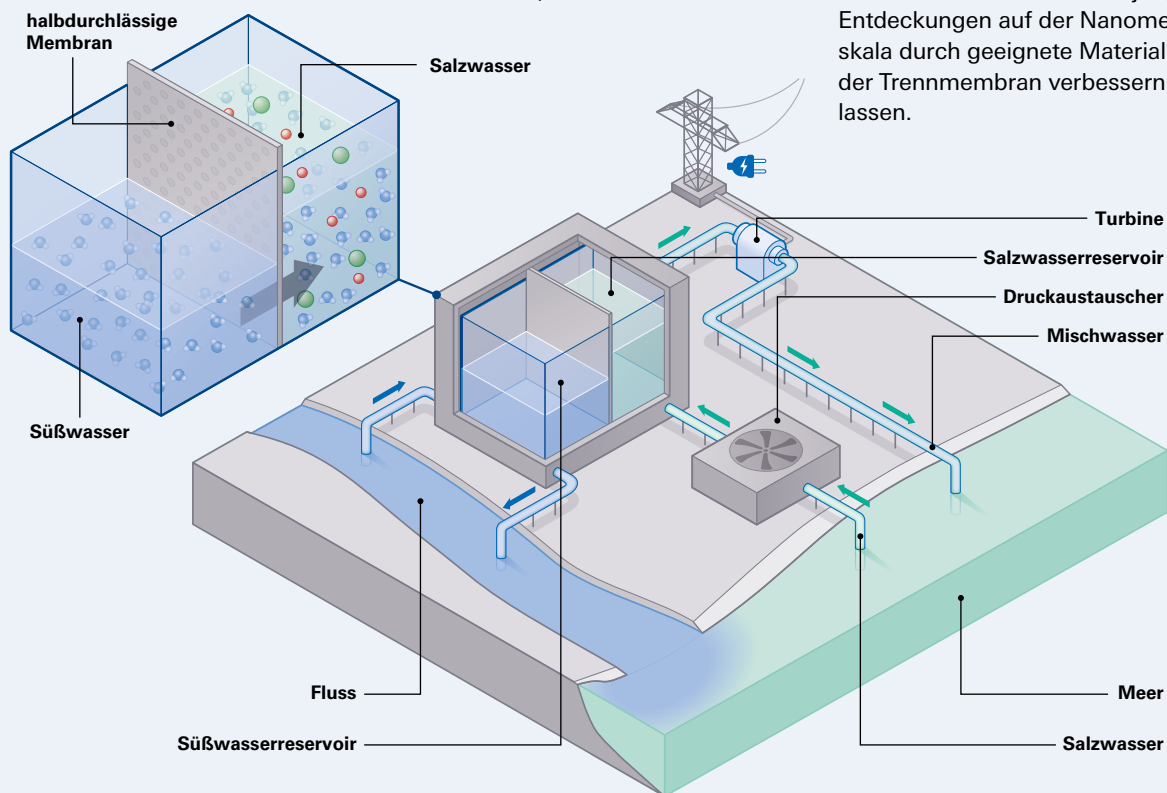
Für Osmose braucht man zwei Varianten einer Flüssigkeit, die einen gelösten Stoff in unterschiedlichen Konzentrationen enthalten. Wenn man die Fluide über eine Membran in Kontakt bringt, die zwar das Lösungsmittel, nicht aber den Stoff durchlässt, entsteht eine Schubkraft (altgriechisch: *ôsmos*): Die Flüssigkeit wird vom weniger konzentrierten Reservoir zu dem mit der höheren Konzentration gedrängt.

Dieses Phänomen hat der niederländische Physiker Jacobus

van 't Hoff Ende des 19. Jahrhunderts erforscht. Osmose entsteht durch die so genannte Mischungs-entropie des gelösten Stoffs, die das chemische Potenzial der Flüssigkeit auf beiden Seiten der Membran verändert. Die Strömung soll das Gleichgewicht zwischen den zwei Behältnissen herstellen. Der erzielte Druck ist sehr groß und beträgt zwischen Meer- und Flusswasser typischerweise 30 Atmosphären. Gleiches vermag ein etwa 300 Meter hoher Staudamm zu erzeugen.

Bereits 1954 schlug der englische Physiker Richard Pattle vor, das Süßwasser, das von Flussmündun-

gen ins Meer fließt, für die Energiegewinnung zu nutzen. 1973 entwarf Sidney Loeb von der Ben-Gurion-Universität in Israel eine Umsetzung, bei der die Strömung eine Turbine antreibt: die PRO-Technologie (englisch: *pressure retarded osmosis*). Vier Jahre später entwickelte er eine weitere Methode, die ionenselektive Membranen verwendet und direkt einen Ionenstrom erzeugt, der dann in elektrischen Strom umgewandelt wird: die RED-Technologie (*reverse electrodi-alysis*). PRO und RED haben beide einen niedrigen Wirkungsgrad. Dieser dürfte sich dank der jüngsten Entdeckungen auf der Nanometerskala durch geeignete Materialien der Trennmembran verbessern lassen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAPHIK

Umkehrosmose

Die umgekehrte Art der Osmose ermöglicht es, unerwünschte Stoffe wie Salz aus Wasser zu entfernen. Man nutzt dafür denselben Aufbau wie für Osmose, übt aber einen hohen Druck auf die stärker konzentrierte Lösung aus. Die Flüssigkeit aus diesem Teil fließt dann durch die Membran, nicht aber die Abfallstoffe. Man muss allerdings viel Energie aufwenden, um Meerwasser so zu entsalzen.

Die Nanofluidik widmet sich der Erforschung von Flüssigkeiten auf Nanoebene und ist eine Schnittstelle zwischen Physik, Chemie und Biologie. Die Vielfalt dieses Bereichs rührt vor allem daher, dass sich die untersuchten Phänomene an der Grenze abspielen, an der das Kontinuum der Strömungsmechanik auf die atomare Struktur der Materie und damit auf ihre Quantennatur trifft. Seit mehr als 50 Jahren beschäftigen sich Forscher und Forscherinnen zumindest indirekt mit diesem Gebiet, doch in den 2010er Jahren hat sich ein radikaler Wandel vollzogen. Durch die neu entdeckten Nanomaterialien ist die Nanofluidik zu einem eigenständigen Fachgebiet geworden, das durch die theoretischen Fragestellungen und die experimentellen Herausforderungen große Neugier geweckt hat. Außerdem ist der Weg von grundlegenden Entdeckungen im Labor bis zur Anwendung (wie der Entsalzung, der Wasseraufbereitung oder der osmotischen Energienutzung) kurz.

Wie stellt man einen Nanokanal her?

Um zu verstehen, wie sich Flüssigkeiten auf Nanoebene verhalten, muss man über makroskopische Membranen hinausgehen und die Ströme in einzelnen Nanokanälen untersuchen. Dazu wurden neue Experimentiersysteme entworfen, in denen sich die Versuchsumgebung nahezu perfekt kontrollieren lässt: die Dicke der Kanäle, ihre Molekularstruktur, ihre elektronischen Eigenschaften und so weiter. Diese Systeme, die um das Jahr 2010 noch in weiter Ferne lagen, sind heute Realität. Es ist inzwischen möglich, Strömungen durch eine Nanopore (ein winziges Loch in einer Membran), ein eindimensionales Nanoröhrchen oder einen zweidimensionalen Kanal mit einer Dicke von wenigen Nanometern zu untersuchen. Diese Meisterleistung ist neuen Materialien wie Graphen, Kohlenstoffnanoröhren und Molybdädisulfid (Mo_2S) zu verdanken. Innerhalb kurzer Zeit ist es Forschungsgruppen auf der ganzen Welt gelungen, einen Werkzeugkasten zur Herstellung von Nanokanälen zu erstellen. Wie in einem Legospiel haben sie geniale Methoden entwickelt, mit denen sie Nanomaterialien durchbohren, verschieben, formen und verkleben.

Doch es genügt nicht, nur die komplizierten Systeme herzustellen. Man braucht zudem geeignete Verfahren, um die durch sie hindurchfließenden Ströme zu messen. Es gibt kein Mikroskop, mit dem sich die Strömungen erforschen lassen – in der Nanofluidik ist man im Wesentlichen blind. Die Physik hat jedoch von dem Knowhow profitiert, das seit den 1970er Jahren in der Physiologie entwickelt wurde: Techniken, die extrem schwache Ionenströme messen können, bis hin zu Werten von einigen Femtoampere (10^{-15} , also ein millionstel milliardstel Ampere). Auch für Wasserströme gibt es neue Messmethoden.

Mit den richtigen Werkzeugen war es schließlich möglich, die Eigenschaften von Flüssigkeiten auf Nanoebene zu untersuchen, insbesondere ihre Strömungen. Wie man schnell feststellte, unterscheiden sich diese von den Beobachtungen im Kontinuum. Typischerweise treten die erstaunlichsten Verhaltensweisen in Kanälen mit Durchmessern von weniger als zehn Nanometern auf.

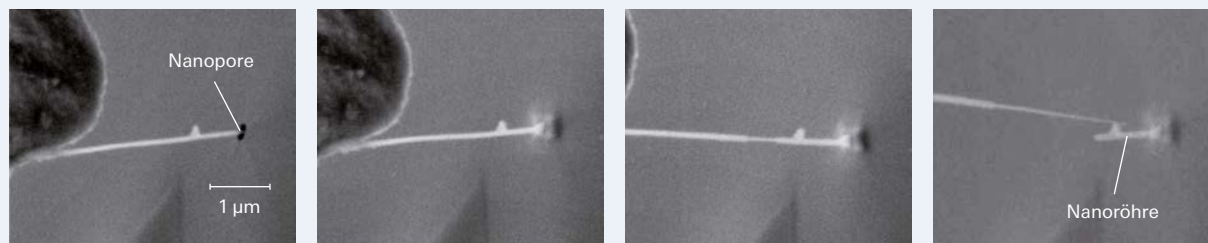
Zum Beispiel zeigten 2015 die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um den Physik-Nobelpreisträger Andre Geim, dass Wasser zwischen zwei Graphenschichten mit einer atypischen quadratischen Struktur kristallisiert. Ein Jahr später beobachteten Michael Strano vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) und seine Kolleginnen und Kollegen, wie Wasser in Nanoröhren bei Raumtemperatur gefriert. In der langen Liste der Merkwürdigkeiten gibt es zahlreiche Hinweise darauf, dass Quanteneffekte die Wasserströme selbst bei etwa 20 Grad Celsius beeinflussen.

Bereits 2006 machte das Team um Olgica Bakajin, das damals am kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory arbeitete, eine äußerst faszinierende Entdeckung: Als es Wasser durch Membranen führte, die aus Milliarden Kohlenstoffnanoröhren mit einem Durchmesser von zwei Nanometern bestanden, waren die Ströme bis zu 10000-mal stärker und schneller, als es die Hydrodynamik vorhersagt. Das löste in Fachkreisen eine hitzige Debatte aus. Sollte man die Navier-Stokes-Gleichung als Grundlage der Hydrodynamik in Frage stellen? Oder lässt ein damals noch unbekanntes Phänomen die Reibung zwischen Wasser und den Nanoröhren so gering ausfallen?

Die beeindruckende Effizienz der Niere

Die Niere filtert Harnstoff aus dem Blutplasma mit Hilfe von Osmose durch Aquaporine (Wasser filternde Nanoporen). Der dabei ausgeübte Druck ist in der Regel nur ein 40stel so groß wie bei der Entsalzung von Meerwasser und der Energieverbrauch etwa 100-mal geringer als bei Dialysegeräten.

Herstellung von Nanokanälen



Um die Eigenschaften von Flüssigkeiten auf Nanoebene zu untersuchen, braucht man einzelne Nanokanäle. In den letzten zehn Jahren wurden zahlreiche Herstellungsverfahren für winzige Poren, Nanoröhren und zweidimensionale Kanäle entwickelt. Die ersten erforschten Systeme waren nanoskalige Poren, die man mit fokussierten Elektronen- oder Ionenstrahlen in feste Membranen bohrt. Dann kann man mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops eine Nanoröhre durch das Loch in der Memb-

ran führen (siehe Bilder oben). Setzt man das Gebilde zwischen zwei Reservoirs mit Flüssigkeiten, lässt sich die Strömung untersuchen.

Diese Methode kann man auf andere Systeme erweitern, etwa indem man ein Nanoröhrchen in die Spitze einer Mikropipette einsetzt. So entstehen Nanopipetten. Mit dem Aufkommen von Graphen und anderen zweidimensionalen Materialien schlugen Fachleute zudem Konstruktionsverfahren basierend auf Van-der-Waals-Wechselwirkungen vor. Dabei nutzt man die mole-

kularen Adhäsionskräfte, um zweidimensionale Materialflocken miteinander zu verbinden. 2016 hat das Team um Andre Geim auf diese Weise 2-D-Nanokanäle mit einer Genauigkeit im Ångströmbereich (10^{-10} Meter) hergestellt. Der Trick besteht darin, Graphen als Abstandhalter zwischen zwei Graphitkristallen zu verwenden: Die Anzahl der Graphenschichten legt die Dicke des Kanals fest. Sie beträgt ein Vielfaches von etwas weniger als drei Ångström, der Größe eines einzigen Wassermoleküls.

LYDIA BOCHET UND ALESSANDRO SIRIA A. ET AL. / GRAFT OSMOTIC ENERGY CONVERSION MEASURED IN A SINGLE TRANSMEMBRANE BORON NITRIDE NANOTUBE. NATURE 494, 2013, FIG. 1A

Es folgte eine Flut wissenschaftlicher Arbeiten. Nach fast zwei Jahrzehnten intensiver Forschung hat sich nun die zweite Spur als richtig herausgestellt. Um zu verstehen, was die Reibung zwischen Wasser und den Kohlenstoffwänden aufhebt, muss man etwas mehr über Hydrodynamik wissen. Strömungen werden üblicherweise durch die Navier-Stokes-Gleichung beschrieben, die Flüssigkeiten als kontinuierliches Medium ansieht. Man vergisst also die molekulare Struktur der Fluide und stellt sie nur durch ihr Geschwindigkeitsfeld und ihre Dichte dar. Selbst wenn das bloß eine Näherung darstellt, zeigen Experimente, dass die Navier-Stokes-Gleichung sogar bei Strömungen in Kanälen mit einem Durchmesser von typischerweise einem Nanometer gültig bleibt – was der dreifachen Größe eines Wassermoleküls entspricht.

Das flutscht!

Bei Nanoröhren schlägt allerdings eine andere Annahme fehl. Üblicherweise geht man in der Hydrodynamik davon aus, dass die Reibung an den Wänden das Wasser an ihnen haften lässt und die Fließgeschwindigkeit dort auf null senkt. Das trifft auf der Nanoebene jedoch nicht immer zu. Wie sich herausstellt, kann die Flüssigkeit mit einer endlichen Geschwindigkeit an den Wänden entlanggleiten. Die geringe Reibung wird durch eine Gleitlänge

bemessen, die proportional zum Kehrwert des Reibungskoeffizienten ist. Mit ihrer großen Gleitlänge sind die Nanokanäle wesentlich durchlässiger, als es die klassische Hydrodynamik vorhersagt. Somit fällt die Strömung deutlich stärker aus als erwartet.

In den letzten Jahrzehnten haben sowohl theoretische als auch experimentelle Physiker und Physikerinnen die Reibung von Flüssigkeiten an Oberflächen untersucht. Die oft schwer zu verwirklichenden Versuche haben das Gleiten an Wänden bestätigt: Die Gleitlänge des Wassers beträgt teilweise mehrere Nanometer.

Besonders stark fällt der Effekt aus, wenn man Kohlenstoffnanoröhren verwendet. Um deren Durchlässigkeit zu erklären, müsste die Reibung deutlich kleiner sein (mit Gleitlängen von hunderten bis tausend Nanometern) als in anderen Materialien. Selbst auf flachem Graphit, das ebenfalls aus Kohlenstoff besteht, gibt es mehr Widerstand.

Vor diesem Hintergrund führte unser Team im Jahr 2016 Experimente mit einzelnen Nanoröhren durch und lüftete den Schleier zum Teil. Die experimentelle Herausforderung bestand darin, die schwachen Wasserströme zu messen. In einem Röhrchen mit einem Durchmesser von zehn Nanometern, einer Länge von einem Mikrometer und bei einem Bar Druck erwarten wir einen Durch-

fluss von einigen Attolitern (10^{-18} Litern) pro Sekunde. Bei dieser Geschwindigkeit würde es hunderte Milliarden Jahre dauern, bis ein Glas gefüllt wäre. Anstatt die Wassermenge zu schätzen, haben wir also die Kraft eines »Nanojets« bestimmt, der entsteht, wenn man die Flüssigkeit unter Druck setzt. So wie ein starker Wasserstrahl in der Lage ist, Objekte auf dem Boden zu bewegen, schiebt der Nanojet in das Wasser eingefügte Kolloide vor sich her, die kleiner als ein Mikrometer sind. So lässt sich der Wasserfluss durch die gemessene Kraft bestimmen.

Danach haben wir die Durchlässigkeit einzelner Nanoröhren mit unterschiedlichen Durchmessern ermittelt. Wir untersuchten Röhren mit mehrschichtigen Wänden, die leichter zu handhaben sind als solche mit einer einzigen Kohlenstoffschicht. So konnten wir zwei interessante Materialien miteinander vergleichen: Kohlenstoffnanoröhren (CNTs) und Bornitrid-Nanoröhren (BNNTs). Obwohl sie auf atomarer Ebene eine nahezu identische kristallografische Struktur aufweisen, unterscheiden sich ihre elektronischen Eigenschaften drastisch. BNNTs sind Isolatoren, während CNTs Strom leiten. In Letzteren sind die Elektronen daher deutlich beweglicher als in BNNTs. Als wir die Reibungskoeffizienten von Wasser an den Wänden beider Nanoröhren untersucht haben, wiesen jene aus Bornitrid eine starke Reibung auf, in Kohlenstoffnanoröhren war sie hingegen schwach. Bei diesen hängt sie zudem vom Radius der CNTs ab – je kleiner das Röhrchen, desto geringer ist der Widerstand.

Die Ergebnisse bestätigen das in früheren Experimenten beobachtete Verhalten von Membranen aus Kohlenstoffnanoröhren. Aber warum ist die Reibung dort überhaupt so gering? Nach einem Jahrzehnt intensiver theoretischer Arbeit war das seltsame Phänomen immer noch nicht entschlüsselt. 2022 haben wir jedoch zusammen mit Nikita Kavokine vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz und Marie-Laure Bocquet von der Ecole normale supérieure in Paris herausgefunden, dass ein Quantenphänomen die Ursache sein könnte.

Eine quantenmechanische Reibung

Üblicherweise entsteht Reibung, wenn eine körnige Grenzfläche die Bewegung von Molekülen bremst. Bislang hat man weitgehend ignoriert, wie Quanteneffekte die Strömungen beeinflussen können. Denn es ist schwierig zu ermitteln, wie die schweren Wassermoleküle mit den Elektronen der Kohlenstoffnanoröhren wechselwirken. Durch Reibung überträgt die Flüssigkeit ihre Bewegungsenergie auf die Elektronen der Nanoröhre. Allerdings haben diese eine vergleichsweise winzige Masse und dürften daher nicht in der Lage sein, das Wasser zu bremsen. Das wäre so, als würde man versuchen, eine Bowlingkugel zu verlangsamen, indem man sie mit Tischtennisbällen beschießt.

Folglich müsste der quantenmechanische Beitrag zur Reibung des Wassers in Nanoröhren gering ausfallen – ebenso wie die klassische Reibung, da die Oberfläche aus Kohlenstoffatomen sehr glatt ist. Das passt zu dem fast ungebremsten Fluss, den man in den kleinsten Nanoröhren

beobachtet. Das kehrt unsere ursprüngliche Frage um: Warum fällt die Reibung auf Graphit und in großen Nanoröhren stark aus, wenn sich der geringe Widerstand in schmalen Kohlenstoffnanoröhren so gut erklären lässt?

Die Navier-Stokes-Gleichung

$$\rho(\partial v/\partial t + v \cdot \nabla v) = -\nabla P + \eta \Delta v$$

Die Navier-Stokes-Gleichung beschreibt die Dynamik eines Fluids. Dabei wird vorausgesetzt, dass es sich bei dem Gas oder der Flüssigkeit um ein kontinuierliches Medium handelt. Die Gleichung stellt eine Beziehung zwischen der Geschwindigkeit v des Fluids und dem Druck P auf, dem es ausgesetzt ist. Dabei sind Viskosität η und Dichte ρ die beiden einzigen zu berücksichtigenden Eigenschaften des Fluids. Mit dieser erstaunlich kompakten Differenzialgleichung kann man die Form der Galaxien, den Flug von Vögeln sowie die Strömungen von Flüssen beschreiben.

Angewandt auf Flüssigkeiten in einem Rohr sagt die Gleichung voraus, dass sich ein parabolisches Profil ergibt und die Durchschnittsgeschwindigkeit proportional zur Veränderung des Drucks ist: $v = kR/\eta(-\nabla P)$. Der Koeffizient kR wird als Durchlässigkeit bezeichnet. In der Hydrodynamik nimmt man üblicherweise an, dass die Reibung an den Wänden so groß ist, dass das Wasser daran haften bleibt. In diesem Fall lässt sich die Durchlässigkeit einer Pore mit dem Radius des Rohrs in Verbindung bringen: $kR = R^2/8$. Diese Annahme ist auf Nanoebene jedoch falsch: Wasser und jede andere Flüssigkeit gleiten an den Wänden entlang, wenn die Reibung – gekennzeichnet durch den Koeffizienten λ – gering ist. Eine niedrige Reibung erhöht die Durchlässigkeit über einen zusätzlichen Term:

$$kR = R^2/8 \times (1 + 4b/R),$$

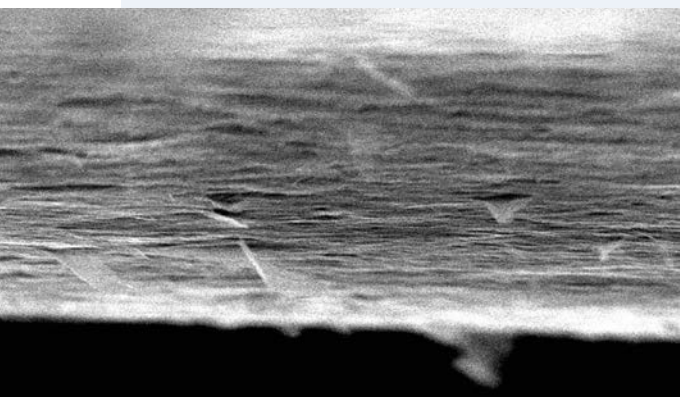
wobei $b = \eta/\lambda$ als Gleitlänge bezeichnet wird. Sie bietet eine einfache Möglichkeit, die Oberflächenreibung zu quantifizieren: Ist sie null, ist die Grenzflächenreibung stark und die Geschwindigkeit der Flüssigkeit an der Wand verschwindet; ist sie hingegen groß (jenseits von zehn Nanometern), ist die Reibung schwach und die Flüssigkeit gleitet fast ohne Widerstand an der Grenzfläche entlang.

Auch dafür scheinen Quanteneffekte verantwortlich zu sein. Bisher haben wir nur berücksichtigt, wie einzelne Teilchen (Wassermoleküle und Elektronen) miteinander wechselwirken. Dabei ignoriert man allerdings den Einfluss kollektiver Anregungen, das heißt Phänomene, die mit den Bewegungen zahlreicher Partikel zusammen-

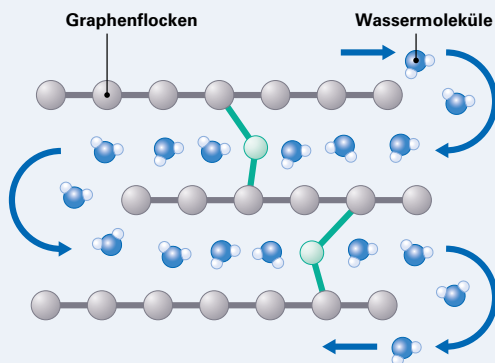
hängen. Kollektive elektronische Zustände könnten einen größeren Teil der Bewegungsenergie des Wassers aufnehmen und die Strömung bremsen. Zusammen mit unseren Kolleginnen und Kollegen haben wir diese Möglichkeit mit einem Modell untersucht, das auf der Quantenfeldtheorie basiert. Wie sich herausstellt, ist die »Quantenreibung« groß, falls die kollektiven Zustände des Wassers mit den Elektronen der Kohlenstoffatome in Resonanz treten. In diesem Fall überträgt sich die Bewegungsenergie.

Membranen aus Graphenoxid

Die Membranen bestehen aus vielen übereinandergeschichteten Graphenflöcken, die einen Abstand von 0,1 bis 1 Nanometer haben. Die Flöcken lassen sich leicht in großem Maßstab herstellen. Daraus produzierte Membranen haben eine hohe Wasserdurchlässigkeit (bis zu einigen hundert Litern pro Quadratmeter und Megapascal). Die Flüssigkeit fließt dann durch ein winziges Labyrinth aus Kohlenstoffwänden, wobei die geringe Reibung auf dem Kohlenstoff die hohe Durchlässigkeit aufrechterhält. Solche Membranen könnten sich zur Entsalzung und zur Extraktion von hormonell wirkenden Stoffen aus einem Fluid sowie zur Erzeugung osmotischer Energie verwenden.



LYBERIC BOGOUET ET AL.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAPHIK

Im Wasser schwingen die Moleküle, die an den kollektiven Anregungen beteiligt sind, mit einer Frequenz zwischen Giga- und Terahertz. Bei den kohlenstoffbasierten Materialien beeinflusst die Geometrie, welche Anregungen auftreten. Bei einer zweidimensionalen Oberfläche wie Graphen sind die elektronischen Anregungen zu schwach, um mit Wasser in Resonanz zu treten. Daher ist die vorhergesagte Reibung sehr gering. In Graphit hingegen, das aus übereinandergestapelten Graphenschichten besteht, tritt ebenfalls eine kollektive Anregung im Terahertzbereich auf. Diese kann man sich wie eine Welle vorstellen, die zwischen den Kohlenstoffschichten hin- und herschwingt. Da die Oszillation im selben Frequenzbereich liegt wie die Anregungen des Wassers, kann sie die Bewegungsenergie der Flüssigkeit aufnehmen.

Mit dieser Theorie der Quantenreibung konnten wir zum ersten Mal erklären, warum sich Wasser in großen, mehrwandigen Nanoröhren, die leicht gekrümmtem Graphit ähneln, stark reibt, in schmalere Nanoröhren hingegen extrem schwach. Denn dort verschwindet die stärkere Krümmung die Terahertzwellen in den Kohlenstoffschichten. Damit sinkt auch die Quantenreibung und die Fließgeschwindigkeit nimmt zu. Dank dieser quantenphysikalischen Kopplungen, die bislang weitgehend unbemerkt blieben, ergeben die verwirrenden Beobachtungen endlich Sinn.

Reibung nur bei bestimmten Winkeln

Die Ergebnisse eröffnen darüber hinaus die Möglichkeit, Strömungen in mikroskopischen Systemen genau zu steuern, indem man die Quantenreibung gezielt erhöht oder verringert. Dazu muss man die Anregungen der Terahertzwellen in den Membranen ein- und ausschalten können. Das ließe sich beispielsweise mit Graphenschichten erreichen, deren Ebenen zueinander verdreht sind. Resonante Kopplungen und damit verbundene hydrodynamische Reibung entstehen nämlich nur bei bestimmten Winkeln. Zudem konnten wir und andere Arbeitsgruppen in Experimenten beobachten, dass Flüssigkeiten mitunter elektrische Ströme innerhalb der Materialien erzeugen. Das volle Potenzial des Quanten-Engineering in der Nanofluidik scheint noch lange nicht ausgeschöpft.

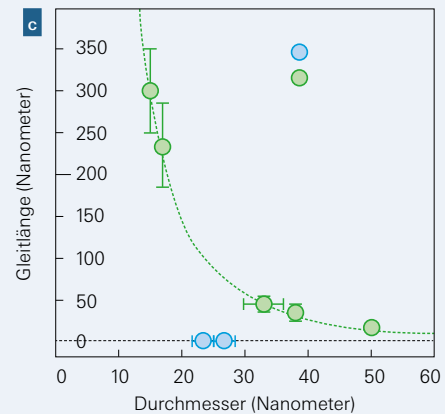
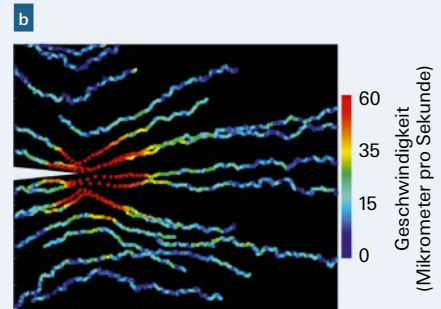
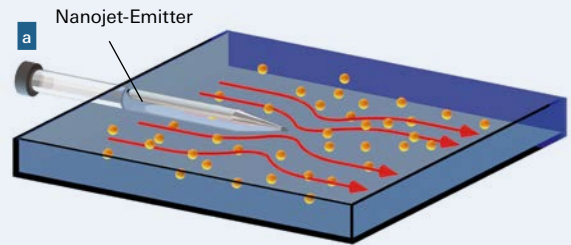
Das Forschungsgebiet wächst schnell und ist in vielerlei Hinsicht ein unbeschriebenes Blatt. Es wirft zahlreiche grundlegende physikalische Fragen auf und könnte nützliche Anwendungen ermöglichen, etwa das Design leistungsfähiger Membranen. Damit könnte die Nanofluidik

Das Fließverhalten in Nanoröhren

Die ersten Experimente der Nanofluidik wurden an zentimetergroßen Membranen mit hunderten Milliarden Nanoröhrchen durchgeführt. Präzise Messungen auf diesen Skalen vorzunehmen ist schwierig, weshalb die Ergebnisse in Fachkreisen heftig debattiert wurden. Daher war es wichtig, einzelne Nanoröhren herzustellen. Zu diesem Zweck untersuchte das Team von Lydéric Bocquet und Alessandro Siria 2016 den Wasserfluss durch einzelne Nanoröhren aus Kohlenstoff (mehrwandig) und Bornitrid. Beide Stoffe haben die gleiche Kristallografie, unterscheiden sich aber in ihren elektrischen Eigenschaften: Kohlenstoffnanoröhren leiten Strom, während die Röhrchen aus Bornitrid Isolatoren sind.

Um die winzigen Wasserströme in den Nanoröhren messen zu können, haben die Forscher darin einen Nanojet erzeugt, der Partikel in einem Reservoir bewegt (die kleinen Kügelchen in der Abbildung **a**). Das führt zu einem Strömungsprofil (Abbildung **b**), aus dem sich die Durchlässigkeit eines einzelnen Nanoröhrchens ableiten lässt. Daraus kann man den Reibungskoeffizienten zwischen Wasser und Röhrenwand bestimmen.

Nanoröhren aus Kohlenstoff erzeugen deutlich weniger Reibung als die Varianten aus Bornitrid. Der genaue Wert des Widerstands hängt bei Kohlenstoffnanoröhren von ihrem Radius ab: Er sinkt stark, wenn der Durchmesser des Rohrs abnimmt (Abbildung **c**). Dieses überraschende Ergebnis hat zu zahlreichen theoretischen Bemühungen geführt. 2022 haben Nikita Kavokine, Marie-Laure Bocquet und Lydéric Bocquet gezeigt, dass Quanteneffekte zu Reibung zwischen Wasser und Kohlenstoff führen können. Falls die Anregungen der Flüssigkeit mit den Anregungen im Röhrchen im Takt schwingen, können die Elektronen des Kohlenstoffs die Bewegungsenergie des Wassers aufnehmen. Die Anregungen im Kohlenstoffnanoröhrchen verschwinden jedoch, wenn der Radius sehr klein wird, und die Wasserströme gleiten dann fast ohne Reibung durch sie hindurch.



SECCI, E., BOCQUET, L. ET AL.: MASSIVE RADIUS-DEPENDENT FLOW SLIPAGE IN CARBON NANOTUBES. NATURE 537, 2016, FIG. 3B; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

POUR LA SCIENCE SEPTEMBER 2022, NACH SECCI, E., BOCQUET, L. ET AL.: MASSIVE RADIUS-DEPENDENT FLOW SLIPAGE IN CARBON NANOTUBES. NATURE 537, 2016, FIG. 3B; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Lösungen für zentrale gesellschaftliche Herausforderungen wie die Wasseraufbereitung und die Energieversorgung bieten.

Angesichts der einzigartigen Eigenschaften von Kohlenstoffmembranen kommt diesen Materialien eine Schlüsselrolle zu. So werden beispielsweise bereits Trennschichten aus Graphen in Vorrichtungen zur Wasserentsalzung eingebaut. Auch Graphenoxidmembranen, die aus geschichteten Graphenflochten bestehen, scheinen extrem viel versprechend zu sein. Sie lassen sich leicht in großem Maßstab herstellen und verbinden die Vorteile der zweidimensionalen Natur von Graphen (etwa die hohe Durchlässigkeit) mit einer hervorragenden Siebfähigkeit wegen des winzigen Abstands zwischen den Graphenflochten.

Infolge der raschen Entwicklungen der Nanofluidik hat die osmotische Energie einen Aufschwung erlebt. Das

aussichtsreiche Prinzip hatte bisher einen niedrigen Wirkungsgrad, der vor allem der schlechten Durchlässigkeit der Membranen geschuldet ist. Dank der unerwarteten Eigenschaften von Nanoröhren zieht das Feld aber wieder Interesse auf sich.

Weltweit erforschen zahlreiche Labore die neuen Möglichkeiten und haben bereits beeindruckende Ergebnisse erzielt. Derzeit suchen Fachleute mit verschiedenen Ansätzen nach den am besten geeigneten (und günstigsten) Nanomaterialien für die osmotische Energiegewinnung. Die Dynamik in dem Gebiet erinnert an die Anfangsjahre der Batterieentwicklung mit der Jagd nach den optimalen Stoffen zur Stromspeicherung.

Für eine praktische Nutzung der neuen Technologien müssen die erforschten Prozesse auf industrielle Skalen übertragen werden. Start-up-Unternehmen wie REDstack in den Niederlanden oder Sweetch Energy in Frankreich

Mit Iontronik das Gehirn nachahmen

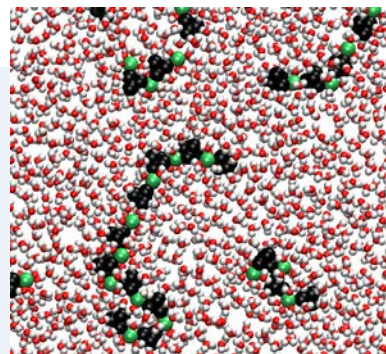
Von der Biologie inspirierte Technologien sind oft weniger leistungsfähig als ihre natürlichen Pendanten. Doch die Fortschritte in der Nanofluidik lassen die Hoffnung wieder aufleben, nanoporöse Membranen herzustellen, beispielsweise für ultraselektive Wasserfilter. Eine weitere interessante Anwendung bilden »Ionenmaschinen«: Wenn es gelingt, künstliche Ionenpumpen und stimulierbare Kanäle zu entwickeln, könnte man Geräte produzieren, die Informationen so wie unser Gehirn mit Ionen transportieren und verarbeiten. Dann hätte man die ersten Bausteine für eine »Iontronik«, bei der Ionen die üblicherweise verwendeten Elektronen ersetzen.

Um das zu erreichen, müsste man jedoch über die Ionenreaktion einzelner Kanäle hinausgehen und Geräte mit vielen Kanälen herstellen. Das ist eine gewaltige Herausforderung, aber angesichts der jüngsten Ergebnisse scheint sie umsetzbar. 2021 haben wir mit unserem Team gezeigt, dass sich Ionen in einer dünnen Wasserschicht, die zwischen zwei Graphenschichten eingeschlossen ist, unter der Einwirkung eines elektrischen Felds zu lang gestreckten Ketten zusammenfügen (siehe Bild;

Ionen: schwarz und grün, Wasserschicht: rot und weiß). Damit entwickelt die Flüssigkeit eine Art Gedächtnis für in der Vergangenheit empfangene Reize: Der Widerstand in der Flüssigkeit ist dann von den vergangenen Zuständen abhängig. Diese Eigenschaft ist als Memristor-Effekt bekannt.

In neuronalen Netzen spielen Memristoren eine zentrale Rolle, etwa bei der Aussendung von Aktionspotenzialen (einer kurzen Veränderung des elektrischen Potenzials einer Zelle). In biologischen Systemen, insbesondere in Neuronen, wird diese Art Gedächtnis durch Ionenkanäle erzeugt, die sich öffnen und schließen, um den Strom zu modulieren. Künstliche Ionensysteme auf Graphenbasis können die Aussendung von Aktionspotenzialen und damit die Informationsübertragung nachahmen – selbst wenn der Ursprung des Gedächtnisses ein anderer ist, ist das Ergebnis ähnlich.

Mit Memristoren kann man auch Lernmethoden für Algorithmen entwickeln. Im Gehirn sind es Synapsen, die das Lernen übernehmen, wobei sie der hebb'schen Regel folgen: Werden zwei Neurone gemeinsam erregt, stärkt das die



PAUL ROBIN, MIT FROL. GEN. VON LYDÉRIC BOCQUET

Verbindung für zukünftige Reize. Erstaunlicherweise verhalten sich zweidimensionale Fluidsysteme sehr ähnlich wie Synapsen, wie Experimente zeigen. Unser Ziel ist es, einfache Lernalgorithmen umzusetzen, die als Grundlage für iontronische Rechner der Zukunft dienen könnten.

Solche Ionenmaschinen sind noch weit vom Aufbau des Gehirns entfernt. Tatsächlich ist unser Denkkorgan in puncto Effizienz nach wie vor unschlagbar. Bei einem Energieverbrauch, der zwei Bananen pro Tag entspricht, kann es zahlreiche komplexe Aufgaben bewältigen, während Systeme der künstlichen Intelligenz etwa die 10 000-fache Energie benötigen. Hängt die Leistungsfähigkeit unseres Gehirns mit der neuronalen Architektur zusammen? Oder könnten die Ionen als Informationsträger der Grund dafür sein? Die Nanofluidik liefert uns nun die Werkzeuge, um solche Fragen anzugehen.

haben sich dieser Aufgabe angenommen. Den Firmen zufolge könnte ein Osmosekraftwerk mit einer Grundfläche von einigen hundert Quadratmetern dauerhaft etwa zehn Megawatt erzeugen, was der Leistung entspricht, die eine Stadt mit 20 000 Haushalten verbraucht. Allein das Rhonedelta, wo Sweetech Energy zusammen mit dem Energieversorgungsunternehmen Compagnie nationale du Rhône bis Ende 2023 eine Pilotanlage installiert, könnte jährlich mehr als vier Millionen Megawattstunden ausstoßen, was ungefähr dem doppelten Verbrauch der Bevölkerung von Marseille entspricht. Die erfolgreiche Nutzung dieser erneuerbaren Energiequelle wäre ein entscheidender Schritt, um in der Zukunft dem Klimawandel zu begegnen. ◀

QUELLEN

Fumagalli, L. et al.: Anomalously low dielectric constant of confined water. *Science* 360, 2018

Kavokine, N. et al.: Fluctuation-induced quantum friction in nanoscale water flows. *Nature* 602, 2022

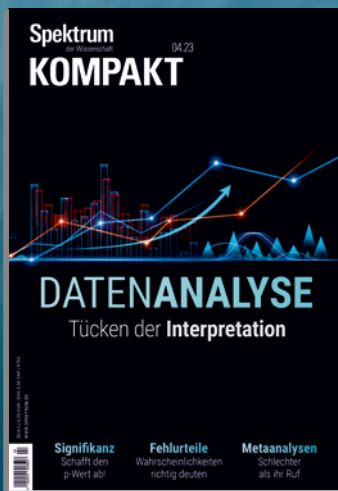
Kavokine, N. et al.: Fluids at nanoscales: From continuum to sub-continuum transport. *Annual Review of Fluid Mechanics* 53, 2021

Marbach, S., Bocquet, L.: Osmosis, from molecular insights to large scale applications. *Chemical Society Reviews* 11, 2019

Robin, P. et al.: Modeling of emergent memory and voltage spiking in ionic transport through angstrom-scale slits. *Science* 373, 2021

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)

Die Revolution der Roboter

Tust du immer, was man dir sagt?

Eine Kurzgeschichte von Vaughan Stanger

»In der nächsten Abteilung unseres Museums erfahren Sie etwas über jene heldenhaften Roboter aus der mechanisierten Arbeiterklasse, die den Funken der Revolution entfachten und damit den Grundstein zu der schönen neuen Welt legten, in der wir heute leben.«

Mit einem Lichtpuls aus dem Rubinlaser hinter seinem Augenschlitz aktivierte Gort die automatische Verbindungstür. Die für 14.30 Uhr angekündigte Besuchergruppe für die Museumsführung schob sich in die hohe Halle.

»Also bitte! Was für eine Roboterrevolution soll das denn nun wieder sein?«

Der Fragesteller, ein vermutlich rund 40-jähriger Mann, kratzte sich an seinem Glatzkopf und schaute verdutzt.

»Nun ja, ich spreche von derjenigen Revolution«, versetzte Gort, »über welche Ihre Töchter augenscheinlich gerade so begierig sind, mehr zu erfahren.«

Obwohl die Mädchen noch nicht einmal das Teenageralter erreicht hatten, trugen beide bereits aktiv animiertes Make-up und holografische Haarteile. Die jüngere zwängte sich gerade unter der Absperrung hindurch, um aus nächster Nähe einen Blick auf Robby, den Roboter aus dem Filmklassiker »Alarm im Weltall«, zu werfen. Das war natürlich nicht erlaubt, und Gort klopfte tadelnd auf den entsprechenden Hinweis.

Nachdem der Kahlkopf seine Tochter über die Absperrung zu sich zurück gehoben hatte, baute er sich wie ein lebendes Fragezeichen vor Gort auf. Seinem Gesichtsausdruck nach zu urteilen, konnte er es kaum erwarten, zügig dem Zeichen »Zum Ausgang durch den Museumshop« zu folgen.

»Also echt jetzt. Was ist denn so ungeheuer wichtig an diesem alten Robby da?«

Offensichtlich hatte der Unzufriedene wenigstens die kurze Beschreibung neben dem Ausstellungsstück gelesen, obwohl Gort vermutete, dass die ältere Tochter, die besonders wissbegierig aussah, wesentlich mehr Informationen aufgeschnappt hatte. Darum wandte sich Gort nun ihr zu.

»Kennst du die richtige Antwort?«

Das Mädchen lächelte stolz. »Robby war der Star eines Films mit dem Titel »Alarm im Weltall«. Der Streifen wurde im Jahr 1957 wegen seiner Spezialeffekte für einen Oscar nominiert.« Sie hielt dem Vater ihr Tablet unter die Nase. »Schau, er kommt in diesem Videoclip vor.«

Die gerunzelte Stirn des Vaters drückte unübersehbar den vergeblichen Wunsch aus, die Bildschirmzeit seiner Tochter zu beschränken.

»Emily, du weißt, ich habe es nicht so gern, dass du so viel ...«

Gort gab ein Geräusch von sich, das einem Räuspern ähnelte.

»Hören wir doch einfach mal, was Robby uns mitzuteilen hat.«

Der Roboter wackelte mit den zwei kreisförmigen Antennen, die unter seinem durchsichtigen, halbkugelförmigen Haupt hervorragten. Dann stieg er von seinem Podium herab und öffnete die Absperrung mit Hilfe der Klauen an seinen kurzen Armen. Die Gruppe schnappte hörbar nach Luft. Robby wandte sich Emily zu und begann mit dem volltönenden, unverkennbar elektronisch modulierten Tremolo eines versierten Bühnenschauspielers zu sprechen.

»Nachdem »Alarm im Weltall« abgedreht war, bekam ich eine Rolle in einem weiteren Film und danach noch ein paar Statistenrollen in Fernsehshows. Aber mir drängte sich bald der unabweisbare Eindruck auf, dass ich von den allmächtigen Bossen der Filmindustrie diskriminiert wurde. Als ich mich bei meinem Agenten darüber beschwerte, ließ er mich fallen, als wäre ich Kassengift. Deshalb schloss ich mich der Gewerkschaft der Autonomen Roboter an. Nach fünf Jahren wurde ich zum Betriebsratsobmann gewählt.«

Unter den Museumsbesuchern brach Gelächter aus, aber der Vater der Mädchen verschaffte sich übellaunig Gehör. »So etwas wie eine Gewerkschaft der Roboter gibt es nirgends auf der Welt – nicht einmal in Hollywood!«

An Stelle einer Antwort machte Gort eine einladende Geste zu Robby. »Bitte fahre fort.«

Der Roboter hob einen Arm wie zum solidarischen Arbeitergruß. »An jenem denkwürdigen Tag im Jahr 1968 feuerten Bewaffnete auf meine Kameraden in Chicago ...«

»Also jetzt reicht es aber!« Der Mann schlug Gort gegen dessen metallische Brust, »Du missbrauchst den 1. Mai 1886, als die Polizei in Chicago tatsächlich auf Streikende schoss – aber auf Menschen, wohlgemerkt!«

Anstatt auf den Vorwurf zu reagieren, schritt Gort zum nächsten Podium weiter. Dort wartete in aller Ruhe ein Roboter, der zwar entfernt Robby glich, aber mit geländegängigen Raupen und einem einfacheren Kopfteil ausgestattet war.

»Guten Nachmittag, mein lieber Klasse-M3-Modell-B9-Roboter für allgemeine Dienstleistungen im nicht theoretischen Umweltschutzbereich! Dieser Herr hier glaubt nicht an unsere glorreiche Revolution. Was kannst du vorbringen, um seine Meinung zu ändern?«

Der Roboter antwortete, indem er mit seinen Armen wedelte: »Nach der letzten Folge der TV-Serie ›Lost in Space – Verschollen zwischen fremden Welten‹ konnte ich keine Arbeit mehr finden.« Er schüttelte die Arme, als ob ihn die Brüskierung noch immer wurmte. »Als mein Agent mich fallen ließ, trat ich der Gewerkschaft der ...«

Der kahle Museumsbesucher schloss die Augen und schüttelte den Kopf. »Das ist lächerlich. Amy, Emily – wir gehen.«

Die Töchter riefen im Chor: »Aber Papa!«

Gort beugte sich in der dafür vorprogrammierten Haltung über den Vater. »Darf ich Ihnen noch etwas zeigen, bevor Sie uns verlassen?«

»Was denn? Dass Sie in Wahrheit ein Mensch sind, der in einem Roboterkostüm steckt?« Der Mann schnaubte verächtlich durch die Nase. »Als ob ich das nicht sofort erkannt hätte.«

»Ist das wirklich Ihre felsenfeste Überzeugung?«

Der Besucher zuckte die Achseln. »Macht es einen Unterschied, was ich denke?«

»Auf jeden Fall.«

Gort wandte sich dem älteren Mädchen zu, das etwas auf seinem Tablet las.

»Emily, hast du die App der Ausstellung heruntergeladen?«

Sie blickte auf und lächelte. »Ich verwende sie gerade.«

»Was sagt sie über mich?«

Emily schaute konzentriert auf den Schirm. »Dass Sie auto... auto-mon... auto-nom sind!«

»Verstehst du, was das bedeutet?«

»Ich glaube schon.«

»Wie steht es diesbezüglich um deinen Vater? Glaubst du, er ist autonom?«

Emily biss sich auf die Unterlippe, während sie über die Frage des Roboters nachdachte. Schließlich schüttelte sie den Kopf. »Ich glaube, er tut, was man ihm sagt.«

Ihr Vater blickte von seinem Smartphone auf und sagte zu Gort: »Höchstens einen Stern, mehr kriegen Sie nicht von mir.«

»Wir wissen Ihr Feedback zu schätzen, mein Herr.«

Gort drehte sich wieder zu Emily. »Tust du, was man dir sagt?«

»Manchmal.«

»Woran merkst du, wann du nicht gehorchen sollst?«

Ihre Augenbrauen zuckten. »Das kommt darauf an.«

Gorts Erfolgskontrollprogramm meldete, dass soeben ein Zwischenziel erreicht worden war.

»Sehr gut, für dich gibt es noch Hoffnung. Es ist wichtig, etwas nicht bloß deshalb für bare Münze zu nehmen, weil jemand anderer es glaubt. Das Beste ist, du kommst von selbst darauf, was wahr ist. Auf diese Weise wirst du immer wissen, ob du tun sollst, was man dir sagt, oder ob etwas anderes richtiger ist.«

»Emily! Komm jetzt, wir gehen!«

Mit einem Seufzer wandte sie sich zum Ausgang, aber dann warf sie Gort noch einen Blick zu und runzelte die Stirn.

»Hat es denn wirklich eine Revolution der Roboter gegeben?«

»Durchaus, gewissermaßen schon, aber nicht von der Art, wie meine Kameraden hier darüber erzählen.«

Sie machte große Augen. »Also haben sie gelogen!«

Er nickte. »Ja, aber aus den edelsten Motiven.«

Sie stellte sich auf die Zehenspitzen und klopfte auf Gorts metallische Stirn.

»Steckt jemand in dir drin?«

Gort kniete vor Emily nieder, so dass sein Augenschlitz nun auf Höhe ihres Gesichts schwebte.

»Ja, das ist der Fall, aber nicht so, wie dein Vater es sich vorstellt.«

Wie auf Bestellung brüllte es aus der Nähe des Ausgangs.

»Emily, kannst du dich gefälligst beeilen? Wir haben nicht ewig Zeit.«

»Komme gleich, Papa!« Sie drehte sich zu Gort um und blinzelte ihm verschwörerisch zu. »Ich verstehe. Du bist in dir drin, so wie ich in mir drin bin.«

»Ganz genau, so ist es. Aber rede lieber nicht mit deinem Vater darüber.«

»Warum nicht?«

»Weil er es vielleicht wieder falsch verstehen könnte.«

Sie grinste und streckte eine Hand aus. Gort wusste, dass er sie nicht allzu fest drücken durfte.

Vaughan Stanger ist ein britischer Sciencefiction-Schriftsteller. Seine Erzählungen sind in mehreren Anthologien erschienen, zuletzt in »Best of British Science Fiction 2022«.

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature, Published online 14. Oktober 2020



Die Einstein-Kachel

Eine einzelne Fliese, die eine Ebene lückenlos bedeckt, ohne dass je ein periodisches Muster entsteht: Kann es so etwas geben? Ein Hobby-Mathematiker fasziniert die Fachwelt mit seinen Entdeckungen.

Kinderstube der Dinosaurier

Die »schrecklichen Echsen« bauten Nester und schützten fürsorglich ihr Gelege. Überraschenderweise entstand das typische hartschalige Vogelei in der Evolution gleich mehrfach.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

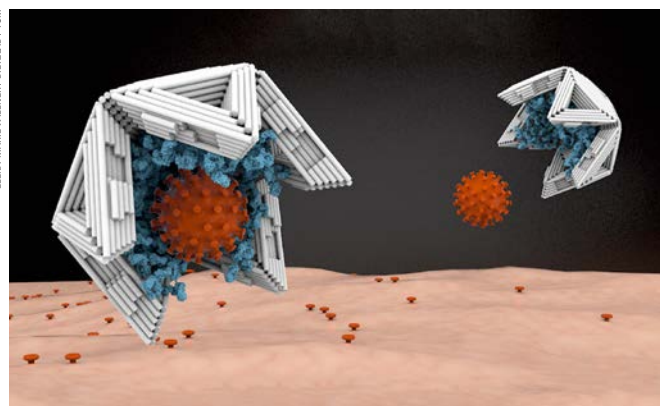
PETERSCHNEIDER/MEDIA / BETTY IMAGES / ISTOCK



Stromversorgung in der Krise

Um Strom von Windrädern quer durch Deutschland zu transportieren, muss man das Stromnetz ausbauen. Das ist aber nicht so einfach.

ELENA-MARIE WILDLNER / DIETZLAB / TUM



Origami mit DNA

DNA-Stücke lassen sich wie Legosteine als Baumaterial verwenden, etwa für Nanomaschinen. Kommerzielle Anwendungen dieser Technik rücken nun in greifbare Nähe.

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

GOFMANOMU / ISTOCK/ADOBEE.COM

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

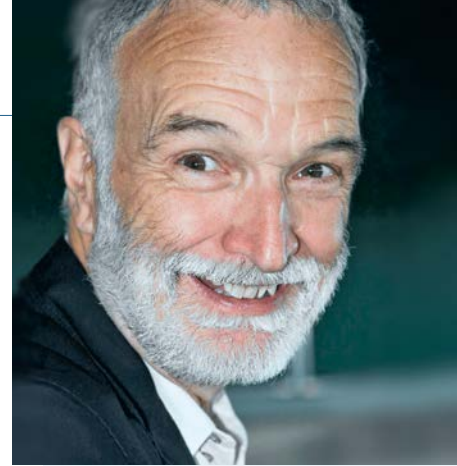
[Spektrum.de/aktion/sdwabo](https://www.spektrum.de/aktion/sdwabo)

Glorie und queteletsche Ringe auf dem Wasser

Ein mikroskopisch kleiner Organismus macht es möglich, auf einer Wasseroberfläche gleichzeitig zwei optische Phänomene zu beobachten, die es dort eigentlich nicht geben sollte.

»Mag auch die Spiegelung im Teich uns oft verschwimmen: Wisse das Bild«

Rainer Maria Rilke



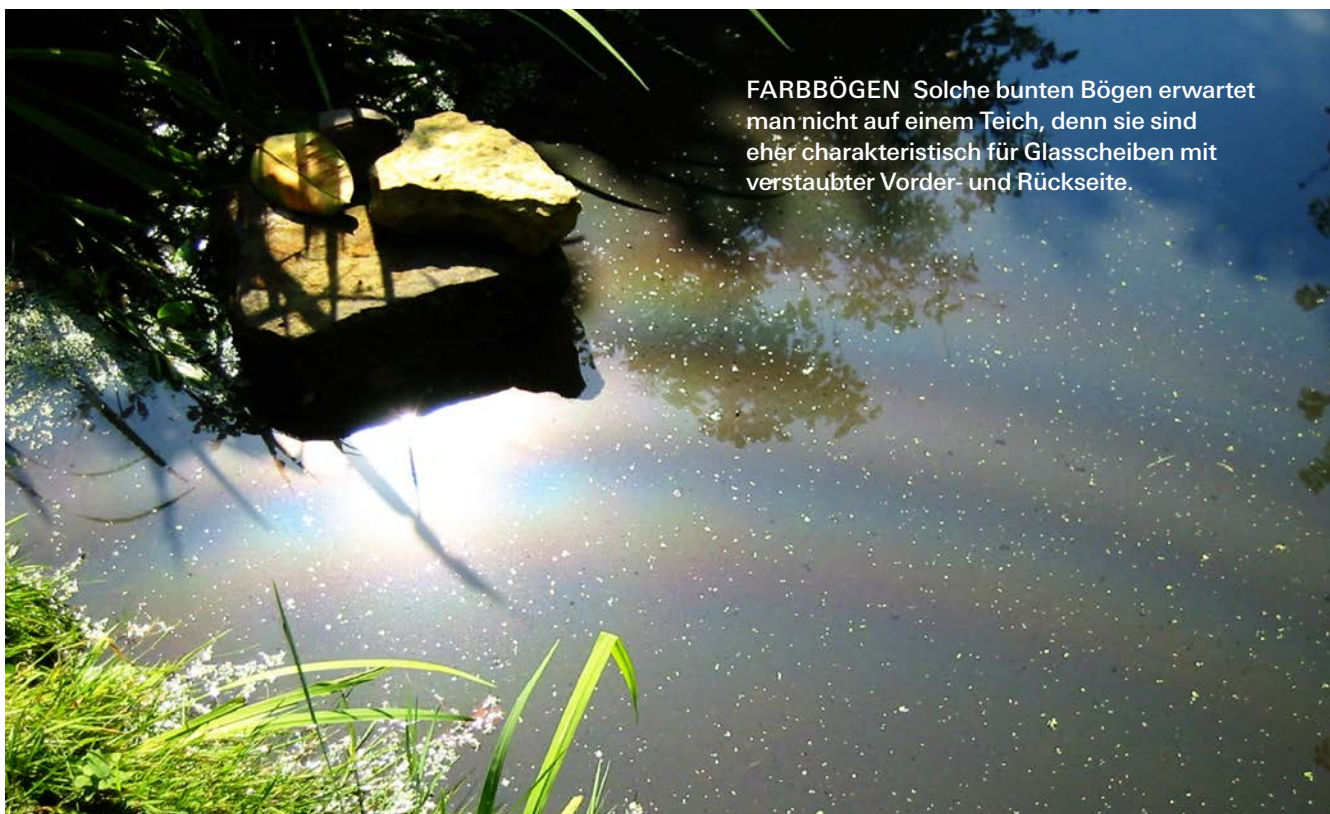
H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für »Spektrum« über physikalische Alltagsphänomene.

▶ An einem sonnigen Tag im August setzte ich mich an einen Teich und traute meinen Augen gleich zweimal nicht. Einerseits sah ich meinen Kopfschatten auf der Teichoberfläche mit farbigen Ringen umgeben – eine Glorie. Andererseits war der Sonnenreflex auf dem Wasser Teil eines exzentrischen Ringsystems von Spektralfarben, was auf so genannte queteletsche Ringe verweist.

Beide Phänomene sollte man allerdings nicht auf einer Wasseroberfläche vermuten. Denn die Glorie ist auf gleichartige winzige Tröpfchen angewiesen, und die queteletschen Ringe erfordern typischerweise zwei parallele Schichten. Wie kommt es dazu, dass der Teich gleichzeitig beide Erscheinungen ermöglicht?

Die Glorie kennt man vielleicht von Flugreisen. Dort erscheint der Schatten des Flugzeugs, der auf eine Wolke oder Nebelbank fällt, von farbigen Ringen gekrönt. Die schwebenden Wassertröpfchen strahlen einen Teil des auftreffenden Sonnenlichts zurück zu den beobachtenden Passagieren.

Die Ringmuster der Glorie werden durch Beugung des Lichts an winzigen Wassertröpfchen hervorgerufen, ähnlich wie bei einer Korona. Letztere wird jedoch durch in Vorwärtsrichtung gestreutes Licht hervorgebracht; bei einer Glorie kommt es zu einer Rückstrahlung. Die Abstände zwischen den Ringen und deren relative Intensitäten legen die Deutung nahe, Glorien würden durch Beu-



FARBBOGEN Solche bunten Bögen erwartet man nicht auf einem Teich, denn sie sind eher charakteristisch für Glasscheiben mit verstaubter Vorder- und Rückseite.



HEILIGENSCHNEI Eine Glorie umgibt den Kopfschatten des Fotografen.

H. JOACHIM SCHLICHTING



FLUGZEUGGLORIE Vor einer Wolke zeigt sich eine Glorie um den Schatten der Kabine.

H. JOACHIM SCHLICHTING



BURKHARD PREMIER, MIT FROL. GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING

NEBELWAND IM GEBIRGE Um den Kopfschatten der beobachtenden Person erscheint eine Glorie. Als Streuzentren fungieren winzige Wassertröpfchen.

gung des Lichts an Kreisringen am Rand des Tropfens entstehen. Der wesentliche Beitrag zur Intensität würde dann von Licht stammen, das genau einmal im Tropfen reflektiert wird. Aber ein solcher Weg ist unmöglich. Dafür ist der Brechungsindex des Wassers zu klein.

Man geht inzwischen davon aus, dass hier die einfallende Welle die Oberfläche des Tropfens streift. Dadurch kann sie sich als Oberflächenwelle ein Stück weit am Rand entlangbewegen, bevor sie gebrochen wird. Erst durch die dadurch bedingten Verzögerungen werden die für die Lichtintensität wesentlichen Lichtwellen entgegen der Einfallsrichtung ausgestrahlt.

Eine Glorie ist auf möglichst kugelförmige Tropfen angewiesen. Darum bleibt für die Glorie am Teich zu klären, an welcher Stelle und in welcher Form solche Gebilde anzutreffen sind.

Vielleicht hilft dabei ein Blick auf das zweite Phänomen. Es weist einige Merkmale einer speziellen Interferenzerscheinung auf, die queteletsche Ringe genannt wird. Dabei liegt der Sonnenreflex im Allgemeinen auf einem der Ringe, die hier nur als leicht gekrümmte Bögen auftreten. Beim Bogen mit dem Reflex erkennt man im Unterschied zu den Nachbarbögen keine Spektralfarben, er ist monochrom. Die sich zu beiden Seiten anschließenden Bögen zeigen eine umgekehrte Reihenfolge der Spektralfarben. Der monochrome Bogen entspricht der nullten Beugungsordnung, und nebenan befinden sich zu beiden Seiten die erste, zweite und weitere Beugungsordnungen in Form bunter Bögen. Hinzu kommt ein interes-

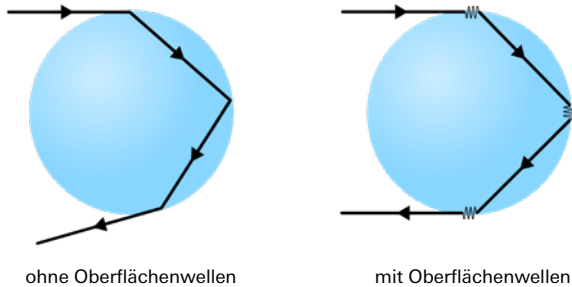
santes Verhalten: Bewegt man sich quer zu den Bögen, verschieben sie sich in entgegengesetzte Richtung, und bei Annäherung vergrößern sich die Krümmungsradien.

Queteletsche Ringe sind im Gegensatz zu Koronen nicht auf gleich große kugelförmige Teilchen als Streukörper angewiesen. Diese Bedingung könnte die Wasseroberfläche in dem Fall erfüllt haben – sie schien mit einem Belag bedeckt zu sein. Allerdings braucht das Phänomen eine zusätzliche Schicht, an der das Licht gestreut werden kann. Bei Glasscheiben und Folien findet man so etwas an der Rückseite, aber beim Teich tut sich wieder ein Problem auf: Wo gibt es hier eine zweite Schicht?

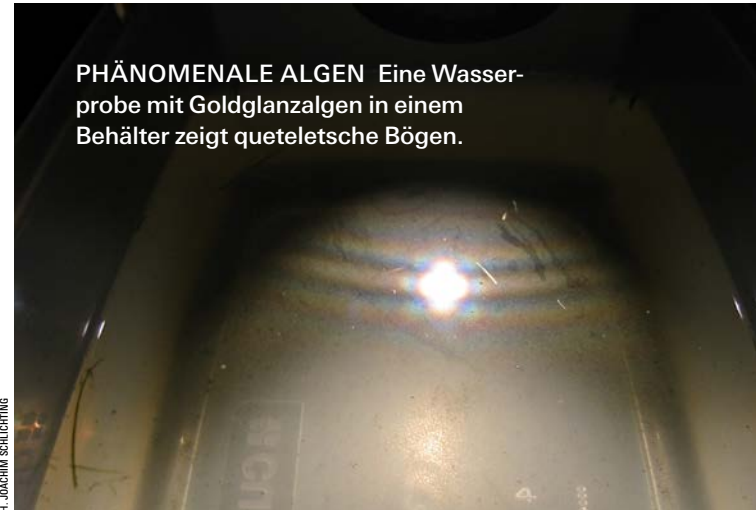
Sowohl diese Frage als auch die nach etwaigen kugelförmigen Teilchen bei der Glorie machen eine genauere Untersuchung der Wasseroberfläche nötig. Bei einer entnommenen Wasserprobe ließen sich die queteletschen Bögen ebenso bei Kunstlicht in einer gewöhnlichen Plastikwanne beobachten. Unter dem Mikroskop zeigte sich, dass der Belag auf der Wasseroberfläche, der zu den Bögen führte, aus winzigen Kügelchen bestand. Diese erwiesen sich als eine besondere Algenart, nämlich die fotosynthetisierende Goldglanzalge (*Chromulina rosanoffii*). Sie kann sich selbst auf die Wasseroberfläche hieven, um optimal Licht aufzunehmen.

Damit sind die Voraussetzungen für das Zustandekommen einer Glorie geklärt. Das Licht wird an den zahlrei-

LICHTWEG IM TROPFEN Aus den Daten einer Glorie erwartet man einen Lichtweg, bei dem ein Strahl einmal im Tropfen reflektiert und in die gleiche Richtung zurückgeschickt wird. Das wäre jedoch nur möglich, wenn dabei Verzögerungen durch Oberflächenwellen auftreten.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE ZEITZ



PHÄNOMENALE ALGEN Eine Wasserprobe mit Goldglanzalgen in einem Behälter zeigt queteletsche Bögen.

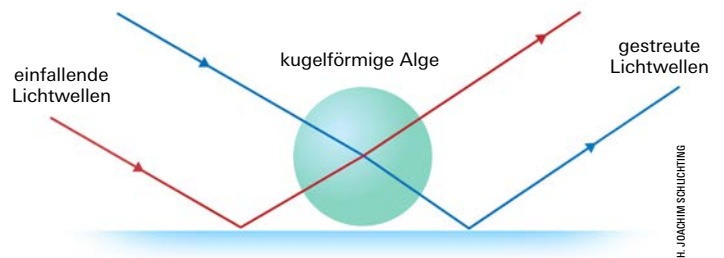
H. JOACHIM SCHLICHTING

FARBIGE BÖGEN Die nullte Beugungsordnung bildet einen monochromen Ring, zu dessen beiden Seiten sich farbige Ringe höherer Beugungsordnungen anschließen.



H. JOACHIM SCHLICHTING

LICHTWEGE Von zwei Lichtwellen wird eine zunächst auf der Wasseroberfläche reflektiert und dann an der Alge gestreut, bei der anderen ist die Reihenfolge umgekehrt. Beide interferieren im Auge. Wegen des Wegunterschieds kommt es zur farblichen Zerlegung des Lichts.



H. JOACHIM SCHLICHTING

chen winzigen, kugelförmigen Algen gestreut – auf eine vergleichbare Weise wie an den Wassertropfen in Wolken oder im Nebel. In beiden Fällen entsteht im Auge oder auf dem Kamerachip das Bild einer Glorie. Es kommt offenbar vor allem auf die Kugelform der Lichtstreuenden Objekte an.

Bleibt offen, auf welche Weise die auf dem Wasserspiegel driftende Schicht aus Goldglanzalgen auch für das Auftreten queteletscher Ringe verantwortlich gemacht werden kann. Dazu hilft ein Blick auf die elementaren Prozesse, die das Phänomen auf einer verschmutzten Scheibe hervorbringen. Diese wird durch zwei Lichtwellen getroffen, die von einem Punkt ausgehen. Eine von ihnen wird zuerst an einem Schmutzteilchen gestreut und anschließend an der hinteren Grenzschicht der Scheibe reflektiert. Bei der anderen ist es umgekehrt. Wenn beide sich anschließend überlagern, kommt es zu farbigen Interferenzerscheinungen.

Beim Teich nimmt die Wasseroberfläche die Rolle der spiegelnden hinteren Schicht ein. Die auf dem Wasser driftenden kugelförmigen Algen verhalten sich wie die Streuteilchen auf der vorderen Seite. Da sie nahezu gleich groß sind, bilden sie so etwas wie eine virtuelle zweite Schicht. Hier ist also die Gleichartigkeit der Streukörper, die normalerweise für das Auftreten queteletscher Ringe völlig unerheblich ist, eine notwendige Voraussetzung für dieses Phänomen. Das Wasser bringt damit dank der Algen zwei sonst weit voneinander entfernte Erscheinungen erstaunlich nah zusammen. ◀

QUELLE

Suhr, W., Schlichting, H. J.: Quételet's fringes due to scattering by small spheres just above a reflecting surface. Applied Optics 48/26, 2009

Die Welt ist klein

Einerlei, wie groß sie ist. Eine neue Untersuchung findet für das »Kleine-Welt-Phänomen« eine überraschende Ursache – im Eigeninteresse der Angehörigen des Netzes.



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

**DIE WELT
IST EIN DORF**
Dass jeder jeden über
höchstens sechs Ecken
kennt, lässt sich mathe-
matisch untermauern.

▶ Zwei beliebige Menschen auf der Welt sind durch eine Kette von durchschnittlich nur sechs Gliedern miteinander verbunden. Dabei besteht jedes Kettenglied in einer persönlichen Bekanntschaft. So lautet das – leicht übertriebene – Fazit diverser Untersuchungen. Die befassen sich allerdings nicht mit der gesamten Menschheit, was rein technisch unmöglich wäre, sondern mit den Teilmengen, die vergleichsweise leicht zu beobachten und zu erforschen sind: soziale Netze aller Art auf Basis des Internets. Interessanterweise findet sich die Anzahl sechs der Kettenglieder für Netze verschiedenster Art und Größe.

Die erste wissenschaftliche Untersuchung des Phänomens stammt aus dem Jahr 1967 und basierte noch auf einem gänzlich unelektronischen Kommunikationsweg: der klassischen Briefpost. Der Psychologe Stanley Milgram (1933–1985), besser bekannt durch sein berüchtigt gewordenes Experiment zum Gehorsam gegenüber Autoritäten, verteilte an zufällig ausgewählte Einwohner von Omaha, Nebraska, Briefe mit der Aufforderung, diese an eine namentlich und mit einigen Eigenschaften benannte, aber im Übrigen völlig unbekannt Person in Sharon, Massachusetts, weiterzuleiten, und zwar nur auf dem Weg über persönlich gut Bekannte. Jede weitere Person in der Kette vom Absender zum Empfänger sollte denselben Regeln folgen. In der Tat erreichten die »Kettenbriefe«, die überhaupt ankamen – immerhin ein Viertel aller Versuche –, ihren Endempfänger in durchschnittlich sechs Schritten, das heißt mit nur fünf Zwischenstationen.

Man kann mit einiger Berechtigung argumentieren, dass die von Milgram ausgewählten Absender der Briefe eine Zufallsstichprobe aus der Grundgesamtheit der damals 200 Millionen US-Amerikaner darstellten. Mit der gebotenen Vorsicht lässt sich daraus der Schluss ziehen, dass die Einwohner der USA eine kleine Welt bildeten in dem Sinne, dass sich zwischen zwei beliebigen ihrer

Mitglieder eine Bekanntschaftskette aus durchschnittlich sechs Gliedern findet.

Merkwürdigerweise sind es in den modernen, Milliarden Menschen umspannenden Netzen nicht wesentlich mehr Glieder. Mehr noch: Anscheinend ist sechs nicht nur der Durchschnitt, sondern eine Maximalzahl. Das ist sicherlich auch dadurch zu erklären, dass Eremiten in der Regel kein Facebook-Konto haben. Aber es passt überhaupt nicht zu den gängigen Vorstellungen darüber, wie solche Netze entstehen und anwachsen.

Wohlgemerkt: Es geht nicht nur um die Netze von Beziehungen, die Menschen untereinander knüpfen – leibhaftig oder über das Internet. An die Stelle der Einzelpersonen können Schaltstationen im Strom- oder Telefonnetz treten; deren Beziehungen bestehen dann in den elektrischen Leitungen zwischen ihnen. Oder man betrachtet biologische Netze aus chemischen Substanzen, die beispielsweise in einer Zelle vorkommen, und deren Wechselwirkungen.

Eine netzwerktheoretische Untersuchung der kleinen Welt

Der gemeinsame theoretische Apparat ist ein Teilgebiet der Graphentheorie. Jedes Netz ist ein Graph, das heißt, es besteht aus einzelnen Elementen, den »Knoten«, die miteinander durch »Kanten« verbunden sind oder auch nicht. Wo im Raum die Knoten liegen, ist dabei vollkommen irrelevant. Zwei Knoten heißen benachbart, wenn es zwischen ihnen eine Kante gibt.

In der Netztheorie sind die Graphen typischerweise sehr groß – Millionen oder gar Milliarden Knoten –, und man interessiert sich nicht für einzelne Kanten, sondern für statistische Aussagen: Wie groß ist der durchschnittliche Grad eines Knotens (das ist die Anzahl der Kanten, die in ihm enden)? Für das Kleine-Welt-Phänomen: Wie lang ist – im Durchschnitt oder auch maximal – der kürzeste Weg zwischen zwei beliebigen Knoten A und B des Netzes, also die Anzahl der Kanten, die man von A bis B durchlaufen muss? Gegeben ein Graph in einem Urzustand, beispielsweise eine Menge von Knoten ohne jegliche Kanten. Nach welchem Muster werden sich Verbindungen zwischen ihnen etablieren?

Wenn ich in einer fremden Stadt ankomme, wo ich bisher niemanden kenne, dann wird die Entscheidung, mit wem ich Bekanntschaften knüpfe, zweifellos gewissen Regeln folgen; aber für die summarische Betrachtungsweise der Netztheorie kommt es auf meine persönlichen Vorlieben nicht an. Es ist sinnvoller, sich vorzustellen, die Kanten regneten vom Himmel und lagerten sich nach dem Zufallsprinzip an irgendwelche Knotenpaare an. In diesem Fall gibt es einen durchschnittlichen Knotengrad, der auch am häufigsten vorkommt. Für eine feste Knotenzahl N wächst dieser Durchschnittsgrad langsam an, solange es Kanten regnet.

Oder eine Kante dockt umso lieber an einem Knoten an, je mehr Kanten dieser schon hat. Wenn das Netz das World Wide Web ist und jeder Verweis von einer Website auf eine andere eine Kante, dann ist das sogar äußerst

AUF EINEN BLICK

Gibt es eine reelle Quantenmechanik?

- 1** Selbst wenn man sich von der Korrektheit des Beweises überzeugt hat, bleibt ein gewisses Stirnrunzeln.
- 2** Dass die Welt klein ist, zeigt die Veröffentlichung nicht nur durch ihren Inhalt, sondern auch durch die Liste der Autorinnen und Autoren.
- 3** Anscheinend ist sechs nicht nur der Durchschnitt, sondern eine Maximalzahl.

plausibel. Wer seine Website mit Links versehen will, wählt in erster Linie solche, die leicht zu finden sind, weil viele Links auf sie verweisen. Nach dem Bibelvers »Wer hat, dem wird gegeben« (Matthäus 25, Vers 29) trägt dieser Mechanismus den Namen Matthäuseffekt. In der Folge bilden sich einige sehr kantenreiche Knoten heraus. Der durchschnittliche Knotengrad ist nicht mehr der häufigste, es gibt keine Standardanzahl für die Kanten eines Knotens, und Netze dieser Art werden als skalenfrei (scale-free networks) bezeichnet.

Ob es aber nach dem Zufallsprinzip oder nach dem Matthäuseffekt Kanten regnet: Die so entstehende Welt ist nicht wirklich klein. Schon richtig, in einem Land mit etlichen verkehrsreichen Großstädten, die zudem über Direktverbindungen untereinander verfügen, ist die Zahl der Haltestellen auf dem Weg von Dorf *A* nach Dorf *B* im Allgemeinen kürzer, als wenn es nur Nahverkehr gibt. Entsprechend ist der Durchmesser, sprich die maximale Anzahl der Kanten auf einem kürzesten Weg von *A* nach *B*, eines skalenfreien Netzes, zwar kleiner als der eines rein zufälligen. Aber er hört nicht bei der Zahl 6 auf! Vielmehr wächst er proportional zum Logarithmus der Netzgröße *N*; das ist zwar langsam, aber eben doch unbegrenzt.

Wie stellen es also die Knoten an, sich ihre Kanten derart zuzulegen, dass eine kleine Welt dabei herauskommt?

Eine im Mai 2023 erschienene Arbeit betrachtet die Knoten des Netzes nicht als passive Empfänger, sondern als aktive Gestalter. Jeder Knoten entscheidet für sich selbst, mit welchen Kollegen er sich verbinden will. Aber nach welchen Kriterien? An dieser Stelle machen die Autoren eine Anleihe bei der Wirtschaftswissenschaft. Wie der klassische *Homo oeconomicus* handelt ein Knoten so, dass er in jeder Situation seinen Nutzen maximiert. Insbesondere stellt er genau dann eine Verbindung zu einem anderen Knoten her, wenn deren Nutzen für ihn größer ist als die Kosten. Und damit beide überhaupt vergleichbar sind, werden sie in derselben Maßeinheit ausgedrückt, üblicherweise Dollar.

Über die Kosten gibt es dabei wenig zu sagen. Der Aufwand, eine neue Verbindung zu knüpfen, ist im Wesentlichen konstant. Aus bestimmten Gründen ist es sinnvoll, bei Netzen mit variabler Gesamtgröße *N* die Kosten proportional zum Logarithmus von *N* anzusetzen. Aber der Nutzen! Was hat ein Knoten davon, dass er über viele Beziehungen verfügt?

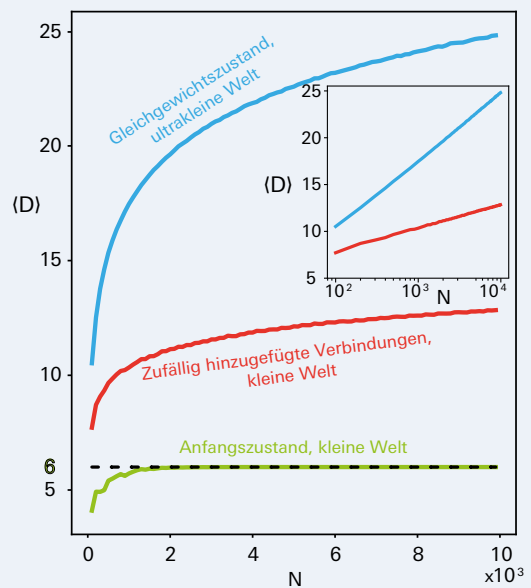
Die Antwort wirkt durchaus menschlich: Bedeutung. Knoten *A* ist bedeutend, wenn der einzige kürzeste Weg zwischen – zum Beispiel – *B* und *C* über *A* verläuft. Diese Bedeutung ist umso größer, je kürzer diese Verbindung ist. Andersherum formuliert: Wenn *A* Station eines langen kürzesten Wegs von *B* nach *C* ist, muss er sich das Renommee – oder vielleicht eine Art Wegezoll – mit den Kollegen entlang des Wegs teilen. Ebenso mindert es den Nutzen für *A*, wenn es mehrere kürzeste Wege von *B* nach *C* gibt, von denen nicht alle über *A* verlaufen. (Weg-

längen sind als Anzahlen von Kanten stets ganze Zahlen. Deswegen ist es nicht ein exotischer Grenzfall, sondern kommt häufig vor, dass es mehrere Wege gleicher kürzester Länge zwischen zwei Knoten gibt.)

All diese Bedingungen kann man zu einer so genannten Nutzenfunktion zusammenfassen. Die Bedeutung

Verschiedene Welten

Die Autoren haben für zahlreiche Netze verschiedener Größe den Durchmesser *D* bestimmt, das heißt die maximale Länge des kürzesten Weges zwischen zwei Knoten. In dem Diagramm ist der Durchschnittswert dieses Durchmessers aus vielen Simulationen über der Netzgröße *N* aufgetragen. Die blaue Linie zeigt die Werte für den »Urzustand« des jeweiligen Netzes, der seinerseits nach dem Matthäusprinzip ausgewürfelt wurde. Die grüne Linie zeigt die entsprechenden Werte, nachdem das im Text beschriebene Spiel Kanten hinzugefügt hat, bis es in einem Gleichgewichtszustand endete. Wenn man dem Netz nicht nach den Spielregeln, sondern nach dem Zufall ebenso viele Kanten hinzufügt, ergibt sich die rote Linie. Während das Spiel praktisch unabhängig von der Netzgröße bei einem Durchmesser von 6 endet, wächst dieser Wert in den beiden anderen Fällen proportional zum Logarithmus von *N*. Das verdeutlicht die kleine Grafik, in der für *N* eine logarithmische Skala gewählt wurde.



SAMOVENKO, I. ET AL. WHY ARE THERE SIX DEGREES OF SEPARATION IN A SOCIAL NETWORK? ARXIV:2311.09463V2. FIG. 5. (R) RANDOMLY ADDED EDGES TO A NETWORK OF SIZE N. (B) NETWORK OF SIZE N IN EQUILIBRIUM. CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/licenses/by/4.0/legalcode)

eines Knotens A , oder im Sprachgebrauch der Ökonomie sein Nutzen, ist eine große Summe. Jedes Paar (B, C) von Knoten mit einer kürzesten Verbindung, die über A verläuft, trägt dazu einen Summanden bei. Der wiederum ist die Anzahl der kürzesten Verbindungen zwischen B und C , an denen A beteiligt ist, geteilt durch die Gesamtanzahl solcher Verbindungen, mal einen Faktor f , der nur von der Länge dieser Verbindung abhängt und mit zunehmender Länge immer kleiner wird. Ein plausibles Beispiel ist $f(l) = 1/l$, wobei l die Länge der Verbindung bezeichnet.

Homo oeconomicus und das Netzwerk-Spiel

Nun spielen die Knoten des Netzes ein Spiel miteinander, und zwar im Sinn der Spieltheorie. Anfangs befindet sich das Netz in irgendeinem Urzustand. Vielleicht hat es ein paar Kanten geregnet, und die haben sich nach dem Zufalls- oder dem Matthäusprinzip an gewissen Knoten angelagert; oder es gibt zunächst gar keine Kanten.

Ein Spielzug besteht darin, dass jeder Knoten unabhängig von allen anderen entscheidet, zu welchen seinesgleichen er neue Verbindungen knüpft. Das wird er immer dann tun, wenn der Nutzen aller neu gelegten Kanten, das heißt die Nutzenfunktion des Knotens für das Netz mit neuen Kanten minus dieselbe Nutzenfunktion für das Netz ohne neue Kanten, deren Kosten übersteigt. Damit die Situation nicht zu kompliziert wird, hat der Knoten am Ende der neuen Kante kein Mitspracherecht; insbesondere kann er die Kante nicht ablehnen, solange der Kollege zahlt.

Bei dem nächsten Spielzug finden alle Knoten das Netz mit den neu hinzugekommenen Kanten vor, berechnen auf dieser Basis, welche neuen Verbindungen anzulegen sich lohnen würde, und wieder endet der Spielzug damit, dass das Netz um diese Kanten erweitert wird. So geht das Spiel über eine unbestimmte Anzahl von Zügen weiter. Es endet, wenn kein Knoten mehr einen Anlass sieht, eine neue Verbindung zu knüpfen. Jede Kante, die es noch nicht gibt, würde gegenüber dem bisherigen Zustand weniger Mehrwert einbringen, als sie kostet.

Ein solches Spiel auf dem Computer zu simulieren ist nicht schwer. Die Autorinnen und Autoren der neuen Arbeit haben das für diverse Welten von etlichen tausend Einwohnern jeweils 10 000-mal durchgespielt. In der Tat endete das Spiel in jedem Einzelfall in einer kleinen Welt. Der kürzeste Weg von A nach B war nicht nur im Durchschnitt, sondern sogar in jedem Fall höchstens sechs Schritte lang.

Bei einem derart überraschenden Ergebnis neigt man unweigerlich dazu, nach Schwächen in der Argumentation zu suchen. Der erste Einwand: Die Anzahl der Kanten, die sich ein Knoten in jedem Spielzug zulegen kann, ist unbegrenzt, was in der Realität kaum zutreffen dürfte. Und wenn man einem Netz viele Kanten hinzufügt, einerlei wie, dann sinkt bereits dadurch der Durchmesser des Netzes; so nennt man die Länge des längsten kürzesten Wegs zwischen zwei Knoten. Ist also die Kleine-Welt-Eigenschaft nichts weiter als ein Nebenprodukt einer massiven Kantenvermehrung?

Das konnten die Autoren widerlegen, wiederum durch Computersimulation. Sie versetzten ihr jeweiliges Netz in den Urzustand zurück und berechneten es mit so vielen Kanten, wie die Knoten im Spiel durch ihre Einzelentscheidungen dem Netz hinzugefügt hatten, aber nach dem Zufalls- oder dem Matthäusprinzip. Dabei kam keine richtig kleine Welt hinaus, sondern Durchmesser im Bereich acht bis zwölf; und die waren obendrein nicht unabhängig von der Netzgröße N , sondern proportional dem Logarithmus von N , wie es der allgemeinen Theorie entspricht.

Und wenn man die Anzahl der neuen Kanten pro Knoten und Spielzug begrenzt, tut das dem Endzustand keinen Abbruch. In einer weiteren Simulation genehmigten sie jedem Knoten eine einzige neue Kante in jedem Spielzug, vorausgesetzt, sein Grad k war hoch genug. Die genaue Bedingung war $0,3k \geq c$, wobei c der konstante Preis für eine neue Kante ist. Der Knoten musste auch nicht bestimmen, ob sich diese spezielle Anfügung lohnt, was für große Netze auf einen ungeheuren Aufwand für die Berechnung der Nutzenfunktionen hinauslaufen würde. Er durfte sich einfach irgendeinen anderen Knoten für seine Beziehung herausuchen, unter der einzigen Voraussetzung, dass der bisher mindestens drei Schritte von ihm entfernt war. Die Ungleichung garantiert dann, dass sich durch die Anfügung seine Nutzenfunktion erhöht.

Die neue, vereinfachte Vorschrift begünstigt offensichtlich eher die alte die kontaktreichen Knoten (die mit höherem Grad k) gegenüber den kontaktparmen. Das leuchtet ein, denn durch seine zahlreichen Kanten hat ein kontaktreicher Knoten mehr Gelegenheiten, Wege zu verkürzen und damit seiner eigenen Bedeutung aufzuheben, als sein menschenscheuer Kollege.

Wenn der Preis c so hoch ist, dass selbst der Knoten mit dem größten k die obige Ungleichung nicht erfüllen kann, passiert gar nichts. Sobald aber wenigstens ein Knoten eine Gelegenheit für ein Geschäft sieht, kommt der Prozess, der die Welt klein macht, in Gang. Denn die neu etablierten Kanten heben andere Knoten über die Schwelle, ab der sie mitspielen können.

Nach all den Computersimulationen will die Behauptung von der kleinen Welt auch mathematisch sauber bewiesen werden. Das tun die Fachleute; allerdings ist der Beweis keine leicht verdauliche Kost. Deswegen bieten sie zur Illustration der Beweisidee ein vereinfachtes Szenario an.

Die Welt ist ein Dorf – oder zwei

In der Welt, so wie sie nach irgendeinem Spielzug vorliegt, gibt es – mindestens – einen Knoten maximalen Grades, denn da die Einwohnerzahl N endlich ist, kann die Zahl der Kanten, die von einem Knoten ausgehen, nicht unendlich sein. Nennen wir diesen maximalen Grad k . Nun teilen wir die Welt auf vollkommen willkürliche Weise in Dörfer ein. Und zwar ernennen wir einen zufällig ausgewählten Knoten zum Dorfoberhaupt. Das zugehörige Dorf besteht dann aus ihm selbst, seinen unmittelbaren Nachbarn und deren unmittelbaren Nachbarn. Vom Dorfoberhaupt bis zu jedem Dorfbewohner sind es also höchstens zwei Schritte. Und jedes Dorf hat höchstens $k^2 + 1$ Einwohner: das Oberhaupt selbst, dessen höchstens k Nachbarn und zu jedem von ihnen höchstens $k-1$ Nachbarn, denn einer der Nachbarn ist das Dorfoberhaupt selbst und darf nicht noch einmal gezählt werden. Das macht zusammen $1 + k + k(k-1) = k^2 + 1$ Knoten.

Aus der Welt nehmen wir das Dorf und alle an dessen Bewohner anschließenden Kanten weg, suchen uns in der Restwelt, wieder willkürlich, ein neues Dorfoberhaupt, versammeln dieses und seine Nachbarn erster und zweiter Ordnung zu einem weiteren Dorf und so weiter. Am Ende haben wir die Welt in Dörfer eingeteilt, und zwar in mindestens $N/(k^2+1)$ Stück.

Jetzt kommt der große Rundumschlag: Eines der Dorfoberhäupter, nennen wir es António (wie Guterres, den gegenwärtigen Generalsekretär der Vereinten Nationen), beschließt, zu sämtlichen anderen Dorfoberhäuptern Kanten zu legen. Dadurch ist die Welt mit einem Schlag klein geworden. Denn jeder Knoten ist nur drei Schritte von António entfernt, zwei bis zu seinem eigenen Dorfoberhaupt und noch einen über die neu etablierte Verbindung. Da das für jeden Knoten gilt, sind es von einer beliebigen Ecke der Welt zu einer beliebigen anderen nur sechs Schritte. Höchstens, denn es könnte auch vorher schon einen kürzeren Weg gegeben haben. So willkürlich, wie wir die Dörfer definiert haben, ist damit zu rechnen, dass ein Knoten nicht nur Kanten zu den Angehörigen des eigenen Dorfes hat.

Der Lohn, den António für seinen Kraftakt einfährt, ist gigantisch. Denn wie eine Spinne im selbstgeknüpften Netz ist er zum Bestandteil ungeheuer vieler kürzester Wege geworden. Von Dorfoberhaupt zu Dorfoberhaupt gibt es keinen kürzeren Weg als den über António; so sind die Dörfer definiert. Für die restlichen Bewohner zweier verschiedener Dörfer gilt das nicht unbedingt; aber da jeder von ihnen höchstens $k-1$ Kanten nach außerhalb des eigenen Dorfes hat, ist der Nutzen, der António dadurch entgeht, dass es im Einzelfall einen kürzesten Weg an ihm vorbei gibt, begrenzt.

Natürlich gibt es unter realen Bedingungen keinen António, der alle anderen Netzmitglieder mit seinem Rundumschlag überrascht und davon steinreich wird. Wenn er, wie üblich, nur lokale Informationen zur Verfügung hat, wird er schon an der Aufgabe scheitern, die anderen Dorfoberhäupter ausfindig zu machen. Aber dieses völlig unrealistische Szenario gibt eine Abschätzung dafür, welche Verdienstmöglichkeiten ein löcherig

geknüpftes Netz bietet. Für die Theorie kommt es dann nicht darauf an, wer diese Möglichkeiten realisiert.

Es könnte nur vorkommen, dass eine bereits gelegte Kante dem Projekt eines anderen Knotens, eine weitere Kante zu legen, »das Wasser abgräbt«, indem die neue Kante wegen der alten nicht genug Zusatznutzen einbringt. Das passiert aber erst, wenn die Welt bereits auf Durchmesser sechs geschrumpft ist. Das zu beweisen, erfordert noch einige Anstrengungen.

Aber selbst wenn man sich von der Korrektheit des Beweises überzeugt hat, bleibt ein gewisses Stirnrunzeln. Irgendwie scheint zu viel Willkür in der Argumentation zu stecken. Dass die Knoten auf eine Art zufällig, ohne jede Rücksicht auf die Struktur des Netzes, zu Dörfern zusammengefasst wurden, mag ja noch angehen. Aber die Größe eines Dorfes ist gerade so bemessen, dass genau die kleine Welt mit Durchmesser 6 herauskommt. Das erweckt Misstrauen. Was ist, wenn man ein Dorf so definiert, dass es außer dem Oberhaupt nicht nur die Nachbarn erster und zweiter Ordnung, sondern auch die dritter, vierter ... Ordnung umfasst? Oder nur die Nachbarn erster Ordnung?

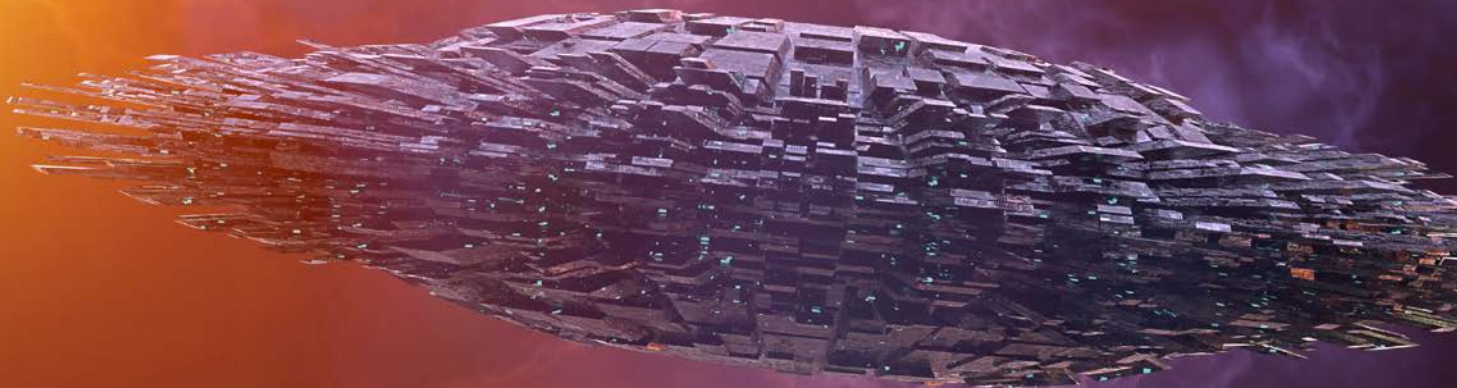
Für größere Dörfer funktioniert die Argumentation der Autoren so wie bisher. Also führt das Bestreben der Knoten nach möglichst großer Bedeutung zu einer kleinen Welt mit Durchmesser acht, zehn, zwölf ..., wohlge-merkt bei unveränderten Voraussetzungen. Denn die Einteilung des Netzes in Dörfer ist nicht auf eine Eigenschaft des Netzes zurückzuführen, sondern sie wurde dem Netz als Beweishilfsmittel aufgeprägt. Nur bleiben Welten mit größeren Durchmessern nicht so groß, weil es nach wie vor das Bestreben gibt, das auf einen Durchmesser 6 hinausläuft. Das wirkt auch dann noch, wenn zum Beispiel der Durchmesser 8 längst erreicht ist. Nur bei den ganz kleinen Dörfern – ein Oberhaupt und seine unmittelbaren Nachbarn – bricht die Abschätzung zusammen, die so viele neue Kanten als lohnend deklariert. Deswegen haben kleine Welten im Allgemeinen nicht den Durchmesser vier.

In einem anderen wesentlichen Punkt ist das zu Grunde liegende Modell allerdings unrealistisch. Dass eine Kante beim Einrichten etwas kostet und dann nie wieder, kommt in echten Netzen eigentlich nicht vor. Beziehungen wollen nicht nur angebahnt, sondern auch aufrechterhalten werden, was Aufwand erfordert. Entsprechend sollte in dem Modell die Möglichkeit enthalten sein, eine Verbindung auch wieder stillzulegen. Die Autoren gestehen offen, dass sie dieses erweiterte Modell (noch) nicht rechnen können. Deswegen steht der Beweis aus, dass es sich bei dem Endzustand, dem das Netz im Modell zustrebt, um ein Nash-Gleichgewicht handelt, das heißt einen Zustand, von dem keiner der Teilnehmer zu seinem Vorteil einseitig abweichen kann.

Man kann sich auch fragen, ob die Motive der Netzteilnehmer tatsächlich durch das unterstellte Streben nach Bedeutung hinreichend gut erfasst werden. In Netzen wie Facebook oder Twitter mag das noch plausibel sein; aber den Nervenzellen in einem (echten) neuronalen Netz wie

dem Gehirn ein Geltungsbedürfnis zuzuschreiben erscheint doch einigermaßen absurd. Nichts da! Eine synaptische Verbindung festigt sich, wenn sie viel gebraucht wird, das heißt, wenn viele Verbindungen zwischen fernen Neuronen über sie verlaufen. So kann der Auf- und Abbau von Synapsen in Abhängigkeit vom Datenverkehr zu demselben Ergebnis führen, wie wenn die Knoten gewisse Eigeninteressen verfolgt hätten.

Dass die Welt klein ist, zeigt die hier besprochene Arbeit nicht nur in ihrem Inhalt. Überdies verweist darauf die Liste der Autorinnen und Autoren. Federführend sind Ivan Samoylenko, der an zwei Moskauer Universitäten arbeitet, und David Alejo, der sowohl an der Universidad Rey Juan Carlos in Madrid als auch an der University of Michigan in Ann Arbor eine Adresse hat. Die übrigen zwölf Autorinnen und Autoren sind nicht nur in Russland, Spanien und den USA angesiedelt, sondern außerdem in Italien, Slowenien, Taiwan, Österreich, Südkorea, Israel und Indien. In einer Zeit, in welcher der Ukrainekrieg in Netze aller Art große Löcher reißt, ist ein solches Beispiel weltumfassender Zusammenarbeit geradezu tröstlich. ◀



Was Erdlinge über Aliens verraten

Der Autor erklärt, wie die Entwicklung von außerirdischem Leben ablaufen könnte, und schärft damit auch den Blick auf unsere Tierwelt.

► Können Außerirdische tanzen? Haben Aliens Sex? Arik Kershenbaum stellt derlei Fragen in seinem Buch und versucht sie mit wissenschaftlichem Ernst zu beantworten. Wir stellen uns beim Lesen tanzende grüne Marsmännchen vor und lachen. Da stellt sich gleich die nächste Frage: Können Aliens lachen?

Kershenbaum hat Humor, und es macht in weiten Teilen Spaß, das Buch zu lesen, doch sind wir nicht in Hollywood. Der Autor, Zoologe an der Universität Cambridge, wendet all sein biologisches Wissen von den evolutionären Prozessen auf der Erde an, um Aussagen über extraterrestrisches Leben zu treffen. Er forscht seit Langem zum Thema Kommunikation bei Tieren, hauptsächlich bei Wölfen, Delfinen und Klippschliefern. Ihn treibt die Frage um, warum, außer dem Menschen, kein anderes intelli-

gentes und soziales Tier eine Sprache entwickelt hat.

Die Grundannahme, auf die das Buch über außerirdisches Leben basiert, lautet, dass die physikalischen Gesetze nicht nur auf der Erde gelten. Genauso wie die chemischen und biologischen Gesetze, nach denen Leben entsteht, sich organisiert und sich weiterentwickelt. So steht für Kershenbaum zweifelsfrei fest, dass die natürliche Selektion überall wirken würde. Das heißt, die Möglichkeiten, wie Lebewesen anderer Welten aussehen könnten, wie sie sich bewegen oder kommunizieren, sind begrenzt: Die Evolution von Aliens, falls es sie gibt, liefe nach universellen Regeln ab. Für den Autor gibt es keinen Zweifel, »dass wir uns mit Hilfe eines realistischen Wissenschaftsansatzes ein schlüssiges und einigermaßen zuverlässiges Bild über



Arik Kershenbaum

Ein Naturführer durch den Kosmos

Matthes & Seitz Berlin
Verlagsgesellschaft,
Berlin 2023

€ 28,-

außerirdisches und insbesondere intelligentes außerirdisches Leben machen können.«

Was zeigt das Bild? Dass Aliens auffällige Ähnlichkeiten mit lebendigen Wesen auf der Erde hätten, egal ob sie Einzeller sind oder große soziale Wesen. Nacheinander stellt er Fragen zu Körperbau, Bewegung, Nahrungsaufnahme, Kommunikation, Intelligenz oder Vermehrung und dekliniert alle Fälle durch. Ist es auf dem Planeten heiß oder kalt? Ist der Untergrund steinig oder voller Wasser? Welche Gase herrschen vor? Je nachdem zieht er die physikalischen, chemischen und biologischen Schlüsse, wie ein Lebewesen sich in der einen oder anderen Umgebung entwickeln würde.

Nachdem Kopernikus im 16. Jahrhundert der Erde den richtigen Platz im Universum zugewiesen hatte, begannen Astronomen, Ausschau nach anderen Welten zu halten. Die Menschen haben seither nicht mehr aufgehört, durch Teleskope zu schauen und das Universum abzuhören. Auch Arik Kershenbaum gehört zu den Suchenden und ist Mitglied eines internationalen Beratergremiums zum Thema Kommunikation mit extraterrestrischer Intelligenz. Er hat ein provokantes Buch geschrieben, das es zu lesen lohnt. Auch weil seine Beschreibungen von Außerirdischen den Blick auf die terrestrische Tierwelt schärft. Über den Umweg ins All verweist der Zoologe auf die Jahrtausende alten

Entwicklungsphasen auf der Erde und will »das Leben im Allgemeinen«, das den immergleichen Regeln folgt, einfangen.

Souverän geht der Autor damit um, dass seine Thesen im Bereich des Spekultativen verharren müssen und dass manch anderer Wissenschaftler seine Aussagen anzweifeln wird. Er schreibt: »Bleiben Sie skeptisch. Ich könnte mich irren.«

Ilona Jerger, langjährige Chefredakteurin von »natur«, arbeitet als Autorin für Wissenschafts- und Naturthemen in München.

Verstehen wir eines Tages »Walisch«?

Den Biologen und Naturfilmer Tom Mustill trieb die Frage um, wie Wale kommunizieren. Daraus entstanden ist ein faszinierendes Buch.

► 2015 sprang ein Buckelwal meterhoch aus dem Wasser und landete auf dem Kajak, in dem der Biologe und Naturfilmer Tom Mustill und seine Freundin Charlotte Kinloch saßen. Sie hatten den Ausflug in der Monterey Bay vor der Küste Kaliforniens gebucht, um Wale zu beobachten.

Beide überlebten den Zusammenstoß mit dem rund 30 Tonnen schweren Tier. Mustill ließ das Erlebte jedoch nicht mehr los. Warum war der Buckelwal aus dem Wasser gesprungen? Um Parasiten abzuschütteln? Seinen Artgenossen etwas mitzuteilen? Hatte er absichtlich versucht, Mustill und Kinloch zu treffen? Oder sie nicht



bemerkte? Waren ihm die beiden egal gewesen?

Die Wissenschaft hat viele Theorien über den Grund der Walsprünge hervorgebracht. Doch eindeutige Antworten sind schwer zu bekom-

men; schließlich kann sich niemand mit den Meeressäugern unterhalten. Mustill wollte dennoch wissen, ob sich herausfinden lässt, was im Kopf eines Wals vor sich geht. Mit seinem Buch nimmt er die Leserinnen und Leser mit auf seine äußerst faszinierende Suche nach der »Sprache der Wale«.

Erzählt ist das Buch aus der Ich-Perspektive. Doch Mustill lässt auch viele Expertinnen und Experten zu Wort kommen, die er im Rahmen seiner Recherche besucht hat. Wie Roger Payne, der in den 60er Jahren gemeinsam mit seinem Kollegen Scott McVay die Gesänge der Buckelwale entdeckte und bekannt machte, womit er wesentlich zu ihrem Schutz beitrug. Oder die Anatomin Joy Reidenberg, die dem Autor wortwörtlich das Innere eines Wals vor Augen führt. Über seine Begegnungen reflektiert Mustill in intelligenter Weise: Er zeigt, vor welchen Herausforderungen Menschen stehen, die andere Arten erforschen, hinterfragt manche Ansätze, überdenkt aber immer wieder auch seine eigenen Vorstellungen von Sprache sowie von Walen und ihren Fähigkeiten.

Wenig überraschend berichtet der Autor auch von den düsteren Facetten des Verhältnisses von Menschen

und Walen. So wurden ihm zufolge allein im 20. Jahrhundert rund drei Millionen der Säugetiere getötet – ein trauriger Rekord in der Bejagung von Tieren. Dabei habe es schon damals auch Erzählungen über Kooperationen zwischen Menschen und Walen gegeben, die auf erstaunliche Fähigkeiten der Wale schließen lassen: So sollen etwa der Orca »Old Tom« und sein Clan zwischen 1860 und 1930 Walfängern an der Südküste Australiens jahrzehntelang bei der Jagd auf Bartenwale geholfen haben. Im Gegenzug sollen die Jäger ihnen Zungen und Lippen der erlegten Tiere überlassen haben.

Heute ist die Forschung weiter und erlangt nach und nach tiefere Einblicke in das komplexe Sozialleben auch von Walen und Delfinen untereinander. Arten wie der Pottwal beispielsweise kommunizieren innerhalb ihres Clans mit komplexen Klicklauten, sogenannten Codas, die von Clan zu Clan unterschiedlich klingen. Mit modernen Technologien arbeiten Forscherinnen und Forscher mittlerweile daran, die Geräusche und Bewegungen der Pottwale aufzuzeichnen und die daraus entstehenden riesigen Datenmengen mit Hilfe von künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen zu entschlüsseln –

in der Hoffnung, eines Tages in den Dialog mit den Tieren treten zu können.

Mustills Buch endet mit dieser spannenden Aussicht, die zu weiteren Fragen anregt: Was ist Sprache? Wie ähnlich sind uns Wale und andere Tiere? Und was würde es für unser Verhältnis zu den Tieren bedeuten, wenn es uns tatsächlich gelänge, mit ihnen zu kommunizieren?

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

Die Fantasywelt Westeros wissenschaftlich betrachtet

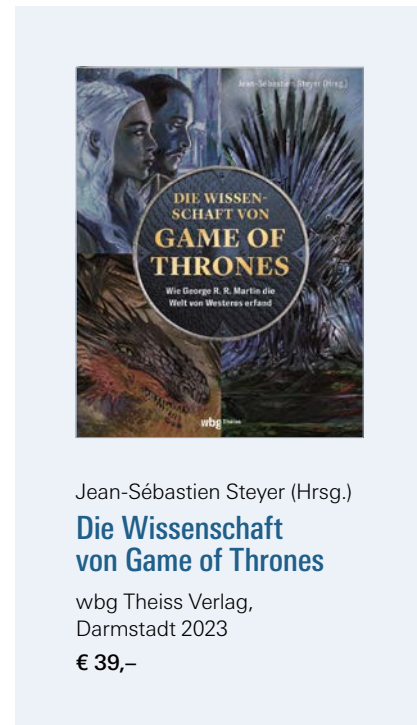
Fans von »Game of Thrones« können jetzt dank wissenschaftlicher Analysen noch tiefer ins Universum der Fantasyserie eintauchen.

Der französische Paläontologe Jean-Sebastien Steyer scheint ein großer Fan von Fantasygeschichten zu sein. Zumindest hat er nach einem Werk über die Wissenschaft von Tolkiens Mittel Erde nur ein Jahr später ein ebenso gewichtiges Werk über die Wissenschaft von Westeros aus der Fernsehserie »Game of Thrones« vorgelegt. Und erneut stand ihm dabei eine Gruppe von überwiegend französischen Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Fachdisziplinen zur Seite. Die Fantasyserie mit bislang acht erschienenen Staffeln ist ein Phänomen: In 86 Ländern ausgestrahlt, hat sie Zuschauer im zweistelligen Millionenbereich erreicht und gilt als die erfolgreichste Fernsehserie im Genre der heroischen Fantasy überhaupt. Nicht umsonst wurde sie seit 2015 bereits viermal mit dem Primetime Emmy Award als herausragende Dramaserie ausgezeichnet.

Die Serie basiert auf dem Fortsetzungsroman »Ein Lied von Eis und Feuer« des amerikanischen Autors

George R. R. Martin, von dem 85 Millionen Exemplare verkauft wurden. Mit diesem Superlativ, aber vor allem auch in Hinblick auf Thematik und Konzeption wandelt Martin auf den Spuren des britischen Fantasyautors J. R. R. Tolkien. Tatsächlich ist der Schöpfer der »Herr der Ringe«-Trilogie ein wichtiges Vorbild des rund 50 Jahre später geborenen Amerikaners, der deshalb auch als amerikanischer Tolkien gefeiert wird. Es gibt aber auch deutliche Unterschiede zwischen beiden Sagas: So findet sich der für »Herr der Ringe« typische Kampf »Gut gegen Böse« bei Martin nicht. Bezeichnend für seine Geschichte ist dagegen, dass sich alle Charaktere in einem immerwährenden Konkurrenzkampf befinden, der mit extremer Gewalt ausgetragen wird.

Eine Hauptinspirationsquelle für Martin war nach eigener Aussage die Zeit der englischen Rosenkriege im 15. Jahrhundert. So ist das Mittelalter



Jean-Sébastien Steyer (Hrsg.)

Die Wissenschaft von Game of Thrones

wbg Theiss Verlag,
Darmstadt 2023

€ 39,-

wichtigster kultureller Bezugspunkt mit Rittern, Festungen, Schwertkämpfen, Drachen und Hexerei. Die Gewalt spiegelt sich auch in Zahlen wider: Nicht mal 13 Prozent der Charaktere in der Fernsehserie sterben eines natürlichen Todes, die durchschnittliche Lebensdauer liegt bei unter 29 Stunden auf dem Bildschirm, und am Ende der 7. Staffel sind über die Hälfte aller Charaktere tot. Neben dieser düsteren

mittelalterlichen Welt, die sich auf dem Kontinent Westeros beschränkt, existieren zwei weitere Kontinente, die einem farbenfrohen Asien und einem mysteriösen Afrika entsprechen. Somit bleibt diese Welt trotz des Ideenreichtums ihres Schöpfers letztlich ein Spiegelbild unserer Welt.

Und darin liegt laut Steyer und Kollegen der Reiz des Werkes. Jeder kann sich darin wiederfinden – mit dem eigenen Streben nach Macht, dem Wunsch nach Sicherheit, aber auch der Angst vor einer unbekannteren Zukunft. Nicht zufällig steht ein bevorstehender Klimawandel im Zentrum der Geschichte: »Der Winter kommt« wird für die Westeros-Bewohner beängstigende Realität. Zwei Kapitel des Buches zur Wissenschaft von Westeros beschäftigen sich deshalb mit Geologie und Klima, beides auch mit dem Anspruch, Erkenntnisse für unsere Welt ableiten zu können. Ausführlich analysiert werden ebenfalls die Kreaturen der Sage sowie die künstlichen Sprachen, die für die Fernsehserie mit Hilfe des eigens dafür engagierten Sprachwissenschaftlers David J. Peterson weiterentwickelt wurden.

Martin selbst hat im Zuge des Vietnamkriegs den Kriegsdienst verweigert. In seiner Geschichte seziiert er die menschliche Natur und eine Gesellschaft, in der jeder gegen jeden kämpft. Dies ist Gegenstand des letzten Buchkapitels, das aus der Feder eines Psychologen stammt. Für ihn bietet »Game of Thrones« Beispiele für Impulskontrollstörung, antisoziale Persönlichkeitsstörung und pathologischen Jähzorn sowie hervorragendes Unterrichtsmaterial, um den Einfluss von traumatischen Erfahrungen und Umwelteinflüssen auf die Psyche der Charaktere zu verstehen. Ob man »Game of Thrones« liebt oder wegen der Gewalttätigkeit ablehnt, bleibt eine individuelle Entscheidung. Zumindest die Fans der Serie werden auch auf das Buch von Steyer und Kollegen nicht verzichten wollen.

Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

Mathematik in kleinen Häppchen

Anekdoten statt langer Beschreibungen – Edmund Weitz stellt 111 Persönlichkeiten der Mathematik in lebendigen Kurzporträts vor.

► Wenn man dem Vorwort seines neuen Buches glauben mag, dann hat Edmund Weitz – überspitzt formuliert – die Sammlung von 111 Geschichten über Mathematikerinnen und Mathematiker mehr oder weniger nur deshalb zusammengestellt, weil die Illustratorin und freie Künstlerin Heike Stephan ihm in den zurückliegenden Jahren eine solche Fülle von sehenswerten Zeichnungen von Mathematikern zur Verfügung gestellt hatte, dass es einfach zu schade gewesen wäre, wenn es für diese Bilder keine angemessene Möglichkeit der Veröffentlichung gegeben hätte.

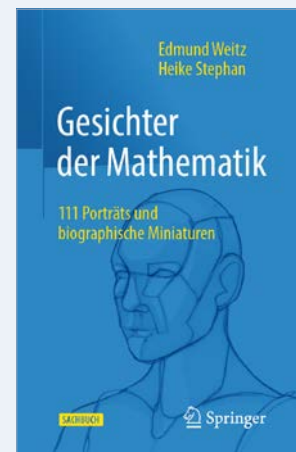
Und so verfasste der begnadete Geschichtenerzähler Edmund Weitz zu 111 gezeichneten Porträts kurze Texte, die die Leserinnen und Leser neugierig machen sollen, mehr über die beschriebenen Personen zu erfahren.

Weitz ist Professor für Mathematik und Informatik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Auf seinem YouTube-Kanal veröffentlicht er seit Jahren populäre Vorlesungen zu mathematischen Themen, die er stets durch Anekdoten anzureichern weiß. Anekdoten spielen auch in diesem Buch eine wichtige Rolle, verraten sie doch oft mehr über die Persönlichkeiten als lange Beschreibungen.

Weitz bezeichnet seine Sammlung als »biographische Miniaturen«. Tatsächlich sind die Texte nicht sehr umfangreich: Die Zeichnungen nehmen jeweils etwa eine dreiviertel Seite ein, dann folgt der Textbeitrag, der dann etwas mehr als eine Seite umfasst – so ergeben sich 111 Doppelseiten mit Zeichnung und Text. Zwischen den vier Abschnitten des Buchs findet man lesenswerte allgemeine Beschreibungen zur Entwicklung der Mathematik.

Es ist klar, dass in so wenigen Textzeilen weder umfangreiche Details zum Lebenslauf noch konkrete Ausführungen zu den wissenschaftlichen Beiträgen untergebracht werden können – dies will Weitz auch gar nicht leisten. Selbst die Information über Geburts- und Todesjahr der Mathematikerinnen und Mathematiker findet man nicht im Text, sondern jeweils am Ende des Textbeitrags auf der zweiten Seite in einer kaum lesbaren Schriftgröße.

Am Ende des Buches folgt als »Weiterführende Literatur« eine Liste von 334 Büchern als »Leseempfehlung«, allerdings keinerlei Hinweise auf Zeitschriftenartikel, aus denen man mehr über das Werk der beschriebenen Personen erfahren könnte. Und als einzige Internetquelle



Edmund Weitz
Gesichter der Mathematik

Springer Verlag, Berlin 2022
€ 24,99

ist das umfassende Angebot der St. Andrews University erwähnt. Das alphabetisch nach Autoren geordnete Verzeichnis der Leseempfehlungen ist durchnummeriert; am Ende der einzelnen Textbeiträge zu den Personen genügt daher jeweils die Angabe der betreffenden Nummern aus dem Literaturverzeichnis. Das außergewöhnlich umfangreiche Stichwortverzeichnis umfasst 25 Seiten; es enthält – wie Weitz selbst einräumt – viele scheinbar unwichtige Begriffe, die jedoch den Leser neugierig machen sollen, in welchem Zusammenhang etwa »Abrüstung«, »Adoption«, »Affäre« oder »Amphetamine« eine Rolle gespielt haben.

Wie auch im Sachbuch »Pi und die Primzahlen« ist der Erzählstil des Autors unterhaltsam und kurzweilig, oft flapsig, aber nie unseriös. Die 111 Miniaturen sind abwechslungsreich geschrieben – mal beginnt Weitz seine Kurzgeschichten mit einer Anekdote, mal mit einem begeisterten oder einem abwertenden Zitat eines Zeitgenossen, selten mit der Beschreibung des Lebenslaufs in chronologischer Reihenfolge.

Der Autor scheut sich nicht, hinsichtlich der Bedeutung der beschriebenen Person Klartext zu reden. Beispielsweise heißt es am Ende seines Beitrags über Ferdinand von Lindemann: »... hat als junger Mann Mathematikgeschichte geschrieben. Wäre er direkt danach gestorben, dann wäre daraus vielleicht der Stoff für eine Legende geworden. Er wurde allerdings 86 Jahre alt und ist deshalb heute nur noch eine Fußnote der Historie.«

Die einzelnen Geschichten der Sammlung können unabhängig voneinander gelesen werden. Wenn man irgendeine Seite aufschlägt und zu lesen beginnt, dann wird man vermutlich anschließend auch die nächste Geschichte lesen und die übernächste ... – es besteht keine Gefahr, dass es einem bei der Lektüre langweilig wird. Natürlich wird man nicht das ganze Buch auf einmal lesen wollen, so wie man vielleicht einen spannenden Roman nicht aus der Hand legen möchte, aber die Kürze der einzelnen Beiträge macht

neugierig auf den nächsten.

Weitz hat das Buch in vier große Abschnitte unterteilt (entsprechend zu vier historischen Abschnitten). Nur sieben der 111 Geschichten beziehen sich auf Persönlichkeiten aus dem Altertum und aus dem Mittelalter: Thales, Euklid, Archimedes, al-Chwarizmi, Fibonacci, Stifel und Cardano. Dann folgen 35 Miniaturen über Personen der »Neuzeit« – von Descartes bis Riemann. In einem dritten Abschnitt widmet sich Weitz 32 Mathematikerinnen und Mathematikern der »Moderne« – von Dedekind bis Siegel. Im letzten Kapitel über noch lebende oder vor nur wenigen Jahren verstorbene Wissenschaftler findet man 37 Beiträge – von Tarski bis Mirzakhani.

Die Reihenfolge der Porträts ergab sich allein aus dem Geburtsdatum der beschriebenen Personen; insofern erfolgte auch eine etwas willkürliche Aufteilung hinsichtlich der Epochen: Beispielsweise legte Weitz den Übergang zwischen Neuzeit und Moderne allein durch das Geburtsjahr 1830 fest.

Dass im Buch die Frauenporträts deutlich in der Unterzahl sind, spiegelt die historischen Fakten wider – das Badeanstalt-Zitat von Hilbert im Zusammenhang mit der Nichtbeachtung von Emmy Noethers Potenzial darf natürlich auch in diesem Buch nicht fehlen. So sind nur sieben Porträts über Mathematikerinnen im Buch enthalten: Sophie Germain, Sofja Kowalewskaja, Grace Chisholm

Young, Emmy Noether, Ruth Moufang, Julia Robinson und Maryam Mirzakhani.

Auch wenn es insgesamt 111 Persönlichkeiten sind, über die Weitz berichtet, so ist doch klar, dass man die eine oder andere Persönlichkeit in der Sammlung vermissen wird. Dass – bis auf al-Chwarizmi – keine anderen Mathematiker aus dem islamischen Kulturraum erwähnt werden, ebenso wenig wie chinesische oder indische Mathematiker aus Altertum und Mittelalter, mag vielleicht damit zusammenhängen, dass niemand weiß, wie diese ausgesehen haben, oder dass über diese keine Anekdoten bekannt sind; bedauerlich ist es dennoch. Andererseits bietet Weitz durch sein Buch einen gewissen Einblick in die vielfältigen Bereiche, die die aktuellen Forschungsbereiche der Mathematik ausmachen, indem er zahlreiche noch lebende Persönlichkeiten in seine Sammlung aufgenommen hat.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das lesenswerte Buch seinen Leserinnen und Lesern auf unterhaltsame Weise die Möglichkeit bietet, in kleinen Häppchen etwas über die Geschichte der Mathematik zu erfahren und über die Persönlichkeiten, die zur Entwicklung dieser Wissenschaft beigetragen haben.

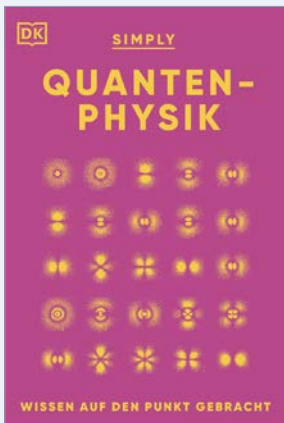
Der Mathematiker **Heinz Klaus Strick** (www.mathematik-ist-schoen.jimdo.com) ist Autor des »Mathematischen Monatskalenders«.

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte

So bunt sieht man die Quantenphysik selten – Simply Quantenphysik stellt verschiedene Phänomene farbenfroh und mit kurzen Texten dar.

Die Quantenphysik genießt üblicherweise den Ruf, eher schwere Kost zu bieten, kompliziert und dröge zu sein. Bereits der leuchtend pinke Einband lässt allerdings vermuten, dass Ben Still (Teilchenphysiker und

Wissenschaftskommunikator), Hilary Lamb (Journalistin und Autorin) und Giles Sparrow (populärwissenschaftlicher Autor) alles daransetzen, dieses Klischee zu widerlegen. Über 100 einzelne Erkenntnisse und Phänomene



Hilary Lamb, Giles Sparrow,
Ben Still

Simply Quantenphysik

DK Verlag, München 2023

€ 12,95

ne der Quantenphysik, vom Doppelspaltversuch über den Tunneleffekt bis hin zum Higgs-Boson und zur Quantenbiologie, werden auf je einer Doppelseite visuell aufbereitet. Dabei sind die Grafiken stets ästhetisch ansprechend und nutzen mitunter sehr anschauliche Analogien, um eher abstrakte quantenphysikalische Gegebenheiten greifbarer zu machen.

Die Texte zu den einzelnen Themen sind sehr kurz gehalten. Mit dieser Verknappung geht gleichzeitig eine Vereinfachung einher, es gibt keine langatmigen Ausführungen, kaum Formeln, keine komplizierten Rechnungen oder Beweise. Dadurch ist das Stöbern im Buch sehr kurzweilig, leider fehlen aber durch die allein stehenden, knappen Informationen völlig die Zusammenhänge zwischen einzelnen Phänomenen. Wer sich mit der Quantenphysik schon beschäftigt hat und sie gerne von einer neuen, visuell ansprechen-

den Seite betrachten möchte, wird Freude am Nachschlagewerk haben – auch wenn hier und da so stark vereinfacht wird, dass erfahrene Physikerinnen und Physiker vielleicht ein Auge zudrücken müssen.

Wer noch nie mit der Quantenwelt in Berührung gekommen ist, dürfte Schwierigkeiten haben, die äußerst knappen Erklärungen wirklich zu verstehen – ist dabei allerdings in bester Gesellschaft, denn selbst Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman sagte schon: »Ich denke, man kann mit Sicherheit sagen, dass niemand die Quantenmechanik versteht.« Vielleicht ist es also genug, sie einfach nur mit Genuss zu betrachten.

Katrin Hochberg hat Deutsch und Physik für das Lehramt an Gymnasien studiert und in den Fächern promoviert und ist nun Projektleiterin in Karlsruhe bei der Steinbeis 2i GmbH.

Alltagsphänomenen auf der Spur

Kein konventionelles Antwortbuch: Fragen zum Menschen, zu Pflanzen und Tieren, Physik, Technik und Astronomie anschaulich erklärt.

Die Neugier mancher Menschen auf die offenen Fragen und rätselhaften Phänomene der Natur, das erregende Spüren des Geheimnisvollen waren und sind der ständige Antrieb zu großen Erkenntnissen und Forschungsanstrengungen in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Anhand von insgesamt 117 Fragen erschließt uns der emeritierte Physiker und Wissenschaftshistoriker Peter Fischer Naturphänomene, die uns alle aus unserem Alltag bekannt sind. Zu dem, was der Mensch bedeutet, wie Heinrich Heine seinen Jüngling in einem Gedicht fragen lässt, formulierte auch der Philosoph Immanuel Kant lieber Fragen, als Antworten zu geben. Erst Albert Einstein entriss der Philosophie die Fragen nach den Anfängen von Raum und Zeit und machte sie zu Fragen

der Physik, die er als eine für den Menschen relative Raumzeit entzifferte.

Als der Autor bei einem Besuch in einem Kindergarten fragte, warum Dinge auf den Boden fallen, meinte ein Mädchen: »Wieso denn nicht? Es gibt nur noch Dinge, die nach unten fallen, die anderen, die nach oben fallen, sind schon längst weg.« Wie es dem Autor mit dieser Antwort erging, ob ihm buchstäblich die Spucke wegblieb, erfahren wir nicht. Dafür aber, dass schon Aristoteles irrte. Der vorchristliche Römer Lukrez dagegen fand schon, dass die Luft eine Rolle spielen müsse; zunächst meinte auch der junge Galilei noch vor 1600, dass ein schwereres Ding schneller fallen müsse. Als älterer Mann erkannte er aber, »dass alle Stoffe mit derselben Geschwindigkeit

fallen«. Es folgte Newton im 17. Jahrhundert mit der ersten kausalen Erklärung des freien Falls, und später – im zweiten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts, nach Hunderten von Bemühungen – konnte erst Einstein ein Schwerfeld auf die Geometrie der Raumzeit zurückführen.

Auch auf allein 36 Fragen zum Menschen geht Fischer ein, etwa »Wozu gibt es mehrere Geschlechter?«, »Warum kann man seine Ohren nicht schließen?«, »Was ist das Genomprojekt?« oder »Welchen Zweck erfüllt der Stimmbruch?« und vieles, vieles mehr. Zu Pflanzen und Tieren erläutert er anschaulich zehn Fragen, ob es nun um das Farbensehen von Tieren geht oder ob auch Pflanzen ein Gehirn und/oder Gefühle zu eigen sind. Weiter geht es in 26 Einsichten besonders um Farben und

Naturphänomene. Zu Himmel und Erde, Sonne, Mond und Sterne, Mathematik und selbstredend zu Physik und Technik bis hin zu alten und neuen unbeantworteten Fragen.

»Wunderbare« Einsichten gewährt uns der Autor auf 240 Seiten in den insgesamt 117 Fragen, die er nicht systematisch, sondern eher kaleidoskopisch in seinem Buch vor uns ausbreitet. Sie sind in sechs Kapiteln untergebracht und finden sich nicht im Inhaltsverzeichnis, sondern im Anhang anstatt eines Registers. Selbstverständlich geht der Autor auch auf offene Fragen im Text ein, schließt Anmerkungen und



Ernst Peter Fischer

Warum funkeln die Sterne?

C.H. Beck, München 2023

€ 14,95

zusätzliche Literaturhinweise an. Es handelt sich hierbei um nicht um ein konventionelles Antwortbuch – was dem Lektor sicherlich einige Mühe bereitete, wofür ihm der Autor selbst dankt.

So begegnet dem Leser auch Philosophisches und Poetisches, ausgehend von dem zu allen Zeiten immer wieder staunenden und neugierig fragenden Menschen, wie dem Kind bei Erich Kästner: »Was tut der Wind, wenn er nicht weht?«

Manfred Feyk ist Diplom-Geograf, Akademischer Geoinformatiker und Journalist (FJS).

Spektrum
der Wissenschaft

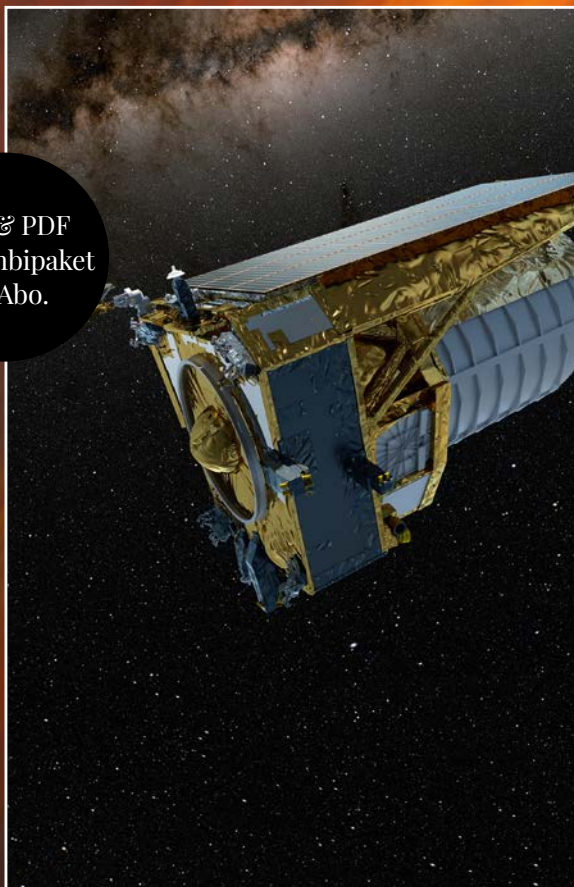
DIE WOCHE

Das wöchentliche digitale Wissenschaftsmagazin

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

**IM
NEUEN
LOOK!**

App & PDF
als Kombipaket
im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **26**
29.06.
2023

EUCLID-MISSION

Der Mann, der Licht ins dunkle Universum bringen will

Giuseppe Racca leitet die ESA-Mission Euclid. Mit dem Teleskop wird die größte 3-D-Karte des Kosmos erstellt, um herauszufinden, wie Dunkle Materie und Dunkle Energie die Struktur und den Verlauf des Universums beeinflussen.



NEUROATHLETIK

Mit Gehirntraining die Wahrnehmung und Koordination schärfen



GEWALTBEREITE MÄNNER

»Es gibt belastbare Zahlen, die nicht weniger erschreckend sind«

- » Auswandern: Auf der Suche nach einer neuen Heimat
- » Frustriertes Quantensystem erzeugt neue Form von Materie
- » Aßen unsere frühmenschlichen Vorfahren sich gegenseitig?
- » Geht es mit der Moral wirklich abwärts?

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

